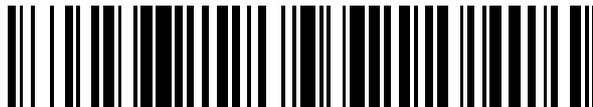


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 775 976**

51 Int. Cl.:

G01M 13/04 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.03.2009** **E 09154474 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020** **EP 2226621**

54 Título: **Mantenimiento predictivo de cojinetes de rodadura**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.07.2020

73 Titular/es:

TETRA LAVAL HOLDINGS & FINANCE S.A.
(100.0%)
Avenue Général-Guisan 70
1009 Pully, CH

72 Inventor/es:

COCCONCELLI, MARCO;
BASSI, LUCA;
BORGHI, DAVIDE;
RUBINI, RICCARDO y
SECCHI, CRISTIAN

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 775 976 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

Mantenimiento predictivo de cojinetes de rodadura

Campo técnico de la invención

5 La presente invención se refiere en general al mantenimiento predictivo de cojinetes de rodadura, y en particular a la vigilancia basada en la condición, orientada al mantenimiento de cojinetes de rodadura en servomotores que funcionan a una velocidad baja variable arbitrariamente y con inversiones de movimiento (cíclico), tales como los empleados en máquinas de llenado o equipos de distribución de líneas de envasado diseñados para fabricar envases sellados que contienen un producto alimentario.

Antecedentes de la técnica

10 Como es sabido, en el suelo de la fábrica de una planta de envasado de alimentos, se llevan a cabo generalmente varios procesos dirigidos a un fin específico, incluyendo el almacenamiento de material de envasado y alimentos de llegada, el procesamiento de alimentos, el envasado de alimentos, y el almacenamiento y depósito de envases. Con referencia específica a los productos alimentarios vertibles, el envasado de alimentos se lleva a cabo en las líneas de envasado, cada una de las cuales es un conjunto de máquinas y equipos para la fabricación y manipulación de
15 envases, e incluye una máquina de llenado para la fabricación de envases sellados, seguida por una o más configuraciones definidas de equipos de distribución posteriores tales como, acumuladores, aplicadores de pajitas, envoltorios de película, y envasadoras de cartón, conectados a la máquina de llenado mediante transportadores, para la manipulación de los envases.

20 Un ejemplo típico de este tipo de envases es el envase con forma de paralelepípedo para productos alimentarios líquidos o vertibles conocido como Tetra Brik Aseptic®, que se fabrica plegando y sellando una banda laminada de material de envasado.

25 El material de envasado presenta una estructura de hoja multicapa que comprende sustancialmente una o más capas de base de refuerzo y resistencia hechas típicamente de un material fibroso, p.ej. papel, o material de polipropileno relleno de mineral, cubierto en ambos lados por un número de capas de material plástico de sellado en caliente, p.ej. película de polietileno. En el caso de los envases asépticos para productos de almacenamiento de larga duración, como la leche UHT, el material de envasado también comprende una capa de material de barrera a gases y luz, p. ej. lámina de aluminio o película de alcohol etilvinílico (EVOH), que está superpuesta sobre una capa de material plástico de sellado en caliente que forma la cara interna del envase que finalmente entra en contacto con el producto alimentario.

30 Los envases de este tipo se fabrican en máquinas de llenado completamente automáticas, en las que se forma un tubo vertical continuo del material de envasado alimentado por banda; el cual se esteriliza aplicando un agente esterilizante químico tal como una solución de peróxido de hidrógeno, que, una vez finalizada la esterilización, se elimina, p.ej. se evapora por calentamiento, de las superficies del material de envasado; y la banda esterilizada se mantiene en un entorno estéril, cerrado, y se pliega y se sella longitudinalmente para formar el tubo vertical. El tubo
35 se llena después en sentido descendente con el producto alimentario esterilizado o procesado de manera estéril, y se alimenta a lo largo de un recorrido vertical a una estación conformadora, donde es enganchado a lo largo de secciones transversales espaciadas por igual por un sistema de mordazas que incluye dos o más pares de mordazas, que actúan cíclica y sucesivamente sobre el tubo, y sellan el material de envasado del tubo para formar una tira continua de paquetes almohada conectados uno a otro por tiras de sellado transversales. Los paquetes almohada son separados uno de otro mediante el corte de las tiras de sellado respectivas, y transportados a una estación final de plegado donde se pliegan mecánicamente hasta formar los envases finales, p.ej. sustancialmente con forma de paralelepípedo.

Alternativamente, el material de envasado puede cortarse en piezas brutas, a las que se da forma de envase en husos conformadores, y los envases se llenan con producto alimentario y se sellan. Un ejemplo de este tipo de envase es el llamado envase de «parte superior con forma de tejado» conocido como Tetra Rex®.

45 En estas líneas de envasado, varios componentes se hacen funcionar mediante servomotores (eléctricos), los cuales, aunque valiosos en varios aspectos, se ven afectados por mal funcionamiento, una de cuyas mayores causas es la avería de los cojinetes de rodadura que soportan el eje de los servomotores debido a fatiga o desgaste. Aunque la fatiga puede caracterizarse estadísticamente de una manera estándar que lleva a la llamada *clasificación L10* de los cojinetes, el desgaste es un fenómeno más sutil, conocido en la bibliografía como picaduras o endurecimiento, que genera daños localizados, el inicio de los cuales puede aparecer (pseud) aleatoriamente durante la vida útil esperada del componente, seguido de una fase de degradación relativamente rápida que lleva a la avería completa. Como resultado, la sustitución periódica de estos componentes es una estrategia que puede resultar exitosa únicamente para prevenir roturas debidas a fatiga, mientras que será casi inútil contra las roturas debidas a desgaste.

55 Otros tipos de actividades de mantenimiento preventivo periódico, tales como la limpieza y la lubricación, pueden ser eficaces para reducir el desgaste de los cojinetes, ya que normalmente el desgaste se caracteriza por la contaminación del lubricante de los cojinetes que a su vez empeora el estado de los cojinetes. Dicha contaminación puede venir del

exterior (p.ej. el cojinete está situado en un entorno hostil) pero también puede deberse a causas internas (p.ej. debido a pequeños copos de material que pierden los elementos giratorios durante el funcionamiento).

Finalmente, sin embargo, la única manera de prevenir averías debidas a desgaste es la vigilancia del estado de los cojinetes basada en la condición; dicha estrategia de mantenimiento es posible principalmente gracias al hecho de que una vez el cojinete está próximo a la rotura, se vuelve ruidoso y vibra como una señal de advertencia de la avería inminente: si esta señal es detectada a tiempo proporciona al operario un periodo de tiempo que típicamente varía de días a incluso semanas (dependiendo del cojinete y de la aplicación) para planificar una actividad de mantenimiento y sustituir el cojinete sin causar impacto en el ritmo de producción.

Puede apreciarse que el análisis de vibraciones es una parte importante de los programas industriales de mantenimiento predictivo de manera que el desgaste y los daños en los cojinetes de rodadura puedan descubrirse y repararse antes de que la máquina se averíe, reduciendo de este modo los costes de mantenimiento y funcionamiento.

La evaluación empírica del nivel de vibración de un cojinete es una actividad propensa a errores que puede llevar a subestimar o sobrestimar significativamente la vida útil restante del componente, y también a confundir con un daño en el cojinete un ruido que se deba a una causa completamente diferente (p.ej. un desequilibrio del eje). Por esta razón, la comunidad científica ha procurado proporcionar una caracterización científica de los defectos en los cojinetes, y hoy en día puede encontrarse abundante bibliografía sobre este tema.

La idea básica es asociar cada modo de defecto de un cojinete con una firma de frecuencia característica, que puede extraerse de una señal de vibración mediante un análisis apropiado. En particular, el análisis tradicional de vibraciones se basa en el hecho de que si existe un daño localizado en una de las superficies del cojinete, provocará una serie de impactos durante la rotación del cojinete; es más, dichos impactos son periódicos suponiendo que el servomotor rota a velocidad constante. De hecho, un análisis cinemático del cojinete muestra que, suponiendo que no haya deslizamiento, el componente es bastante similar a un engranaje epicicloidial; en otras palabras, hay una «relación de transmisión» fija entre el eje del servomotor y todas las otras partes móviles del cojinete, y esto lleva a la ecuación fundamental del análisis de vibraciones:

$$f_d = k_d \cdot f_r \quad (1)$$

la cual muestra que f_d , la frecuencia de daño (que es en realidad la frecuencia de dichos impactos) depende linealmente de la frecuencia de rotación f_r por medio de un coeficiente de daño k_d que no es otro que la relación de transmisión entre el eje del servomotor y la parte móvil donde está localizado el daño. Dichos coeficientes son bien conocidos en la bibliografía y vienen dados por:

$$k_d = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) & = k_g \quad \text{para defectos de jaula} \\ \frac{1}{2} N \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) & = k_e \quad \text{para defectos de anillo exterior} \\ \frac{1}{2} N \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) & = k_i \quad \text{para defectos de anillo interior} \\ \frac{1}{2} \frac{B_d}{P_d} N \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right)^2 \right] & = k_v \quad \text{para defectos de bolas} \end{cases} \quad (2)$$

donde B_d , P_d son diámetro de bola y de paso, N es el número de elementos giratorios, θ es un ángulo que indica una posible desalineación entre los anillos interior y exterior (o anillos) como resultado de operaciones de montaje (los valores típicos están entre 0 y 10 grados), y donde el subíndice d se refiere en general a frecuencias de daño, mientras que los subíndices g , e , i y v se refieren a tipos específicos de daño, concretamente en el anillo interior y el exterior, en las bolas espaciadas angularmente de modo uniforme entre los anillos interior y exterior, y en la jaula que retiene las bolas y que rota conjuntamente, *i.e.*, a la misma velocidad, con las bolas.

Las repercusiones de este fenómeno en el espectro de una señal de vibración pueden entenderse fácilmente utilizando las propiedades básicas de las transformadas de Fourier: si se considera un solo impacto, en el dominio del tiempo este puede representarse como una acción forzada $d(t)$ de naturaleza impulsiva y duración finita T , que tiende a una función ideal de impulso de Dirac $\delta(t)$ conforme $T \rightarrow 0$; de igual manera, el espectro $D(f)$ de dicha señal estará caracterizado por un ancho de banda que tenderá al infinito conforme $d(t)$ se aproxima al caso ideal de impulso (cuya transformada de Fourier es constante sobre todas las frecuencias).

Durante el funcionamiento del componente real la acción forzada $u(t)$ será una repetición periódica en la frecuencia de daño del impulso original $d(t)$:

$$u(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} d(t - jT_d) \quad (3)$$

En virtud de las propiedades de la transformada de Fourier, la repetición periódica en el tiempo equivale a hacer un muestreo en la frecuencia, lo que significa que el espectro $U(f)$ de la acción forzada que un daño localizado aplica al cojinete es un espectro discreto, obtenido mediante muestreo del espectro del impulso original $D(f)$:

$$U(f) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} D(f) \delta(f - jf_d) \quad (4)$$

En la práctica, esto significa que la firma de la frecuencia del daño en la señal de vibración es una secuencia de picos separados por la frecuencia de daño característica de la parte del cojinete dañada.

En general, sin embargo, el espectro de una señal de vibración adquirida en un cojinete no reproduce exactamente $U(f)$; puede más bien representarse como:

$$Y(f) = G(f)H(f)U(f) + N(f) \quad (5)$$

donde $G(f)$ es la función de transferencia del conjunto mecánico, $H(f)$ es la función de sensibilidad del sensor (normalmente un acelerómetro), y $N(f)$ es cualquier tipo de ruido superpuesto a la señal de defecto. El espectro de $Y(f)$ puede por lo tanto no ser la mejor señal para observar con el fin de identificar una firma de daño; el procedimiento usual para obtener una señal con una mejor relación señal-ruido se llama análisis de envolvente y se basa en las siguientes suposiciones: existe una banda de frecuencias $[f_1, f_2]$ de manera que:

- $|G(f)| \gg 1$, esto es se está cerca de una resonancia mecánica
- $|H(f)| \gg 1$, esto es se está en el rango operativo del sensor
- $|N(f)| \ll 1$, que en la práctica significa que se han de buscar armónicos más elevados de la señal $U(f)$.

La última afirmación está motivada por el hecho de que normalmente el ruido mecánico es más elevado en las frecuencias bajas. Existen algunas excepciones a esta regla, por ejemplo, el ruido debido al engranaje sujeto al motor, y en este caso es necesario recurrir a técnicas de filtrado conocidas más avanzadas. Si se cumplen las hipótesis anteriores, mediante filtrado de paso de banda en la banda de frecuencias $[f_1, f_2]$ y demodulación de $Y(f)$ es posible obtener una señal donde algunos picos son claramente visibles, espaciados por f_d .

En resumen, el análisis de vibraciones clásico se basa en las siguientes hipótesis:

- existe un daño localizado en un cojinete;
- el motor al que está sujeto el cojinete rota a velocidad constante;
- no hay deslizamiento durante el movimiento relativo de los elementos del cojinete;
- durante el funcionamiento del motor, el daño provoca una serie de impactos de corta duración, que generan un tren de puntas en el espectro de frecuencia de la señal de vibración con una cierta periodicidad;
- existe una banda de frecuencias donde la relación señal-ruido es tal que el tren de impulsos es detectable.

Si estas condiciones no se verifican, el tren de picos puede difuminarse de forma que ya no sea reconocible, o estar escondido entre otros tipos de ruido. Es más, el hecho de que el ángulo θ en (2) es casi imposible de medir en circunstancias prácticas añade algunas dificultades a la tarea, ya que cada f_d es realmente variable en el rango de θ admisibles. La mayor parte de la investigación en el campo se ha enfocado históricamente en técnicas de procesamiento de señales para obtener mejores relaciones señal-ruido o en combatir el difuminado de los picos debido a pequeñas fluctuaciones de velocidad o a la presencia de deslizamiento.

Pese a que la suposición básica de velocidad de rotación constante de los servomotores sigue siendo cierta para muchas aplicaciones, resulta ser una enorme limitación en el campo de las máquinas automáticas, donde normalmente un número de servomotores se emplean como levas eléctricas y funcionan a velocidad variable con el fin de obtener perfiles de velocidad variable de los elementos actuados. En particular, como los servomotores, normalmente motores sin escobillas AC, tienden a aparecer cada vez más a menudo en diseños de máquinas recientes gracias a que su desempeño es mucho más elevado que las soluciones mecánicas para el movimiento de máquinas en el tiempo requerido para reconfigurar el perfil de movimiento, en estas aplicaciones cualquier predicción de defectos de los cojinetes de rodadura basada en la firma de frecuencia determinada mediante el análisis de vibraciones clásico descrito anteriormente resulta insatisfactoria.

Con el fin de extender el análisis de vibraciones clásico anteriormente descrito basado en la suposición de velocidad de rotación constante para afrontar aplicaciones en las que la velocidad de rotación de los servomotores varía en el tiempo, se ha propuesto un análisis de vibraciones llamado Seguimiento de Órdenes (OT, por sus siglas en inglés),

que es un análisis de frecuencias que utiliza múltiples, comúnmente denominados órdenes, de velocidad de rotación, en vez de frecuencias absolutas (Hz) como la base de frecuencia, y es útil para vigilar la condición de la máquina porque puede identificar fácilmente vibraciones relacionadas con la velocidad tales como defectos de eje y desgaste de cojinetes. Para una exposición detallada de esta técnica, puede hacerse referencia a R. Potter, *A new order tracking method for rotating machinery*, *Sound and Vibration* 24, 1990, 30-34, y K. Fyfe, E. Munck, *Analysis of computed order tracking*, *Mechanical System and Signal Processing* 11(2), 1997, 187-205.

