

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 374 860**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08847602 .3**

96 Fecha de presentación: **07.11.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2225460**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.09.2010**

54 Título: **DIAGNÓSTICO DE DEFECTOS DE PASO Y DE CARGA.**

30 Prioridad:
07.11.2007 EP 07120177
28.11.2007 US 990858 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
22.02.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
22.02.2012

73 Titular/es:
Vestas Wind Systems A/S
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:
BRATH, Per;
DALSGAARD, Søren y
BLANKE, Morgens

74 Agente: **Arias Sanz, Juan**

ES 2 374 860 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

Diagnóstico de defectos de paso y de carga.

5 CAMPO DE LA INVENCION

La invención se refiere a un procedimiento y un código legible por ordenador para el diagnóstico de defectos de paso y/o de carga de, por ejemplo, turbinas eólicas que usan dicho procedimiento de diagnóstico y/o que comprenden dicho sistema de diagnóstico.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

En los últimos años la energía eólica se ha vuelto una fuente muy atractiva de energía renovable y se han construido muchas turbinas eólicas por todo el mundo. Esto aumenta la demanda de un mejor mantenimiento y supervisión de los componentes de la turbina eólica. Actualmente, existen tres esquemas para el mantenimiento de componentes: mantenimiento de averías; mantenimiento preventivo en base a la vida útil media del componente; y mantenimiento predictivo en base a la supervisión del buen estado de un componente. Sin embargo, con respecto a la estrategia de mantenimiento predictivo, existen algunos defectos de componentes, por ejemplo, relacionados con las palas y asociados a detectores que son difíciles de diagnosticar mediante los procedimientos y técnicas conocidos, faltas que pueden conducir a una eficacia empeorada o a sobrecargar y acortar la vida útil de las palas. Dichos defectos no dan como resultado necesariamente una avería rápida, pero a menudo se advierten después de un periodo de tiempo, por ejemplo, cuando la producción de energía anual media de una turbina eólica difiere de la producción esperada.

15

20

25

Además, algunos defectos sólo pueden detectarse con los procedimientos existentes, pero el componente da lugar a que el defecto que no pueda aislarse sin la invención humana.

30

El documento EP0995904 describe un sistema de turbina eólica (WT) que tiene un rotor con al menos dos palas (B) con ángulos ajustables de ataque y un transductor (KB, KR, KT) que proporciona un parámetro de medición que proporciona una medida de la carga actual en un elemento de la estructura del sistema. El ángulo de la pala se ajusta dependiendo del parámetro de medición, que representa una aceleración o deformación del elemento estructural y proporciona una medida de una fuerza o par de torsión. El transductor se monta en una pala del rotor y/o las palas del rotor se ajustan de forma individual.

35

Por lo tanto, son necesarios un nuevo procedimiento y un sistema para el diagnóstico de las palas y los componentes asociados. Este es el caso en particular para una pala de turbina eólica y los detectores asociados.

40

En vista de la presente invención, se proporcionarán en este documento algunas definiciones de los términos más usados en esta solicitud de patente. Sin embargo, estas definiciones de términos no deben limitarse a la presente invención, y debe ser posible usar cualquier otra definición o definiciones apropiadas y/o adecuadas.

45

El ángulo de paso θ se define por el ángulo entre la cuerda de la raíz de la pala y el plano giratorio del rotor. Un giro de paso es un giro de la pala a lo largo de su eje longitudinal.

50

El ángulo de azimut δ se define por la posición angular del rotor según el ángulo en el sentido horario o anti-horario (vista frontal) entre la posición angular actual de la pala, por ejemplo, la primera pala (pala N° 1, B1), y la vertical descendente.

La carga de pala es el par de torsión experimentado por la pala debido a diferentes fuerzas que actúan sobre todo el conjunto o partes de la pala.

El ángulo de referencia de paso θ_{ref} es el valor deseado del ángulo de paso θ , y un ángulo de referencia de azimut δ_{ref} es el valor deseado del ángulo de azimut δ .

55 RESUMEN DE LA INVENCION

El procedimiento descrito en este documento es una estrategia de mantenimiento predictivo, pero debido a la naturaleza de los defectos y la invención, el manejo de los defectos puede realizarse sin intervención humana.

60

La presente invención permite diagnosticar los defectos de paso y/o de carga de la pala y/o los detectores con una suficiente precisión y a tiempo para evitar que una falta se desarrolle en fallo.

Las turbinas eólicas con un ángulo de pala controlado (paso) tienen un detector para el ángulo de pala que se denomina un detector de paso. Si este sensor tiene una falta, el paso de la pala de turbina eólica afectada será

incorrecto. Los defectos del detector de paso, (por ejemplo, el defecto de ganancia de paso o desfase de paso) conducirá a los problemas y desventajas que se han mencionado anteriormente.

5 Puede usarse un detector de carga en la pala de turbina eólica con el fin de medir la carga en la pala individual ya que se sabe que la carga en las palas de la turbina eólica es decisiva para la vida útil de las palas y para la eficacia de la turbina eólica. Un defecto del detector de carga (por ejemplo, defecto de ganancia de carga o desfase de carga) también conducirá a problemas y desventajas haciendo que la medición sea casi inútil.

10 La presente invención hace uso de las mediciones de carga y de paso.

Puede observarse como un objeto de la presente invención proporcionar un procedimiento para el diagnóstico de un posible defecto o defectos con las mediciones de paso y carga, así como un código legible por ordenador en un medio legible o apto para ordenador adaptado para realizar dicho procedimiento.

15 Preferiblemente, la invención alivia, mitiga o elimina una o más de las desventajas que se han mencionado anteriormente u otras de forma individual o en cualquier combinación.

En particular, puede observarse como un objeto de la invención proporcionar una solución para dichas desventajas.

20 La presente invención proporciona un procedimiento para el diagnóstico de al menos un posible defecto en una pala y/o su detector o detectores asociados, que comprende las etapas que se definen en la reivindicación 1.

25 El procedimiento de diagnóstico de acuerdo con la invención puede consistir en varias acciones, como por ejemplo, la detección y el aislamiento de un defecto, y si es posible, también el cálculo de su magnitud.

Se presentan características adicionales de la invención en las reivindicaciones dependientes.

30 En general, al escribir que "es una ventaja" por la presente invención y haciendo referencia a una ventaja, debe entenderse que esta ventaja puede verse como una posible ventaja prevista por la invención, pero también puede entenderse que la invención es particularmente, pero no exclusivamente, ventajosa para obtener la ventaja descrita.

Estos y otros aspectos, características y/o ventajas de la invención serán evidentes a partir de y elucidadas con referencia a las realizaciones descritas en lo sucesivo en este documento.

