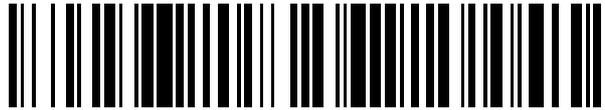


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 528**

51 Int. Cl.:

G01H 1/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2008 E 08831021 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.03.2016 EP 2165167**

54 Título: **Procedimiento y sistema de caracterización de álabes de turbina**

30 Prioridad:

30.04.2007 US 914998 P

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

13.04.2016

73 Titular/es:

**NUOVO PIGNONE S.P.A. (100.0%)
2, VIA FELICE MATTEUCCI
50127 FLORENCE, IT**

72 Inventor/es:

**MITARITONNA, NICOLA y
CIONCOLINI, STEFANO**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 566 528 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

Procedimiento y sistema de caracterización de álabes de turbina

Solicitudes relacionadas

- 5 La presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional de Estados Unidos n.º 60/914.998, presentada el 30 de abril de 2007, que se incorpora en el presente documento por referencia en su totalidad para las finalidades de cada estado y región miembro del PCT en la que dicha incorporación por referencia se permite o en otro caso no se prohíbe.

Campo de la invención

- 10 La presente invención se refiere a turbomáquinas, y, más particularmente, a la caracterización y comparación de la respuesta de álabes en base a un ensayo de caja de rueda con excitación por fluido (por ejemplo, aceite) y modelizado de la excitación del fluido, y para la caracterización de la dinámica de una o más etapas de turbina, permitiendo la caracterización de una etapa en términos de frecuencias naturales, intensidad de respuesta normalizada, y forma modal de la etapa (también denominada como la configuración nodal).

Antecedentes

- 15 Generalmente, puede usarse un ensayo estándar de caja de rueda para la caracterización de álabes de turbina; sin embargo, dichos ensayos conocidos solo se dirigen parcialmente a los deseos y necesidades del diseño de álabes de turbina. Por ejemplo, el resultado de dichos ensayos solo proporciona la medición de las frecuencias naturales del sistema, con escasa información acerca de las formas modales de rueda/álabe y la excitación forzada. En consecuencia, los ensayos de caja de rueda estándar solo permiten análisis salida-salida (por ejemplo, determinación del factor de calidad).

- 20 Adicionalmente, en dichos ensayos estándar de caja de rueda, la excitación se reproduce típicamente por medio de un spray de gas, y por ello no puede realizarse a una presión absoluta demasiado baja. Adicionalmente, puede observarse que las fuerzas de excitación producidas con un spray de gas están limitadas por la capacidad del caudal de la bomba de vacío. Este límite no permite el uso de caudales del spray elevados y en consecuencia no permite elevadas fuerzas de impulsión sobre los álabes.

- 25 En consonancia con lo anterior, los presentes inventores no son conscientes de ningún trabajo de modelizado o caracterización (por ejemplo, cuantificación) de una excitación por spray de gas (excitación que es muy difícil de modelizar), que proporcione una caracterización compleja. Las dificultades en el modelizado o caracterización de la excitación por spray de gas (por ejemplo cuantificación) también limita los ensayos de caja de rueda estándar; por ejemplo, esta incapacidad impide el diseño y/u optimización de la excitación para excitar uno o más modos específicos (por ejemplo según pueda desearse por un cliente).

- 30 Aunque hay disponible software (por ejemplo, LMS, B&K, AGILIS, etc.) para la realización de un procesamiento posterior de las señales de los datos de ensayo adquiridos durante el ensayo de caja de rueda y proporcionar la caracterización de las formas modales, dicho software de procesamiento posterior representa una metodología específica de caracterización de formas modales y tiene varias limitaciones. Por ejemplo, dicho software de procesamiento posterior no permite el cierre del bucle a través del análisis de la excitación.

- 35 En otras palabras, las técnicas para la medición, análisis y/o caracterización de álabes giratorios (por ejemplo, caracterización dinámica de los álabes de turbina) están generalmente limitadas a técnicas de tipo salida-salida resultado y, por ejemplo, ni usan un modelizado de la excitación ni metodologías entrada-salida.

- 40 La especificación de patente de Estados Unidos 2002/083772 A1 (Sonnichsen el ál.) Se refiere a un aparato y método para ensayos de vibración en un disco de álabes que incluye un rotor accionado por motor sobre el que puede fijarse el disco de álabes. El estado de tensiones y/o posición de un álabe giratorio impactado por líquido dirigido para impactar al menos en un álabe del disco de álabes giratorios puede supervisarse para ensayar sus características de vibración. El documento EP 0826949 (Rolls Royce PLC) se refiere a un método para la determinación de la frecuencia de resonancia de la vibración de un álabe giratorio comprendiendo la determinación de la frecuencia de resonancia aproximada y el giro de un álabe a una pluralidad de frecuencias en un intervalo por encima y por debajo de la frecuencia aproximada.

Sumario de la invención

- 50 De acuerdo con la presente invención se proporciona un método para la caracterización de al menos un álabe de turbina tal como se define en la reivindicación 1 a continuación.

Varias realizaciones de la presente invención proporcionan métodos y aparatos para ensayo, caracterización, y/o análisis de turbomáquinas en base a una excitación por fluido y modelizado cuantitativo de la excitación por fluido. Varias realizaciones de la presente invención proporcionan adicional o alternativamente métodos y aparatos para ensayo, caracterización y/o análisis de la forma modal o configuración nodal de un disco de álabes (por ejemplo, una

etapa de turbina) en base a un análisis de fase de las señales de tensión adquiridas desde un disco de álabes sometido a una excitación por fluido, en el que la forma modal o configuración nodal corresponde a modos de los álabes acoplados a través de un disco o envoltura.

5 De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, un método que proporciona la caracterización de un álabe de turbina, comprende proporcionar al menos un álabe de turbina sobre un rotor; girar el rotor, girando de ese modo el al menos un álabe de turbina; impactar un líquido sobre el álabe de turbina durante la rotación del al menos un álabe de turbina; y proporcionar un modelo cuantitativo de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina mediante el líquido impactante. El líquido puede ser un aceite, impactado como un espray atomizado. El impacto de líquido sobre el al menos un álabe de turbina puede controlarse de acuerdo con el modelo
10 cuantitativo de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina por el líquido. Las señales recibidas desde los sensores que están acoplados directa o indirectamente a los álabes de turbina pueden procesarse de acuerdo con el modelo cuantitativo. El procesamiento puede incluir el análisis de una información de fase procedente de los sensores para determinar la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad del al menos un álabe de turbina.

15 En algunas realizaciones, un método que proporciona la caracterización de al menos un álabe de turbina comprende el modelizado de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina por un líquido; y el control del impacto de líquido sobre el al menos un álabe de turbina de acuerdo con el modelo de fuerza de excitación. El modelo de fuerza de excitación puede proporcionar la fuerza de excitación en función del tiempo y proporcionar los componentes de frecuencia o contenido armónico de la fuerza de excitación.

20 En algunas realizaciones, un método que proporciona la caracterización de al menos un álabe de turbina comprende el procesamiento de señales recibidas desde sensores directa o indirectamente acoplados a los álabes de turbina mecánicamente excitados por un líquido, en el que el procesamiento se realiza de acuerdo con un modelo cuantitativo de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina por el líquido. El procesamiento puede comprender la determinación de la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad de
25 álabes de turbina. El modelo de fuerza de excitación puede proporcionar la fuerza de excitación en función del tiempo y/o proporciona los componentes de la frecuencia o contenido armónico de la fuerza de excitación.

En algunas realizaciones, un método que proporciona la caracterización de al menos un álabe de turbina comprende el procesamiento de señales de fase recibidas desde sensores directa o indirectamente acoplados a los álabes de turbina para determinar la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad de álabes turbina. Las señales de fase recibidas pueden corresponder a los álabes de turbina que están mecánicamente excitados por un líquido.
30

Varias realizaciones de la presente invención pueden también comprender relacionar la respuesta de los álabes de turbina determinada por el análisis de forma modal/configuración nodal con la cuantificación de la excitación para proporcionar factores de amortiguación asociados con al menos una forma modal/configuración nodal.

35 Varias realizaciones de la presente invención también comprenden al menos un medio legible por ordenador, y/o un sistema que comprende al menos un medio legible por ordenador, en el que el al menos un medio legible por ordenador almacena programación que cuando se ejecuta por al menos un ordenador es operativa en el al menos un ordenador implementando uno o más de los métodos descritos anteriormente y/o descritos en otra forma y/o reivindicados en el presente documento.

40 Se apreciará por los expertos en la materia que la breve descripción precedente y la siguiente descripción detallada son ejemplares y explicativas de la presente invención, pero no se pretende que sean restrictivas de la misma o limitativas de las ventajas que pueden conseguirse mediante la presente invención. Adicionalmente, se entiende que el sumario procedente de la invención es representativo de algunas realizaciones de la invención, y ni es representativo ni inclusivo de todas las materias objetivo y realizaciones dentro del alcance de la presente invención. Por ello, los dibujos adjuntos, referidos en el presente documento y que constituyen una parte del mismo, ilustran
45 realizaciones de la presente invención y, junto con la descripción detallada, sirven para explicar principios de la presente invención.

Breve descripción de los dibujos

Aspectos, características y ventajas de realizaciones de la invención, tanto de la estructura como de la operación, se entenderán y quedarán más claramente evidentes cuando la invención se considere a la luz de la siguiente descripción realizada en conjunto con los dibujos adjuntos, en los que números de referencia iguales designan las mismas o similares partes a todo lo largo de las diversas figuras, y en los que:
50

la FIG. 1 representa esquemáticamente una disposición de ensayo ilustrativa para la excitación de una o más ruedas de álabes con un líquido (por ejemplo aceite) durante un ensayo de caja de rueda, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

55 las FIGS. 2A-2C representan esquemáticamente un modelo ilustrativo, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, para la obtención de la fuerza transferida por el impacto de las gotitas de un espray con un álabe de una rueda giratoria;

la FIG. 3 representa esquemáticamente el desarrollo en plano de los álabes a diferentes valores de tiempo, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

la FIG. 4 representa un histograma ilustrativo de impactos de acuerdo con el modelizado de la fuerza de excitación, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

5 las FIGS. 5A-C muestra la fuerza en el sistema de referencia $\{r, \delta, z\}$ para el caso ilustrativo representado por el histograma de impactos representado en la FIG. 4; de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

10 la FIG. 6 muestra la fuerza tangencial transferida a un álabe en 360° de rotación mediante cuatro toberas del mismo tamaño, uniformemente distribuidas alrededor de la circunferencia en la misma localización radial, bajo las mismas condiciones para el caso ilustrativo de las FIGS. 5A-C, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

la FIG. 7 muestra la descomposición de la fuerza para la FIG. 6 en términos de sus componentes de Fourier en diferentes XRevs, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

15 la FIG. 8 muestra el componente 4XRev de la fuerza en función de la velocidad de rotación, correspondiente a las condiciones ilustrativas para el modelo del caso ilustrativo de las FIGS. 6 y 7, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

la FIG. 9 es un diagrama de flujo que representa etapas ilustrativas para la realización de análisis tonal, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

20 la FIG. 10 muestra el diagrama de Campbell del álabe L0 (última etapa) para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

las FIGS. 11A y 11B muestran la respuesta medida y la respuesta medida normalizada, respectivamente, para seis álabes diferentes en cinco cruces diferentes para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

25 las FIGS. 12A-F muestra la magnitud de las respuestas, trazadas como microtensiones respecto a rpm, para seis álabes, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

las FIGS. 12G-L muestran los datos de fase respectivos, trazados como grados respecto a rpm, para seis álabes, correspondientes a los datos de magnitud de las FIGS. 12A-F, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

30 la FIG. 13 es un diagrama de Campbell para el que se extraen los datos de las FIGS. 12A-L a lo largo del 6.º orden motor, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

la FIG. 14 muestra un trazado polar de desplazamiento correspondiente a fases teóricas del álabe y fases medidas del álabe, correspondientes a los datos de las FIGS. 12G-L, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

35 la FIG. 15 muestra un trazado polar de desplazamiento correspondiente al cruce 4XRev con el primer modo, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención;

las FIGS. 16A-L representan los datos de magnitud (microtensiones respecto a rpm) y los datos de fase correspondientes (grados respecto a rpm) para seis álabes para el cruce 5XRev, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención; y

40 las FIGS. 17A-C muestran trazados polares de desplazamientos de álabe correspondientes a tres picos respectivos de los datos de cruce 5XRev medidos, junto con los desplazamientos teóricos para una configuración 5ND, para un ensayo experimental realizado de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención.

Descripción de realizaciones de la invención

45 Como se entenderá a la vista de la subsiguiente descripción, varias realizaciones de la invención se refieren a ensayos experimentales, e incluyen aspectos y realizaciones que pueden dividirse, por conveniencia, en tres áreas primarias: organización del ensayo; análisis de excitación/modelizado; y procesamiento posterior (por ejemplo análisis fase/tono). Como se entenderá, la materia objeto englobada por la presente invención incluye, pero sin limitarse a, realizaciones dirigidas a cada una de estas áreas primarias individualmente, así como a realizaciones dirigidas a combinaciones de dos o más de estas áreas primarias. Más específicamente, como se entenderá por los expertos en la materia, los métodos y sistemas de acuerdo con las realizaciones de la presente invención incluyen la
50 integración de realizaciones y/o aspectos de las tres áreas para definir y caracterizar la respuesta mecánica del sistema (por ejemplo, los álabes de turbina que se están ensayando).

- Adicionalmente, tal como se entenderá por los expertos en la materia a la vista de la presente divulgación, métodos y sistemas de acuerdo con las realizaciones de la presente invención proporcionan mediciones experimentales de los parámetros característicos de vibración (frecuencias naturales, factores de amortiguación asociados con cada forma modal, etc.) en el rotor giratorio/ruedas de álabes. Los métodos y sistemas de acuerdo con las realizaciones de la presente invención permiten la caracterización de la etapa en términos de frecuencias naturales, intensidad de respuesta normalizada, y forma modal (configuración nodal) de la etapa. Además, se apreciará a la vista de la presente divulgación que los ensayos de acuerdo con las realizaciones de la presente invención pueden realizarse en una fase relativamente temprana del desarrollo del diseño, dado que no requieren el equipamiento completo de recorrido del flujo.
- La FIG. 1 representa esquemáticamente una organización de ensayo ilustrativa para la excitación de una o más ruedas de álabes (por ejemplo, una rueda de álabes del compresor/turbina) con un líquido (por ejemplo aceite) durante el ensayo de caja de rueda, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. Más específicamente, la realización representada incluye una cámara 100 en la que se montan tres ruedas de álabes 102a, 102b, 102c (por ejemplo, etapas de turbina, comprendiendo cada una un número de álabes de turbina mecánicamente acoplados a una envolvente común) sobre un eje de un rotor 122 que es accionado por una máquina motriz 112. La cámara 100 puede evacuarse hasta una presión deseada mediante una bomba de vacío 110, que está acoplada comunicativamente al ordenador 106. A modo de ejemplo, puede realizarse un ensayo a una presión absoluta muy baja (por ejemplo, del orden de 10 mbar) en la cámara/bunker 100 mediante el control de la bomba de vacío 110, incrementando así la relación señal a ruido medida.
- Una o más de las ruedas de álabes 102a, 102b, 102c incluyen cada una al menos una pluralidad de álabes en la que cada una incluye uno o más medidores de tensiones, esquemáticamente representados como medidores 120, montados sobre ellas. Las señales de los medidores de tensiones se conectan comunicativamente (enlace no mostrado por claridad) a una interfaz de comunicación 104, que se monta hacia un extremo del eje 122 y se conecta comunicativamente al ordenador 106. Aunque las conexiones comunicables se representan por líneas, dichas líneas representan esquemáticamente un enlace de comunicación, que puede implementarse por una conexión conductora (por ejemplo, un cable, bus, etc.) y/o mediante una conexión inalámbrica (por ejemplo telemetría), y puede proporcionar una señal de comunicación unidireccional o bidireccional dependiendo de la implementación y requisitos funcionales.
- El sistema incluye una pluralidad de toberas controlables 103 dispuestas alrededor de una o más de las ruedas de álabes 102a, 102b, 102c (por ejemplo, etapas de turbina) para dirigir el fluido sobre los álabes de una o más de las ruedas de álabes 102a, 102b, 102c. Para una mejor compresión, solo se representan esquemáticamente dos toberas 103 dirigidas sobre cada etapa/disco. De acuerdo con varias realizaciones de la presente invención, como se comprenderá adicionalmente a la vista del modelo de excitación presentado en el presente documento a continuación, las toberas 103 se implementan como toberas de tipo atomización. Cada una de las toberas 103 puede configurarse o montarse de modo que su orientación y/o posición relativa a los álabes y ruedas de álabes sea ajustable, de modo que la tobera pueda dirigir el fluido sobre los álabes desde varias posiciones circunferenciales y/o radiales con relación al disco de álabes, y desde varios ángulos con relación a la superficie del álabes. Cada tobera 103 está acoplada a un suministro de fluido (no mostrado) y puede controlarse separadamente por el ordenador 106 (por ejemplo, por medio de una válvula controlable para regular y cortar el flujo de fluido, un pasador ajustable para ajustar la abertura/anillo de la tobera, etc.) para controlar los parámetros de emisión del fluido (por ejemplo, caudal másico de espray, presión, calor, etc.). Por claridad de exposición, el control posicional/orientación así como el control del parámetro de emisión de fluido por el ordenador 106 se representa esquemáticamente mediante el ordenador 106 conectado de modo comunicativo a un colector/paso de alimentación 105, que se acopla a las toberas 103.
- Como se ha indicado anteriormente, el ordenador 106 se conecta comunicativamente para el control y/o recepción de señales (por ejemplo, señales desde los sensores de tensiones 102a, varios sensores para la supervisión de otros parámetros/condiciones y/o para control por realimentación, etc.) desde la bomba de vacío 110, accionador motor 112, toberas 103, y medidores 120 a través de la interfaz 104. El ordenador 106 puede almacenar conjuntos adquiridos de datos de ensayo en el medio de almacenamiento 107. El ordenador 106 es operativo también para la ejecución del software para proporcionar control por programa de las operaciones de ensayo incluyendo, de acuerdo con algunas realizaciones, el control de las toberas 103 para proporcionar las excitaciones forzadas deseadas según se determina de acuerdo con un modelo de la excitación del fluido. El ordenador 106 puede ser operativo también para realizar análisis u otro procesamiento posterior a la adquisición de los datos de ensayo adquiridos, tal como la realización de análisis tonal de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención. Como se entenderá, sin embargo, dicho procesamiento posterior, así como otro modelizado (por ejemplo modelizado de excitación) o análisis previo al ensayo o generación de datos (por ejemplo, para la generación de las señales de excitación deseadas) puede implementarse fuera de línea mediante uno o más de otros ordenadores que pueden no ser utilizables para el ensayo.
- De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, se excita una rueda mediante el impacto de un cierto número de (por ejemplo, uno o más) chorros de espray de aceite (por ejemplo, toberas 103 en la realización de ensayo de la FIG. 1). Una vez que el álabes, girando a la velocidad de rotación, se pone en contacto con el aceite, acelera cada gotita de aceite del espray a lo largo de su dirección de rotación. En esta forma, la variación del

momento imprimida sobre la gotita de aceite tiene el efecto de transferir un cierto momento al álabe y de ese modo excitarlo. Como se ha indicado anteriormente, el espray de aceite (por ejemplo, emitido a través de la tobera) puede localizarse en una o más localizaciones circunferenciales diferentes (que pueden ser ajustables) y puede situarse de tal manera que transfiera el momento en cualquier sección radial del álabe.