El Seguimiento de Órdenes se basa en un enfoque de muestreo espacial constante, según el cual la señal de vibración se muestrea en incrementos angulares constantes (*i.e.* $\Delta\theta$ uniforme), y por tanto en una frecuencia proporcional a la velocidad de rotación del cojinete. El seguimiento de órdenes tradicional efectúa esta tarea utilizando un sistema de obtención de datos en tiempo variable, en el que se lleva a cabo un muestreo en el tiempo en una frecuencia que varía de manera proporcional a la velocidad de rotación del cojinete. En cambio, el Seguimiento de Órdenes Calculados (COT, por sus siglas en inglés) efectúa esta tarea utilizando un sistema de adquisición de datos en tiempo constante, en el que la señal de vibración se muestrea primero en una frecuencia constante (*i.e.* muestreo en tiempo constante con Δt uniforme), y después los datos muestreados se remuestrean espacialmente de manera digital en incrementos angulares constantes (*i.e.* muestreo en espacio constante con $\Delta\theta$ uniforme) para proporcionar los datos de $\Delta\theta$ constante deseados. Por lo tanto, el Seguimiento de Órdenes mapea la referencia de tiempo real t a una referencia de tiempo modificado τ de manera que la señal de vibración se ve como si estuviera generada por trazos por un cojinete que rota a velocidad constante. Este mapeo da lugar a una señal de vibración modificada donde puede encontrarse la firma de frecuencia de una tipología dada de daño, y predecirse el defecto de un cojinete de rodadura de manera satisfactoria.

El documento US 5,511,422 A describe un método y un sistema para el análisis de señales de máquinas giratorias que contienen componentes giratorios que se deslizan, como cojinetes, para detectar defectos en dichos componentes. Las señales son procesadas por una serie de etapas para generar espectros promediados coherentemente y características derivadas que indican defectos en, o algunas otras características de, componentes de máquinas que se deslizan o giran de manera asíncrona.

Objeto y compendio de la invención

El solicitante ha experimentado que, pese a su valor incuestionable, el Seguimiento de Órdenes Calculados aún se basa en suposiciones adicionales sobre el funcionamiento del servomotor, tales como el funcionamiento a una velocidad de rotación elevada (>500 rpm), la necesidad de varias revoluciones de eje para la detección del defecto, la inexistencia de inversiones de movimiento, que impiden que su enseñanza sea aplicable de forma satisfactoria a servomotores que funcionan a una velocidad de rotación baja variable arbitrariamente, están sujetos a inversiones de movimiento cíclico, y efectúan aproximadamente una revolución de eje por ciclo, como los empleados en el campo del envasado de productos alimentarios para hacer funcionar los sistemas de mordazas.

El objetivo de la presente invención es por tanto proporcionar una técnica que permita que el Seguimiento de Órdenes Calculados se aplique también a servomotores que funcionan a una velocidad de rotación baja variable arbitrariamente, están sujetos a inversiones de movimiento cíclico, y efectúan aproximadamente una revolución de eje por ciclo, como los empleados en el campo del envasado de productos alimentarios, para predecir satisfactoriamente los defectos de cojinetes de rodadura de servomotores, permitiendo así que los actuales programas de mantenimiento de máquinas se mejoren de manera eficaz.

Este objetivo se logra por la presente invención por cuanto se refiere a un método según la reivindicación 1 de predicción de defectos en un cojinete de rodadura, a un sistema de procesamiento de señales digitales según la reivindicación 11 programado para implementar el método, y a un producto de software según la reivindicación 12 diseñado para implementar, cuando se ejecuta, el método, según las reivindicaciones anejas.

Breve descripción de los dibujos

Para una mejor comprensión de la presente invención, se describirán ahora realizaciones preferidas, meramente a título de ejemplo y que no han de interpretarse como limitativas, con referencia a los dibujos adjuntos (ninguno para escalar), donde:

- la figura 1 muestra un diagrama de bloques general de un sistema de adquisición de datos configurado para implementar un Seguimiento de Órdenes Calculados Modificado según la presente invención;
- la figura 2 muestra un diagrama de flujo general del Seguimiento de Órdenes Calculados Modificado según la presente invención;
- la figura 3 muestra esquemáticamente una sección transversal de un cojinete de 8 bolas;
- las figuras 4 y 5 muestran una operación de «cortar y pegar» según una primera realización de la presente invención, para ejecutarse en una señal de posición adquirida $x(t)$ y una señal de vibración filtrada $y_f(t)$ para testar un cojinete de rodadura por un defecto en el anillo exterior;

- las figuras 6a y 6b muestran posiciones relativas de un anillo interior y, respectivamente, de un conjunto de jaula de bolas con respecto a un anillo exterior de un cojinete de rodadura representadas en gráficos versus tiempo;
- 5 • las figuras 7 y 8 muestran una operación de «cortar y pegar» según una primera realización de la presente invención, para ejecutarse en una señal de posición adquirida $x(t)$ y una señal de vibración filtrada $y_f(t)$ para testar un cojinete de rodadura por un defecto en el anillo interior;
- las figuras 9a y 9b muestran posiciones relativas de un anillo interior con respecto a un anillo exterior y, respectivamente, de un conjunto de jaula de bolas con respecto a un anillo interior de un cojinete de rodadura representadas en gráficos versus tiempo;
- 10 • las figuras 10 y 11 muestran una operación de «cortar y pegar» según una segunda realización de la presente invención, que ha de efectuarse en una señal de posición adquirida $x(t)$ y una señal de vibración filtrada $y_f(t)$;
- las figuras 12a y 12b muestran una señal de posición procesada $\hat{x}(t)$ obtenida después de una operación de «cortar y pegar» y, respectivamente, una señal de posición muestreada en el espacio $\bar{x}(t)$ obtenida por muestreo en espacio constante de una señal de posición procesada $\hat{x}(t)$;
- 15 • las figuras 13, 14 y 15 muestran señales procesadas de posición y vibración muestreadas en el espacio obtenidas mediante la inversión de porciones de las señales de posición y vibración muestreadas en el espacio $\bar{x}(t)$ y $\bar{y}(t)$ correspondientes a las rampas descendientes de las señales de posición muestreadas en el espacio $\bar{x}(t)$ mostradas en las figuras 5, 7 y 11, respectivamente; y
- 20 • las figuras 16 y 17 muestran espectros de frecuencia de la señal de vibración invertida mostrada en la figura 13, donde se representan las frecuencias de daño relativas a un defecto del anillo exterior y un defecto del anillo interior.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas de la invención

La siguiente descripción se presenta para permitir a un experto en la técnica realizar y utilizar la invención.

25 La idea básica que subyace a la presente invención es la modificación apropiada del Seguimiento de Órdenes Calculados tradicional para tener en cuenta el perfil de movimiento específico, concretamente las inversiones de movimiento cíclico y aproximadamente una revolución de eje por ciclo, de los servomotores empleados en las líneas de envasado de productos alimentarios, para proporcionar lo que de aquí en adelante se llamará Seguimiento de Órdenes Calculados Modificado (MCOT, por sus siglas en inglés).

30 La figura 1 muestra un diagrama de bloques general de un sistema de adquisición de datos configurado para implementar el MCOT según la presente invención. En particular, en la figura 1, el número de referencia 1 designa un servomotor con un eje 2 soportado de manera rotatoria por un cojinete 3 de rodadura (figura 3) que comprende un anillo 3a interior, y un anillo 3b exterior, y cuerpos 3c de rodadura retenidos y distribuidos angularmente de modo uniforme entre los anillos 3a, 3b interior y exterior por una jaula 3d, y cuyos defectos han de predecirse mediante el MCOT, y que se pueden hacer funcionar bien cíclicamente en una misma dirección, concretamente sin ninguna
 35 inversión de rotación, o invirtiendo cíclicamente su dirección de rotación; el número de referencia 4 designa el accionamiento del servomotor, que provee al servomotor 1 de energía eléctrica mediante un cable 5 de alimentación, recibe del servomotor 1, mediante un cable 6 de retroalimentación, una señal de retroalimentación generada por un codificador de alta resolución (no mostrado) asociado al eje 2 del servomotor, y produce una señal de posición $x(t)$ que es generada a partir de la señal de retroalimentación del servomotor 1 y es indicativa de la posición angular del eje 2 del servomotor, y por tanto del anillo 3a interior con respecto al anillo 3b exterior del cojinete 3 de rodadura; el número de referencia 7 designa un acelerómetro, que está asociado al cojinete 3 de rodadura vigilado y produce una señal de vibración $y(t)$ que es indicativa de la intensidad de las vibraciones en el cojinete 3 de rodadura; y el número de referencia 8 designa un sistema de procesamiento de señales digitales configurado para implementar el MCOT según la presente invención. En particular, el sistema 8 de procesamiento de señales digitales incluye una placa 9 de
 40 adquisición A/D, que recibe la señal de vibración $y(t)$ del acelerómetro 7 mediante un cable 10 de conexión y la señal de posición $x(t)$ del accionamiento 4 del servomotor mediante un cable 11 de conexión, y que está configurada para muestrear simultáneamente en tiempo constante las señales de posición y vibración $x(t)$ e $y(t)$, por lo que en cada tiempo t de muestreo se generan

$$x, y \in \mathbb{R}^{ns}$$

50 un par de valores, de manera que $x = [x(t_1), \dots, x(t_{ns})]$ e $y = [y(t_1), \dots, y(t_{ns})]$ están sincronizados entre sí; y una unidad 12 de procesamiento de señales digitales (PSD), que está conectada a la placa 9 de adquisición A/D mediante un cable 13 de conexión para recibir las señales de posición y vibración muestreadas en el tiempo, todavía designadas por $x(t)$ e $y(t)$, y está programada para procesar estas señales según el MCOT de la presente invención, que de aquí en adelante se describirá con referencia al diagrama de flujo general mostrado en la figura 2.

Como se muestra en la figura 2, la primera etapa del MCOT (bloque 100) es identificar un componente de cojinete candidato a ser testado por defectos (p.ej., defecto de anillo interior, defecto de anillo exterior, etc.). En particular, el componente de cojinete candidato a ser testado por defectos es indicado por un operario mediante una Interfaz Gráfica de Usuario (IGU) implementada por el sistema 8 de procesamiento de señales digitales, y es necesario porque testar diferentes componentes de cojinete por defectos requiere ejecuciones separadas del MCOT, como apreciará después el lector cuando se describa la tercera etapa del MCOT.

La segunda etapa del MCOT (bloque 200) es identificar una banda adecuada de frecuencias $[f_1, f_2]$ donde se efectúa el análisis de envolvente sobre la señal de vibración muestreada en el tiempo $y(t)$: esto significa la identificación de una frecuencia de resonancia en el conjunto en el que está colocado el servomotor, y puede hacerse bien por simulación o por medición. Dicha información es específica de la aplicación y por lo tanto no es probable que se modifique por sustitución del servomotor o incluso por cambio a otra máquina del mismo modelo. Una vez identificada la banda adecuada de frecuencias, la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración muestreada en el tiempo $y(t)$ son adquiridas durante un periodo de tiempo de adquisición dado, por ejemplo de 50 s, y después la señal de vibración muestreada en el tiempo $y(t)$ es filtrada con un paso de banda en $[f_1, f_2]$ y demodulada, obteniendo así lo que en adelante se denominará señal de vibración filtrada $y_f(t)$.

El filtrado y demodulación de la señal de vibración muestreada en el tiempo $y(t)$ se lleva a cabo porque la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ tiene un ancho de banda equivalente a f_2-f_1 , que es generalmente muy inferior al de la señal de vibración muestreada en el tiempo $y(t)$, y esto puede mejorar de manera significativa la legibilidad de los resultados, especialmente en entornos altamente ruidosos.

La tercera etapa del MCOT (bloque 300) es procesar la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración muestreada en el tiempo filtrada $y_f(t)$ según dos realizaciones alternativas diferentes de la presente invención.

En la primera realización de la presente invención, se efectúa un procesamiento de señales particular que surge de un análisis en profundidad de lo que sucede en un cojinete defectuoso durante un ciclo de funcionamiento del mismo. Considérese por ejemplo una aplicación de servomotor en la que el servomotor invierte cíclicamente su movimiento cada 400° , concretamente en la que el servomotor tiene un ciclo de funcionamiento durante el cual el eje del servomotor efectúa un desplazamiento angular en una dirección con una amplitud mayor que una rotación completa (un ángulo completo, i.e. 360°), después de eso invierte su dirección de rotación. Considérese asimismo el caso en que el cojinete de rodadura es de un tipo de 8 bolas mostrado en la figura 3, en el que cada par de bolas adyacentes está espaciado separado por un espacio angular de 45° . En la figura 3, las velocidades de rotación absolutas de los anillos interior y exterior y de la jaula se designan por ω_i , ω_o y ω_c , respectivamente, y las velocidades de rotación relativas de los anillos interior y exterior con respecto al conjunto de jaula de bolas, se designan por ω_{i-c} y ω_{o-c} , respectivamente.

En la aplicación de servomotor considerada, donde el cojinete de rodadura es de un tipo de 8 bolas soporta el eje del servomotor, y por tanto la velocidad de rotación del anillo interior es igual a la velocidad de rotación del servomotor y el anillo exterior es estacionario ($\omega_o=0$), $\omega_{i-c}=\omega_i-\omega_c=\omega_i-J\omega_i=(1-J)\omega_i=0.616\omega_i$, donde $J=0.384$ es la relación de transmisión entre las velocidades de rotación del anillo interior y el conjunto de jaula de bolas en un cojinete de 8 bolas, y $\omega_{o-c}=\omega_c-\omega_o=\omega_c$.

Además, el desplazamiento angular relativo del conjunto de jaula de bolas con respecto al anillo interior es $R_{i-c}=\omega_{i-c}T=(1-J)\omega_iT=0.616\cdot400^\circ=246,4^\circ$, donde T es la duración de tiempo de un ciclo de funcionamiento del servomotor y por tanto $\omega_i\cdot T$ es el desplazamiento angular del anillo interior durante el ciclo de funcionamiento del servomotor, y el desplazamiento angular relativo del conjunto de jaula de bolas con respecto al anillo exterior es $R_{o-c}=\omega_{o-c}T=\omega_cT=J\omega_iT=0,384\cdot400^\circ=153,6^\circ$.

En vista de lo anterior, puede apreciarse que, si un defecto está presente bien en el anillo interior o en el exterior, ocurrirá un cierto número de impactos entre las bolas y el anillo defectuoso, y este número depende claramente de dónde está el defecto (anillo interior o exterior) y del espacio angular entre las bolas. En particular, si el defecto está en el anillo interior, el número de impactos es igual a $\text{int}(R_{i-c}/45)=\text{int}(246,4/45)=\text{int}(5,475)=5$, mientras que si el defecto está en el anillo exterior, el número de impactos es igual a $\text{int}(R_{o-c}/45)=\text{int}(153,6/45)=\text{int}(3,413)=3$.