35 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Las realizaciones de la invención se describirán, únicamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos, en los que:

40 Las figuras 1a y 1b muestran una turbina eólica con palas y detectores que se van a diagnosticar y una sección transversal de uno de ellos, también ilustrando los ángulos de paso y de azimut; La figura 2 muestra la estructura de carga de pala en condiciones fijas de viento cero de acuerdo con la presente invención;

45 Las figuras 3a, 3b, 3c y 3d muestran cómo cambian el paso y la carga medidos con respecto al paso y la carga esperados cuando el sistema experimenta un desfase de paso (3a), un desfase de carga (3b), un defecto de ganancia de carga (3c) o defecto de ganancia de paso (3d);

Las figuras 4a, 4b y 4c muestran los cálculos de defectos del algoritmo de aislamiento activo.

50 **DESCRIPCIÓN DE LAS REALIZACIONES**

La invención muestra un procedimiento para el diagnóstico de defectos de ganancia y/o desfase en mediciones de paso y de carga en las palas. La invención permite no sólo detectar defectos en los detectores, sino también detectar un defecto o defectos en el montaje de las pala. Usa únicamente mediciones de carga en el sentido de la pala y usa una secuencia predefinida de referencias de paso (ángulo de la pala) y de azimut (posición del rotor) para diagnosticar los defectos. Los defectos pueden diagnosticarse incluso con defectos de ganancia y desfase simultáneos tanto en el paso como en la carga. El diagnóstico activo se hace a velocidad baja o de viento cero, mientras que la turbina no está produciendo. El análisis de la secuencia de datos no se hace necesariamente en el dominio temporal, pero puede hacerse en función de los ángulos de paso y de azimut, lo que permite la recolección de datos de secuencia en diferentes momentos de acuerdo con las condiciones predominantes.

60 El desfase de la medición de paso en una pala de turbina eólica dará como resultado el controlador que estabiliza la posición de la pala en el paso erróneo. Esto cambia el rendimiento aerodinámico de la pala particular y dará como resultado una disminución de la producción y una desviación diferente en el comportamiento de la carga de la que se espera. Este defecto de la medición se caracteriza por ser de baja gravedad e instintivamente difícil de diagnosticar.

Si se reconfigura un bucle cerrado no se experimentará degradación en el rendimiento.

Para permitir una reconfiguración total, el cálculo preciso de los defectos de paso y de carga debe hacerse usando mediciones de la turbina. El defecto debe diagnosticarse de tal forma que no sea necesaria una inspección manual o una medición manual.

La figura 1a muestra una turbina eólica WT que comprende (obsérvese que no se muestran algunos de los componentes):

- un rotor,
- al menos una pala de turbina eólica B1, B2, B3, en la que dicha al menos una pala de turbina eólica B1, B2, B3 se extienda desde el rotor para girar el rotor con el fin de asumir diversos ángulos de azimut δ cuando se somete al viento y/o el rotor puede girarse por medios de rotación de rotor accionado, y al menos parte de dicha al menos una pala de turbina eólica B1, B2, B3 se proporciona con medios giratorios de la pala para girar al menos parte de dicha al menos una pala de turbina eólica B1, B2, B3 para asumir diversos ángulos de paso θ ,
- medios de medición de carga para medir la carga en dicha pala de turbina eólica B1, B2, B3 debido a la gravedad y/o debido al viento sometido a dicha al menos una pala de turbina eólica B1, B2, B3,
- medios de medición del ángulo de paso para medir el ángulo de paso θ de al menos parte de dicha al menos una pala de turbina eólica, y
- medios para controlar el ajuste del ángulo de paso θ de dicha al menos parte de la pala de turbina eólica.

Pueden usarse medios informáticos para el cálculo de la magnitud del defecto o los defectos y/o medios informáticos para la adaptación de los defectos.

Además, en otra posible realización, el rotor puede ajustarse para asumir uno o más ángulos de azimut δ . El ángulo de azimut está disponible para los procedimientos informáticos por medición o de otro modo.

En otra posible realización, el rotor no se ajusta y el ángulo de azimut está disponible para los procedimientos informáticos por medición o de otro modo.

En otra posible realización, el giro del rotor puede comprender un cojinete en el que el giro se proporciona por el viento y el ángulo de giro puede detenerse mediante un freno, y/o puede comprender un motor eléctrico o hidráulico y/o un engranaje entre los mismos.

En otra posible realización más, los medios de giro de las palas pueden comprender un cojinete situado entre el rotor y la pala de turbina eólica, y/o pueden comprender un motor hidráulico o eléctrico y/o un engranaje entre los mismos.

Los medios de medición de carga pueden proporcionarse en la pala de turbina eólica o en una posición del rotor en la que la pala de turbina eólica está conectada al rotor.

En otra posible realización, los medios de medición de carga pueden ser un extensómetro y/o proporcionarse por la luz que se emite y se recibe, y mediante esto puede calcularse una desviación de la pala de turbina eólica y la carga sobre la pala. Sin embargo, puede usarse cualquier medio o tipo de medición de carga adecuado diferente y la invención no debe limitarse a los que se han mencionado anteriormente.

Los medios de medición del ángulo de paso pueden proporcionarse por un detector de proximidad, un medio de detección angular o cualquier otro medio de medición adecuado. Sin embargo, puede usarse cualquier otro medio o tipo de medición de ángulo de paso adecuado y la invención no debe limitarse a los que se ha mencionado anteriormente.

El sistema de diagnóstico puede comprender al menos un procesador para diversos cálculos, etc., por ejemplo, junto con los procedimientos matemáticos y/o algoritmos usados para el diagnóstico de dicha al menos un posible defecto, y/o junto con el cálculo de dicha relación carga-paso o paso-carga esperada o de referencia, y/o junto con el aislamiento y/o el cálculo de la magnitud y/o la adaptación del defecto o defectos de carga y/o de paso.

Las tres palas B1, B2, B3 mostradas en la figura 1a y/o los detectores de pala se van a diagnosticar usando el procedimiento de la invención. La posición de puntos de las palas indica un ángulo de azimut equivalente a cero grados ($\delta = 0^\circ$). La construcción de la turbina eólica no se limita a las tres palas B1, B2, B3. También puede usarse un número inferior o superior de palas. La figura 1b muestra una sección transversal de una pala de la pala B1, teniendo la sección transversal un paso θ , un par de torsión de carga en el sentido del flap N_i , y un movimiento en el sentido del flap (mostrado con líneas/flechas de puntos).

El procedimiento de diagnóstico de acuerdo con la presente invención se basa en un modelo de pala que es más preciso cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- no hay fuerzas aerodinámicas significativas que actúen sobre la pala B1, B2, B3, y de ello velocidades bajas o de viento cero; y/o
- condiciones de rotor fijo.