5 Como puede apreciarse, dicha organización de ensayo tal como se muestra en la FIG. 1 permite tener relaciones de señal a ruido muy altas. Por ejemplo, como puede apreciarse, se proporciona una relación señal a ruido alta mediante el uso de un líquido (por ejemplo, aceite), que, en comparación con un gas, proporciona fuerzas mucho más altas (por ejemplo, el líquido se asocia con una masa o densidad mucho más alta (por ejemplo, con el mismo caudal en volumen) en comparación con un gas; también, en comparación con un gas, un líquido tiene una divergencia mucho más baja desde la tobera).

10 Varias realizaciones de la presente invención proporcionan la caracterización de la excitación en el caso de un espray líquido (por ejemplo, aceite). Como se entiende, realizaciones de la presente invención incluyen métodos para la caracterización tal como una excitación por líquido (por ejemplo aceite), tal como se representa dicha excitación en términos de la fuerza en función del tiempo y/o en términos de componentes de frecuencia (por ejemplo, contenido armónico de la excitación). La consiguiente descripción expone un modelo ilustrativo para la caracterización de la fuerza de excitación de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, y los expertos en la materia entenderán que aspectos y realizaciones de la presente invención, incluyendo realizaciones dirigidas al análisis/modelizado de excitación en sí así como realizaciones que emplean la caracterización de la fuerza de excitación (por ejemplo en términos de dependencia del tiempo y/o componentes de frecuencia) no están limitadas a este modelo ilustrativo particular.

15 Las FIGS. 2A-2C representan esquemáticamente un modelo ilustrativo, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, para la obtención de la fuerza transferida por el impacto de las gotitas de un espray 209 emitido por la tobera 203 con un álabe de rueda 201 girando a N revoluciones por minuto (rpm).

En este modelo, un álabe (por ejemplo el álabe 205) se modeliza por un plano normal $n(n_r, n_\delta, n_z)$ de ecuación:

25
$$\pi_B : \vec{n} \cdot (\vec{P} - \vec{P}_0) = 0 \quad (1)$$

La FIG. 2A representa esquemáticamente lo que puede denominarse como un desarrollo planar de la sección de la fila de álabes (por ejemplo, álabes 205 y 207, también denominados en los dibujos como Álabe 1 y Álabe 2, respectivamente) a radio constante r_n igual al radio en el que se sitúa la tobera 203. En este plano \vec{P}_0 es el punto de intersección de la línea que describe el álabe y la línea que describe el plano tangencial a los bordes del álabe en la dirección axial (π_B). Dado que el álabe está girando, el punto \vec{P}_0 se mueve con una velocidad \vec{V}_B en la dirección tangencial ($\hat{\delta}$):

$$V_B = \frac{N \cdot 2\pi}{60} \cdot r_n \hat{\delta} \quad (2)$$

Un modelo simplificado, que los expertos en la materia entenderán como adecuado para muchas implementaciones, considera el espray como un conjunto de gotitas inyectadas desde la tobera. Cada gotita sale de la tobera con una velocidad axial \vec{V}_{iny} :

$$\vec{V}_{iny} = CN \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

Cuando la gotita alcanza el plano de los bordes de los álabes su velocidad es:

$$\vec{V}_D = \frac{1}{\sqrt{r_D^2 + \delta_D^2 + z_D^2}} \left(\begin{matrix} r_D^2 V_{iny} \\ z_D \end{matrix}, \begin{matrix} \delta_D^2 V_{iny} \\ z_D \end{matrix}, \begin{matrix} z_D V_{iny} \\ z_D \end{matrix} \right) \quad (4)$$

40 Desde este punto de vista la gotita entra en el área de posibles impactos con el álabe. En esta realización ilustrativa del modelo de impacto del espray, se representa el caso de un tipo de tobera H (cono hueco). La intersección del patrón de espray con el plano π_B se representa esquemáticamente en la FIG. 2A desde la perspectiva de la sección AA, y en la FIG. 2C en el plano π_B (mostrando el patrón de espray de intersección que tiene una forma angular de ancho s, radio medio Rext, y extendido al radio Rext). El análisis del impacto considera las gotitas moviéndose desde su plano al interior del área de impacto posible. Si una gotita está a una distancia axial l dada desde el plano π_B , alcanza al plano en un tiempo

$$t' = \frac{l}{V_{iny}} \quad (5)$$

La posición D de la gotita puede identificarse con sus coordenadas radial y curvilínea (R y φ) sobre el plano π_B junto con su distancia axial desde π_B , l . Cada gotita puede identificarse en el sistema del álabe como sigue:

$$D = (r_D, \delta_D, z_D) = (r_n + R \text{sen}(\varphi), R \text{cos}(\varphi), l) \quad (6)$$

5 o alternativamente, dada la ecuación (5), como sigue:

$$D = (r_D, \delta_D, t') = (r_n + R \text{sen}(\varphi), R \text{cos}(\varphi), t') \quad (7)$$

Considerando el suceso de un evento de impacto entre una gotita y un álabe, se considera el tiempo total T para que tengan lugar los posibles impactos. Este tiempo, T , es simplemente el tiempo necesario para que el álabe cubra una distancia igual a la suma del paso de álabes y la dimensión total de la impresión del espray sobre el plano π_B :

$$10 \quad T = \frac{p + 2R_{ext}}{V_B} \quad (8)$$

El tiempo t' necesario para que cada gotita alcance el plano π_B es entonces elegido aleatoriamente en el intervalo $[0, T]$. Mientras que la gotita viaja desde su posición inicial al plano π_B , también el punto base \vec{P}_0 del plano que representa el álabe, se mueve tangencialmente como sigue:

$$\vec{P}_0 = \vec{P}_{00} + \vec{V}_B t' \quad (9)$$

15 en la que \vec{P}_{00} es la posición inicial de \vec{P}_0 :

$$\vec{P}_{00} = (r_n, -(2R_{ext} + p), d) \quad (10)$$

En el instante t' la gotita se sitúa sobre el plano π_B y sus coordenadas son entonces:

$$D_0 = (r_D, \delta_D, d) \quad (11)$$

20 En este punto, contando el tiempo t'' desde el instante en el que la gotita sale del plano π_B , la posición de la gotita viene dada por:

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{V}_D \cdot t'' \quad (12)$$

mientras el punto base \vec{P}_0 se convierte en:

$$\vec{P}_0 = \vec{P}_{00} + \vec{V}_B (t' + t'') \quad (13)$$

La condición para el impacto se representa finalmente por la ecuación (1) con $\vec{P} = \vec{D}$:

$$25 \quad \vec{n} \cdot (\vec{D} - \vec{P}_0) = 0 \quad (14)$$

Sustituyendo las ecuaciones (12) y (13) en la ecuación (14), la ecuación para el tiempo de impacto t'' es:

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_0 + \vec{V}_D \cdot t'' - \vec{P}_{00} - \vec{V}_B (t' + t'')) = 0 \quad (15)$$

Invirtiendo la ecuación (15), es posible hallar el tiempo transcurrido desde el instante en el que la gotita entra en el área de posibles impactos y el impacto en sí

$$30 \quad t'' = - \frac{\vec{n} \cdot (\vec{D}_0 - \vec{P}_{00} - \vec{V}_B t')}{\vec{n} \cdot (\vec{V}_D - \vec{V}_B)} \quad (16)$$

El tiempo total para que cada gotita bajo consideración impacte en el álabe es entonces:

$$t = t' + t'' \quad (17)$$

La posición de la gotita impactada \vec{D}_{im} viene dada por la sustitución de la ecuación (16) en la ecuación (12).

Claramente, en este modelo ilustrativo, no todos los impactos son posibles o tienen interés. Más específicamente, en esta realización ilustrativa, los impactos de interés son aquellos que tienen lugar en el canal del álabe entre el primer y el segundo álabe en el instante t' , tal como se ha representado en la FIG. 3, que representa esquemáticamente el desarrollo planar del álabe 205 y del álabe 207 en los instantes 0, t' , $t' + t''$.

5 La situación en el otro canal será entonces igual. Esta condición se verifica cuando lo siguiente es verdadero:

$$\left[\bar{n} \cdot (\bar{D}_{im} - \bar{P}_0) \right] \cdot \left[\bar{n} \cdot (\bar{D}_{im} - (\bar{P}_0 + \rho \delta)) \right] < 0 \quad (18)$$

Más aun las coordenadas radial y axial del punto de impacto deben ser tales que el impacto ocurra físicamente sobre el álabe:

$$\begin{aligned} z_{D_{im}} &< d + a \\ r_{D_{im}} &< r_{punt} \end{aligned} \quad (19)$$

10 en la que a es la longitud axial del álabe mientras que r_{punt} es el radio de la punta.

De acuerdo con este modelo ilustrativo de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, se supone que las gotitas tienen todas el mismo diámetro. Este diámetro se toma igual al diámetro medio de Soutern d_{32} . Como es conocido por los expertos en la materia, hay disponibles diferentes correlaciones en la literatura. Para las finalidades del modelo ilustrativo presentado en el presente documento del acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, se usa la correlación de Hiroyasu y Kadota (véase, por ejemplo H. Hiroyasu y T. Kadota, "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE Paper 740715 (1974)):

$$d_{32} = A \cdot \Delta p^{-0,135} \rho_a^{0,121} Q^{0,131} \quad (20)$$

en donde d_{32} está en μm , A es una constante geométrica dependiendo de la tobera (igual a 18,82 para una tobera de 28 Gal para la que se presentan los resultados de modelizado en el presente documento con finalidades de ilustración y a modo de ejemplo), Δp es la presión diferencial efectiva media a través de la tobera (MPa), ρ_a es la densidad del aire ambiente (kg/m^3), y Q (mm^3/s) es el caudal volumétrico. Se entenderá por los expertos en la materia que mientras que la correlación propuesta se desarrolló para inyectores diésel, es más que suficiente para muchas implementaciones de modelizado de acuerdo con varias realizaciones de la presente invención.

La masa de cada gotita es entonces:

$$25 \quad m_D = \pi \frac{d_{32}^3}{6} \cdot \rho_{aceite} \quad (21)$$

El caudal en masa \dot{m} (que es bien conocido por la caracterización de la tobera) se enlaza con el tiempo T y el número total M de gotitas inyectadas en ese tiempo mediante la siguiente relación:

$$\dot{m} = \frac{M \cdot m_D}{T} \quad (22)$$

de la que:

$$30 \quad M = \frac{\dot{m} \cdot T}{m_D} \quad (23)$$

Se supone que las gotitas tienen una distribución dada en la dirección radial y una distribución coherente en las direcciones circunferencial y axial tal como se ha explicado en el apéndice. Si m_R es el número de partículas en la dirección radial, el número de partículas en las direcciones circunferencial m_φ y axial m_z son:

$$m_\varphi = \text{redondeo} \left(m_R \frac{2\pi R_{medio}}{s} \right) \quad (24)$$

$$35 \quad m_z = \text{redondeo} \left(m_R \frac{T \cdot V_{iny}}{s} \right) \quad (25)$$

en las que R_{medio} y s son respectivamente el radio medio y el ancho del patrón de espray sobre el plano π_B . En consecuencia el número total de gotitas considerado es:

$$M = m_R \cdot m_\varphi \cdot m_z = m_R^3 \cdot \left(\frac{2\pi R_{medio}}{s} \right) \cdot \left(\frac{T \cdot V_{iny}}{s} \right) \quad (26)$$

Invirtiendo la ecuación (26), una vez que es conocido m_R (claramente redondeando al entero más próximo), también conocidos m_φ y m_z por las ecuaciones (24) y (25).

Resumiendo, la gotita viaja con la velocidad \vec{V}_D dispersándose desde la tobera. Entretanto, el álabe viaja en la dirección tangencial con una velocidad \vec{V}_B . En consecuencia, en el impacto la velocidad relativa entre el álabe y la gotita es:

$$\vec{V}_{imp} = \vec{V}_D - \vec{V}_B \quad (27)$$

DesJardin et ál. formularon, en base a los principios de conservación de la energía, un modelo de impacto para una gotita impactando sobre la superficie. (Véase, por ejemplo, "A Droplet Impact Model for Agent Transport in Engine Nacelles," Proceedings of the 12th Halon Options Technical Working Conference (HOTWC), NIST SP 984, págs. 1-12 (2002)). Uno de los resultados de su trabajo es un criterio para analizar el comportamiento de la gotita tras el impacto. Después del impacto la gotita puede o bien rebotar o bien adherirse sobre la superficie. En particular, con referencia a DesJardin et ál. para detalles adicionales, el criterio establece esencialmente que, si la energía superficial del estado en el impacto (donde la gotita se supone que se dispersa en la superficie en una forma aproximadamente de torta) es menos que la energía disipada durante el impacto entonces la gotita se adhiere a la superficie.

Considerando los análisis de DesJardin et ál. en conexión con las características de la gotita predichas por el modelo previamente presentado y las velocidades de álabe encontradas típicamente en un ensayo típico de caja de rueda, para dichas condiciones, generalmente no tiene lugar el rebote. En consecuencia, bajo dichas condiciones, debido a que el impacto puede analizarse como un impacto completamente inelástico, es más fácil (por ejemplo, que bajo condiciones que incluyen impactos inelásticos incompletos) calcular las fuerzas que se desarrollan en el impacto.

Cada una de las M gotitas bajo consideración impacta en el álabe después del tiempo dado (ecuación (17)). Estos tiempos puedan recogerse en un histograma para tener el número de impactos N que suceden en un cierto intervalo de tiempo $[t, t+dt]$. Con finalidades de ilustración, a modo de ejemplo, se presenta en la FIG. 4 un histograma de impactos considerando una tobera de 28 Gal con una presión barométrica de 10 bar montada en $r_n = 878,5$ mm y $d = 10$ mm sobre una etapa L0 girando a 8000 RPM.

La fuerza transferida al álabe, por la conservación del momento es entonces simplemente:

$$\vec{F}(t) = \frac{m_D \sum_{i=1}^N \vec{V}_{imp,i}}{dt} \quad (28)$$

en la que el índice i individualiza el impacto de partícula único en el intervalo de tiempo $[t, t+dt]$. Las FIGS. 5A-C muestran los componentes de la fuerza en el sistema de referencia $\{r, \delta, z\}$ para el caso ilustrativo representado en el histograma de impactos trazado en la FIG. 4.

Una vez se muestra la fuerza transferida por los impactos de las gotitas inyectadas desde la tobera al álabe en función del tiempo, es posible estudiar el diagrama de fuerzas para cualquier distribución de toberas alrededor de la rueda. A modo de ejemplo, la FIG. 6 muestra la fuerza tangencial transferida a un álabe en 360° de rotación por cuatro toberas del mismo tamaño, uniformemente distribuidas alrededor de la circunferencia en la misma localización radial, bajo las mismas condiciones para el caso ilustrativo de las FIGS. 5A-C, mientras la FIG. 7 muestra la descomposición de fuerzas para la FIG. 6 en términos de sus componentes de Fourier en diferentes XRevs. Para este caso ilustrativo, la FIG. 8 muestra el componente 4XRev de la fuerza en función de la velocidad rotacional, demostrando claramente que el componente 4 XRev se incrementa linealmente con la velocidad de rotación, una relación que también se exhibe (no mostrada) por los otros componentes XRev de la fuerza.