En vista de eso, puede apreciarse que el hecho de que en general $R_{i-c}/45$ y $R_{o-c}/45$ no sean números enteros da lugar a que los ciclos de funcionamiento del servomotor generalmente no terminen con un impacto, concretamente a que el servomotor efectúe, después del último impacto (tercero o quinto en el ejemplo anteriormente considerado), un desplazamiento angular adicional antes de invertir la dirección de rotación.

El solicitante ha experimentado que este fenómeno afecta de manera adversa a la señal de vibración adquirida $y(t)$ hasta tal punto que el análisis de vibraciones anteriormente descrito, y en particular el Seguimiento de Órdenes Calculados, resulta insatisfactorio.

Por lo tanto, el procesamiento de señales según la primera realización de la presente invención se dirige a producir que la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ parezcan como si hubieran sido generadas por un anillo interior que rota continuamente en una misma dirección, concretamente sin ninguna

inversión de la dirección de rotación, con respecto al anillo exterior, y durante lo cual el conjunto de jaula de bolas ejecuta desplazamientos angulares con respecto a los anillos interior y exterior, respectivamente, cada uno igual a un múltiplo entero del desplazamiento angular entre dos impactos consecutivos en el cojinete de rodadura.

5 Este objetivo se logra mediante el procesamiento de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ de manera que, en cada ciclo de funcionamiento del servomotor, corresponden a desplazamientos angulares del conjunto de jaula de bolas con respecto al anillo interior y, respectivamente, al anillo exterior, cada uno de los cuales es igual a un múltiplo entero del espacio angular entre dos elementos de rodadura adyacentes del cojinete.

10 El procesamiento de señales anteriormente mencionado se efectúa mediante el «cortado y pegado» de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ para eliminar (cortar) aquellas porciones de las mismas que permitan lograr el resultado anteriormente mencionado.

15 Esta operación se muestra en las figuras 4 a 6, y en las figuras 7 a 9, donde las tres primeras se refieren a una búsqueda de un defecto en el anillo exterior, mientras que las tres últimas se refieren a una búsqueda de un defecto en el anillo interior. En particular, las figuras 4 y 7 muestran las señales de posición muestreadas en el tiempo $x(t)$, las señales de vibración filtradas $y_f(t)$ y aquellas partes de las mismas, delimitadas por rectángulos de color gris, que han de cortarse, mientras que las figuras 5 y 8 muestran las señales de posición y vibración procesadas $\hat{x}(t)$ y $\hat{y}_f(t)$, que se obtienen pegando una detrás de otra (fusionando entre sí) las porciones restantes de las correspondientes señales de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de vibración filtrada $y_f(t)$.

20 En particular, la figura 4 se refiere a una búsqueda de un defecto en el anillo exterior, cuyo desplazamiento angular relativo con respecto al conjunto de jaula de bolas es de $153,6^\circ$, durante el cual ocurren tres impactos entre los defectos y las bolas. Por lo tanto, para que el conjunto de jaula de bolas efectúe un desplazamiento angular igual a un múltiplo entero del desplazamiento angular entre dos impactos consecutivos en el anillo exterior, dicho desplazamiento angular debería ser $3 \cdot 45^\circ = 135^\circ$ (múltiplo entero del espacio angular entre dos bolas adyacentes del cojinete), el cual a su vez corresponde a un desplazamiento angular del anillo interior de $135^\circ / 0,384 = 351,6^\circ$. Por lo tanto, para que la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ corresponda a un desplazamiento angular del anillo interior de $351,6^\circ$, han de cortarse porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a un desplazamiento angular de $400^\circ - 351,6^\circ = 48,4^\circ$ del anillo interior.

25 Con el fin de que las porciones retenidas de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ estén centradas en los respectivos ciclos de funcionamiento del servomotor, para evitar aquellas porciones donde el eje del servomotor invierte su dirección de rotación y por tanto está en un estado de rotación transitorio, las porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ que han de cortarse de las mismas son aquellas correspondientes a ambas porciones inicial y final de los ciclos de funcionamiento del servomotor, en partes iguales, en el ejemplo mostrado en la figura 4 aquellas porciones en los rangos de 0° a $24,2^\circ$ y $375,8^\circ$ a 400° , reteniendo así las porciones en los rangos de $24,2^\circ$ a $375,8^\circ$.

30 El experto puede apreciar que se pueden cortar otras porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ diferentes de las mostradas en la figura 4, lo que permite lograr el mismo resultado. Por ejemplo, se pueden cortar aquellas porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a cualquiera de las porciones inicial o final de los ciclos de funcionamiento originales, concretamente en los rangos de 0° a $48,4^\circ$ o $351,6^\circ$ a 400° , respectivamente.

35 Se puede hacer el mismo cálculo en el dominio del desplazamiento angular del conjunto de jaula de bolas en vez de en el dominio del eje del servomotor. En particular, para que la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ corresponda a un desplazamiento angular de la jaula de cojinete de 135° y las porciones retenidas de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ estén centradas en los ciclos de funcionamiento, han de cortarse aquellas porciones en los rangos de 0° a $9,3^\circ$ y de $144,3^\circ$ a $153,6^\circ$ (las cuales, en el dominio del eje del servomotor, corresponden a los rangos previamente indicados de 0° a $24,2^\circ$ y $375,8^\circ$ a 400°), y han de retenerse aquellas porciones en los rangos de $9,3^\circ$ a $144,3^\circ$ (las cuales, en el dominio del eje del servomotor, corresponden a los rangos previamente indicados de $24,2^\circ$ a $375,8^\circ$).

40 Los rangos anteriormente mencionados se representan en las figuras 6a y 6b, donde las posiciones de tanto el anillo interior (figura 6a) como el conjunto de jaula de bolas (figura 6b) con respecto al anillo exterior se muestran en gráficos versus tiempo.

45 La figura 7 se refiere en cambio a una búsqueda de un defecto en el anillo interior, cuyo desplazamiento angular relativo con respecto al conjunto de jaula de bolas es de $246,4^\circ$, y en el que ocurren cinco impactos entre los defectos y las bolas. Por lo tanto, para que el conjunto de jaula de bolas efectúe un desplazamiento angular igual a un múltiplo entero del desplazamiento angular entre dos impactos consecutivos en el anillo interior, dicho desplazamiento angular debería ser $5 \cdot 45^\circ = 225^\circ$ (múltiplo entero del espacio angular entre dos bolas adyacentes del cojinete), que a su vez corresponde a un desplazamiento angular del anillo interior de $225^\circ / 0,0616 = 365,2^\circ$. Por lo tanto, para que la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ corresponda a un desplazamiento angular del anillo interior de $365,2^\circ$, han de

cortarse porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a un desplazamiento angular de $400^\circ - 365,2^\circ = 34,8^\circ$ del anillo interior.

5 Con el fin de que las porciones retenidas de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ estén centradas en los respectivos ciclos de funcionamiento del servomotor, para evitar aquellas porciones donde el eje del servomotor invierte su dirección de rotación y por tanto está en un estado de rotación transitorio, las porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ que han de cortarse de las mismas son aquellas correspondientes a ambas porciones inicial y final de los ciclos de funcionamiento del servomotor, en partes iguales, en el ejemplo mostrado en la figura 7 aquellas porciones en los rangos de 0° a $17,4^\circ$ y $382,6^\circ$ a 400° , reteniendo así las porciones en los rangos de $17,4^\circ$ a $382,6^\circ$.

10 El experto puede apreciar que se pueden cortar otras porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ diferentes de las mostradas en la figura 7, lo que permite lograr el mismo resultado. Por ejemplo, se pueden cortar aquellas porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a cualquiera de las porciones inicial o final de los ciclos de funcionamiento originales, concretamente en los rangos de 0° a $34,8^\circ$ o $365,2^\circ$ a 400° , respectivamente.

15 Se puede hacer el mismo cálculo en el dominio del desplazamiento angular del conjunto de jaula de bolas en vez de en el dominio del eje del servomotor. En particular, para que la señal de posición muestreada en tiempo $x(t)$ corresponda a un desplazamiento angular de la jaula de cojinete de 225° y las porciones retenidas de la señal de posición muestreada en tiempo $x(t)$ estén centradas en los ciclos de funcionamiento, han de cortarse aquellas porciones en los rangos de 0° a $10,7^\circ$ y de $235,7^\circ$ a $246,4^\circ$ (las cuales, en el dominio del eje del servomotor, corresponden a los rangos previamente indicados de 0° a $17,4^\circ$ y $382,6^\circ$ a 400°), y han de retenerse aquellas porciones en los rangos de $10,7^\circ$ a $235,7^\circ$ (las cuales, en el dominio del eje del servomotor, corresponden a los rangos previamente indicados de $17,4^\circ$ a $382,6^\circ$).

20 Los rangos anteriormente mencionados se representan en las figuras 9a y 9b, donde las posiciones de tanto el anillo interior con respecto al anillo exterior (figura 9a) como del conjunto de jaula de bolas con respecto al anillo interior (figura 9b) se muestran en gráficos versus tiempo.

En vista de lo anterior, puede apreciarse que el espacio angular entre dos elementos de rodadura adyacentes del cojinete depende del tipo y geometría del cojinete de rodadura, y por tanto que el procesamiento de señales anteriormente mencionado depende, además de qué componente del cojinete ha de testarse por defectos (anillo interior o exterior), también de los parámetros geométricos del cojinete.

30 En una segunda realización de la presente invención, la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ están procesadas de manera que corresponden a un número entero de rotaciones completas (360°) del anillo interior con respecto al anillo exterior, concretamente de manera que parecen como si se hubieran generado por un anillo interior que rota continuamente en la misma dirección, concretamente sin ninguna inversión de la dirección de rotación, con respecto al anillo exterior, y durante lo cual efectúa un número entero de rotaciones completas con respecto al anillo exterior. Claramente, cuanto mayor sea el número de rotaciones completas, más rica es la información basada en la cual se efectuará el análisis de vibraciones.

También en esta segunda realización, esta tarea se efectúa llevando a cabo una operación de «cortar y pegar» en la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ similar a la descrita previamente con referencia a la primera realización de la presente invención.

40 Esta operación se muestra en las figuras 10 y 11, que son similares a las figuras 4 y 5, y donde las porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ que han de cortarse de las mismas son aquellas correspondientes a las porciones finales del ciclo de funcionamiento original, concretamente la porción que excede de 360° , *i.e.*, en los rangos de 360° a 400° .

45 El experto puede apreciar que se pueden cortar otras porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ diferentes de las mostradas en la figura 10, lo que permite lograr el mismo resultado.

50 Por ejemplo, se pueden cortar aquellas porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a las porciones iniciales de los ciclos de funcionamiento originales, concretamente las porciones en los rangos de 0° a 40° , o aquellas porciones de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ correspondientes a ambas porciones inicial y final de los ciclos de funcionamiento originales, convenientemente en partes iguales, por ejemplo las porciones en los rangos de 0° a 20° y de 380° a 400° , dando lugar así a que las porciones retenidas de la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y de la señal de vibración filtrada $y_f(t)$ estén centradas en los ciclos de funcionamiento respectivos.

55 Merece la pena mencionar que la operación de «cortar y pegar» puede resultar superflua si la rotación del cojinete a examen es monótona y similar a una rampa, en tanto que hay un cierto número de rotaciones completas en la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada $y_f(t)$, pero resulta crucial en caso de un

movimiento cíclico. Esta operación se realiza con la ayuda de coeficientes de transmisión en (2) y en la práctica produce, como resultado, dos vectores

$$\hat{y}, \hat{x} \in \mathbb{R}^n.$$

5 En vista de lo anterior, puede apreciarse que para que la señal de posición muestreada en el tiempo $x(t)$ y la señal de vibración filtrada muestreada en el tiempo $y(t)$ sean procesadas como se describe anteriormente, ya no es necesario conocer con antelación cuál es el componente de cojinete candidato a ser testado por defectos, y por tanto en esta segunda realización puede omitirse esta etapa.

10 También merece la pena mencionar que las dos realizaciones de la presente invención se han descrito con referencia a una aplicación de servomotor en la que el cojinete de rodadura soporta el eje del servomotor y por tanto el anillo exterior está fijado a una parte estacionaria del servomotor, mientras que el anillo interior está acoplado de manera rotatoria al eje del servomotor y por tanto rota con respecto al anillo exterior a la misma velocidad que el servomotor. Por lo tanto, en la aplicación considerada la rotación relativa del anillo interior con respecto al anillo exterior corresponde a la rotación del eje del servomotor. Sin embargo, puede apreciarse que lo que se ha descrito previamente con respecto a la aplicación considerada puede aplicarse generalmente a cualquier otra aplicación en la que los anillos interior y exterior rotan relativamente uno con respecto al otro, concretamente en la que el anillo interior está fijado a un miembro estacionario y el anillo exterior está acoplado de manera rotatoria con un miembro giratorio, y en la que ambos anillos el interior y el exterior están acoplados de manera rotatoria a miembros giratorios que rotan en la misma o en diferentes direcciones.

20 El experto apreciará asimismo que la enseñanza de la presente invención se aplica también a cojinetes de rodadura que son estructuralmente diferentes de, pero operativamente equivalentes al descrito previamente, en particular a cojinetes de rodadura en los que los cuerpos de rodadura están retenidos y espaciados angularmente de modo uniforme por medios de retención distintos de la jaula descrita anteriormente, o cojinetes de rodadura sin un anillo interior o un anillo exterior, concretamente en los que los cuerpos de rodadura directamente descansan en, y están retenidos de manera radial por un miembro giratorio interior o, respectivamente, uno exterior, que, por tanto, desempeña el papel del anillo correspondiente que falta.

25 Con referencia de nuevo al diagrama de flujo mostrado en la figura 2, la cuarta etapa del MCOT (bloque 400) es muestrear en el espacio, en particular muestrear en espacio constante, las señales de posición y vibración procesadas $\hat{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$, de manera que son transformadas respectivamente en señales de posición y vibración muestreadas en el espacio $\tilde{x}(t)$ y $\tilde{y}(t)$ en virtud de una ley de remuestreo no lineal, definida como un mapeo

30 $F: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m,$

cuyos argumentos son:

$$[\tilde{y}(\tau_1), \dots, \tilde{y}(\tau_m)] = F[\hat{y}(t_1), \dots, \hat{y}(t_n), \hat{x}(t_1), \dots, \hat{x}(t_n), \Delta x] \quad (6)$$

donde Δx representa el periodo de muestreo espacial, que está relacionado con el tamaño físico mínimo del defecto que puede detectarse por el algoritmo, y se encuentra en el orden de magnitud de décimas o centésimas de grados.