5 En la práctica, se encuentra que los modelos que incluyen relaciones entre la velocidad del viento y la energía producida por una turbina son demasiado inciertos para dar resultados útiles cuando el objeto es aislar defectos de paso y/o de carga y calcular la magnitud de los defectos de paso y/o de carga.

10 El segundo requisito a menudo es resultado de la baja velocidad del viento. Cuando la carga aerodinámica es insignificante, la carga gravitacional es la única carga que afecta a la pala B1, B2, B3. Esto proporciona una estructura del conjunto de ecuaciones (restricciones) que describen un comportamiento normal entre las variables como se muestran en la figura 2, en las que los cuadrados negros indican restricciones y los círculos indican variables. Las variables conocidas, tales como las mediciones o los valores de referencia, se muestran con el fondo gris. Con $i = 1, 2$ o 3 , la figura 2 ilustra que el par de torsión de la carga sobre la pala N_{ii} depende del paso de la pala θ_i y el ángulo de azimut δ hasta la restricción C_{ii} , denominado como el modelo de carga. Una medición de la carga mN_{ii} se refiere a la carga física N_{ii} hasta la restricción m_{ii} , denominado como una restricción de medición. Las entradas al sistema son las referencias de paso $\theta_{ref,i}$ que controlan el paso hasta la restricción $C_{\theta i}$. El ángulo de azimut δ se controla para coincidir con un punto de referencia δ_{ref} mediante un bucle cerrado, descrito como restricción C_{δ} . Ha de observarse que no se hacen suposiciones sobre cómo se miden el paso y la carga (tipo de detectores, etc.). No se hacen suposiciones de cómo se controlan los ángulos de paso y de azimut, sólo que rastrean la referencia en un estado estable, siempre que no halla defectos.

20 El análisis del modelo matemático de las palas y los detectores asociados muestra que los defectos de carga y/o de paso pueden detectarse, pero no aislarse usando procedimientos convencionales de detección de defectos y la teoría del aislamiento.

25 Con I representando el conjunto de defectos aislables y D el conjunto de defectos detectables (violaciones de restricciones),

$$\begin{aligned}
 I &= \{C_{\delta}\} \\
 D_1 &= \{m_{11}, C_{\theta 1}, C_{11}\} \\
 D_2 &= \{m_{12}, C_{\theta 2}, C_{12}\} \\
 D_3 &= \{m_{13}, C_{\theta 3}, C_{13}\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

30 Estos bloques de defectos aislables y detectables son los que un sistema de diagnóstico puede conseguir. Un defecto en el actuador de azimut C_{δ} puede aislarse, pero el resto son detectables en conjuntos, es decir, sólo serán detectables defectos en cualquiera de las relaciones $\{m_{ii}, C_{\theta i}, C_{ij}\}$, en la que $i = 1, 2$ ó 3 . La expresión "sistema de diagnóstico pasivo" significa que no se cambia ninguna entrada del sistema por el sistema de diagnóstico. Un sistema de diagnóstico pasivo solo puede verificar la coherencia del bucle cerrado, pero no cambiar el comportamiento y/o las referencias. Sin embargo, si el diagnóstico permite cambiar o perturbar ligeramente la entrada, es posible dividir algunos de los bloques detectables en bloques más pequeños (o incluso hacer aislables las restricciones). Éste es el concepto de aislamiento activo de defectos. El modelo descrito (turbina eólica de viento cero y fija) es de especial interés con respecto al aislamiento activo de defectos. Cuando el modelo es válido, puede realizarse el aislamiento activo de defectos sin afectar a la producción de la turbina.

35 En el modelo estructural de la figura 2, se observa que las trayectorias de la entrada o entradas a la salida, de θ_{ref} y δ_{ref} a mN_{ii} son diferentes. La trayectoria $\theta_{ref} \rightarrow mN_{ii}$ es $\{C_{\theta i}, C_{ii}, m_{ii}\}$. La trayectoria de $\delta_{ref} \rightarrow mN_{ii}$ es $\{C_{\delta}, C_{ii}, m_{ii}\}$. Ya que estas son diferentes, puede existir una posibilidad de aislar los defectos en restricciones si las entradas proporcionan diferentes señales de referencia o cualquiera de las señales de referencia proporciona una perturbación. Esto se denomina como aislamiento activo de defectos.

45 Con el fin de evaluar este resultado mediante un análisis detallado, se deja que la medición de la carga se proporcione por:

$$mN_i = g_i(\delta, \theta) + f_{N_i} = f_A g_i(\delta_{ref}, \theta_{ref} - f_{\theta}) + f_{N_i} \tag{2}$$

50 en la que un modelo de carga g_i depende del ángulo de azimut y el ángulo de paso, f_A es un defecto de ganancia en

la medición de la carga, f_{N_l} es un desfase en la carga o un desfase en el detector de carga, f_θ es un desfase en el ángulo de paso o en el detector de paso. La extensión para incluir el defecto de ganancia de fase es simple, pero por simplicidad no se incluye en este documento. La sensibilidad en la carga medida para cualquiera de los tres defectos en la ecuación 2 se proporciona por las sensibilidades:

$$\frac{\partial_m N_l}{\partial f_\theta} = f_A \frac{\partial}{\partial f_\theta} g_l(\delta_{ref}, \theta_{ref} + f_\theta) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial_m N_l}{\partial f_{N_l}} = 1 \quad (3b)$$

$$\frac{\partial_m N_l}{\partial f_A} = g_l(\delta_{ref}, \theta_{ref} + f_\theta) \quad (3c)$$

5 A partir de las ecuaciones anteriores 3a, 3b y 3c es evidente que todos los tres defectos pueden observarse en la misma salida (ninguna de las sensibilidades es cero). Lo más importante es que la sensibilidad del defecto de paso depende de la entrada del sistema (δ_{ref} y θ_{ref}) que permite el aislamiento activo de defectos. La sensibilidad del defecto de ganancia de carga f_A también depende de las entradas, pero no con la misma expresión analítica que f_θ . Los tres defectos pueden afectar a la misma salida con diferentes sensibilidades Ec. 3a, 3b y 3c. Esto hace posible el aislamiento activo de defectos.

10 La sensibilidad hacia los defectos de paso depende del comportamiento (modelo) de la carga, mientras que un desplazamiento de la medición de la carga tiene sensibilidad de unidad en la carga medida. Asumiendo un modelo preciso, g_l , los tres defectos pueden aislarse con buena precisión, siempre y cuando pueda determinarse una secuencia adecuada de perturbaciones de señal de entrada.