De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, dicho modelizado de la excitación puede usarse en una variedad de formas, tal como para el control de los parámetros de la tobera para generar una excitación deseada. Los grados de libertad ilustrativos en relación al diseño de la excitación incluyen (es decir, pero no están limitados a) los siguientes: número de toberas de spray dirigidas a una etapa dada; tamaño nominal y tipo de spray de las toberas de spray de aceite; caída de presión que actúa sobre la tobera; localización circunferencial de las toberas; distancia axial de cada tobera; y localización radial de cada tobera. Un código dedicado puede manejar los parámetros anteriores para cuantificar la excitación resultante. Puede usarse una rutina de optimización para diseñar la excitación en función de las necesidades de diseño (por ejemplo, necesidades del cliente). Por ejemplo, las necesidades de diseño, deseos, o solicitudes (por ejemplo, en base a necesidades del cliente) pueden implicar la posibilidad de excitar una forma modal de álabe/rueda particular con una excitación desconocida para simular coherentemente condiciones de operación real. Dichas necesidades, deseos, o solicitudes pueden proporcionarse en base a un modelizado de la excitación de acuerdo con las realizaciones de la presente invención.

De acuerdo con algunas realizaciones, en base a dicho modelizado de la excitación, la fuerza de excitación impartida por el fluido inyectado por las toberas puede controlarse de modo que la intensidad de excitación sea una función deseada de la velocidad de rotación. Por ejemplo, puede ser deseable para ciertos ensayos controlar la fuerza de excitación de modo que sea aproximadamente igual para diferentes velocidades de rotación (por ejemplo, una fuerza de excitación constante en función de la frecuencia de rotación), tal como velocidades de rotación a las que se excitan diferentes modos. Adicionalmente, tal como se explica adicionalmente a continuación, dicho modelizado de excitación proporciona un análisis de entrada-resultados de la dinámica del sistema (por ejemplo, para determinar factores de amortiguación y/u otras propiedades mecánicas del sistema) para caracterizar más precisamente y/o más completamente el sistema. Por ejemplo, dicho modelizado de excitación permite que sean analizadas diferentes respuestas del sistema medido (por ejemplo, a diferentes frecuencias) con relación a sus fuerzas de excitación respectivas (por ejemplo, normalización de respuestas en relación a sus excitaciones).

Los métodos y sistemas de acuerdo con las varias realizaciones de la presente invención también proporcionan la ejecución del denominado "análisis tonal" sobre las señales adquiridas desde los medidores de tensiones durante un ensayo. Más específicamente, en algunas realizaciones, el código de procesamiento posterior es operativo para analizar las señales de los medidores de tensiones para ejecutar un análisis tonal para estudiar las diferentes resonancias de forma de álabes/rueda modal durante el ensayo. Esto es, el análisis tonal proporciona la determinación de la forma modal/configuración nodal entre los álabes, y, de acuerdo con varias realizaciones de la presente invención, pueden implicar el uso de información de fase de la respuesta de los medidores de tensiones para identificar un modo acoplado.

La FIG. 9 es un diagrama de flujo que representa las etapas ilustrativas para la realización del análisis tonal de acuerdo con una realización de la presente invención. Después de que se hayan ensayado una o más etapas de álabes de turbina para adquirir mediciones de los medidores de tensión para dos o más álabes (preferiblemente, para un número de álabes para proporcionar datos suficientes para identificar los diámetros modales que pueden ser de interés) a través de un intervalo de RPM (etapa 902), el conjunto de datos correspondientes puede almacenarse en términos de amplitud (magnitud) y fase de la respuesta (por ejemplo, en base a un cálculo de FFT) con respecto a cada orden motor (es decir, XRev).

En la etapa 904, para un orden motor dado ("XRev"), para cada uno de un conjunto de álabes, para los que se han adquirido datos (por ejemplo, dos o más álabes, y preferiblemente un número suficiente para la evaluación de un diámetro nodal de interés), se analiza la respuesta de los medidores de tensión (por ejemplo, magnitud de la FFT) sobre una banda estrecha de RPM correspondiente a una posible región de resonancia para confirmar si los álabes pueden estar en un modo de resonancia acoplado. Por ejemplo, este análisis puede incluir la confirmación de que (i) cada uno de los álabes está en resonancia para la XRev dada en el intervalo de RPM de interés, tal como puede determinarse, por ejemplo, en base a si la señal de amplitud para cada álabes tiene un pico característico de resonancia (por ejemplo, en base a un umbral de amplitud y/o forma de la señal de amplitud, tal como la relación de pico a ancho total a mitad del máximo, etc.), y (ii) la resonancia puede considerarse como acoplada (por ejemplo, en base a las frecuencias respectivas de las amplitudes de pico que están a o cerca de la misma frecuencia). Si se determina que los álabes no están en un estado de resonancia acoplado (etapa 906), entonces se determina si se analizarán datos adicionales (etapa 912) (por ejemplo, en base a entradas del usuario y/o si hay disponibles datos adicionales para un posible análisis).

Alternativamente, en la etapa 906, si se determina que los álabes están probablemente en un estado de resonancia acoplada, entonces se analizan los datos de fase correspondientes para cada uno de los álabes (etapa 908) para identificar o extraer en otra forma valores de fase para cada uno de los álabes. De acuerdo con algunas realizaciones, este análisis incluye la determinación de si hay coherencia entre los datos de fase en la región de resonancia. Dicha evaluación de coherencia puede, por ejemplo, implementarse mediante la selección de los datos de fase para uno de los álabes como datos de fase de referencia, y la resta de estos datos de fase de referencia de los datos de fase para cada uno de los otros álabes a través de un intervalo de valores de RPM en la vecindad de la señal de resonancia (por ejemplo, dentro y fuera de la ventana, tal como se definirá por el ancho de la resonancia de amplitud FFT) de la resonancia. La coherencia entre las fases puede deducirse, por ejemplo, mediante cada una de estas señales de diferencia de fase demostrando una señal de fase bien definida dentro de la ventana de resonancia (por ejemplo, relativamente al ruido, rápidamente variable, o variación de fase aleatoria, que puede presentarse fuera de la ventana de resonancia). Para cada uno de los álabes, puede determinarse un valor de fase de la resonancia como el valor de fase FFT correspondiente (o como el valor de fase de la señal diferencia, en cuyo caso la fase del álabes de referencia es cero) a la frecuencia de resonancia (por ejemplo, tal como se determina de acuerdo con amplitud de pico).

Se analizan entonces los valores de fase extraídos para los álabes para identificar un diámetro nodal asociado con la resonancia. De acuerdo con una realización de la presente invención, el diámetro nodal para el modo acoplado puede determinarse de acuerdo con la correlación de los datos de fase con una distribución de fase teórica para un diámetro nodal dado, en el que la distribución de fase teórica puede representarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\phi_i(n) = \left(\frac{360 * ND}{N_b} \right) \cdot (n-1) \quad (29)$$

en la que ϕ_i es la fase teórica, ND es el número de diámetro nodal, N_b es el número total de álabes, y n es un entero desde 1 a N_b que identifica el álabe enésimo. Como puede entenderse, se supone que el primer álabe (es decir, $n = 1$) tiene una fase de cero, y corresponde al álabe de referencia al que se referencian las fases relativas y el número de álabe relativo de los otros álabes. Dicho análisis puede realizarse en cualquiera de una variedad de formas, tal como mediante comparación de las fases medidas con las fases teóricas calculadas para cada uno de un cierto número de diámetros nodales, mediante la realización de un cálculo de mejor ajuste (por ejemplo, mínimos cuadrados) para extraer ND , etc. Como puede entenderse por los expertos en la materia, y tal como se ha indicado anteriormente, la identificación de un número de diámetro nodal dado requiere datos que corresponden a un mínimo suficiente de número de álabes. En caso contrario, puede identificarse una condición de "solo necesario".

Después de que se haya realizado el análisis del diámetro nodal para el conjunto de datos dado, pueden analizarse datos adicionales (por ejemplo, correspondientes a otros XRevs) (por ejemplo, etapa 912) de acuerdo con el análisis tonal descrito para identificar configuraciones modales adicionales excitadas durante el ensayo.

Como se entenderá a partir de lo anterior, de acuerdo con implementaciones alternativas, no es necesario confirmar que cada uno de los álabes presenta una resonancia analizando cada una de sus señales de amplitud respectivas (por ejemplo, tal como en la etapa 904) antes del análisis de los datos de fase. Por ejemplo, con o sin referencia a las señales de amplitud para uno o más álabes, los datos de fase de los XRevs correspondientes para diferentes álabes pueden analizarse para identificar regiones coherentes, a partir de las que pueden extraerse los valores de fase respectivos y evaluarse la coincidencia de diámetro nodal. Más aún, en algunas implementaciones, es alternativamente o adicionalmente no necesario evaluar la coherencia de los datos de fase en sí antes del procesamiento de los datos de fase para extraer los valores de fase que se pueden usar para identificar una correlación de las fases del álabe con un diámetro nodal debido a que, por ejemplo, si o no (o el grado en el que) los valores de fase extraídos para los diferentes álabes dan como resultado una correlación con significado o significativa con un diámetro nodal con sí mismo es indicativo de si los álabes corresponden a un modo acoplado. También, de acuerdo con algunas implementaciones, la evaluación de cada una de las señales de amplitud respecto a resonancia (por ejemplo, etapa 904) y/o evaluación de la coherencia de los datos de fase dentro de la ventana de resonancia antes de la extracción de los valores de fase de los mismos, proporciona una confirmación adicional de la existencia de un modo acoplado.

Puede entenderse, de acuerdo con el modelo de excitación presentado en el presente documento, que debido a que el modelo de excitación proporciona la descomposición o representación en otra forma de la excitación aplicada en términos de componentes que corresponden a las respuestas medidas a diferentes frecuencias de respuesta, la dinámica del sistema medido puede caracterizarse de acuerdo con técnicas entrada-salida que se aplican a los datos medidos. En consecuencia, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, pueden extraerse parámetros distintos a los parámetros de salida-salida estándar a partir de los datos de ensayo. Por ejemplo, puede determinarse la correlación entre los niveles de vibración del álabe y la función de forzado. Esto es, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, mediante la relación de la respuesta del sistema (por ejemplo, no solamente en términos de amplitud, sino también en términos de fase) con la cuantificación de la excitación, pueden determinarse factores de amortiguación, correlaciones de fuerza-respuesta, etc., asociados con cada forma modal. Por ejemplo, en algunas implementaciones, puede usarse un programa de modelizado disponible comercialmente (por ejemplo, ANSYS) para implementar un modelo que usa una fuerza de excitación calculada de acuerdo con el modelo expuesto en el presente documento como una entrada, y determina un factor de amortiguación como un parámetro que se ajusta (por ejemplo optimiza) para proporcionar las características de salida medidas durante el ensayo de caja de rueda (por ejemplo, una estimación del mejor ajuste). De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, dicha información (por ejemplo, factores de amortiguación, correlaciones fuerza-respuesta, etc.) proporcionados por el análisis entrada-salida proporcionan la predicción de la respuesta en operación real mediante escalado de la respuesta en la caja de rueda con fuerzas aerodinámicas simuladas.

Además, se hace notar que la mayor parte de los algoritmos salida-salida realizan un cierto conjunto de hipótesis o suposiciones para extraer parámetros del modelo. Entre otras, una importante hipótesis/suposición es la linealidad del sistema. Con más detalle, estos métodos suponen típicamente que los parámetros característicos del sistema son independientes del nivel de excitación. En máquinas reales, sin embargo, hay una miríada de recursos de no linealidad, y de ese modo la fiabilidad de esta hipótesis de linealidad debería al menos verificarse y/o evaluarse el grado de no linealidad para la aplicación de estas técnicas salida-salida. Como se entenderá por los expertos en la materia, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, esto puede evaluarse ahora.

El siguiente ejemplo se proporciona para ilustrar algunas realizaciones de la presente invención y características y ventajas de la misma, y no se pretende que limite la presente invención. Como se entenderá a partir de los resultados explicados a continuación, las implementaciones de la presente invención proporcionadas para una caracterización más profunda de una etapa de turbina en términos de análisis modal, frecuencias naturales, forma modal de la rueda (configuración de nodos diametrales), forma modal del álabe (curvado, axial, torsional) y también para medición del factor de amortiguación asociado a las diferentes formas modales.

Más específicamente, a continuación se presentan algunos resultados ilustrativos obtenidos a partir de un ensayo de caja de rueda, en el que la organización experimental incluye ruedas a escala completa para una etapa de baja presión HS8 instalada en un búnker de sobrevelocidad en vacío para una disposición de ensayo similar a la representa esquemáticamente en la FIG. 1. Esta disposición proporcionó la excitación de los álabes con N toberas alimentadas con aceite (f excitación = $N \times \text{Rev}$ y múltiplos), regulando el flujo de masa para cada uno de los espray de tobera mediante el ajuste de la presión de entrada y el diámetro de toberas, y variando la velocidad del equipo desde 0 a 125 % para capturar todos los modos en el intervalo operativo. Adicionalmente, la fuerza de excitación se modelizó analíticamente, tal como de acuerdo con la modelización descrita en el presente documento anteriormente.

Las cuatro etapas de baja presión bajo análisis se instrumentaron con 50 medidores de tensión de elevado ancho de banda. Las posiciones de los medidores de tensión se eligieron con el uso de un modelo de elementos finitos (FE) para detectar todos los modos de interés con una sensibilidad adecuada y todos los sensores se encaminaron eventualmente a la caja de transmisión de telemetría colocada en el extremo del eje, que transmitió las señales de los medidores de tensión a un sistema de adquisición de datos. El sistema de telemetría usado para este ensayo fue un tipo de modulación de frecuencia de Datatel, que permitió la realización de la cadena de medición completa con un nivel de ruido por debajo de 0,2 de microtensión a través de todo el dominio de frecuencia. Esto condujo a unas mediciones de alta calidad, que permitió la apreciación de todos los modos de vibración, también fuera de resonancia.

El sistema de adquisición de datos recogió tanto los parámetros de variación lenta (estáticos) (por ejemplo, presión, temperaturas del sistema de chorro de aceite, etc.) como los parámetros dinámicos (señales de los medidores de tensión). El sistema estático fue principalmente un Datalogger Agilent 34970 conectado a través de GPIB a un PC, y los datos adquiridos se compartieron con el sistema dinámico por medio de una rutina de software personalizada. El sistema fue capaz de acumular datos sobre una cinta AIT con un ancho de banda de 20 kHz, y adquirirlos en tiempo real en el dominio de la frecuencia de una transformada de Fourier rápida (FFT) cada 200 ms para cada canal. Para la FFT, se usaron los siguientes ajustes: tamaño de bloque de datos = 2048 pt, velocidad de muestreo = 12,8 miles de muestras por segundo, lo que significa 5 kHz de ancho de banda con una resolución de 6 Hz. Si era requerida una resolución más alta, fue siempre posible re-muestrear los datos a partir de las cintas AIT con diferentes ajustes. Todos los canales se sincronizaron tanto en tiempo real como en reproducción; y el retardo de fase entre canales fue menor de 1 grado. Los datos FFT se almacenaron y procesaron a través de un software a diagramas de Campbell.

El resultado principal del ensayo de caja de rueda es el diagrama de Campbell de la fila de álabes. La FIG. 10 muestra el Campbell del álabes L0 (última etapa). Las frecuencias de modo del álabes se detectaron donde tenían lugar picos de respuesta. En el cruce con los órdenes motores ("XRev"), en donde la excitación debida a la frecuencia de paso del chorro de aceite (y armónicos) coincidía con la frecuencia de los modos acoplados del álabes, tuvo lugar resonancia. Este nivel de análisis permitió normalmente la determinación del Campbell del álabes, pero para evaluar la amortiguación de la fila de álabes se requirieron elaboraciones adicionales de los datos.

Dado que en el ensayo de caja de rueda la intensidad de la excitación (espray de aceite) se incrementa en función de la velocidad de rotación (para un caudal en masa de aceite dado), la respuesta de resonancia a una velocidad más alta se espera que muestre valores más altos. Sin embargo, al incrementar la velocidad también provoca un incremento en las fuerzas de contacto entre cubiertas (y en las colas de milano), por tanto una reducción de la amortiguación por fricción, lo que podría representar una causa adicional de incremento en la respuesta. Por lo tanto, para evaluar correctamente qué parte de la respuesta incrementada se debe realmente a una amortiguación más baja, en lugar del simple incremento de la excitación, y para comparar la respuesta del álabes a diferentes velocidades y condiciones es importante obtener cierta percepción de la fuerza de excitación y su contenido en frecuencia.

En el pasado, el chorro de aceite se modelizó simplemente como una función de "impulso cuadrado". De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, sin embargo, durante estos experimentos, se realizó un intento para describir la forma de la excitación en una base más física mediante la implementación de dos modelos: uno en base a un enfoque Euleriano y otro en base al enfoque Lagrangiano (por ejemplo, tal como se ha descrito en el presente documento anteriormente). Los modelos se usaron para determinar el contenido en frecuencia de la excitación para las condiciones de ensayo dadas (por ejemplo, flujo en masa, velocidad de rotación, tipo de tobera y geometría de la etapa).

El diagrama indicado en la FIG. 11A muestra la respuesta medida de seis álabes diferentes en cinco cruces diferentes (es decir, a diferentes velocidades). Debido a los efectos de desajuste hay una cierta variabilidad de respuesta de álabes a álabes, pero el incremento en la amplitud de la respuesta es bastante evidente y la relación entre la respuesta media a 5XRev y la respuesta media a 9XRev es aproximadamente 4. Usando esta representación de los datos experimentales, no es posible distinguir qué parte del incremento en la respuesta es debido a la variación de la excitación y cuál es debido a la disminución de la amortiguación, que se espera a velocidad más alta. Cuando el mismo conjunto de datos se normaliza a través del componente armónico de la excitación determinado de acuerdo con el modelizado de la excitación, se aísla el efecto de la reducción de la amortiguación. Los datos normalizados, mostrados en la FIG. 11B, muestran una tendencia más suave, siendo la relación entre la respuesta media normalizada a 5XRev y la respuesta media normalizada a 9XRev de

aproximadamente 1,8, en comparación con aproximadamente 4,0 para los datos no normalizados (es decir, mostrados en la FIG. 11A). Dicha metodología se ha aplicado también para comparar las respuestas de álabes diferentes bajo una excitación normalizada. En particular la respuesta de un nuevo álabe de la última etapa de una turbina de vapor se ha comparado con la respuesta de una existente y probada.