35 Expresado en pseudocódigo, el mapeo F es:

```

 $\hat{y}(\tau_1) := \hat{y}(t_1);$ 
 $\tau_1 := 0;$ 
 $i := 2;$ 
 $j := 2;$ 
 $x_{last} := x(t_1);$ 
while  $i \leq n$ 
  while  $|\hat{x}(t_i) - x_{last}| < \Delta x$ 
     $i := i + 1;$ 
  end
   $x_{curr} := x_{last} + \text{sgn}(\hat{x}(t_i) - x_{last})\Delta x;$ 
   $\tau_j := \tau_{j-1} + \Delta x;$ 
   $\hat{y}(\tau_j) := (\hat{y}(t_i) - \hat{y}(t_{i-1})) \left[ \frac{x_{curr} - \hat{x}(t_i)}{\hat{x}(t_i) - \hat{x}(t_{i-1})} + 1 \right] + \hat{y}(t_{i-1});$ 
   $j := j + 1;$ 
   $x_{last} := x_{curr};$ 
end

```

que significa, en términos sencillos, que los puntos en \hat{y} están separados por un intervalo de tiempo variable, pero una rotación fija. Si no es posible encontrar un punto en \hat{y} que corresponda al espacio de rotación deseado, el algoritmo interpola linealmente entre los dos valores más próximos.

- 5 Merece la pena mencionar que, como se muestra en las figuras 12a y 12b, como la señal de posición procesada $\hat{x}(t)$ aumenta monótonamente con el tiempo t (figura 12a), entonces la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$, cuando se representa en un gráfico vs. el tiempo modificado τ , es una línea recta inclinada que, cuando el movimiento se invierte cíclicamente, se convierte en una onda triangular con rampas ascendientes y descendientes, cuya pendiente es constante en módulo pero diferente en signo (figura 12b).
- 10 Gracias al mapeo F , es posible así generar una señal de vibración muestreada en el espacio $\hat{y}(t)$ donde se puede encontrar la firma de frecuencia de una tipología dada de defecto (siempre que se conserven las otras suposiciones previamente mencionadas). En particular, con el fin de identificar la firma de frecuencia en la señal de vibración muestreada en el espacio $\hat{y}(t)$, es necesario calcular la frecuencia de daño f_d a partir de (1), dicho cálculo requiere el
- 15 cálculo preliminar de la frecuencia de rotación f_r del eje del servomotor (o, alternativamente, del anillo interior con respecto al anillo exterior). Como la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$ es indicativa de la posición del eje «como se ve» por el muestreo en espacio constante, el valor absoluto de la pendiente (constante) de la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$ es la frecuencia de rotación f_r buscada, que también corresponde a la media del valor absoluto de la velocidad de rotación en el periodo de adquisición. Sin embargo, como se ha dicho anteriormente con referencia a la figura 12, cuando la rotación del eje del servomotor, concretamente la rotación del
- 20 anillo interior con respecto al anillo exterior, se invierte cíclicamente, la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$ presenta un desarrollo de tiempo triangular cuya pendiente es constante en módulo pero diferente en signo. Por lo tanto, para calcular la frecuencia de rotación f_r , es necesario provocar que la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$, y la señal de vibración muestreada en el espacio $\hat{y}(t)$ por consiguiente, parezcan como si estuvieran producidas por una rotación continua del anillo interior con respecto al anillo exterior en una misma dirección, *i.e.*, sin ninguna inversión de la dirección de rotación, y a una velocidad constante a lo largo del periodo de adquisición, asegurando así un signo constante de la frecuencia de rotación f_r durante todo el periodo de adquisición.

Por lo tanto, la quinta etapa del MCOT (bloque 500) es invertir, *i.e.*, volcar (dar la vuelta), aquellas porciones de las señales de posición y de vibración muestreadas en el espacio $\tilde{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$ que corresponden a cualquiera de los dos grupos de rampas ascendientes y descendientes en la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$. De este modo,

30 el perfil de la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$ cambia de uno triangular a uno de dientes de sierra, cuya pendiente es constante tanto en módulo como en signo durante todo el periodo de adquisición, asegurando así una frecuencia de rotación f_r con un signo constante durante todo el periodo de adquisición. Esta operación de inversión («volteo») da lugar a las señales de posición y vibración invertidas mostradas en las figuras 13 y 14, donde la primera se refiere a la primera realización de la presente invención y por tanto representa las señales de posición y vibración muestreadas en el espacio $\tilde{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$ obtenidas mediante muestreo en el espacio de las señales de posición

35 y vibración procesadas $\hat{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$ mostradas en la figura 5, mientras que la última se refiere a la segunda realización de la presente invención y por tanto representa las señales de posición y vibración muestreadas en el espacio $\tilde{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$ obtenidas mediante muestreo en el espacio de las señales de posición y vibración procesadas $\hat{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$ mostradas en la figura 8, y en la que las porciones de las señales de posición y vibración muestreadas en el espacio $\tilde{x}(t)$ y $\hat{y}(t)$

que han sido volteadas son aquellas correspondientes a las rampas descendientes de la señal de posición muestreada en el espacio $\tilde{x}(t)$.

5 Merece la pena enfatizar que la operación de «volteo» es necesaria únicamente cuando al eje del servomotor, y por tanto al cojinete de rodadura asociado, se le hace funcionar para invertir cíclicamente su dirección de rotación, mientras que no es en absoluto necesaria cuando al eje del servomotor, y por tanto al cojinete de rodadura asociado, se le hace funcionar cíclicamente sin invertir su dirección de rotación.

Asimismo, merece la pena mencionar que para movimientos cíclicos el hecho de que (1) se conserve depende también de la operación de corte antes del remuestreo, ya que esto garantiza que por cada ciclo están presentes un número entero de impactos en el componente potencialmente dañado.

10 Finalmente, la sexta y última etapa del MCOT (bloque 600) es calcular la frecuencia de rotación f_r y después la frecuencia de daño f_d a partir de la señal de posición invertida, calculando el espectro de frecuencia de la señal de vibración invertida mediante la transformación rápida de Fourier de la última, y después mediante la búsqueda de picos en el espectro de frecuencia de la señal de vibración invertida que están separados en frecuencia por una cantidad igual a la frecuencia de daño f_d , como en el análisis de vibraciones clásico.

15 Las figuras 15 y 16 muestran dos espectros de frecuencia de una señal de vibración invertida obtenidos implementando dos veces el MCOT según la primera realización de la presente invención para testar un cojinete de rodadura por un fallo en el anillo interior y, respectivamente, en el anillo exterior. En particular, la firma de frecuencia (frecuencia de daño f_d y el correspondiente primer armónico más elevado de la misma) relativa a un defecto del anillo interior se representa por medio de cuadrados en la figura 16 mientras que la firma de frecuencia relativa a un defecto del anillo exterior se representa por medio de círculos en la figura 17. Como puede apreciarse, en la figura 16 la frecuencia de daño relativa a un defecto del anillo interior está en un valor donde el envolvente de un espectro de frecuencia presenta un máximo relativo, siendo así indicativo de un defecto en el anillo interior, mientras que en la figura 17 la frecuencia de daño relativa a un defecto del anillo exterior está presente en un valor donde el envolvente del espectro de frecuencia presenta un mínimo relativo, siendo así indicativo de la inexistencia de defecto en el anillo exterior.

20

REIVINDICACIONES

1. Método de predicción de un defecto en un cojinete (3) de rodadura, incluyendo el cojinete (3) de rodadura anillos (3a, 3b) interior y exterior y cuerpos (3c) de rodadura distribuidos angularmente de modo uniforme entre los mismos, comprendiendo el método:

- 5 • procesar una señal $(x(t))$ de posición indicativa de una posición angular relativa del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior, y una señal $(y(t))$ de vibración indicativa de vibraciones relacionadas con la velocidad en el cojinete (3) de rodadura, de manera que correspondan a un desplazamiento angular de los cuerpos (3c) de rodadura igual a un número entero de espacios angulares entre cuerpos (3c) de rodadura adyacentes o a un número entero de rotaciones completas del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior;
- 10 • muestrear en el espacio la señal $(\hat{y}(t))$ de vibración procesada a partir de la señal $(\hat{x}(t))$ de posición procesada; y
- predecir un defecto en el cojinete (3) de rodadura a partir de la señal $(\check{y}(t))$ de vibración muestreada en el espacio;

15 caracterizado por que procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración incluye:

- eliminar de las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración aquellas porciones de las mismas que provocan que las mismas no correspondan a un desplazamiento angular de los cuerpos (3c) de rodadura igual a un número entero de espacios angulares entre cuerpos (3c) de rodadura adyacentes del cojinete (3) de rodadura o a un número entero de rotaciones completas del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior; y
- 20 • fusionar entre sí las porciones restantes de la señal $(x(t))$ de posición una detrás de otra y fusionando entre sí las porciones restantes de la señal $(y(t))$ de vibración una detrás de otra.

2. El método de la reivindicación 1, en el que, cuando se hace funcionar el cojinete (3) de rodadura cíclicamente sin invertir la dirección de rotación relativa del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior, procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración incluye:

- 25 • procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración de manera que correspondan, en cada ciclo de funcionamiento, a un desplazamiento angular de los cuerpos (3c) de rodadura igual a un número entero de espacios angulares entre cuerpos (3c) de rodadura adyacentes o a un número entero de rotaciones completas del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior.

30 3. El método de la reivindicación 1, en el que, cuando se hace funcionar el cojinete (3) de rodadura para invertir cíclicamente la dirección de rotación relativa del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior, procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración incluye:

- 35 • procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración de manera que correspondan, en cada ciclo de funcionamiento, a un desplazamiento angular de los cuerpos (3c) de rodadura igual a un número entero de espacios angulares entre cuerpos (3c) de rodadura adyacentes o a un número entero de rotaciones completas del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior; y
- procesar la señal $(\check{y}(t))$ de vibración muestreada en el espacio de manera que corresponda a una rotación continua del anillo (3a) interior con respecto al anillo (3b) exterior en una misma dirección y a velocidad constante.

4. El método de la reivindicación 3, en el que procesar la señal $(\check{y}(t))$ de vibración muestreada en el espacio incluye:

- 40 • muestrear en el espacio la señal $(\hat{x}(t))$ de posición procesada, generando mediante ello una señal $(\tilde{x}(t))$ de posición muestreada en el espacio que presenta un desarrollo de tiempo sustancialmente triangular con rampas ascendientes y descendientes; y
- invertir aquellas porciones de la señal $(\check{y}(t))$ de vibración muestreada en el espacio que corresponden a las rampas ascendientes o descendientes en la señal $(\tilde{x}(t))$ de posición muestreada en el espacio.

45 5. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que procesar las señales $(x(t), y(t))$ de posición y vibración además incluye:

- calcular un desplazamiento angular relativo de los cuerpos (3c) de rodadura con respecto a uno de los anillos (3a, 3b) interior y exterior seleccionado, de manera que sea igual a un número entero de espacios angulares entre los cuerpos (3c) de rodadura adyacentes, a partir de la señal $(x(t))$ de posición; y
- 50 • procesar las señales $(x(t), y(t))$ de vibración a partir del desplazamiento angular relativo calculado de los cuerpos (3c) de rodadura.

6. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que muestrear en el espacio incluye:

- muestrear en espacio constante.

7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que predecir un defecto en el cojinete (3) de rodadura incluye:

- 5
- hacer una transformación rápida de Fourier de la señal ($\check{y}(t)$) de vibración muestreada en el espacio, generando mediante ello un espectro de frecuencia de la señal ($\check{y}(t)$) de vibración muestreada en el espacio; y
 - buscar una firma de frecuencia característica del defecto.

8. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además incluye:

- 10
- seleccionar uno de los anillos (3a, 3b) interior y exterior; y
 - llevar a cabo el método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores para testar el cojinete (3) de rodadura por un defecto en el anillo (3a, 3b) seleccionado.

9. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que procesar las señales ($x(t)$, $y(t)$) de posición y vibración incluye:

- 15
- muestrear en el tiempo las señales ($x(t)$, $y(t)$) de posición y vibración.

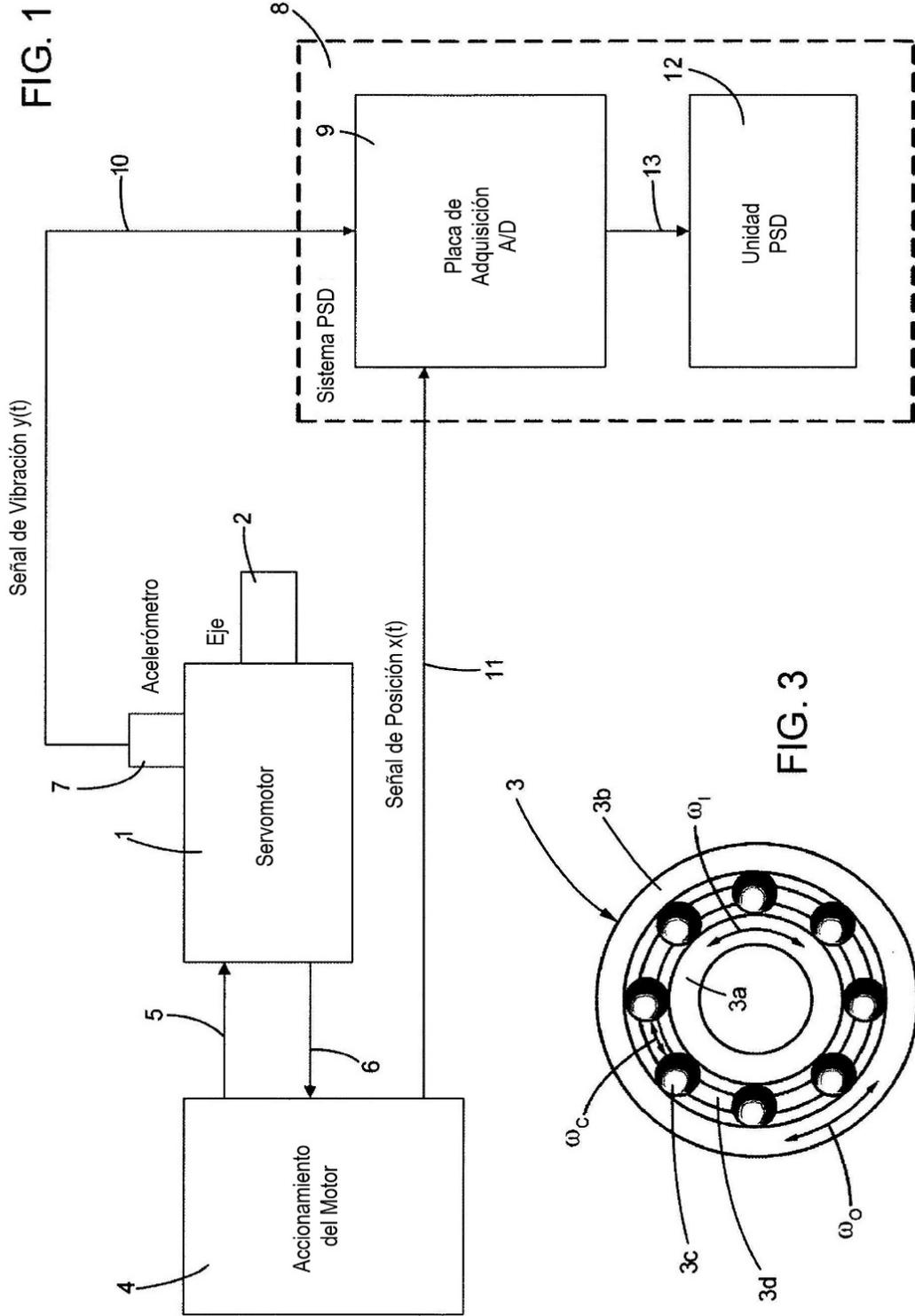
10. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que procesar las señales ($x(t)$, $y(t)$) de posición y vibración incluye:

- filtrar con paso de banda y llevar a cabo un análisis de envolvente en la señal ($y(t)$) de vibración.