15 Con azimut cero ($\delta = 0$), el modelo de señal gravitacional no depende de los defectos de ganancia o desfase de paso ni tampoco del defecto de ganancia de carga. Por lo tanto, sólo hay desfase de carga en esta señal y, así, puede estimarse fácilmente en esta posición. Sin embargo, el desfase de carga también puede estimarse en posiciones de azimut diferentes de 0. Por lo tanto, no es necesario limitar la presente invención a esta posición ($\delta = 0$) en el algoritmo, pero esta posición no debe excluirse como una posibilidad.

20 Usando el aislamiento activo de base residual puede extraerse la misma conclusión. Esto puede observarse a partir de la expresión residual:

$$R = \dots_m N_l - g_l(\delta_{ref}, \theta_{ref}) \quad (4)$$

30 Ya que el término $g_l(\delta_{ref}, \theta_{ref})$ tiene el comportamiento esperado, no depende de los defectos. La medición no depende de los defectos de la manera que describe la ecuación 2. Debido a esto, las sensibilidades de R y $_m N_l$ son iguales y pueden extraerse las mismas conclusiones.

35 En resumen, la configuración de defectos activos puede diagnosticar defectos de paso y de carga, por ejemplo, defectos de medición de desfase y ganancia de paso y de carga, en condiciones cercanas a fijas a viento cero. Los defectos pueden distinguirse usando los siguientes procedimientos:

Procedimiento 1: Ciclo de paso en diferentes ángulos de azimut.

40 1) Establecer un ángulo de azimut deseado (por ejemplo, no cero) δ_{ref} para la pala de turbina que se va a diagnosticar;

2) Realizar un ciclo θ_{ref} (por ejemplo, de límite a límite) y medir la carga gravitacional con el fin de deducir una relación paso-carga o carga-paso;

45 3) Realizar la etapa 2) en diferentes ángulos de azimut para aumentar la robustez de los cálculos de los defectos;

4) Comparar la relación paso-carga o carga-paso con la relación paso-carga o carga-paso esperada; y

5) Deducir los defectos de medición de paso y/o de carga (por ejemplo, defecto o defectos de ganancia de paso y/o desfase de paso y/o defecto o defectos de ganancia de carga y/o desfase de carga del conjunto o conjuntos de datos de paso-carga o carga-paso.

Procedimiento 2: Ciclo de azimut en diferentes ángulos de paso.

1) Definir un paso θ_{ref} deseado para la pala de turbina que se va a diagnosticar;

2) Realizar un ángulo de azimut δ_{ref} (de límite a límite) y medir la carga gravitacional con el fin de deducir una relación paso-carga o carga-paso;

3) Realizar 2) en diferentes ángulos de paso para aumentar la robustez de los cálculos de los defectos;

4) Comparar la relación paso-carga o carga-paso con la relación paso-carga o carga-paso esperada; y

5) Deducir los defectos de medición de paso y/o de carga (por ejemplo, defecto o defectos de ganancia de paso y/o desfase de paso y/o defecto o defectos de ganancia de carga y/o desfase de carga del conjunto o conjuntos de datos de paso-carga o carga-paso.

Procedimiento 3: Obtener un conjunto de datos de mediciones de paso y de carga en rotación simultanea en azimut y cambiar en paso con el fin de obtener el conjunto o conjuntos de datos para el análisis.

Cualquiera de estos procedimientos puede verse como un objeto de la invención para encontrar la respuesta paso-carga o carga-paso.

Paso y azimut pueden lograrse por una acción de retroalimentación (control de bucle cerrado) o por la actuación directa sin retroalimentación (bucle abierto).

El posible defecto o defectos pueden ser al menos una de: defecto de ganancia de paso, defecto de desfase de paso, defecto de desfase de carga, defecto de ganancia de carga, y/o otra desviación del comportamiento normal de la pala y/o el detector o detectores.

Las figuras 3a, 3b, 3c y 3d muestran respectivamente ejemplos de desfase de paso, desfase de carga, defecto de ganancia de paso y defecto de ganancia de carga. En estas cuatro representaciones con curvas (líneas) claras (finas) se muestra lo que se mide por los medios de medición de paso y de carga, y con curvas (líneas) oscuras (gruesas) se muestra lo que se espera.

Más adelante se mostrará cómo pueden calcularse los defectos de desfase de paso y la ganancia y desfase de carga usando un modelo de cuerpo rígido y el procedimiento descrito. Sin embargo, la invención no se limita al modelo de cuerpo rígido, que sólo se proporciona como ejemplo. Debe usarse cualquier otro modelo adecuado y, por consiguiente, cualquier otro algoritmo adecuado con la presente invención.

La utilidad del aislamiento activo de defectos se ilustrará usando una carga de gravedad de cuerpo rígido. El comportamiento de la carga de gravedad en el sentido del flap es:

$$\begin{aligned} {}_m N_l(\delta_{ref}, \theta_{ref}) &= m_b l_b g \text{sen}(\delta) \text{sen}(\theta) + f_{N_l} \\ &= f_A \bar{m}_b \bar{l}_b g \text{sen}(\delta_{ref}) \text{sen}(\theta_{ref} + f_\theta) + f_{N_l} \end{aligned} \quad (5)$$

en la que m_b y l_b son la masa real de la pala y el centro de la masa, θ y δ son el ángulo de paso y de azimut real, respectivamente. Se incluye un defecto multiplicativo f_A cuando se usan los valores nominales (\bar{m}_b y \bar{l}_b). Este defecto de ganancia representa defectos en el término $\bar{m}_b \bar{l}_b g$ que pueden interpretarse como un defecto de ganancia del detector de carga. Además, se incluyen los defectos de desfase de la medición de carga y de paso.

La señal de medición tiene la siguiente sensibilidad hacia el desfase de medición de paso:

$$\frac{\partial {}_m N_l}{\partial f_\theta} = f_A \bar{m}_b \bar{l}_b g \text{sen}(\delta_{ref}) \cos(\theta_{ref} - f_\theta) \quad (6)$$

5 en la que la dependencia del defecto de desfase de paso se desvanece claramente cuando la referencia de azimut se ajusta a cero ($\delta_{ref} = 0$). Esto permite una lectura directa del desfase de la medición de carga y pueden aplicarse los procedimientos de diagnóstico que se han descrito anteriormente. La tarea de calcular los defectos, después de realizar los procedimientos de diagnóstico, se analizará a continuación (esta configuración asume que no hay defectos de ganancia de paso).