5 Los sistemas de simetría cíclica acoplada, como álabes de turbinas con corona, tienden a comportarse como una única estructura vibratoria y por ello a mostrar soluciones modales simétricas cíclicas que pueden verse como un “modo acoplado”, lo que se ha documentado bien, por ejemplo, Singh, “SAFE diagram”, Technology Report ST 16, Dresser-Rand Company (1984); y Singh et ál. “SAFE Diagram-A Design Reliability Tool for Turbine Blading”, *Proceedings of the Seventeenth Turbomachinery Symposium*, Texas A&M University (1988), págs. 93-101 (véase también, Dresser-Rand Technical Papers TP024, TP025 de Singh et ál.). Estas soluciones modales simétricas cíclicas se denominan normalmente soluciones de diámetro nodal debido a que se caracterizan por la presencia de N diámetros simétricamente situados (ND) en los que el desplazamiento modal es aproximadamente cero.

15 En ensayos experimentales (como la caja de rueda, o vehículo de ensayo), la identificación de las soluciones ND es una tarea más compleja por al menos las siguientes razones. Primero, el resultado tradicional supervisado durante el ensayo de álabes de turbinas es el espectro de la señal de los medidores de tensiones en términos de amplitud y frecuencia. Por lo tanto, no es directo evaluar si los picos de respuesta medidos son relevantes para formas de modos de “álabe único” o “acoplado”. Segundo, la forma espacial de la excitación ha de ser consistente con la forma del modo de la solución ND para transferir energía al modo y hacer la respuesta detectable. Por lo tanto solo se espera observar durante el ensayo algunos modos ND. Tercero, el sistema de álabes y eje tiene un comportamiento desajustado debido a las pequeñas diferencias geométricas introducidas por el proceso de fabricación. Este desajuste provoca usualmente la presencia de dobles picos, lo que hace el análisis de datos más complejo.

25 En la investigación realizada, se usó la fase de la respuesta del medidor de tensión para verificar si un pico de amplitud de vibración detectado podría asociarse a un “modo acoplado”, y en caso de respuesta positiva se usó la fase para determinar el número de diámetros nodales del modo detectado. La suposición básica detrás de esta metodología es que en el “modo acoplado”, todos los álabes vibran en fase. En el ensayo para una fila L0 (última etapa), solo se instrumentaron seis álabes (concretamente, en orden, los álabes 1, 7, 14, 21, 28 y 35) de los 40; por lo tanto, se esperaba que esta metodología diera una demostración suficiente del número de ND justo para las soluciones hasta 6 diámetros nodales.

30 El sistema de adquisición usado durante el ensayo fue capaz de seguir la amplitud y la fase de la respuesta de cada orden motor (“XRev”). En este caso, al ajustar uno de los medidores de tensión como referencia, es posible leer la evolución de la fase relativa de los otros a través de todo el intervalo de rpm.

35 Las FIGS. 12A-F muestran la magnitud (es decir, a partir de las FFT) de las respuestas (trazadas como micro-tensiones respecto a rpm) y las FIGS. 12G-L muestran la fase correspondiente respectiva (es decir, desde las FFT, usando el álabe 1 como referencia) de las respuestas (trazadas como grados respecto a rpm) para los seis medidores de tensión, en el orden de álabes (por ejemplo, la FIG. 12A y la FIG. 12G representan la magnitud y fase, respectivamente, para el medidor de tensión del álabe 1, la FIG. 12B y la FIG. 12H son la magnitud y fase para el medidor de tensión del álabe 7, etc.). Los trazados se extrajeron a lo largo del orden motor 6.º del Campbell mostrado en la FIG. 13. Según se ha indicado, las fases trazadas se calcularon usando el primer álabe como referencia (por ejemplo, para cada uno de los álabes, los datos de fase dibujados representan la diferencia entre la fase calculada en FFT para ese álabe y la fase calculada en FFT para el primer álabe) y los trazados se enfocaron en una banda estrecha de RPM y se extrajeron para un específico “XRev” (6.º en este caso) del diagrama de Campbell.

45 En referencia a las FIGS. 12A-G, cuando aparece claramente un pico en la amplitud en todos los trazados de magnitudes (resonancia), puede notarse un comportamiento de fase coherente en los trazados de fase en el lado derecho, mientras que fuera del pico el comportamiento de fase es incoherente o aleatorio. En otras palabras, las fases pueden leerse o determinarse en otra forma en una ventana con coherencia que corresponde a una condición de resonancia (por ejemplo, se determinan las fases en el pico de resonancia), porque separado de o fuera de la proximidad del pico de amplitud la información de fase aparece como esencialmente aleatoria. La existencia de una fase coherente evidencia que la resonancia observada es relevante para un “modo acoplado”. Dado que el modo es el cruce de una excitación en 6 XRev, la solución ND más reactiva se espera que sea la 6ND.

55 Para soportar esta hipótesis, los ángulos de fase registrados se trazaron sobre un gráfico polar y se compararon con la fase teórica de una solución modal 6 ND de acuerdo con el siguiente procedimiento (1) cálculo de la fase teórica, $\phi_i(n)$, de cada álabe usando la ecuación (29) anterior para un valor de ND dado (por ejemplo, ND = 6 para este ejemplo); (2) trazado sobre un gráfico polar del desplazamiento del álabe teórico para cada álabe (por ejemplo, mostrando una curva a través de los valores de desplazamiento de álabe teóricos) mediante cálculo para cada valor de fase teórico del desplazamiento $d(n)$ del enésimo álabe como el coseno del valor de fase teórica (es decir, $d(n) = \cos[\phi_i(n)]$); y (3) en el mismo gráfico polar, trazar el desplazamiento de los álabes medidos de acuerdo con la fase medida (es decir, cálculo, para cada álabe medido, de $d(n)$ como el coseno de la fase medida). El trazado polar permite así visualizar la disposición ND teórica como una referencia con respecto a los desplazamientos correspondientes a las fases medidas.

60

La FIG. 14 muestra el resultado de este procedimiento con los valores procedentes del ensayo experimental representado por las FIGS. 12A-L (correspondiente a la resonancia a lo largo del 6.º XRev), e indica que la coincidencia con ND=6 parece muy buena. (Nótese, que los valores de fase medidos, en grados, para los álabes 1, 7, 14, 21, 28, y 35 fueron 0, 49,96491, -15,3813, -8,71609, -6,6103, y -15,0029, respectivamente). Se ha de observar que los desplazamientos teóricos calculados en esta forma no están específicamente vinculados a ninguna forma de modo vibratorio particular (axial, tangencial o torsional), sino solamente a la configuración nodal. El desplazamiento teórico $d(n)$ calculado de acuerdo con las fases teóricas (tal como se ha descrito anteriormente) muestra simplemente como se desplazan los álabes en el intervalo $+1/-1$ de acuerdo con el ND especificado en la ecuación (29). El mismo análisis se repitió también con éxito para el cruce 4XRev con el primer modo, y el diagrama polar representado en la FIG. 15 confirma que, tal como se esperaba, se halló una solución 4ND.

Un ejemplo clásico para un efecto de desajuste se observó en el cruce 5XRev, para el que los datos de magnitudes (microtensión respecto a rpm) se representan en las FIGS. 16A-F y los datos de fase correspondientes (grados respecto a rpm) se representan en las FIGS. 16G-L, respectivamente, para cada uno de los seis álabes medidos, en orden (es decir, álabes 1, 7, 14, 21, 28 y 35). En los trazados de amplitud, se puede observar como algunos álabes (7, 14 y 35) muestran múltiples picos. Realizando el mismo análisis descrito anteriormente se revela que tiene lugar una configuración 5ND coherente a aproximadamente 8980 rpm, lo que se representa en la gráfico polar de la FIG. 17A. Los siguientes picos, respectivamente a 9010 y 9055 rpm, no muestran una coincidencia completa con el 5ND teórico; de hecho, en ambos casos, los álabes 7 y 35 se muestran fuera de fase en aproximadamente 90°. La presencia de picos adicionales puede interpretarse como un modo de ábabe único que debido al efecto de la variabilidad de fabricación en el contacto de cubierta se suprime en algunos álabes y es visible en otros. Sin embargo, pasando a través de 9080 y 9115 rpm, la etapa muestra de nuevo una respuesta coherente, coincidiendo respectivamente con configuraciones 6ND y 7ND teóricas, como puede verse en las representaciones del gráfico polar de las FIGS. 17B y 17C, respectivamente.

En suma, en los resultados del ensayo se mostró una coincidencia muy buena con la simulación numérica (por ejemplo, usando ANSYS), permitiendo un análisis entrada-salida, proporcionando también la posibilidad de tener información detallada que se puede usar para reiterar sobre el modelo cambiando las condiciones límite en consecuencia. Adicionalmente, junto con la salida estándar de un análisis experimental (por ejemplo, diagrama de Campbell, diagrama en cascada), la técnica, por medio de un análisis de fase, también permite obtener información precisa sobre la forma modal de la rueda y de los álabes. Dependiendo del número total de medidores de tensión usados, la técnica puede identificar las formas modales únicamente (condición necesaria y suficiente). En otros casos, la técnica proporciona la información necesaria que se puede usar junto con simulación numérica para proporcionar la parte suficiente.

La presente invención se ha ilustrado y descrito con respecto a realizaciones específicas de la misma, realizaciones que son meramente ilustrativas de los principios de la invención y no se pretende que sean exclusivas o realizaciones limitativas en otra forma. En consecuencia, aunque la descripción anterior de las realizaciones ilustrativas de la presente invención, así como varias modificaciones ilustrativas y características de la misma, proporcionan muchas especificidades, estos detalles permitidos no deberían interpretarse como limitativos del alcance de la invención, y se entenderá claramente por los expertos en la materia que la presente invención es susceptible de muchas modificaciones, adaptaciones, variaciones, omisiones, adiciones e implementaciones equivalentes sin apartarse de este alcance y sin disminuir sus ventajas que la acompañan. Por ejemplo, excepto en el grado necesario o inherente a los procesos en sí, no está implícito ningún orden particular de las etapas o fases de métodos o procesos descritos en la presente divulgación, incluyendo las figuras. En muchos casos el orden de las etapas de procesos puede variarse, y varias etapas ilustrativas pueden combinarse, alterarse, u omitirse, sin cambiar la finalidad, efecto o importancia de los métodos descritos. Se ha de observar adicionalmente que los términos y expresiones se han usado como términos de descripción y no términos de limitación. No hay intención de usar los términos o expresiones para excluir ningún equivalente de las características mostradas y descritas o partes de la misma. Adicionalmente, la presente invención puede ponerse en práctica sin proporcionar necesariamente una o más de las ventajas descritas en el presente documento o entenderse de otra forma a la vista de la divulgación y/o que puede realizarse en algunas realizaciones de la misma. Se pretende por lo tanto que la presente invención no está limitada a las realizaciones divulgadas sino que debería definirse de acuerdo con las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para proporcionar la caracterización de al menos un álabe de turbina, comprendiendo el procedimiento el procesamiento de señales recibidas desde sensores directa o indirectamente acoplados a los álabes de turbina mecánicamente excitados por un líquido, en el que el procesamiento se realiza de acuerdo con un modelo cuantitativo de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina por el líquido, estando controlado el impacto del líquido sobre el al menos un álabe de turbina de acuerdo con dicho modelo cuantitativo de la fuerza de excitación impartida sobre el al menos un álabe de turbina por el líquido.
2. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el procesamiento comprende la determinación de la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad de los álabes de turbina.
- 10 3. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende adicionalmente:
el giro de un rotor al que está acoplado mecánicamente el al menos un álabe de turbina, girando de ese modo el al menos un álabe de turbina; y
el impacto del líquido sobre el álabe de turbina durante la rotación del al menos un álabe de turbina.
- 15 4. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el líquido se hace impactar sobre el al menos una álabe de turbina a través de al menos una tobera.
5. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el procesamiento implica el análisis de la información de fase desde los sensores para determinar la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad del al menos un álabe de turbina.
- 20 6. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que los sensores comprenden medidores de tensión mecánicamente acoplados a los álabes de turbina.
7. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la excitación mecánica se proporciona mediante el impacto de líquido sobre el al menos un álabe de turbina, y en el que el impacto de líquido sobre el al menos un álabe de turbina es controlado de acuerdo con el modelo de fuerza de excitación.
- 25 8. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, reivindicación 3 o reivindicación 7, en el que el modelo de fuerza de excitación proporciona la fuerza de excitación en función del tiempo y/o proporciona los componentes de frecuencia de la fuerza de excitación o contenido armónico.
9. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, en el que el procesamiento comprende la determinación de la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad de los al menos un álabe de turbina.
- 30 10. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el procesamiento comprende el procesamiento de las señales de fase recibidas desde los sensores para determinar la forma modal/configuración nodal entre una pluralidad de los álabes de turbina.
11. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, reivindicación 3 o reivindicación 7, en el que el líquido es un aceite.
- 35 12. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2 o 5 o 9 o 10, que comprende adicionalmente relacionar la respuesta de los álabes de turbina determinada por el análisis de forma modal/configuración nodal con la cuantificación de la excitación para proporcionar factores de amortiguación asociados con al menos una forma modal/configuración nodal.
- 40 13. Al menos un medio legible por ordenador que almacena programación que cuando se ejecuta por al menos un ordenador es operativo en el al menos un ordenador implementando un procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
14. Un sistema que comprende el al menos un medio legible por ordenador de acuerdo con la reivindicación 13.