20

11. Un sistema (8) de procesamiento de señales digitales programado para implementar el método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

12. Un programa de software cargable en un sistema (8) de procesamiento de señales digitales, y diseñado para implementar, cuando se ejecuta, el método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 anteriores.



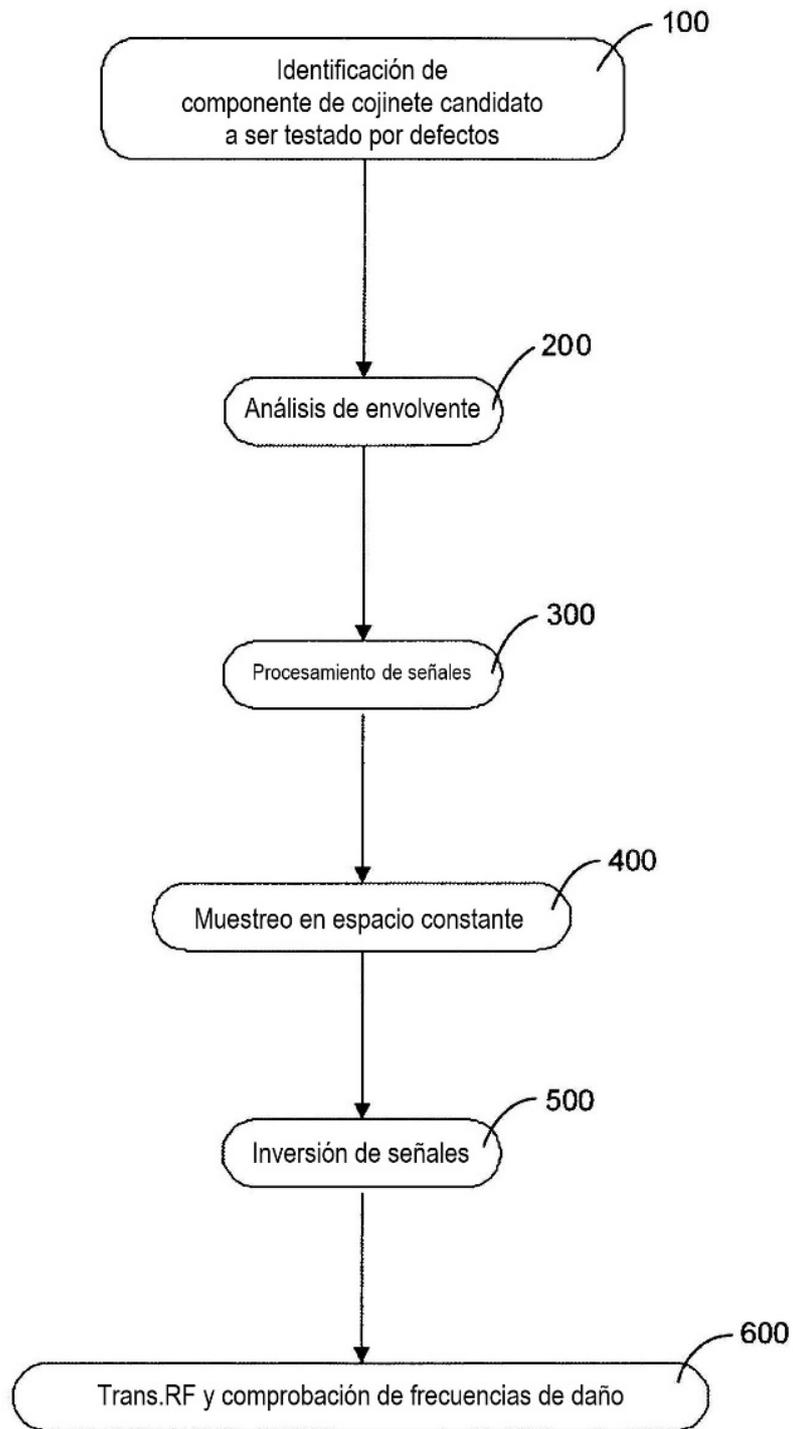