10 La referencia de paso puede variarse de límite a límite, en los que los defectos deben calcularse. La carga de gravedad es periódica (con respecto al paso) con un periodo de 360 grados, pero con una amplitud, fase y desfase desconocidos. El uso de un ajuste sinusoidal por linealización exacta permite el cálculo de la fase, el desfase y la amplitud. Se asume que la medición de carga es:

$${}_m N_l(nT) = A \text{sen}(2\pi f n T + \varphi) + N_0 + v, \quad n = 1 \dots N \quad (7)$$

15 que es un seno con amplitud (A), desfase (N_0) y fase (φ) desconocidos, pero con frecuencia (f) conocida. El ruido de medición es (v). La ecuación puede expandirse directamente a:

$${}_m N_l(nT) = A \cos(\varphi) \text{sen}(2\pi f n T) + A \text{sen}(\varphi) \cos(2\pi f n T) + N_0 + v \quad (8)$$

20 que es lineal con respecto a $\lambda_1 = A \cos(\varphi)$, $\lambda_2 = A \text{sen}(\varphi)$ y $\lambda_3 = N_0$. Estos parámetros pueden calcularse usando regresión lineal:

$$\begin{bmatrix} {}_m N_l(1) \\ {}_m N_l(2) \\ \vdots \\ {}_m N_l(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(2\pi f 1T) & \cos(2\pi f 1T) & 1 \\ \text{sen}(2\pi f 2T) & \cos(2\pi f 2T) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{sen}(2\pi f NT) & \cos(2\pi f NT) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

25 o

$${}_m \mathbf{N}_l = \Phi \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{v}$$

La solución del parámetro del mínimo cuadrado medio del error es una solución al problema del mínimo cuadrado lineal y tiene la solución de forma cerrada:

30

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T {}_m \mathbf{N}_l \quad (10)$$

La fase puede calcularse por:

$$\hat{\varphi} = \hat{f}_\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_2}{\hat{\lambda}_1} \right) \quad (11)$$

35

El defecto de desfase de paso puede calcularse directamente por la fase, sin calcular la fase de respuesta modelo, ya que la fase modelo de la señal esperada es cero. El defecto de desfase de la medición de carga puede calcularse también usando este ajuste sinusoidal.

$$\hat{N}_0 = \hat{f}_{N_i} = \hat{\lambda}_3 \quad (12)$$

Como alternativa, el cálculo del desfase de carga a partir de $\delta_{ref} = 0$ puede verificarse por este ajuste sinusoidal. También puede calcularse la amplitud de la señal.

$$\hat{A} = \hat{f}_A \bar{m}_b \bar{l}_b g \text{sen}(\delta_{ref}) = \sqrt{\hat{\lambda}_1^2 + \hat{\lambda}_2^2} \quad (13)$$

Ha de observarse que el error de ganancia de la medición f_A puede encontrarse a partir del cálculo de la amplitud. Cuando las mediciones contienen ruido blanco, la solución de (10) es el mejor cálculo de mínimo cuadrado medio del error con respecto a $\hat{\lambda}$.

El uso de un diagnóstico con base residual (en lugar del comportamiento de la salida que se ha tratado anteriormente) da como resultado una estructura residual de:

$$R = m_b l_b \text{sen}(\delta) \text{sen}(\theta) - \bar{m}_b \bar{l}_b \text{sen}(\delta_{ref}) \text{sen}(\theta_{ref}) \quad (14)$$

$$= \bar{m}_b \bar{l}_b \text{sen}(\delta_{ref}) (f_A \cos(f_\theta) \text{sen}(\theta_{ref}) + f_A \text{sen}(f_\theta) \cos(\theta_{ref}) - \text{sen}(\theta_{ref})) + f_{N_i} \quad (15)$$

en la que puede realizarse el mismo análisis de regresión sobre la respuesta transportada:

$$R + \text{sen}(\theta_{ref}) \bar{m}_b \bar{l}_b \text{sen}(\delta_{ref}) \quad (16)$$

La funcionalidad del algoritmo puede verificarse realizando una simulación con la siguiente respuesta fija a partir de referencias a la carga:

$$m N_l = f_A \bar{m}_b g \bar{l}_b \text{sen}(\delta_{ref}) \text{sen}(\theta_{ref} + f_\theta) + f_{N_i} + v \quad (17)$$

$$v \in N(\mu, \sigma)$$

en la que $\bar{m}_b = 8000 \text{ kg}$, $\bar{l}_b = 5 \text{ m}$, $f_A = 1,05$, $f_\theta = 4^\circ$, $f_{N_i} = 25 \text{ kNm}$ y el ruido de medición con media de cero y varianza de $\sigma^2 = (10 \text{ kNm})^2$. El algoritmo del aislamiento activo genera las curvas de paso-carga o carga-paso para la serie de ángulos de azimut. Cada curva muestra respuesta en ángulos de azimut que abarcan de 0° a 90° en intervalos de 10° .

En el ángulo de azimut cero, el algoritmo puede calcular el desfase de carga de la medición de carga como el valor medio (al variar el paso). Después, el algoritmo ajusta un seno en las curvas de paso-carga o carga-paso generadas en el conjunto de ángulos de azimut, dando como resultado un cálculo de fase, amplitud y desfase en azimut dependiente. Sólo es necesario un ángulo de azimut para el diagnóstico de defectos, pero el uso de un conjunto de ángulos diferentes aumentará la robustez del procedimiento.

Las representaciones de los cálculos de defectos de las muestras se muestran en las figuras 4a, 4b y 4c. La figura

4b muestra el cálculo del desfase de carga que calcula bien el desfase de 25 kNm. El ruido de medición afecta al cálculo del desfase de carga, pero no muestra una dependencia significativa del azimut. La figura 4a muestra el cálculo del desfase de paso que en ángulos de azimut por encima de 10° calcula bien el desfase a 4°. La amplitud del ajuste del seno corresponde al término $f_A \overline{m_b} g \overline{l_b} \text{sen}(\delta_{ref})$ y la ampliación del cálculo por $(f_A \overline{m_b} g \overline{l_b} \text{sen}(\delta_{ref}))^{-1}$ da como resultado un cálculo de defectos preciso como se muestra en la figura 4c. Las representaciones son una función de ángulos de azimut y verifican que no hay dependencia de azimut en los cálculos.

Se apreciará que una realización especial de la invención usa $\delta_{ref} = \delta$ y obtiene los mismos resultados que se han descrito anteriormente.

Las consideraciones analíticas del comportamiento de la carga verificaron que un desfase de paso y los defectos de ganancia y desfase de carga pueden aislarse usando aislamiento activo. Usando la carga gravitacional para un cuerpo rígido, se han realizado simulaciones que verifican estas conclusiones. Se ha hecho un cálculo de una media de mínimos cuadrados para calcular el desfase de paso de carga, así como el defecto de ganancia en la medición de carga. Pudieron diagnosticarse usando el cálculo de la media de mínimos cuadrados y aislamiento activo. Este procedimiento de diagnóstico usa únicamente mediciones de una pala, por lo tanto, puede usarse independientemente el mismo enfoque en las demás palas de las turbinas.