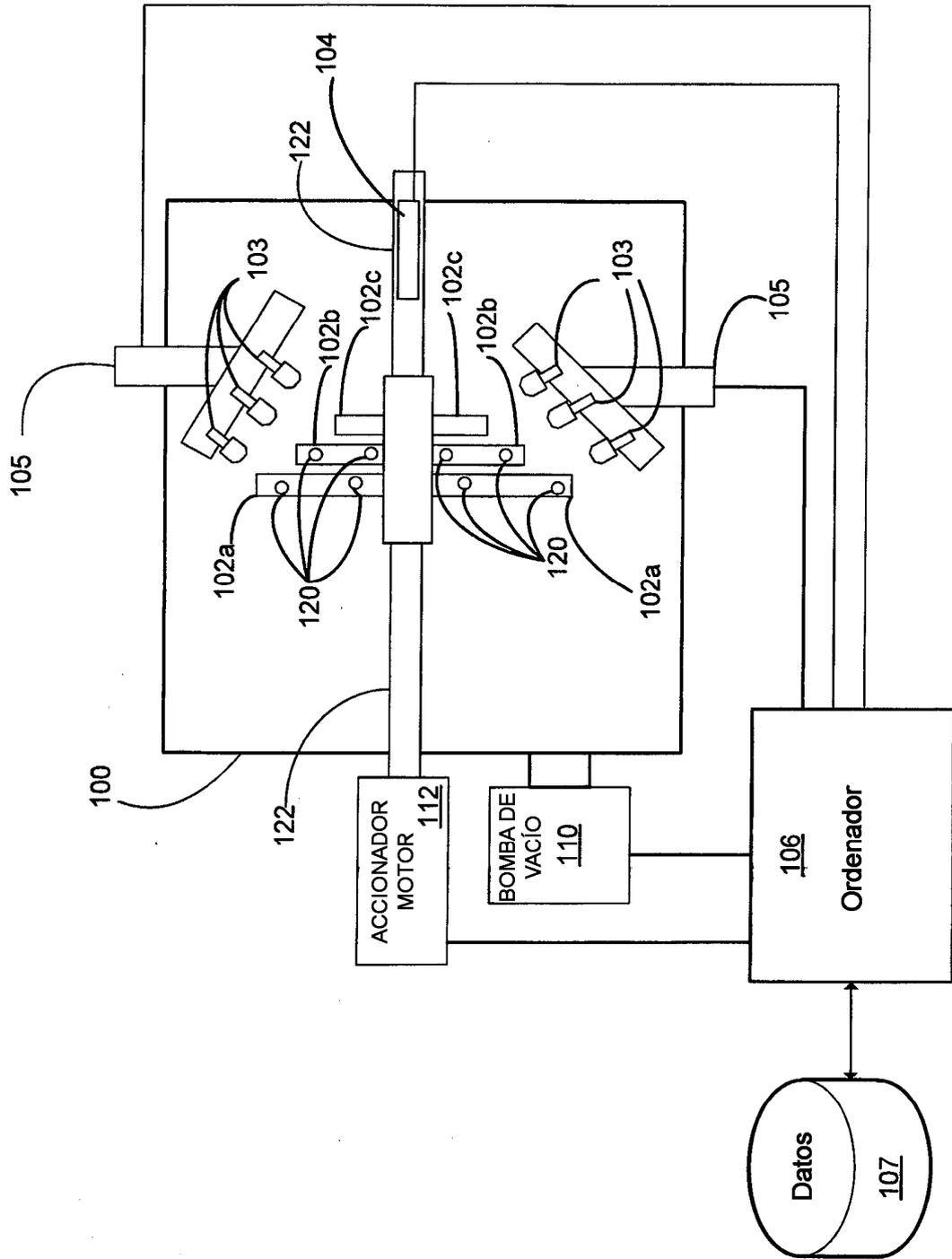


FIG. 1

FIG. 2A

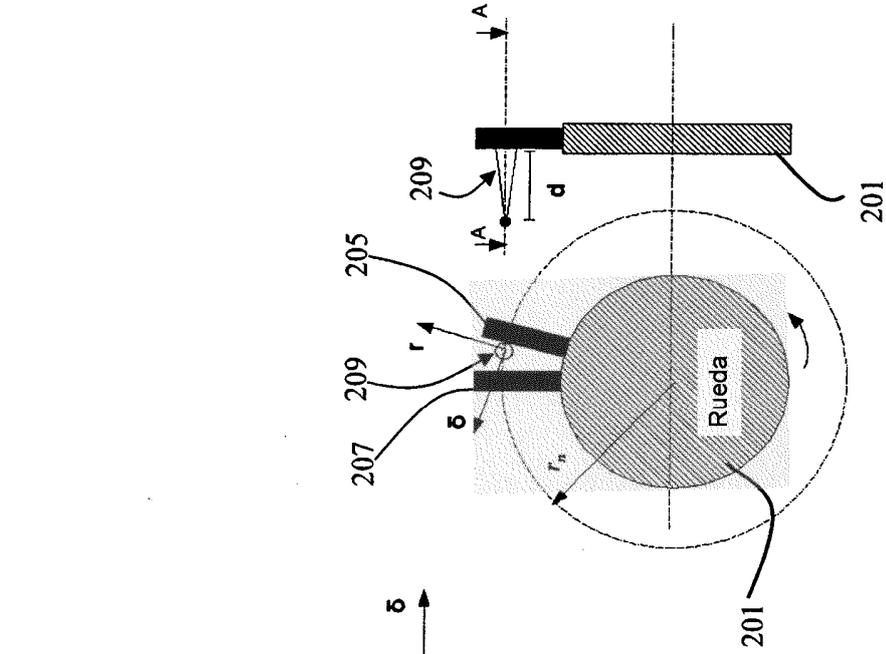
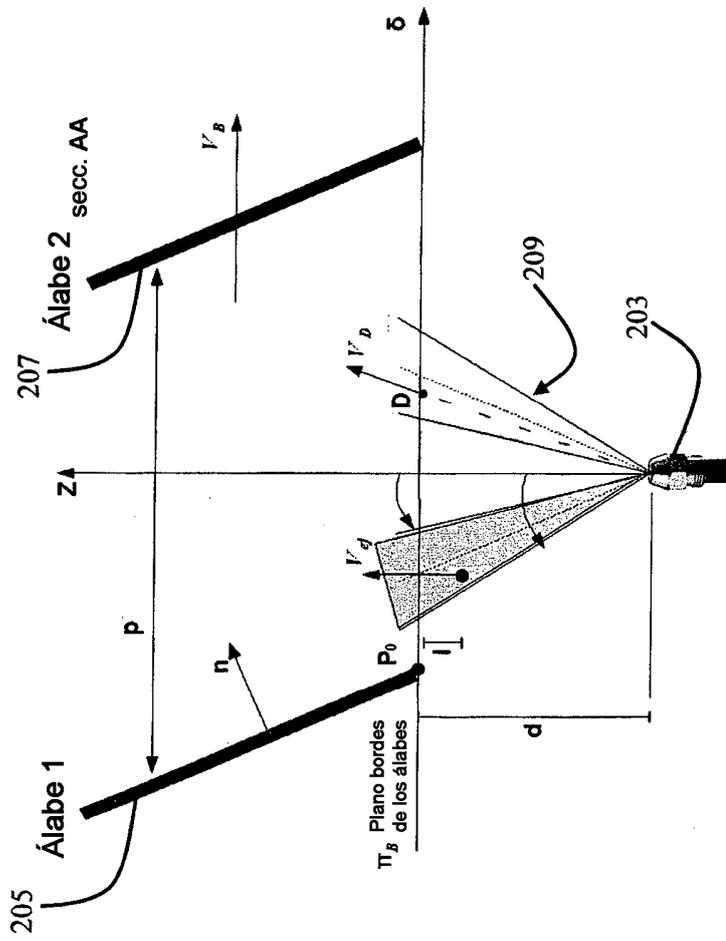


FIG. 2B

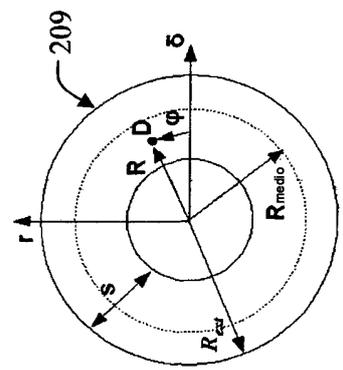


FIG. 2C

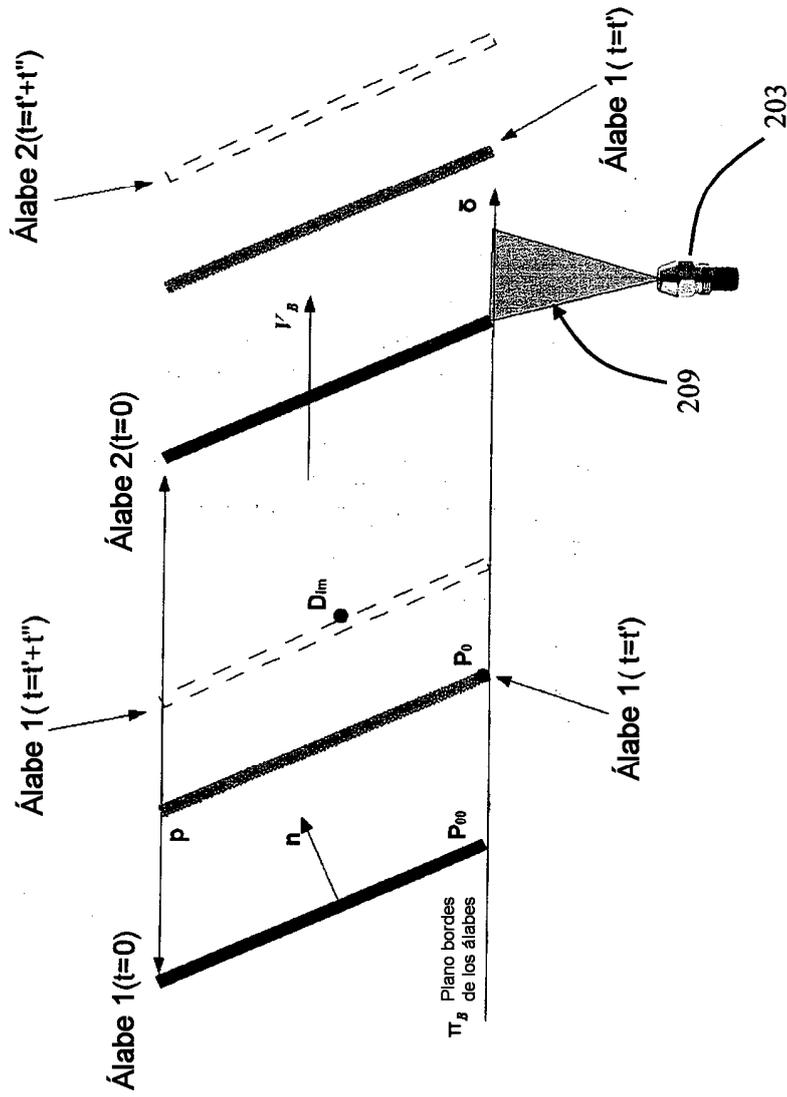


FIG. 3

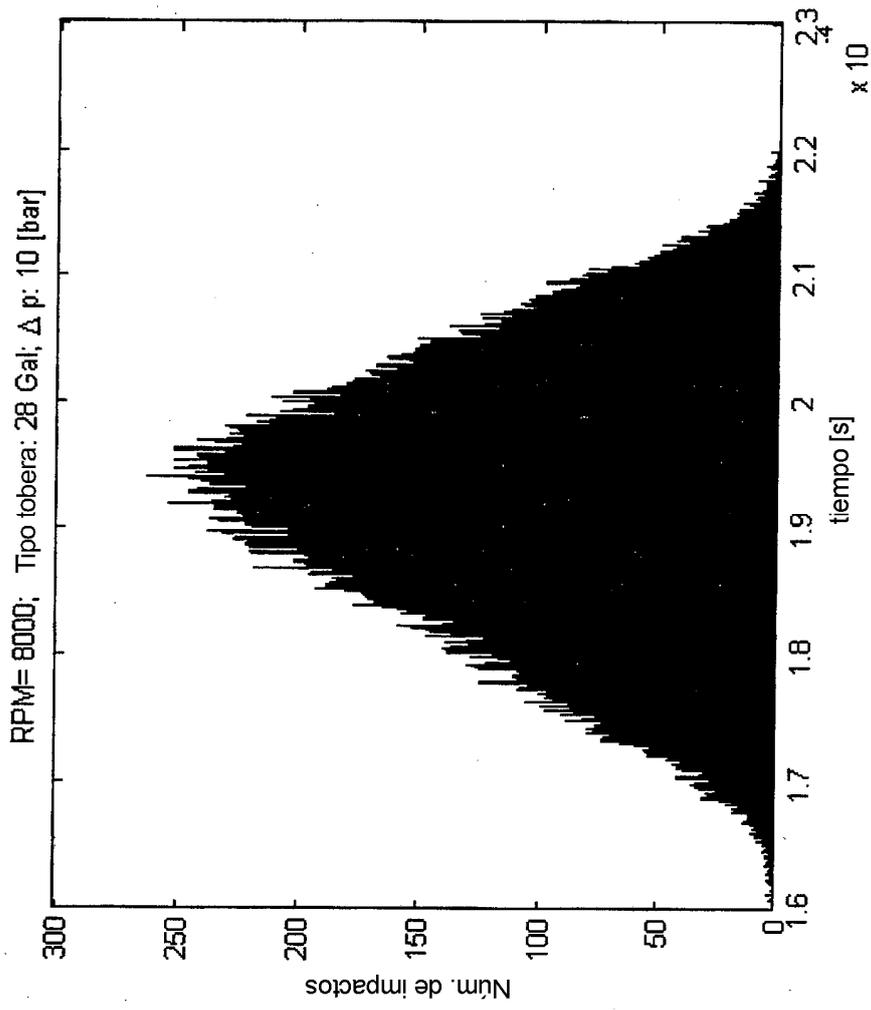
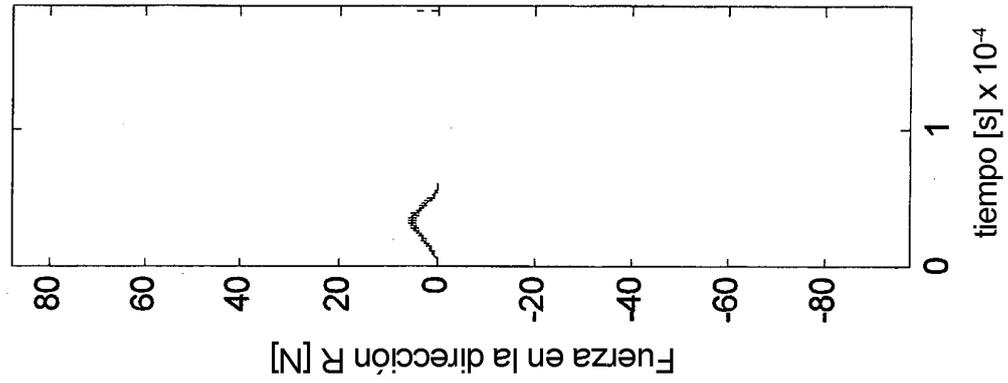
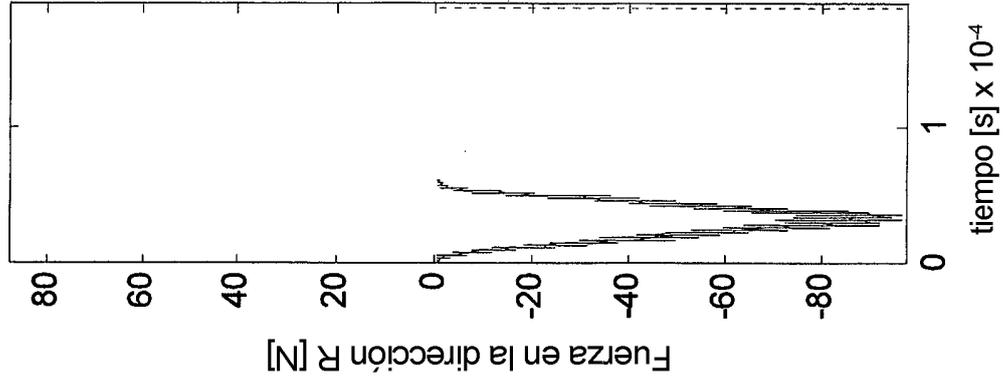
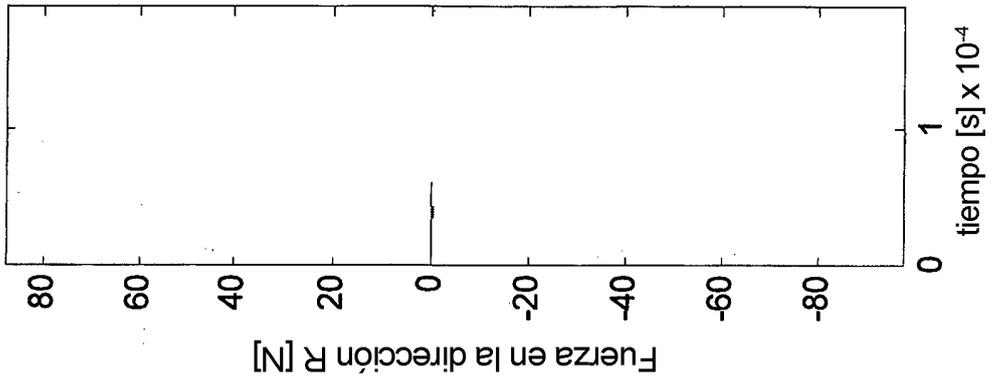