FIG. 2

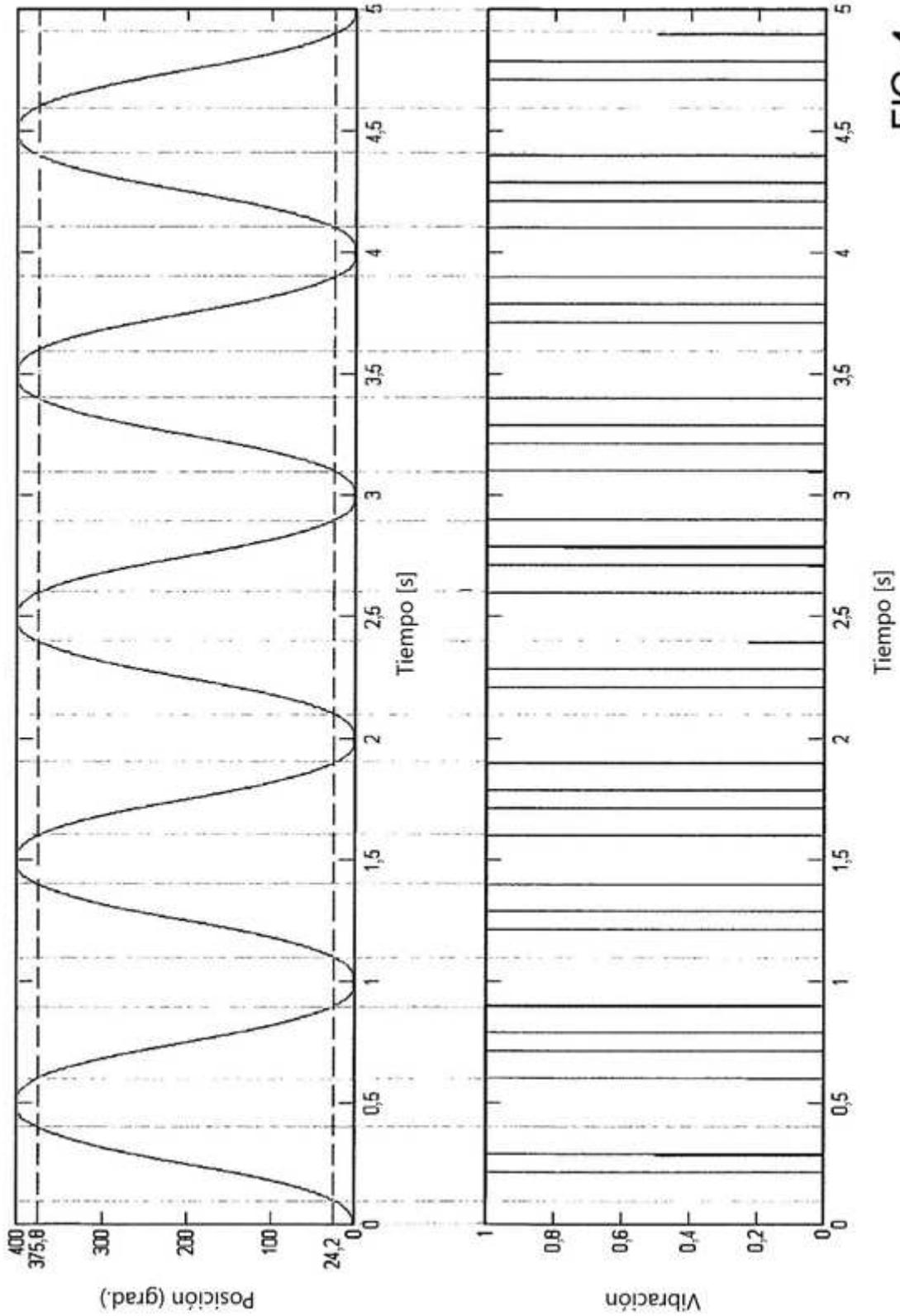


FIG. 4

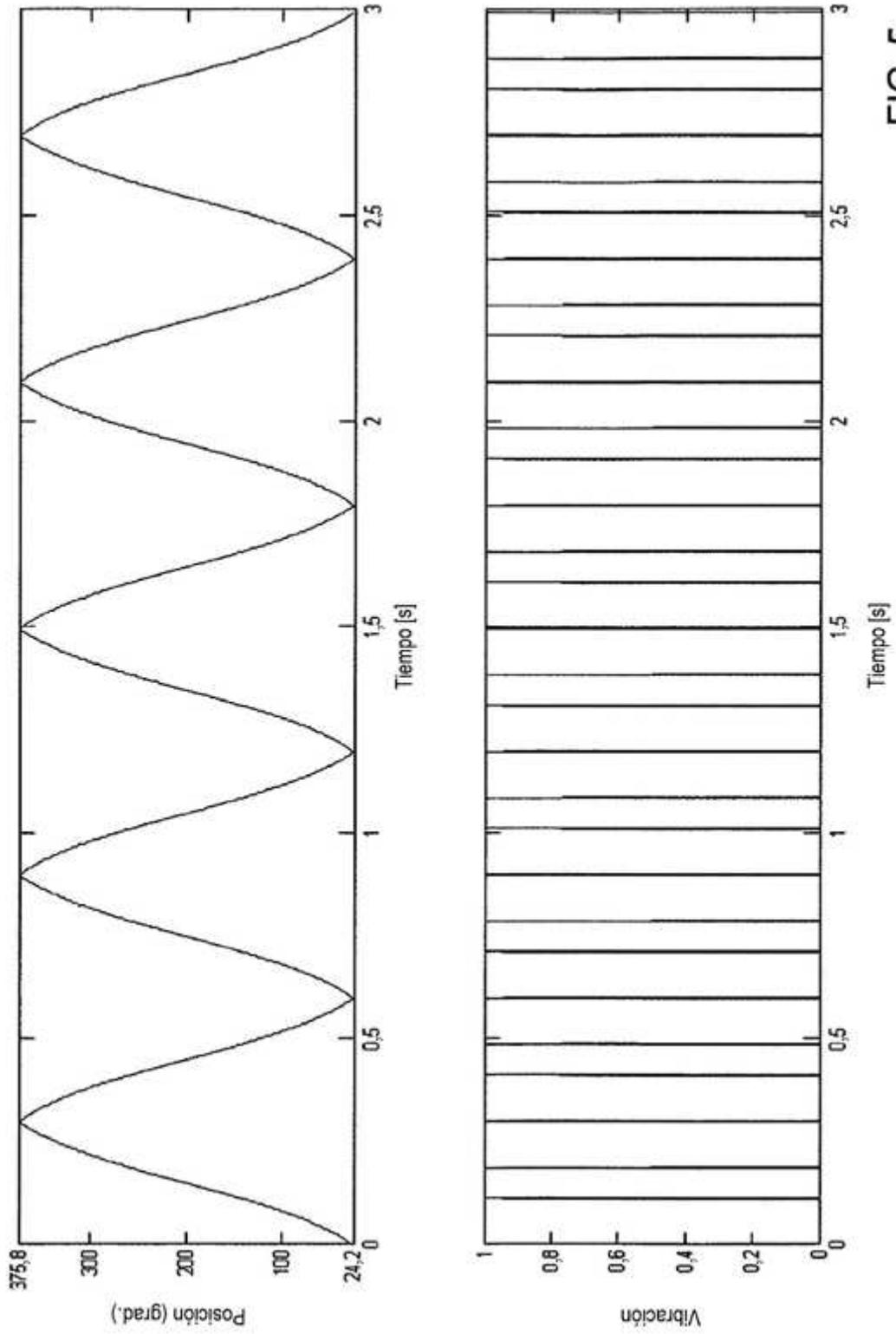


FIG. 5

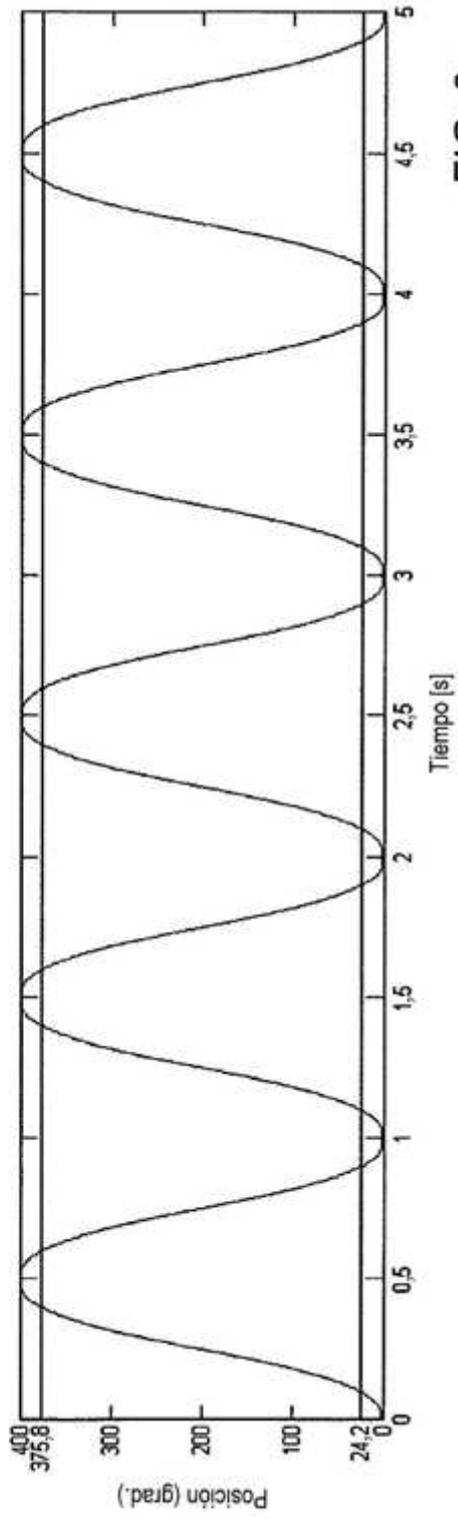


FIG. 6a

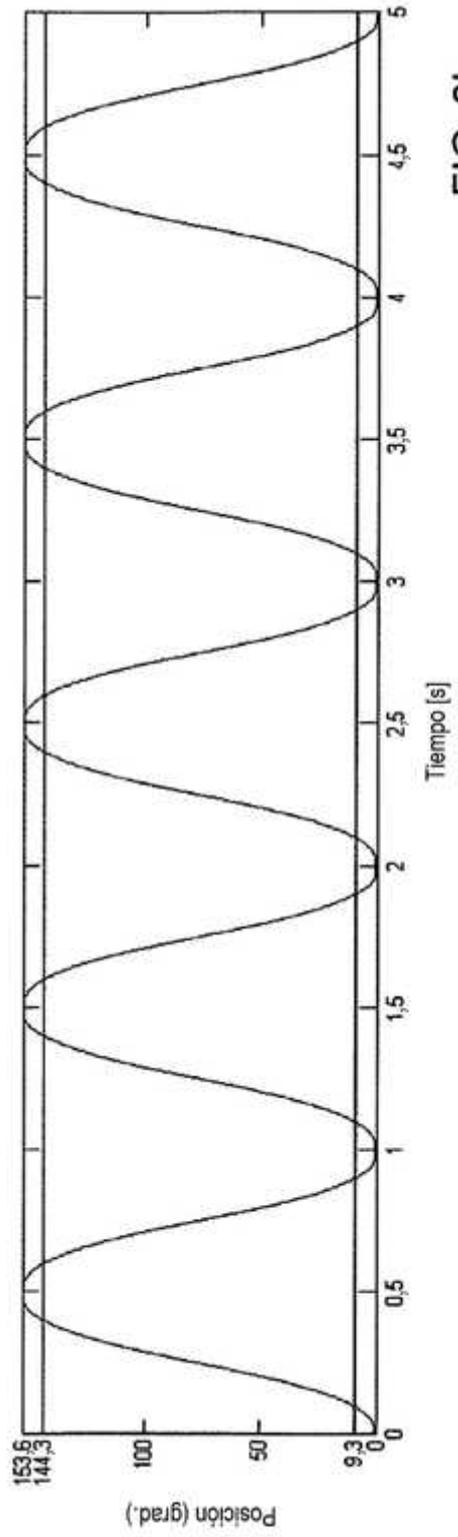


FIG. 6b

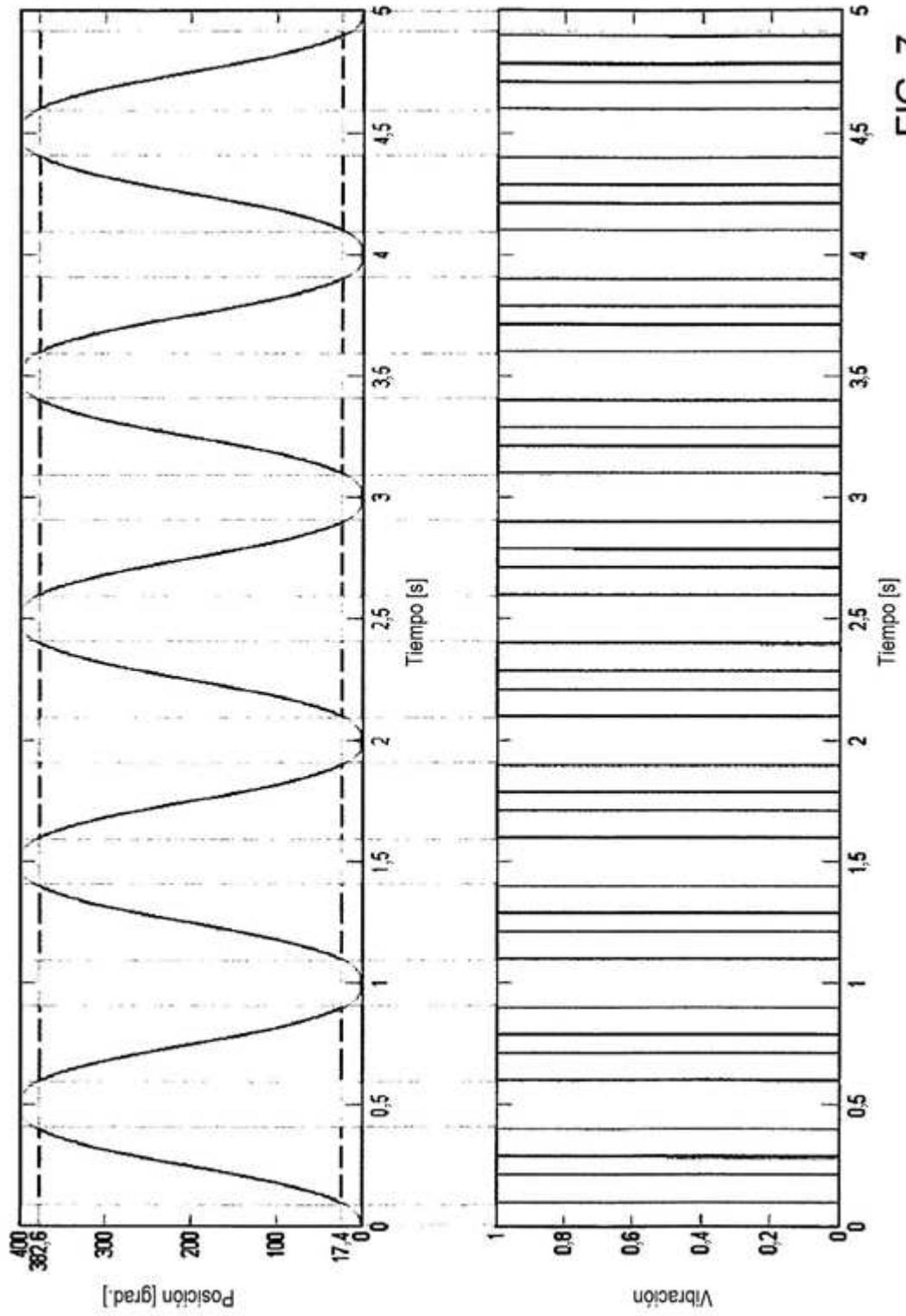


FIG. 7

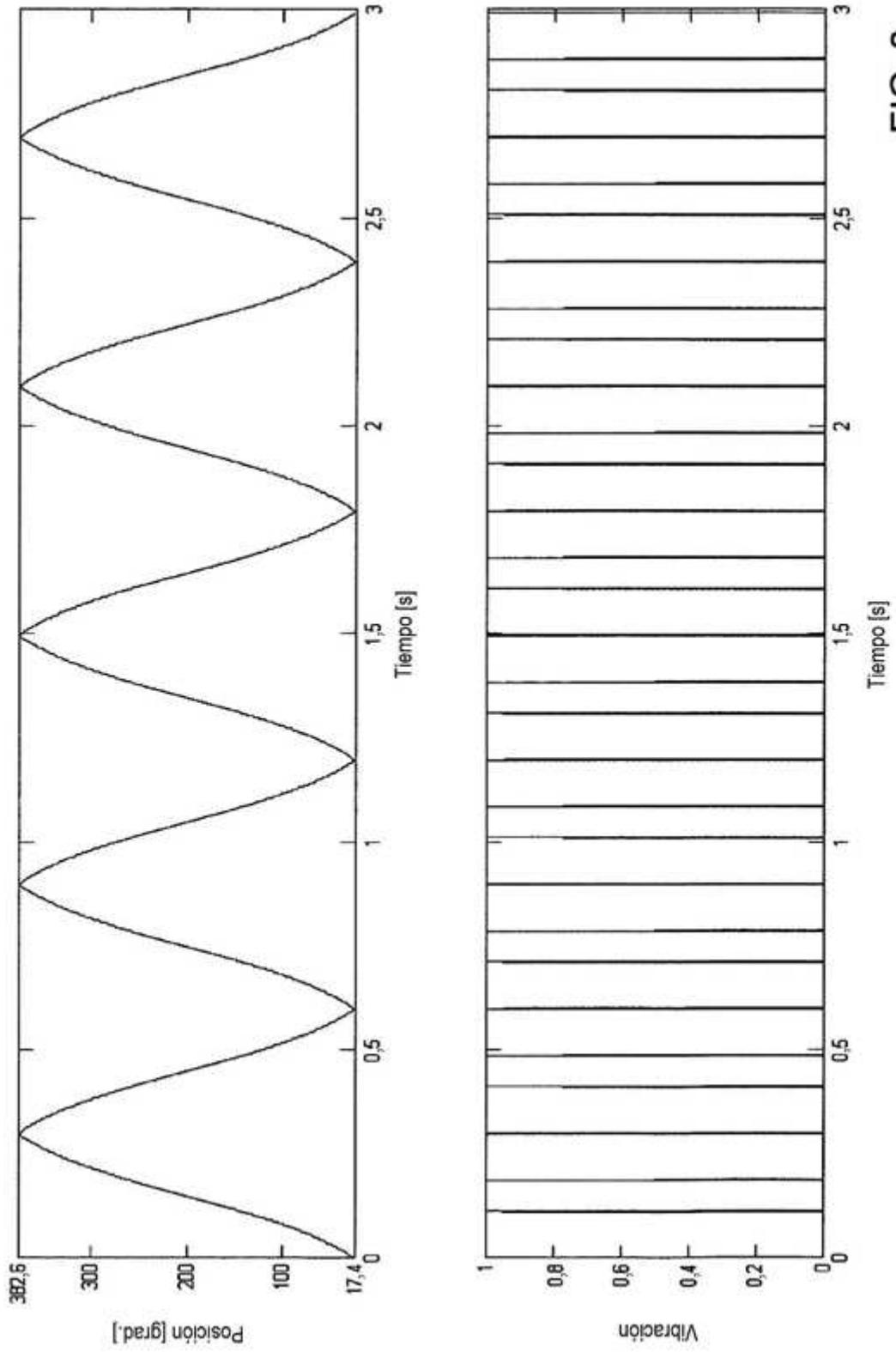
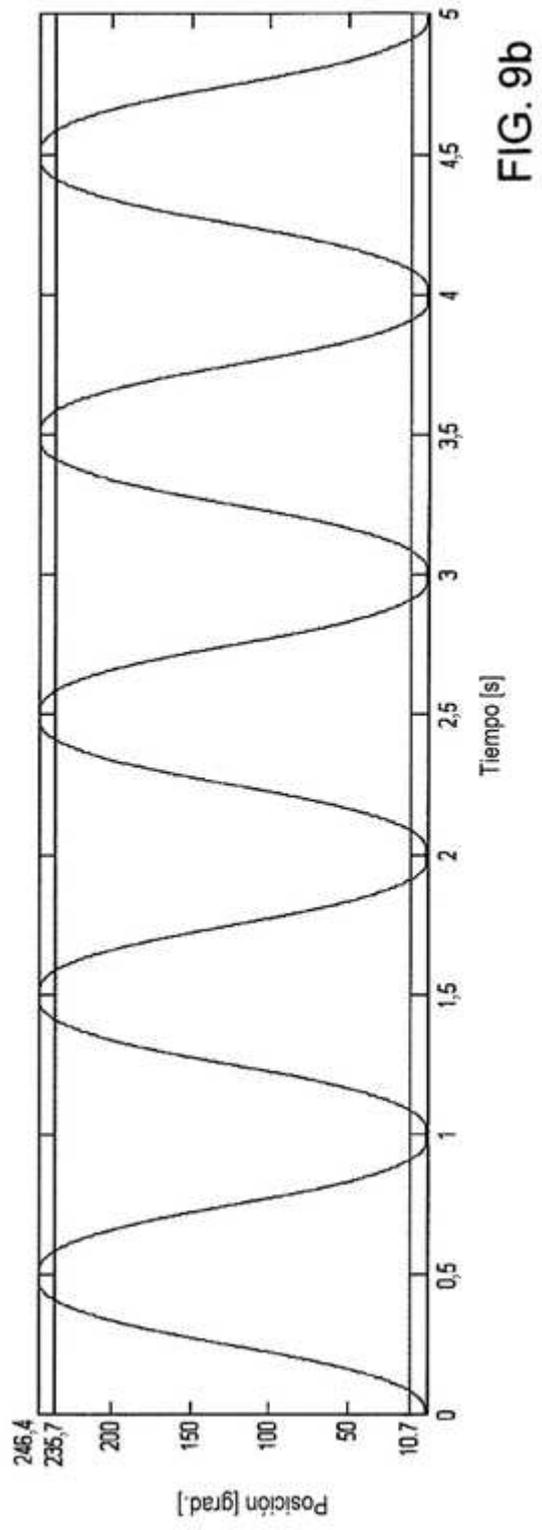
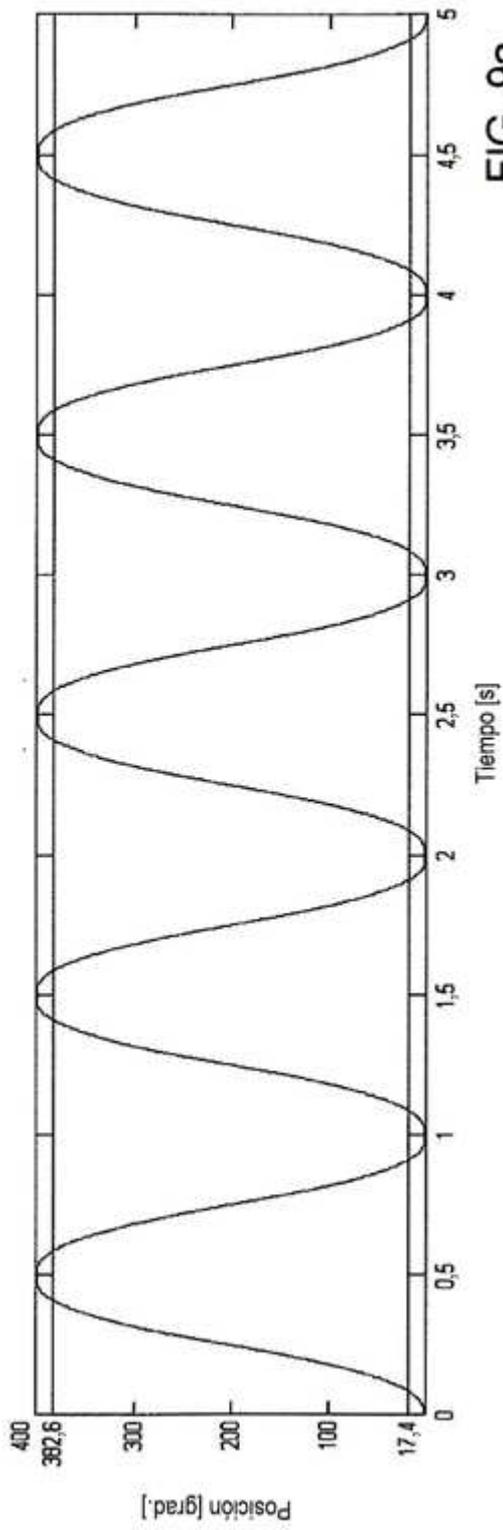