Sin embargo, la invención no debe limitarse a la simulación o el algoritmo que se ha descrito anteriormente, sino en el principio en el que se fundamenta.

A partir del procedimiento de acuerdo con la presente invención se ha deducido que puede diagnosticar el desfase de paso usando únicamente mediciones de carga adulteradas tanto por los defectos de desfase como de ganancia de la medición de carga. La extensión del algoritmo para diagnosticar el defecto de ganancia de paso se hace fácilmente usando un algoritmo de estimación del ajuste del seno de frecuencia variable.

Aunque la presente invención se ha descrito junto con las realizaciones preferidas, no pretende limitarse a las formas específicas expuestas en este documento. En cambio, el alcance de la presente invención sólo se limita por las reivindicaciones adjuntas.

En esta sección, se exponen ciertos detalles específicos de la realización descrita con fines de explicación en lugar de limitación, para proporcionar una comprensión clara y completa de la presente invención. Sin embargo, debe apreciarse fácilmente por los expertos en la técnica, que la presente invención puede ponerse en práctica en otras realizaciones que no se asemejen exactamente a los detalles expuestos en este documento, sin apartarse significativamente del espíritu y alcance de esta descripción. Adicionalmente, en este contexto, y con fines de brevedad y claridad, se han omitido las descripciones detalladas de aparatos, circuitos y metodologías bien conocidas, para evitar detalles innecesarios y posibles confusiones.

En las reivindicaciones, el término "comprendiendo" no excluye la presencia de otros elementos o etapas. Adicionalmente, aunque puedan incluirse características individuales en diferentes reivindicaciones, estas posiblemente pueden combinarse de forma ventajosa, y la inclusión en diferentes reivindicaciones no implica que no sea posible y/o ventajosa una combinación de las características. Además, las referencias en singular no excluyen una pluralidad. Por lo tanto, las referencias a "un", "una", "primer", "segundo", etc., no impiden una pluralidad. Los símbolos de referencia se incluyen en las reivindicaciones; sin embargo, la inclusión de los símbolos de referencia es únicamente por motivos de claridad y no debe interpretarse como limitante del alcance de las reivindicaciones.

Nomenclatura

| Letras latinas Símbolo | Descripción | Unidad |
|---------------------------|--|--------|
| A | Amplitud de carga | Nm |
| \hat{A} | Cálculo de amplitud de carga | Nm |
| B_n | n-ésima pala | - |
| $C_{l,n}$ | Restricción de carga de pala n | - |
| $C_{\theta,n}$ | Restricción de actuador de paso de pala n | - |
| C_δ | Restricción de actuador de azimut | - |
| D_n | El conjunto n-ésimo de restricciones detectables | - |
| f | Frecuencia del ciclo de paso-carga | 1/rad |
| f_{N_i} | Desfase de carga | Nm |
| \hat{f}_{N_i} | Cálculo del desfase de carga | Nm |
| f_A | Defecto de ganancia de carga | - |
| f_θ | Desfase de paso | rad |

ES 2 374 860 T3

| | | |
|-----------------------|--|------|
| \hat{f}_θ | Cálculo del desfase de paso | rad |
| g | Constante gravitacional | N/kg |
| $g_l(\delta, \theta)$ | Modelo de carga | - |
| l | El conjunto de restricciones aislables | - |
| l_b | Centro de masa de la pala | m |
| \bar{l}_b | Centro nominal de masa de la pala | m |
| m_b | Masa de la pala | kg |
| \bar{m}_b | Masa nominal de la pala | kg |
| $m_{l,n}$ | Restricción de la medida del par de torsión de la carga de la pala n | - |
| n | Índice | - |
| $N(\mu, \sigma)$ | Número distribuido Gaussiano | |
| N_0 | El desfase de la relación paso-carga | Nm |
| \hat{N}_0 | Cálculo del desfase de la relación paso-carga | Nm |
| $N_{l,n}$ | Par de torsión de carga de la pala n | Nm |
| ${}^m N_{l,n}$ | Medición del par de torsión de carga de la pala n | Nm |
| ${}^m N_l$ | Medición del par de torsión de carga de la pala | Nm |
| R | Residual de la carga | Nm |
| T | Intervalo de la muestra de paso | rad |
| v | Ruido de la medición de carga | Nm |

Letras Griegas

| Símbolo | Descripción | Unidad |
|------------------------------|--|--------|
| δ | Ángulo de azimut (ángulo de la posición del rotor) | rad |
| δ_{ref} | Referencia del ángulo de azimut (referencia del ángulo de la posición del rotor) | rad |
| λ_n | El parámetro lineal n -ésimo | - |
| $\hat{\lambda}_n$ | El cálculo del parámetro lineal n -ésimo | - |
| $\hat{\lambda}$ | El cálculo del parámetro lineal | - |
| μ | Valor medio | - |
| θ | Paso (ángulo de la pala) | rad |
| $\theta_i \quad i = 1, 2, 3$ | Paso 1, 2 y 3 de la pala (ángulo) | rad |
| $\theta_{ref1,2,3}$ | Referencia del paso 1, 2 y 3 de la pala (ángulo) | rad |
| θ_{ref} | Referencia del paso (ángulo) | rad |
| σ | Desviación convencional | |
| φ | Fase de la relación paso-carga | rad |
| $\hat{\varphi}$ | Cálculo de la fase de la relación paso-carga | rad |
| Φ | Matriz de regresión lineal | - |

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para el diagnóstico de palas y componentes asociados, estando dicho procedimiento caracterizado porque es un procedimiento para el diagnóstico de al menos un posible defecto asociado con el paso y/o la carga, comprendiendo el procedimiento las etapas de:
- a) hacer mediciones de la carga y el paso utilizando uno cualquiera o ambos de los siguientes dos procedimientos:
- 10 i) en un ángulo de azimut deseado, medir la carga en un conjunto de ángulos de paso (θ), y/o
- ii) en un ángulo de paso deseado, medir la carga en un conjunto de ángulos de azimut (δ), y después repetir la medición de la carga en un conjunto de ángulos de azimut (δ) en uno o más ángulos de referencia de paso (θ_{ref});
- 15 b) deducir una relación entre las mediciones de los ángulos de carga y de paso; y
- c) comparar dicha relación carga-paso o paso-carga con una relación carga-paso o paso-carga esperada con el fin de determinar si se presenta al menos un defecto posible con la pala (B1; B2; B3...) y/o el detector o los detectores de las palas.
- 20 2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que el procedimiento i) comprende adicionalmente medir la carga en un conjunto de ángulos de paso (θ) en uno o más ángulos de azimut (δ).
- 25 3. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que las mediciones se hacen a velocidad o velocidades bajas o de viento cero.
4. El procedimiento de la reivindicación 1 ó 2, en el que las mediciones se hacen en condiciones de rotor fijo.
- 30 5. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho posible defecto es al menos una de: defecto de ganancia de paso, defecto de desfase de paso, defecto de desfase de carga, defecto de ganancia de carga, y/o otra desviación del comportamiento normal de la pala y/o el detector o los detectores.
- 35 6. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que se usa al menos un procedimiento matemático y/o algoritmo para el diagnóstico de dicha al menos un posible defecto.
7. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que los resultados se van a usar para el diagnóstico del defecto o los defectos de carga y/o de paso para la estimación de la magnitud del defecto o los defectos y/o para la adaptación del defecto o los defectos.
- 40 8. Un código legible y/o apto para ordenador en un medio legible y/o apto para ordenador adaptado para realizar el procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1-7.