FIG. 4



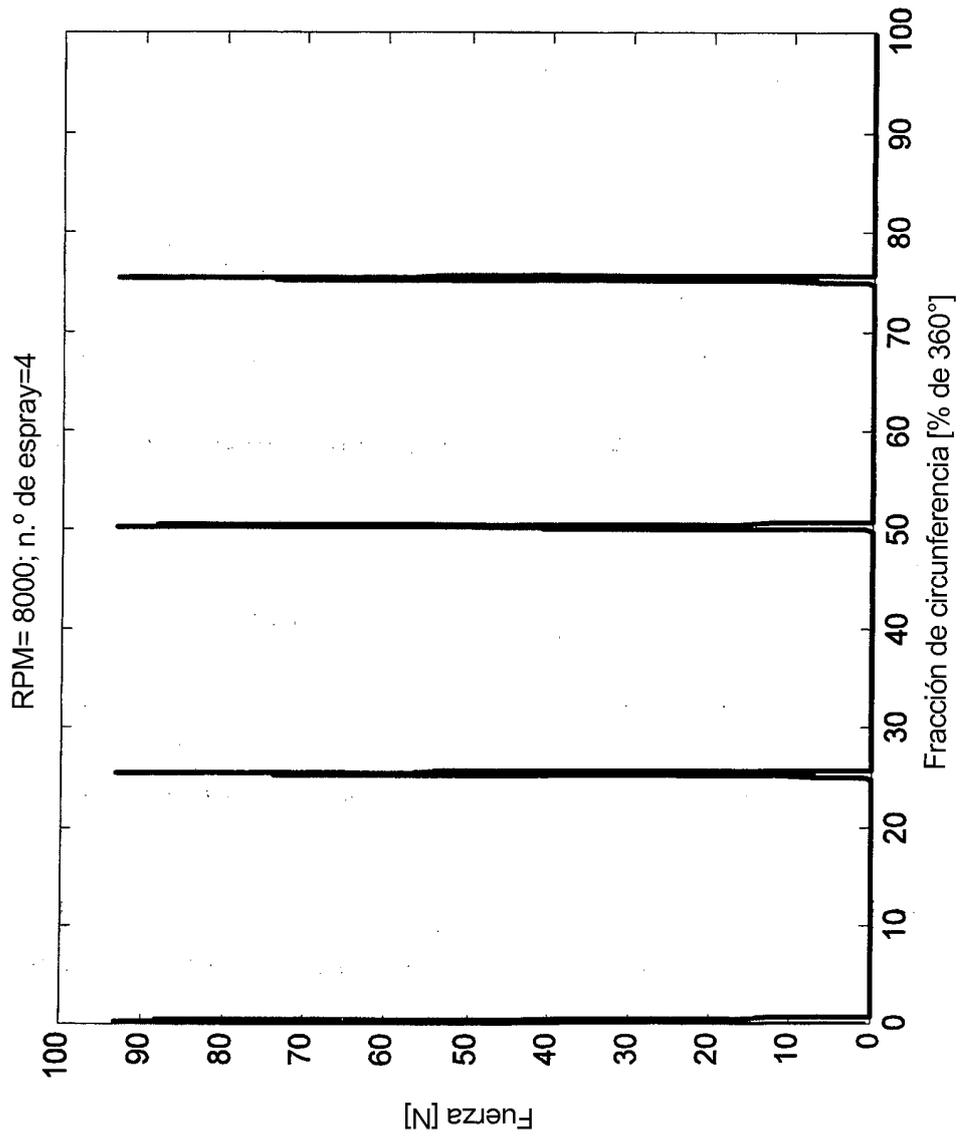


FIG. 6

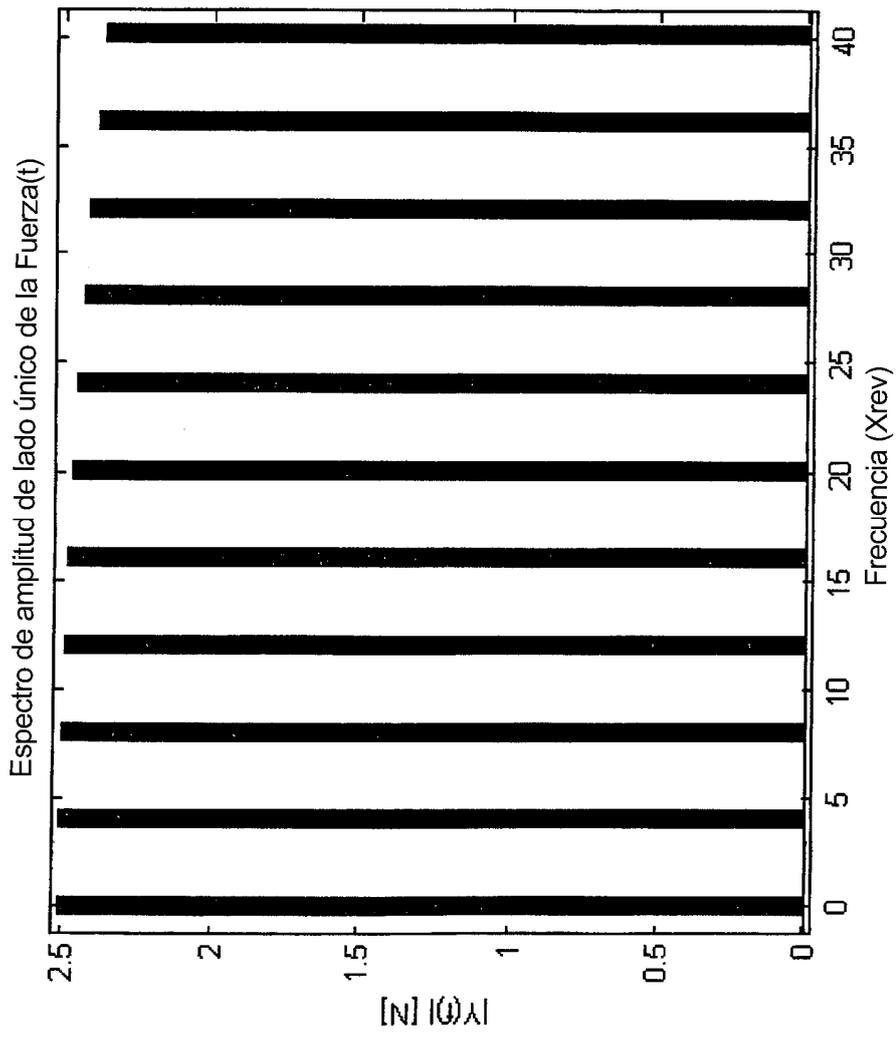


FIG. 7

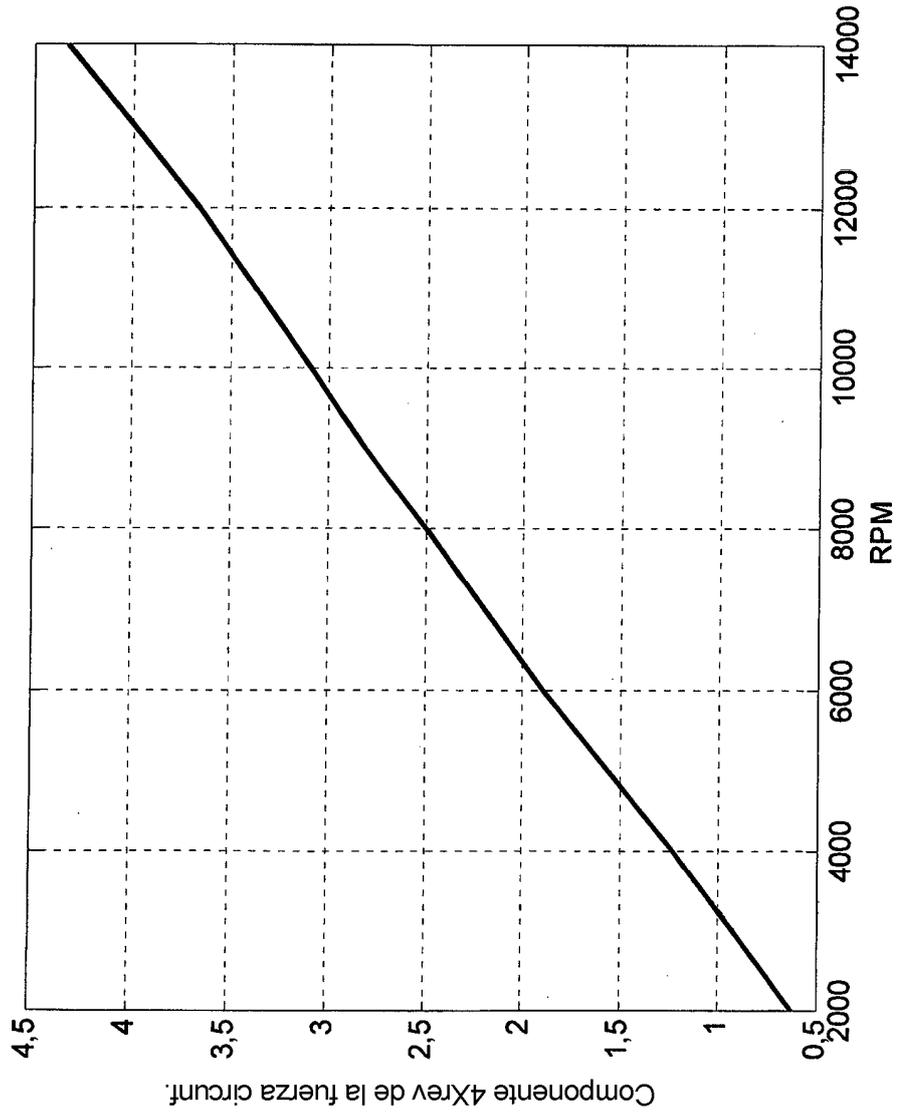


FIG. 8

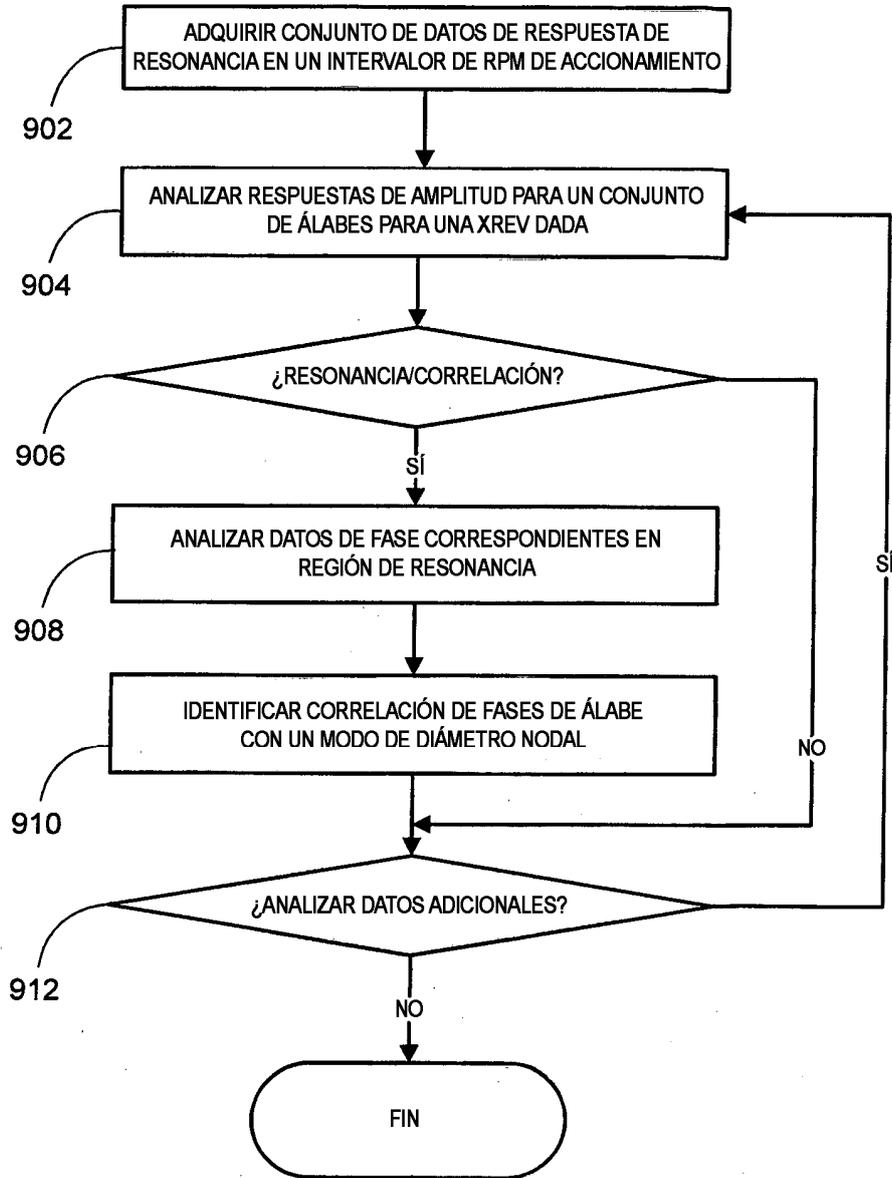


Fig. 9

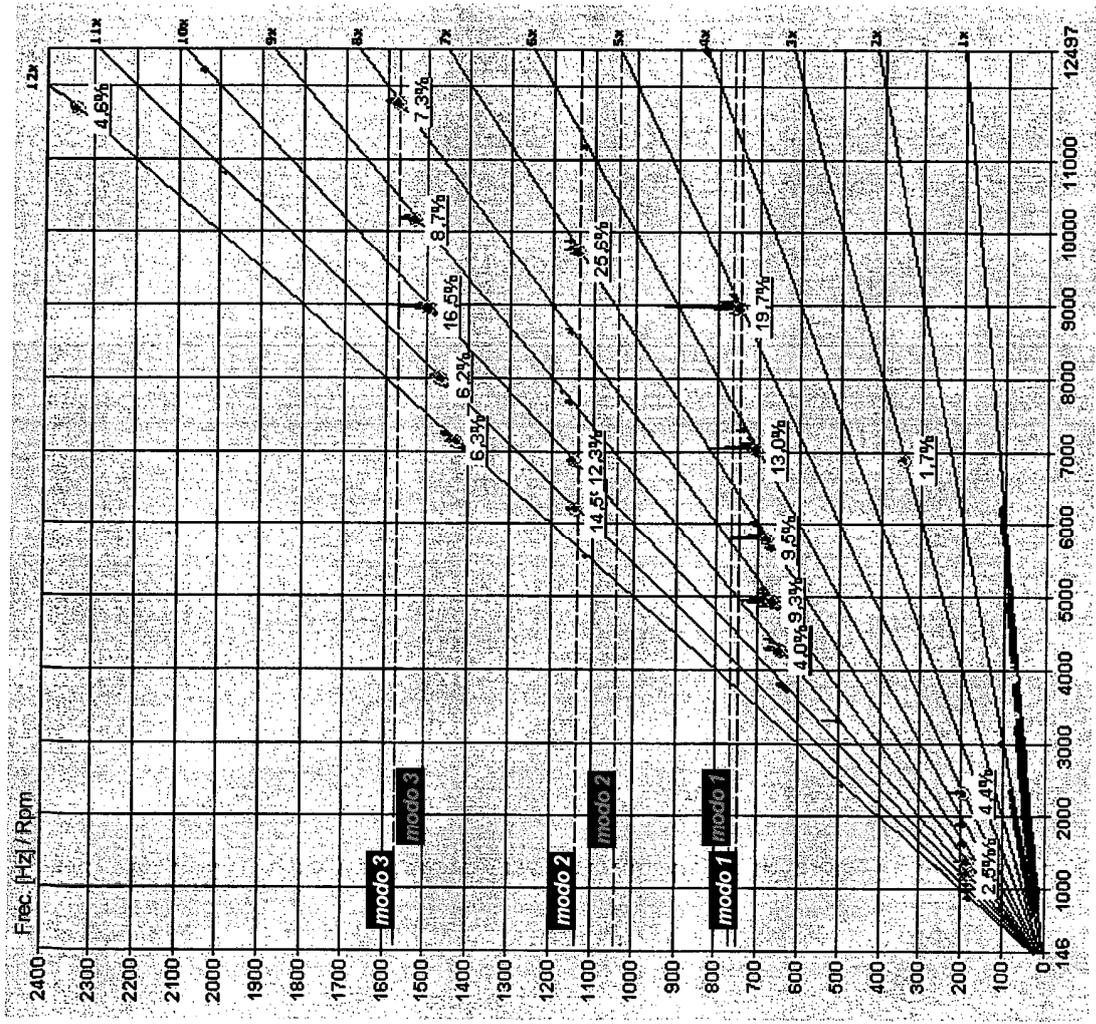


FIG. 10

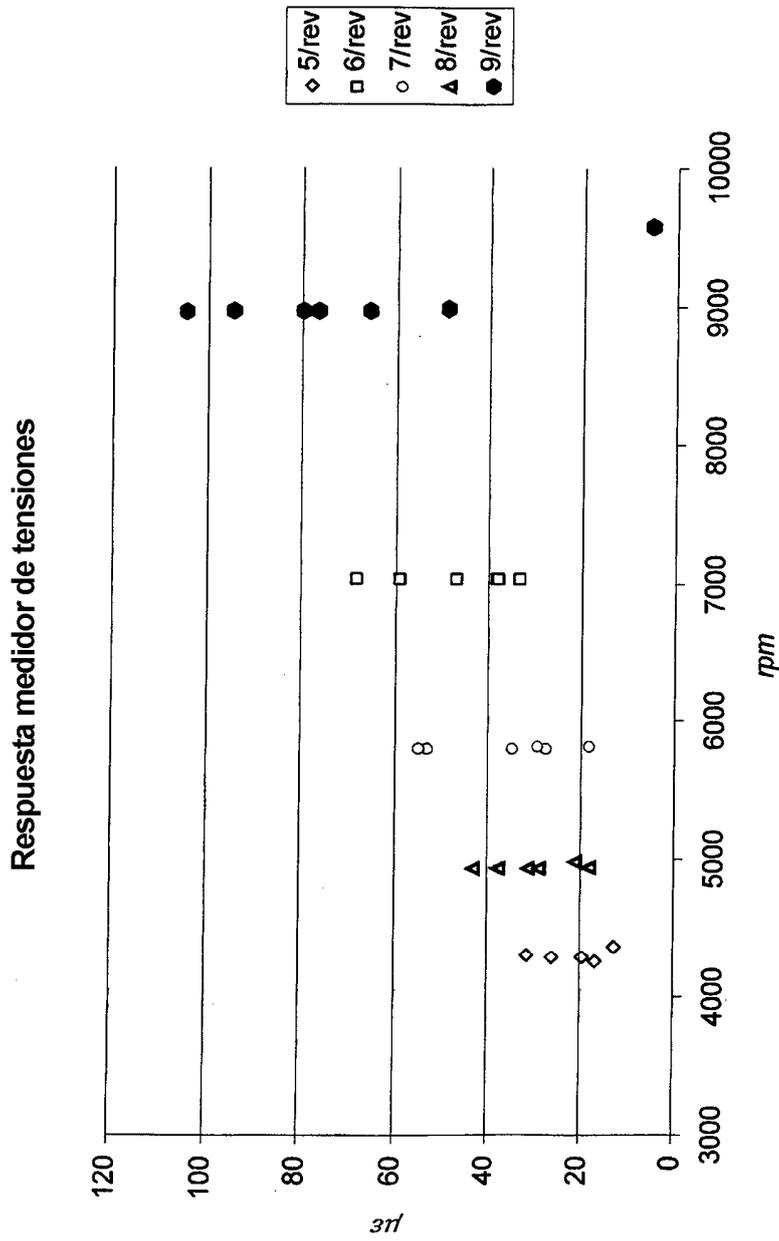


FIG. 11A

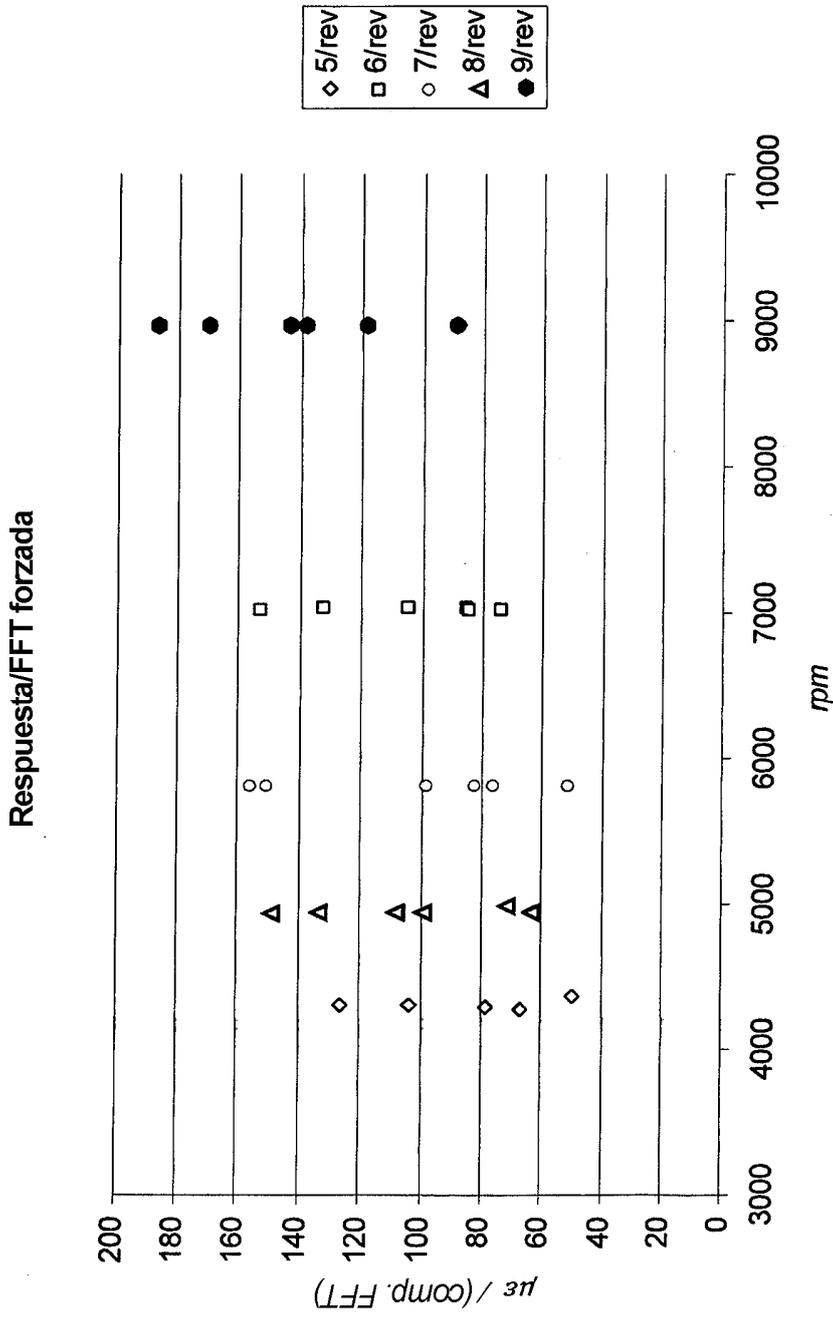
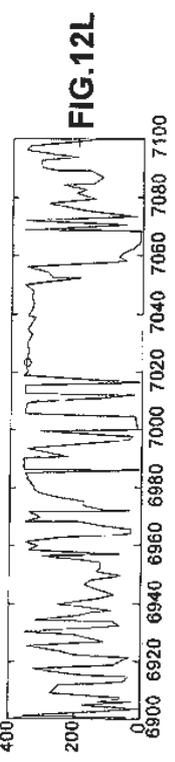
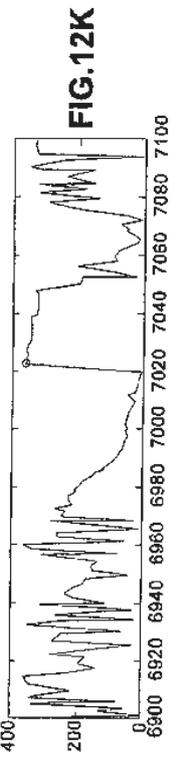