FIG. 8



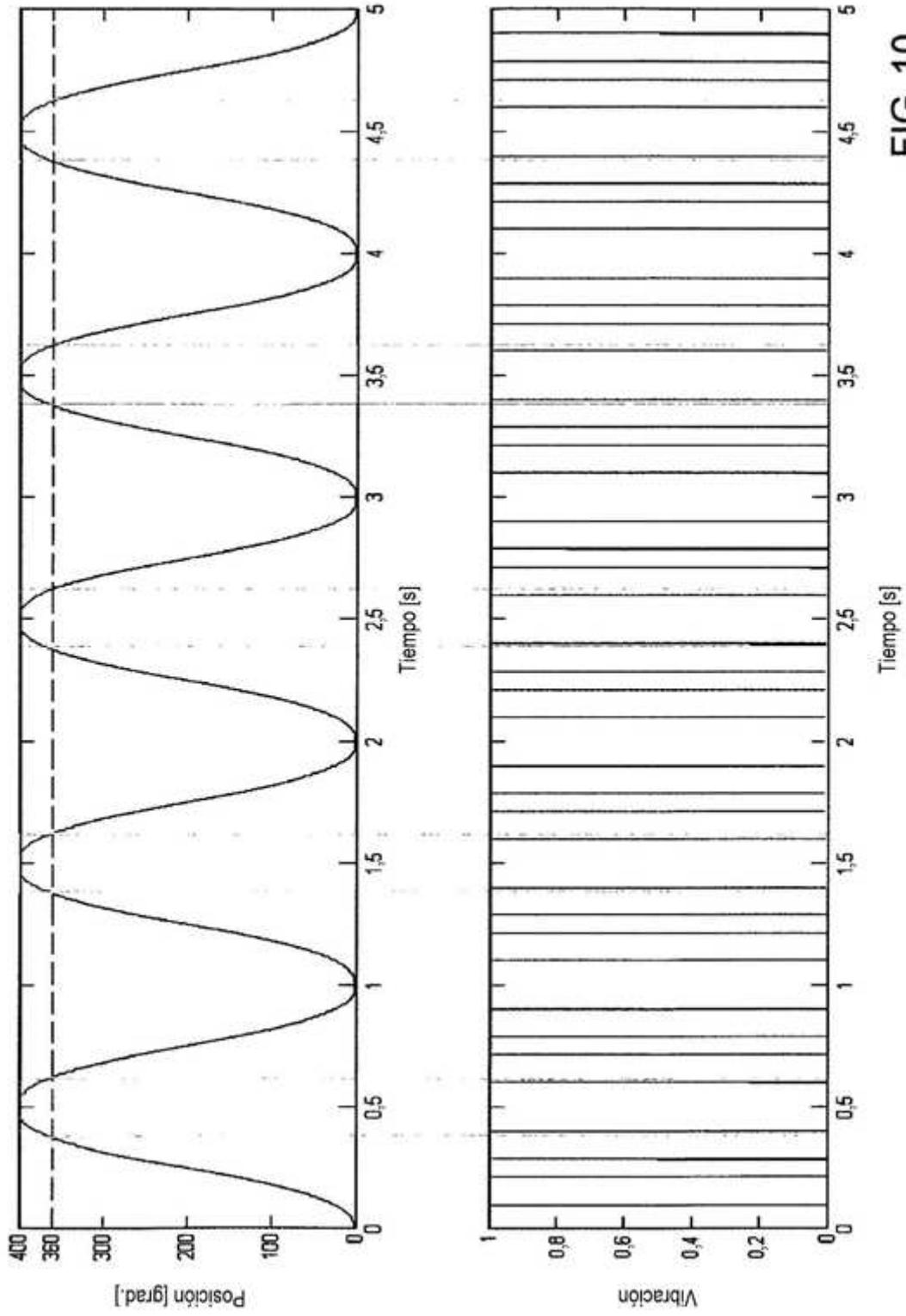


FIG. 10

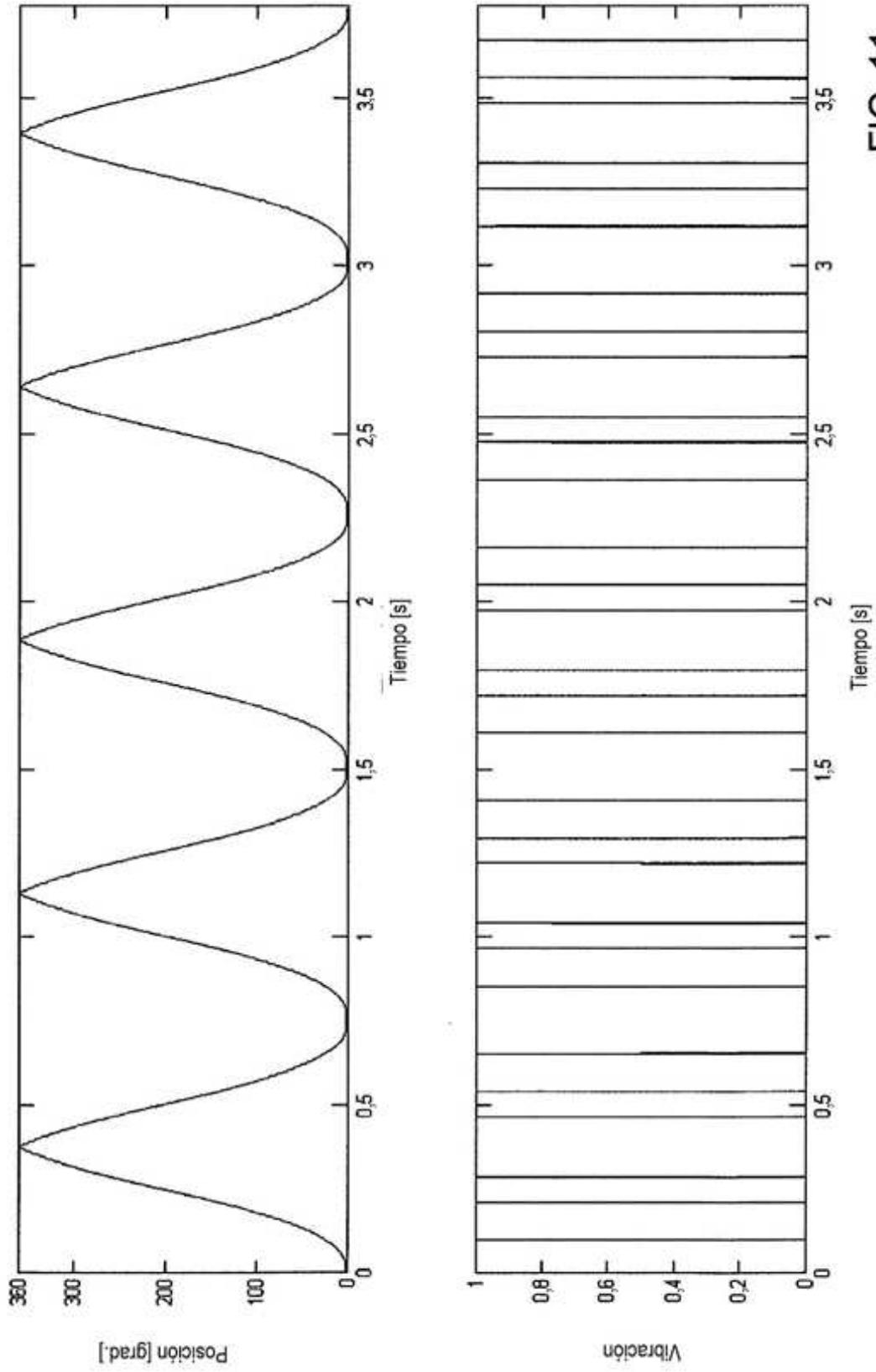


FIG. 11

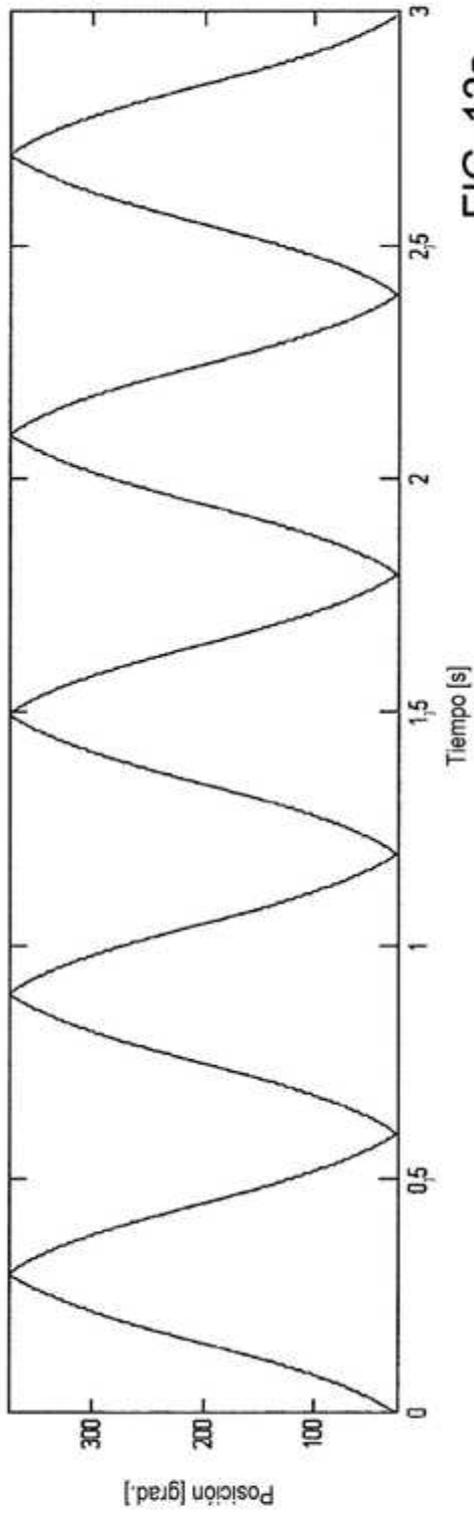


FIG. 12a

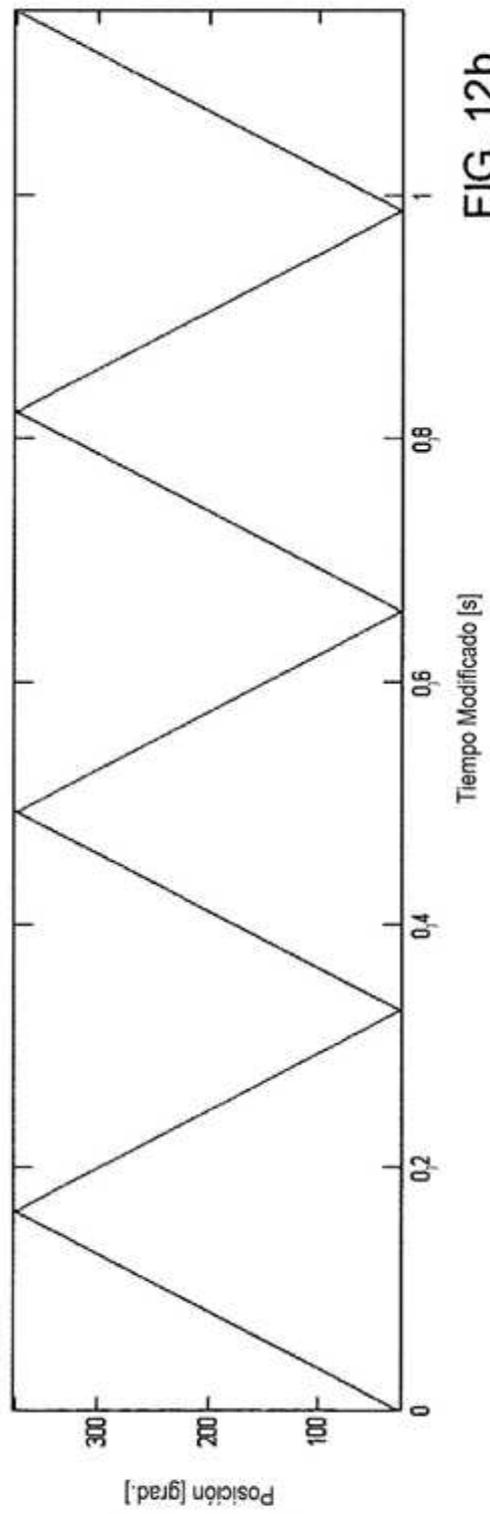


FIG. 12b