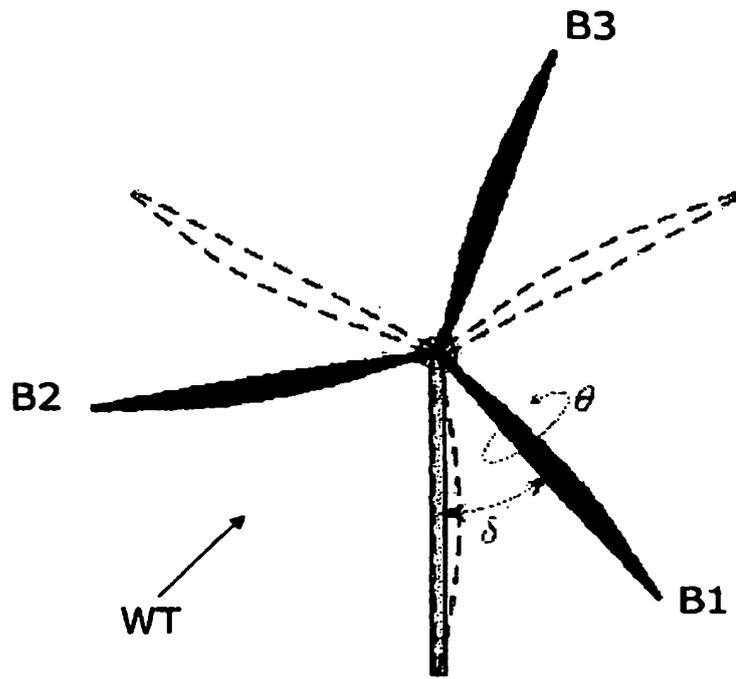


Fig. 1a

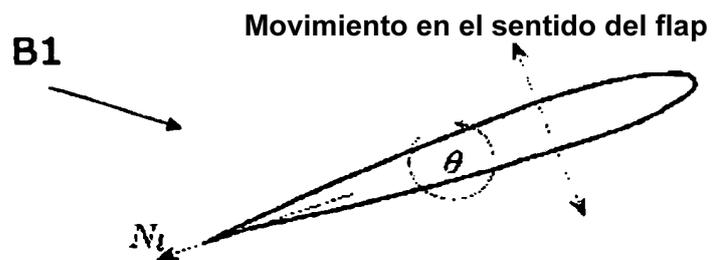


Fig. 1b

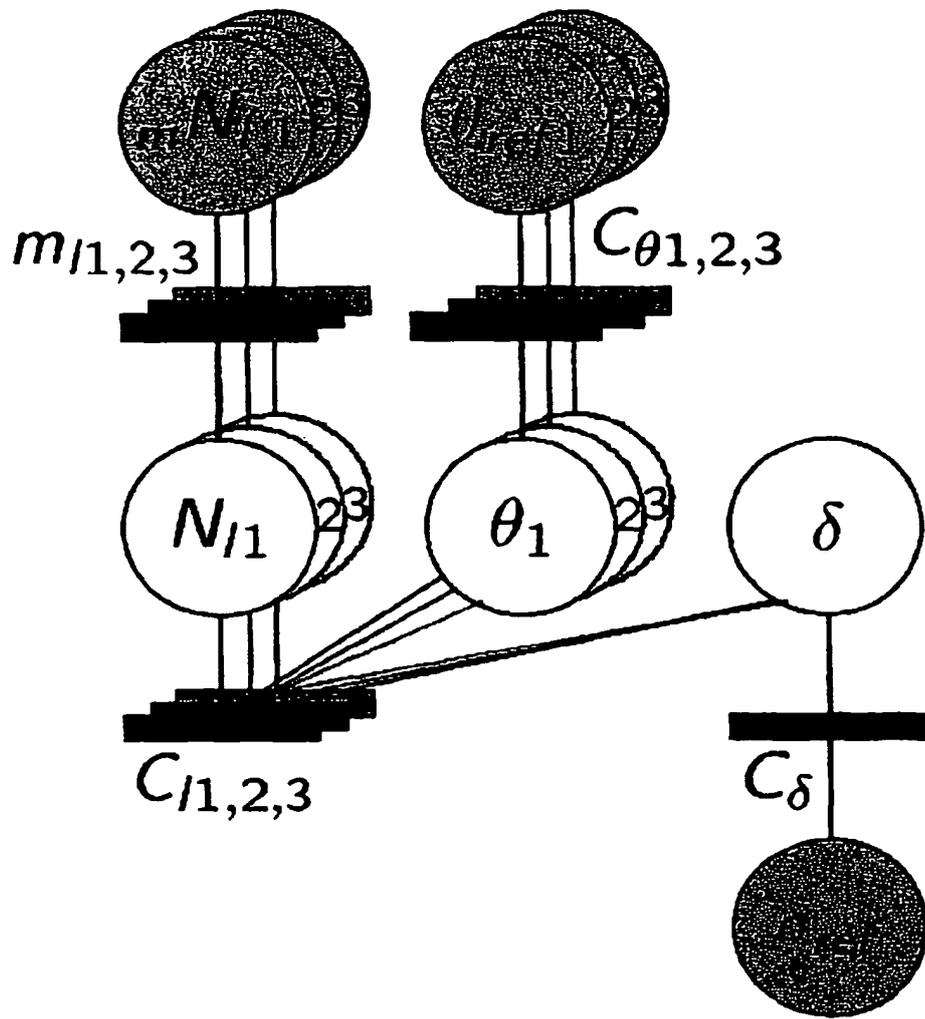


Fig. 2

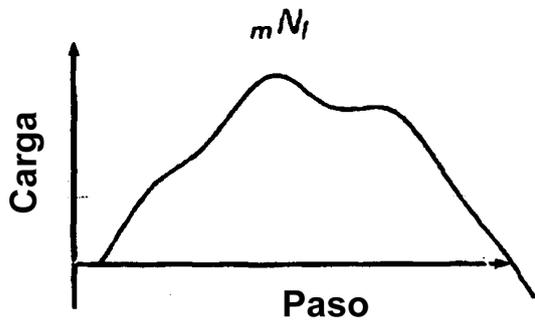


Fig. 3a

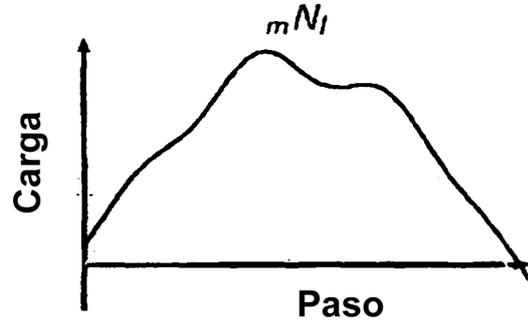


Fig. 3b