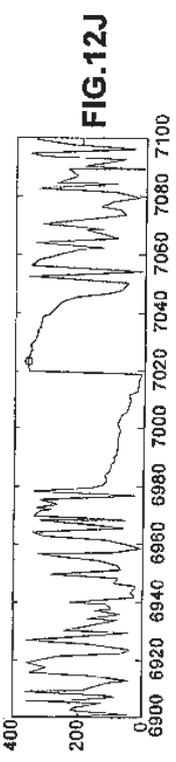
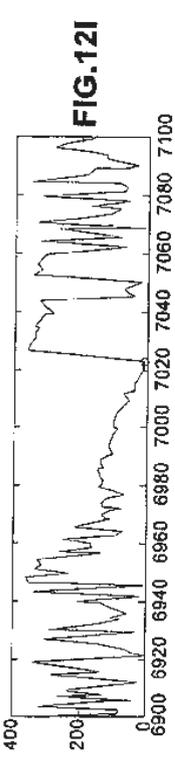
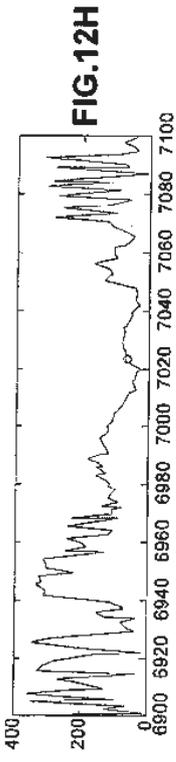
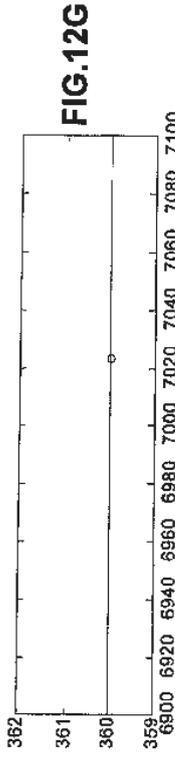
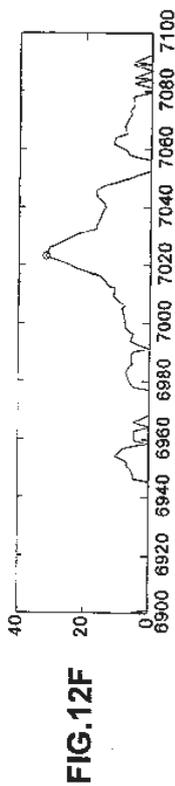
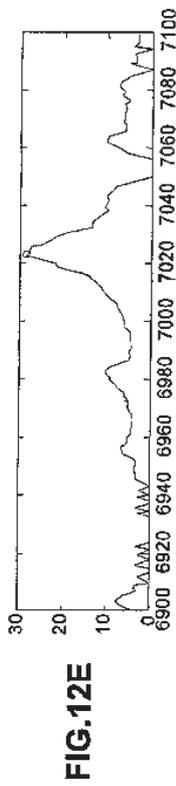
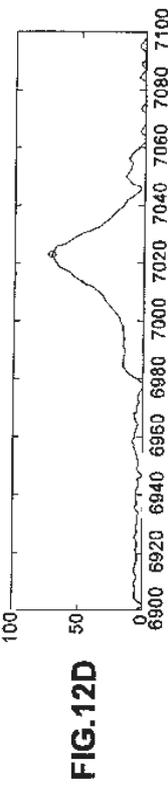
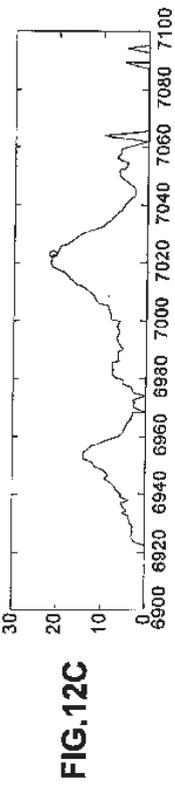
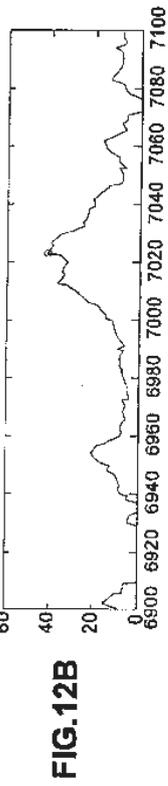
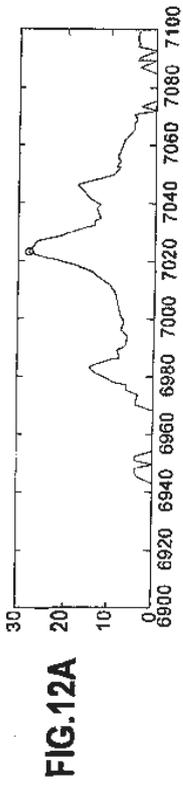