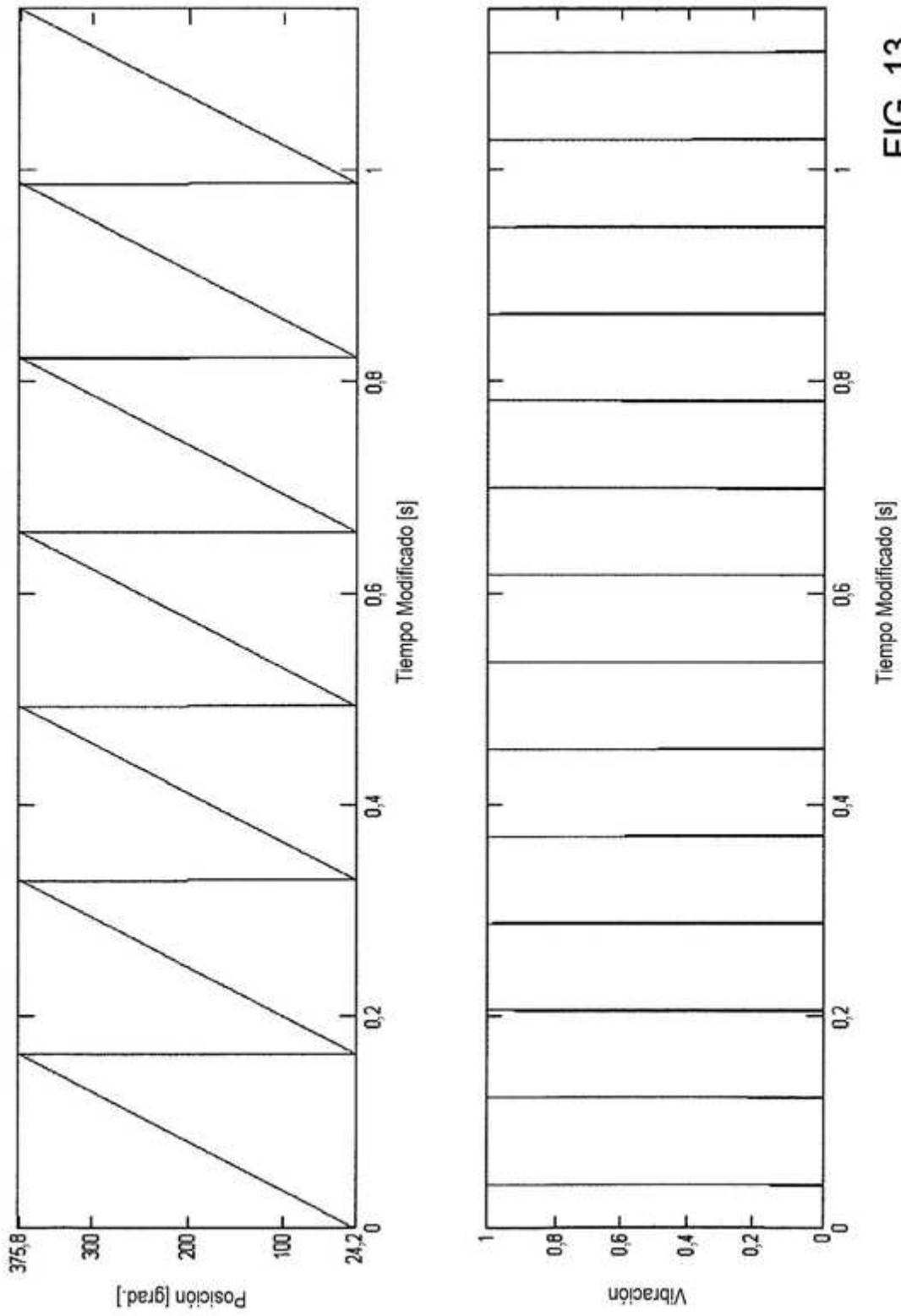


FIG. 13

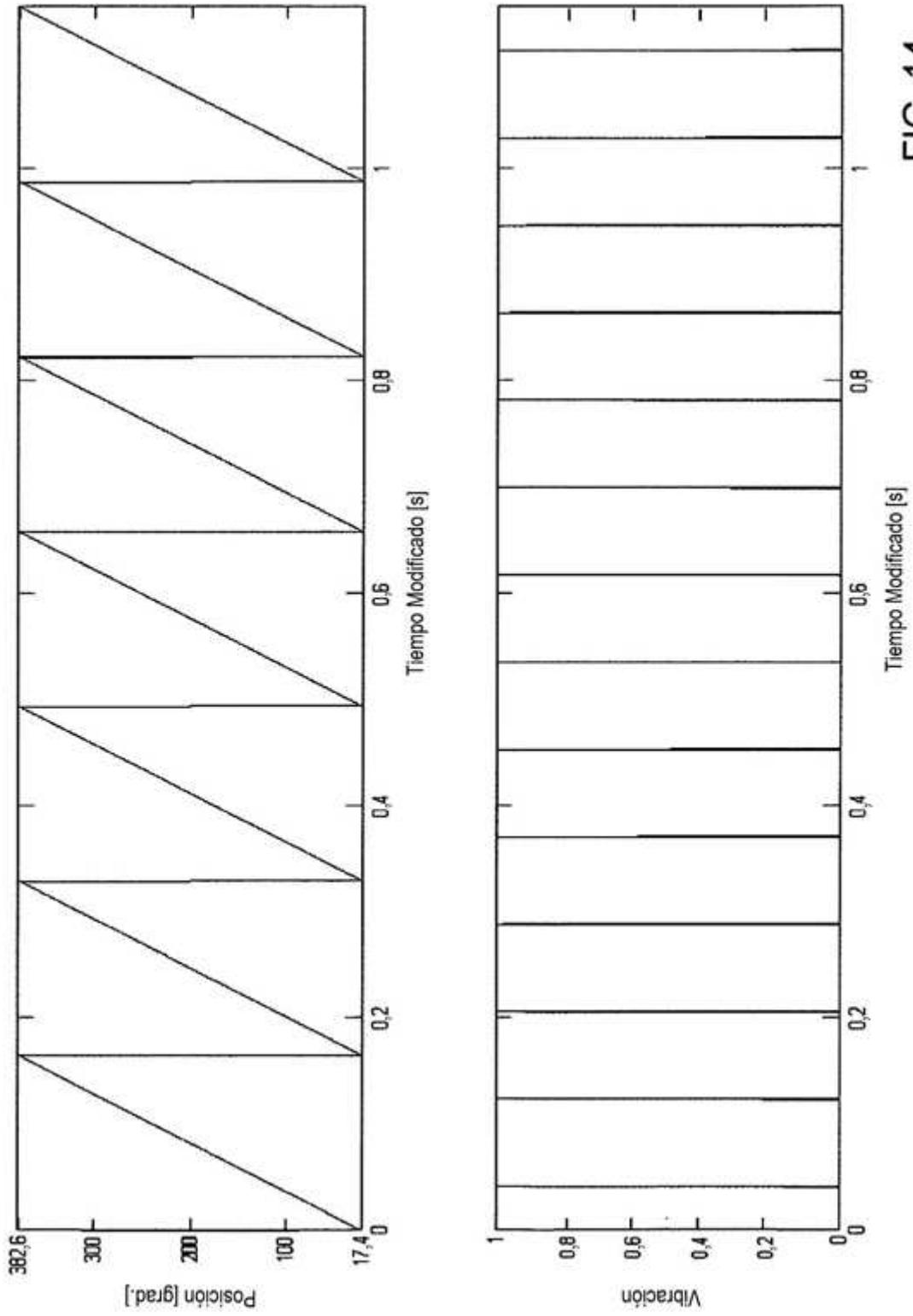


FIG. 14

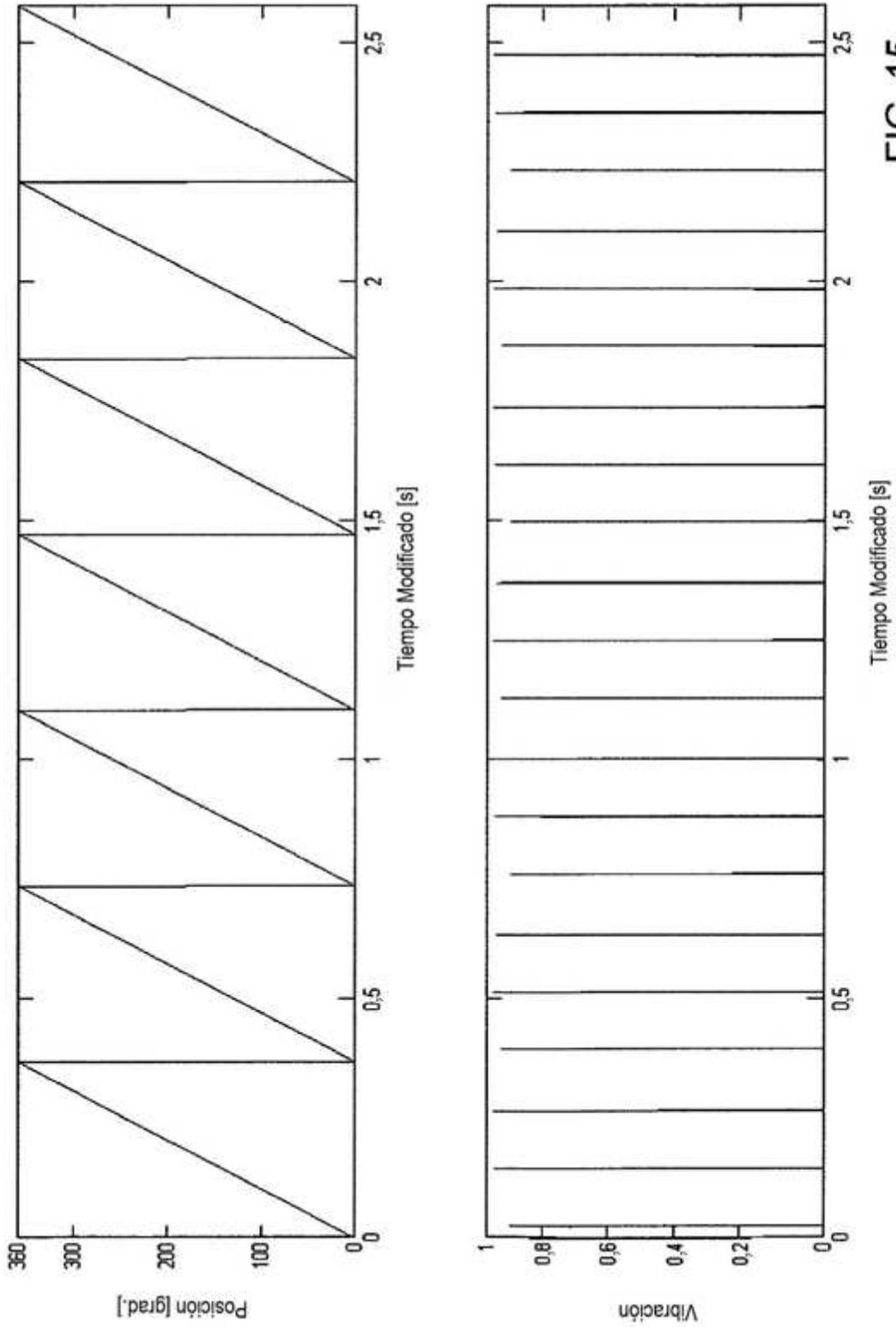


FIG. 15

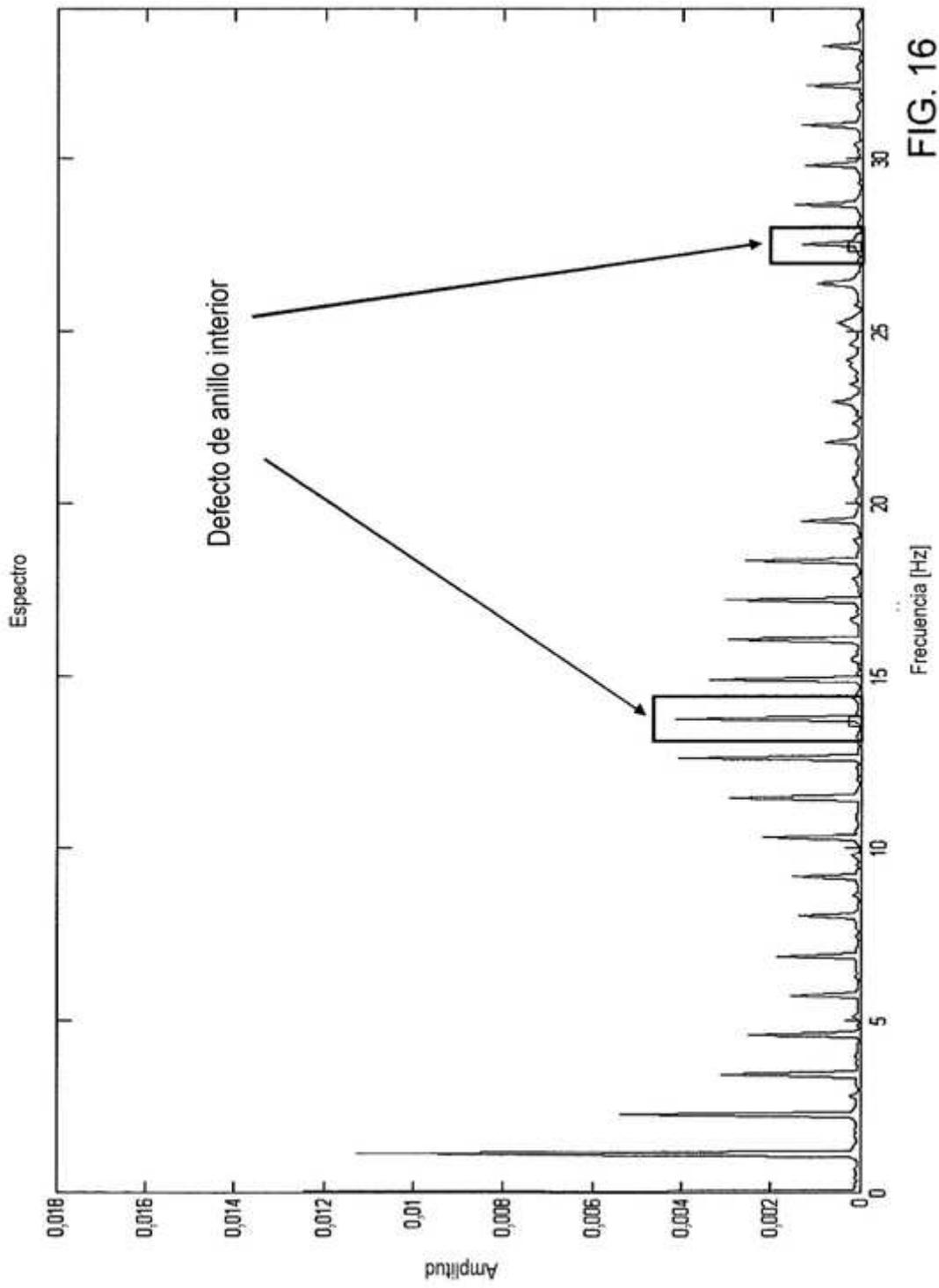


FIG. 16

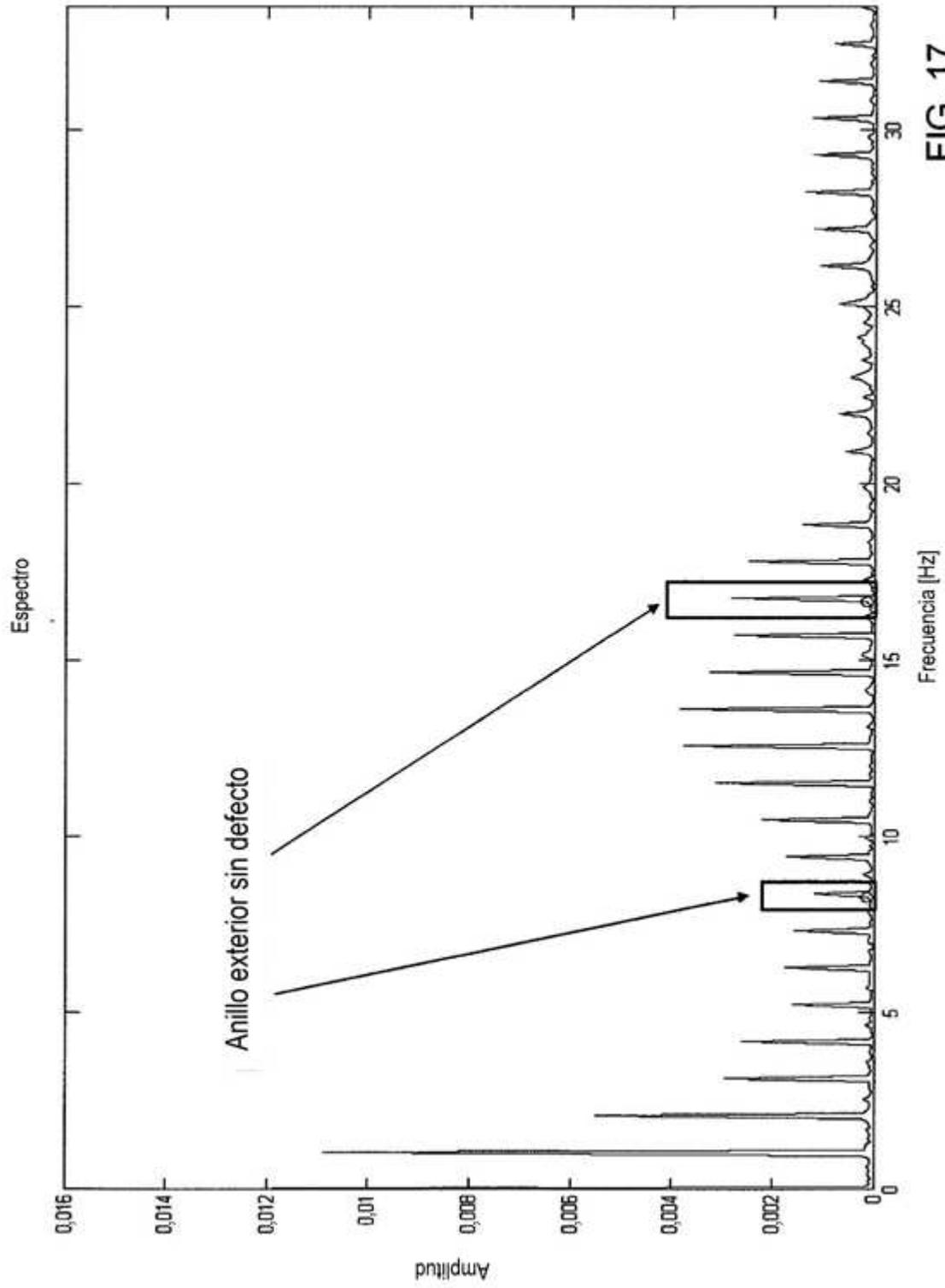


FIG. 17