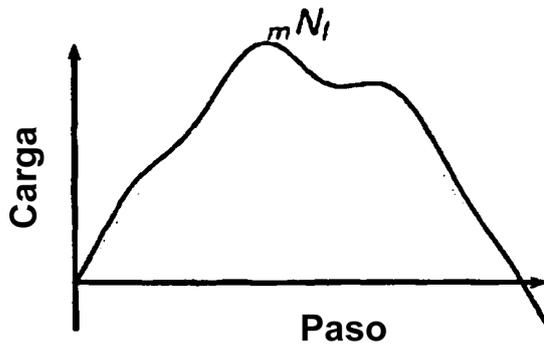


Fig. 3c

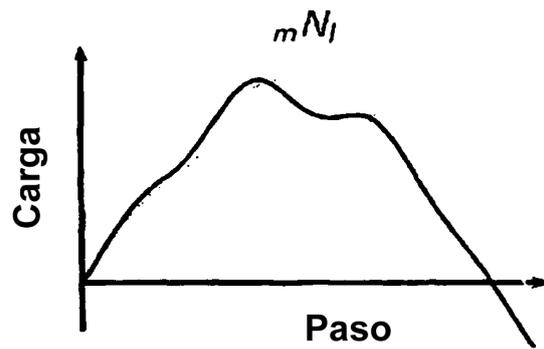


Fig. 3d

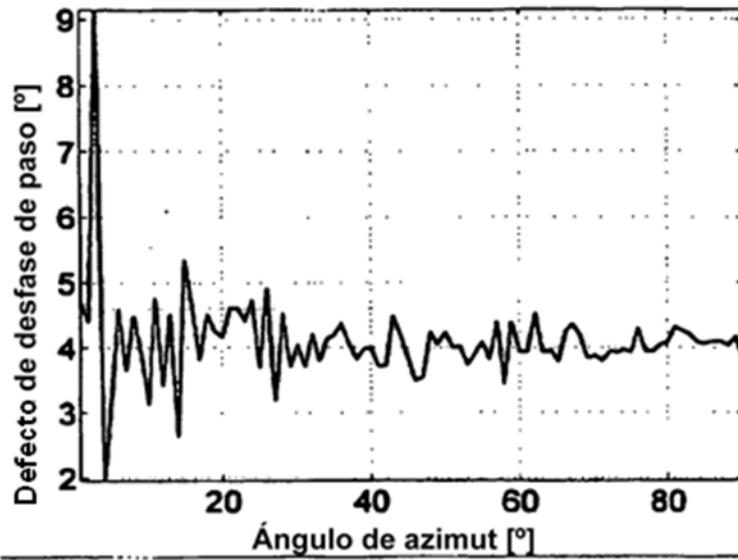


Fig. 4a

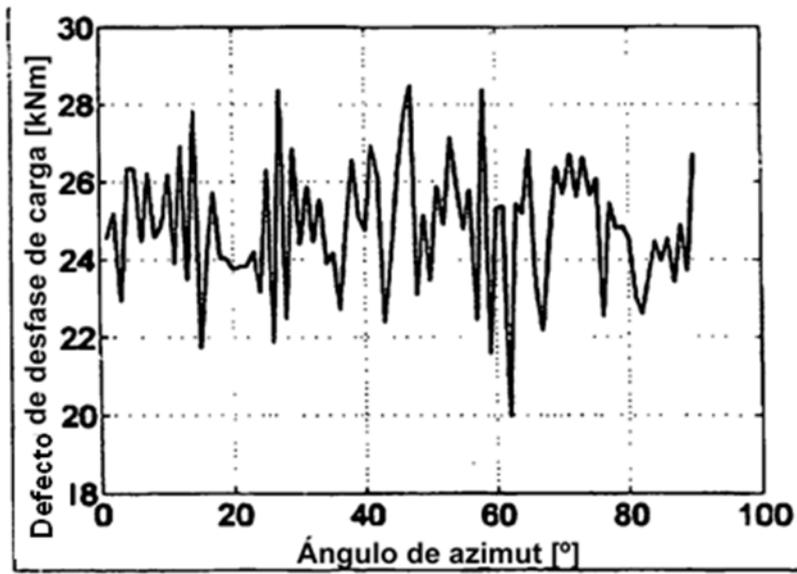


Fig. 4b

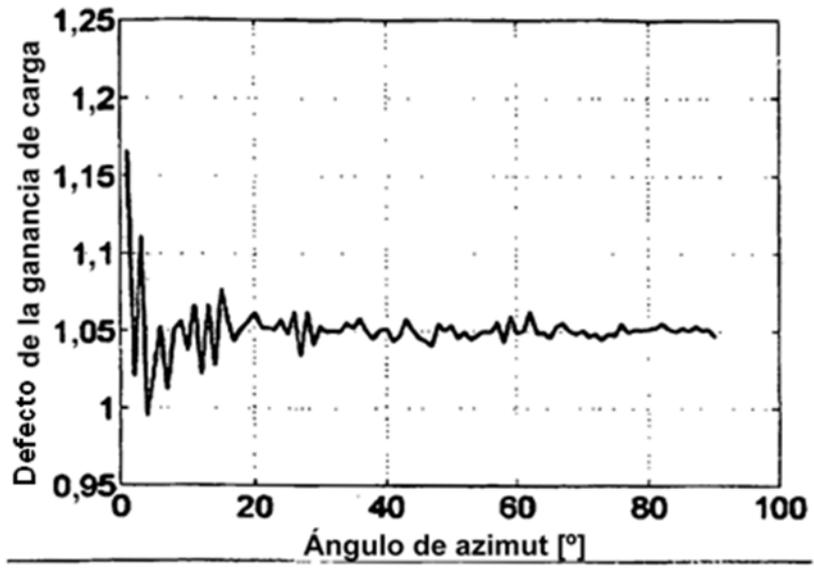


Fig. 4c