FIG. 11B



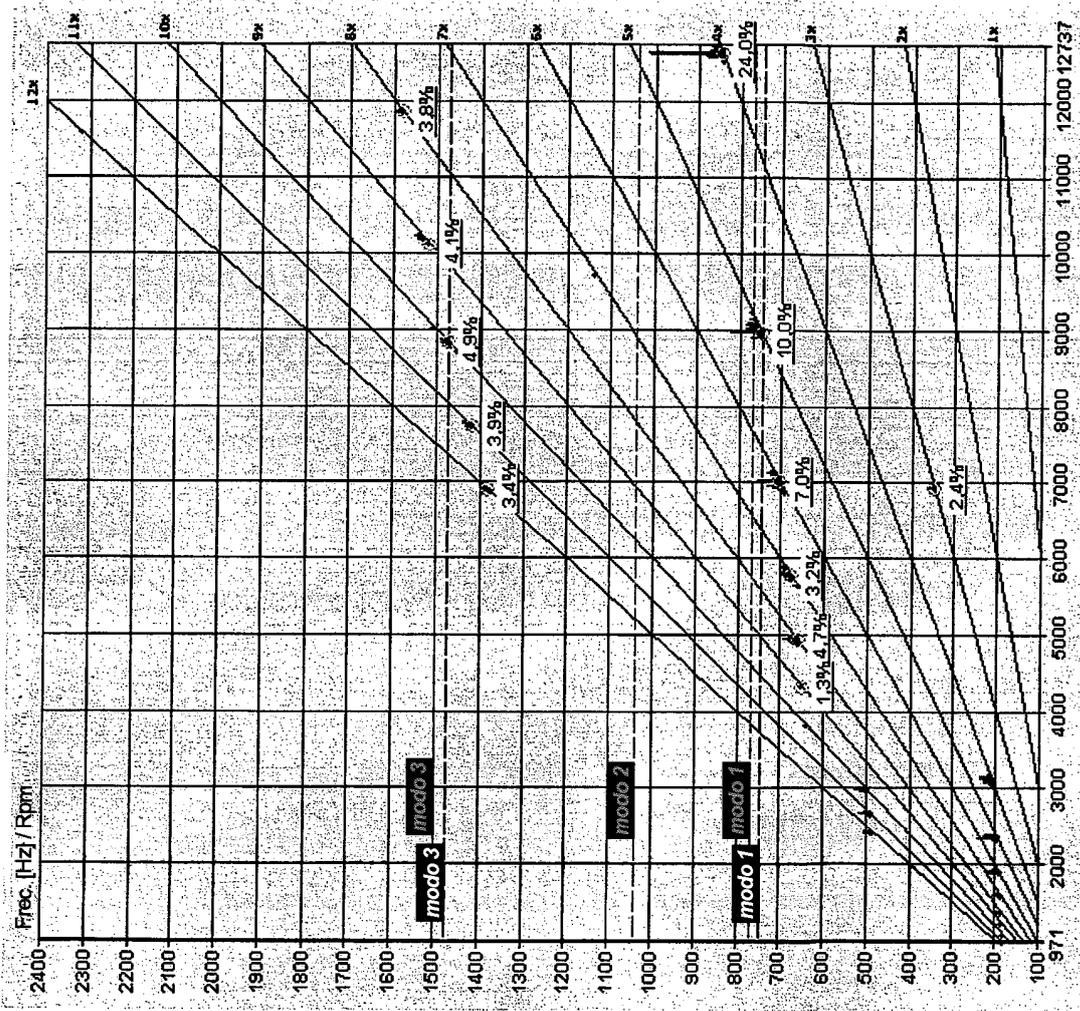


FIG.13

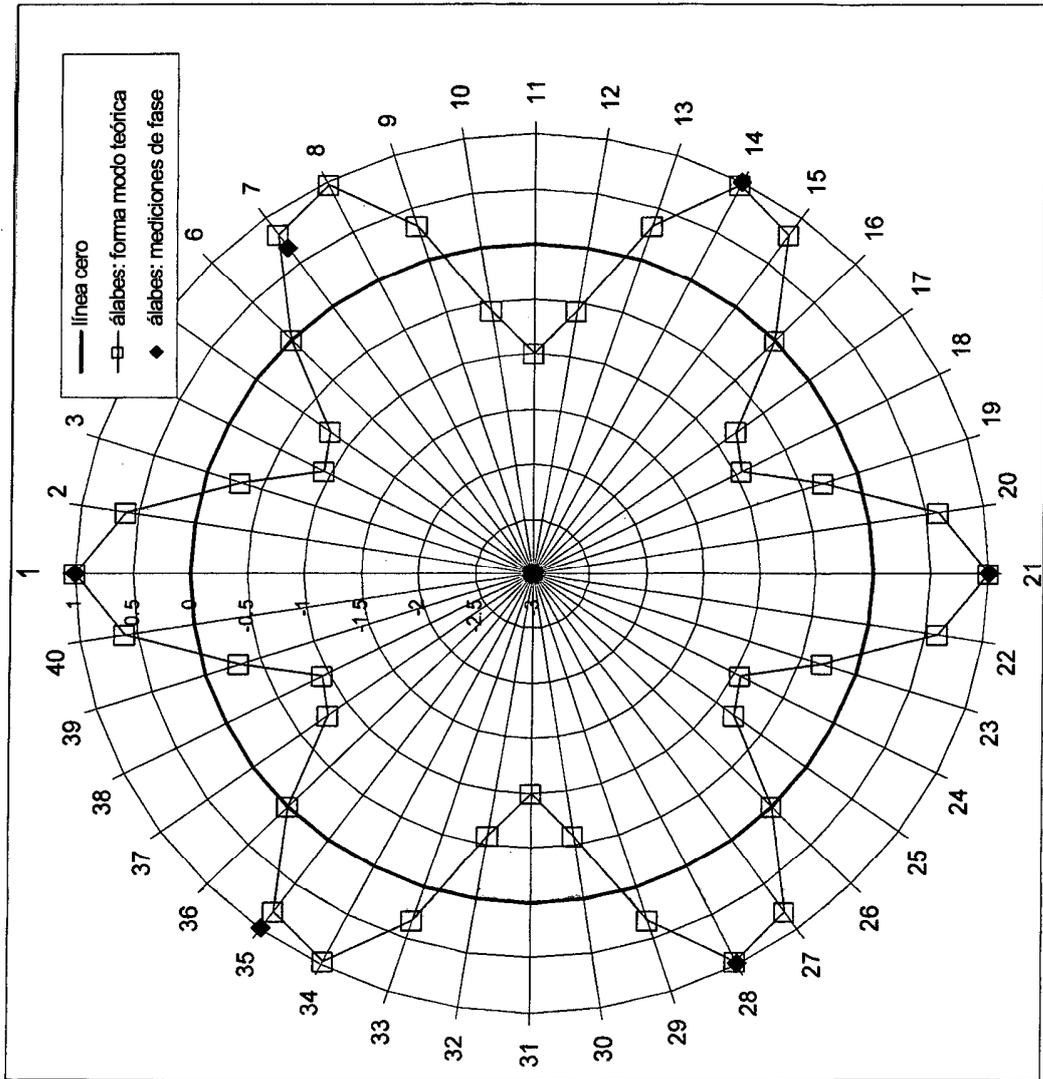


FIG. 14

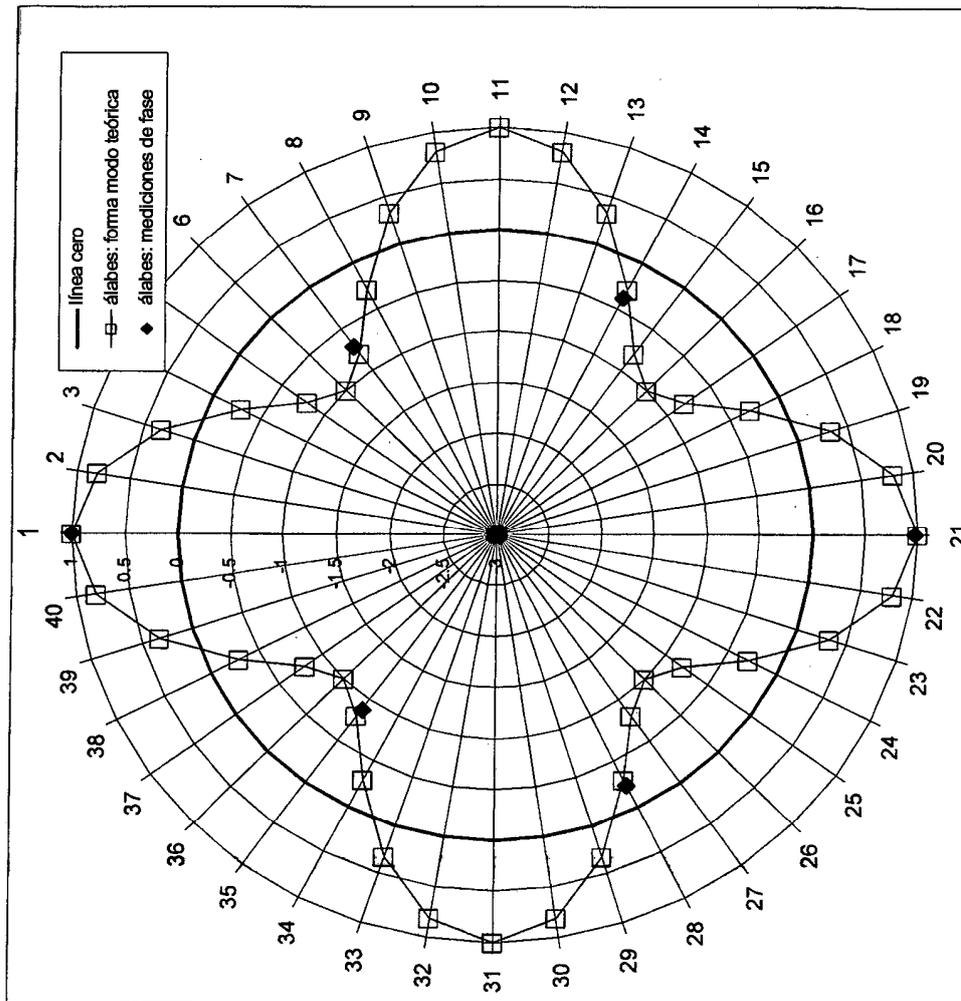
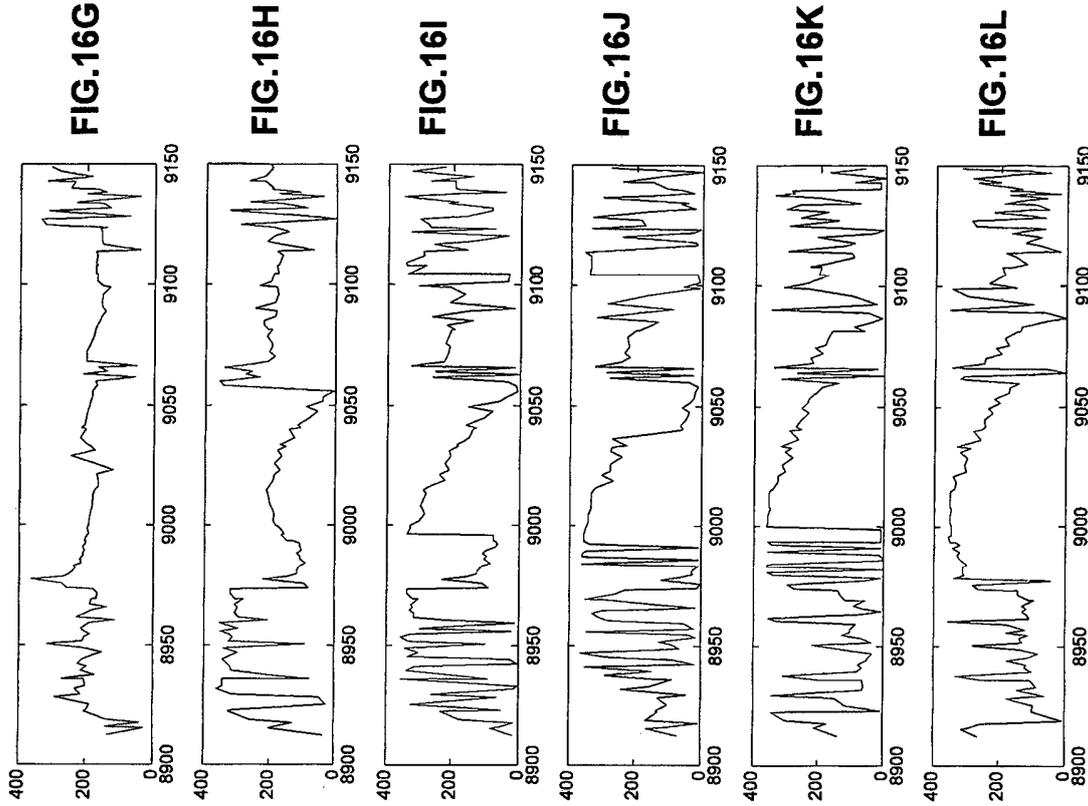
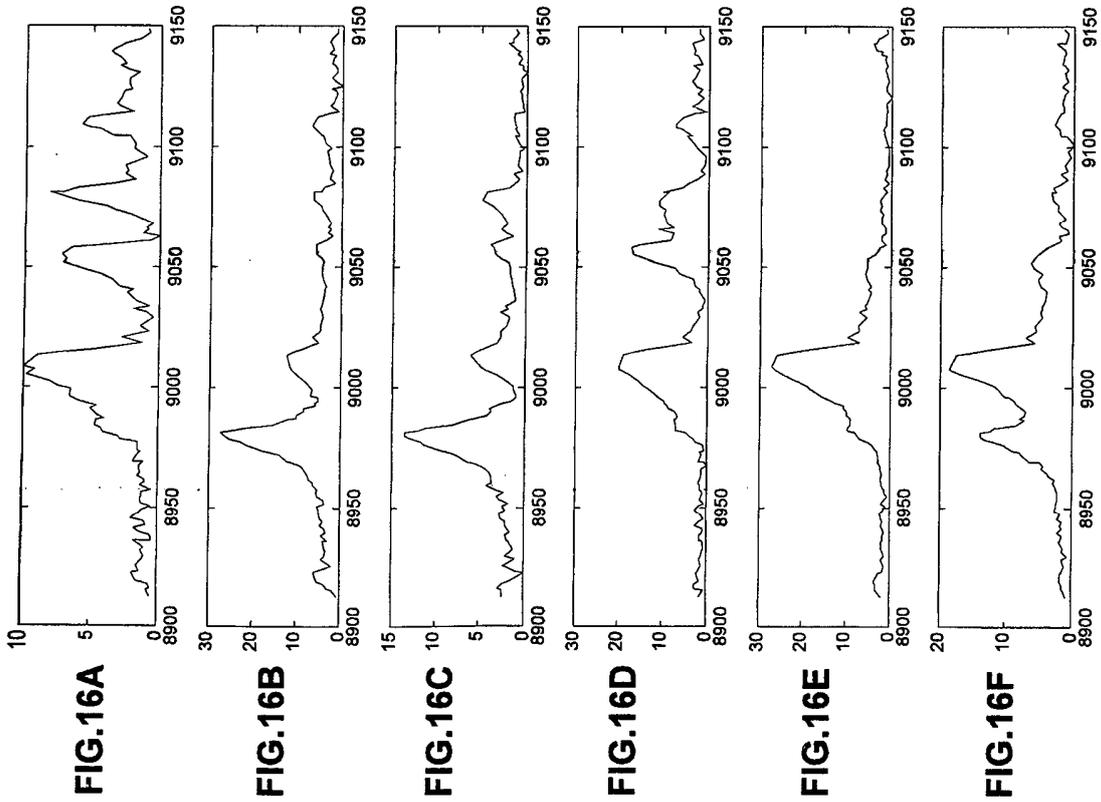


FIG. 15



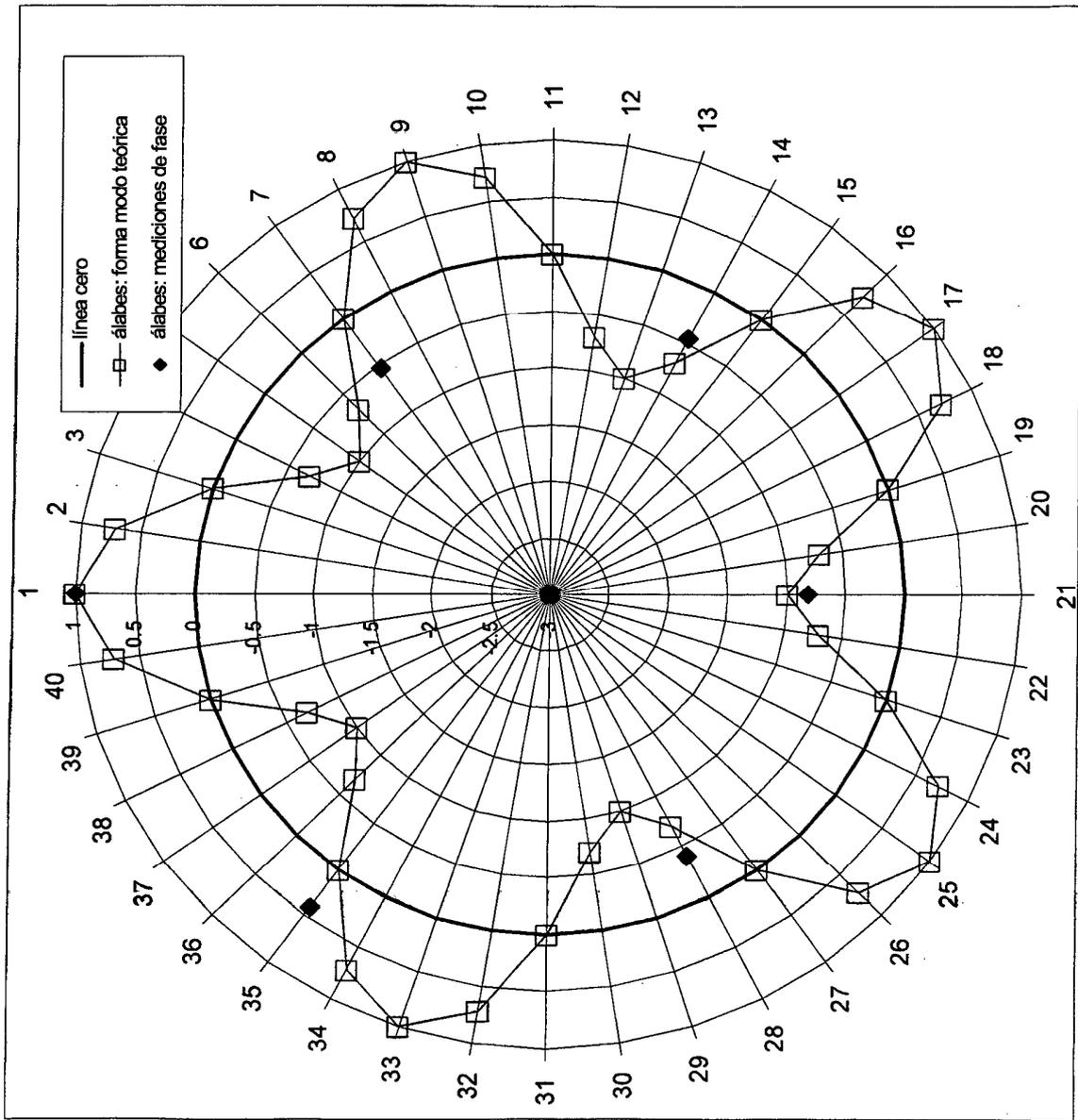


FIG. 17A

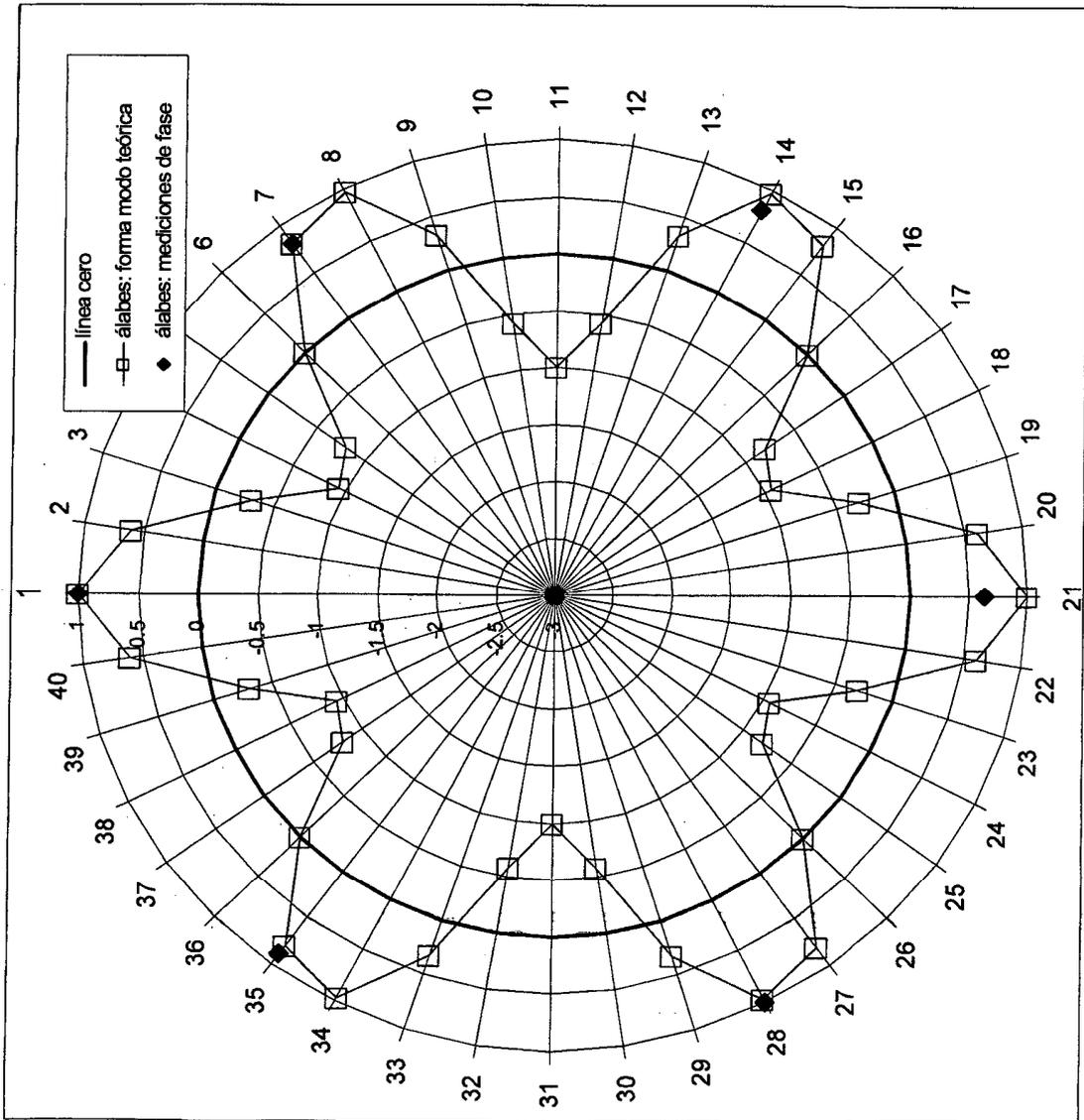


FIG. 17B

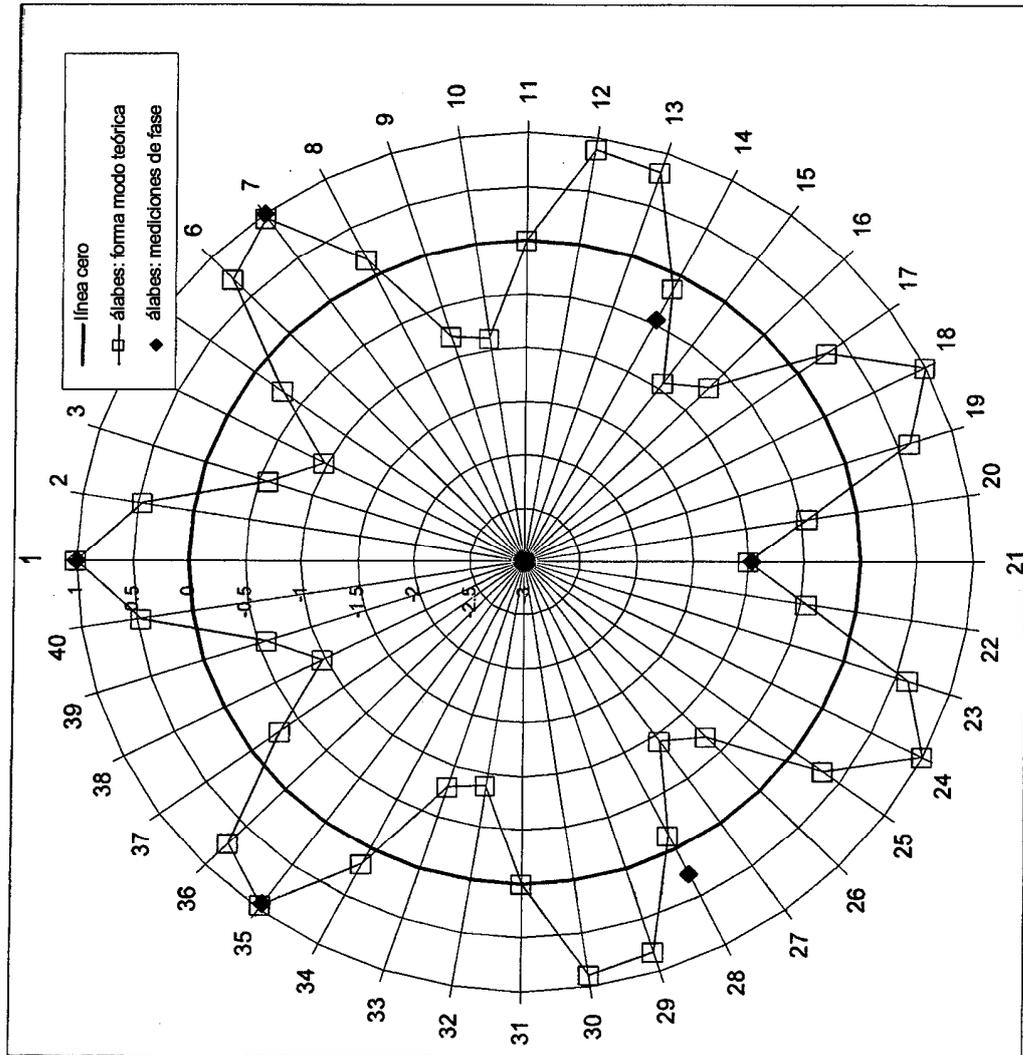


FIG. 17C