

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 717 122**

51 Int. Cl.:

G01M 5/00 (2006.01)

G01M 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.12.2015 PCT/GB2015/054145**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.06.2016 WO16102968**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2015 E 15817526 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.01.2019 EP 3237873**

54 Título: **Pruebas de fatiga**

30 Prioridad:

23.12.2014 GB 201423028

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

19.06.2019

73 Titular/es:

**ORE CATAPULT DEVELOPMENT SERVICES
LIMITED (100.0%)
Offshore House Albert Street
Blyth, Northumberland NE24 1LZ, GB**

72 Inventor/es:

GREAVES, PETER

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 717 122 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

Pruebas de fatiga

5 Campo de la Invención

La presente invención se refiere a la prueba de muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas o similares. En particular, pero no exclusivamente, la presente invención se refiere a pruebas de fatiga de dos ejes de muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas.

10

Actualmente hay una tendencia dentro de la industria de turbinas eólicas hacia turbinas eólicas más grandes para reducir el impacto del costo de instalación, mantenimiento y conexión a la red de una turbina eólica sobre el costo total de la energía convertida por la turbina eólica. Por esta razón, se están diseñando y fabricando paletas más largas y más grandes para capturar una mayor cantidad de energía del viento, con algunas paletas de más de 75 m de largo. El aumento de tamaño da como resultado un aumento de las cargas a las que se somete la paleta durante el uso. Las paletas son algunos de los componentes más críticos de la turbina, por lo que se realizan pruebas a gran escala en todos los nuevos diseños de paletas antes de su lanzamiento al mercado para garantizar que no fallen durante el servicio.

15

20

Hay dos tipos principales de prueba de una paleta de turbina eólica; pruebas estáticas y pruebas dinámicas de fatiga. Las pruebas estáticas demuestran que la paleta puede sobrevivir a las cargas extremas que la paleta verá en servicio y las pruebas de fatiga demuestran que la paleta puede sobrevivir a la vida útil de diseño de la turbina.

25

Convencionalmente, los cabrestantes o los actuadores lineales están unidos a la paleta para aplicar fuerzas a la paleta en típicamente cuatro direcciones diferentes, mientras que la deformación se mide en puntos definidos en la superficie de la paleta. Por lo general, una paleta está orientada horizontalmente y restringida en todas las direcciones desde su raíz, atornillando la raíz a un banco de prueba fijo adecuado. Luego se aplican cargas a la paleta en los lugares y direcciones deseados a lo largo de la paleta. Un tipo de carga que se aplica perpendicularmente al eje longitudinal de la paleta y sustancialmente perpendicular a la cuerda del perfil aerodinámico se conoce como carga axial. Otro tipo de carga que también se aplica perpendicularmente al eje longitudinal de la paleta y sustancialmente paralela a la cuerda del perfil aerodinámico se conoce como carga transversal. Estas pruebas pueden ser estáticas o dinámicas para determinar la rigidez y la resistencia de una paleta o su rendimiento de fatiga respectivamente.

30

35

Otro tipo conocido de prueba es poner en voladizo la paleta en su raíz desde un banco de prueba fijo y hacer que la paleta resuene en un modo de frecuencia natural. Para hacer que la paleta resuene, se sabe que se aplica una carga sinusoidal en la dirección axial o transversal para excitar la paleta en una o más ubicaciones, que se eligen para que la forma del modo resultante resulte en una coincidencia cercana con las cargas deseadas a lo largo de la longitud de la paleta. Estas cargas se calculan de modo que se produzca una cantidad equivalente de daño a la que se predice que se producirá durante la vida útil (generalmente, alrededor de 20 años) de la paleta después de un número determinado de ciclos, generalmente del orden de 1 millón de ciclos.

40

45

La vibración resonante de la paleta reduce la cantidad de energía requerida para aplicar, por ejemplo, flexión o cargas laterales a las paletas. Por lo tanto, la excitación resonante es un método deseable para realizar una prueba de fatiga en una paleta de turbina eólica. Sin embargo, la prueba generalmente se limita a la primera frecuencia natural de la paleta con todo el equipo de prueba montado en ella. Además, a medida que las paletas aumentan en longitud y masa, las fuerzas, las deflexiones y el amortiguamiento aerodinámico que se producen durante una prueba de fatiga cíclica aumentan, y también la frecuencia de resonancia de la paleta disminuye, lo que hace que las pruebas tomen más tiempo y que los costos asociados aumenten.

50

Además, las paletas de las turbinas eólicas se prueban convencionalmente contra la fatiga en las direcciones axial o transversal, y estas pruebas se realizan por separado, con un promedio de alrededor de 1 millón de ciclos a 5 millones de ciclos para cada dirección. Sin embargo, en servicio, las dos cargas ocurren juntas, por lo que este método de prueba no representa las condiciones de servicio de la vida real y requiere una cantidad significativa de tiempo y costo. Para paletas especialmente grandes, el programa de prueba puede durar más de un año, por lo que es deseable un método de prueba que reduzca el tiempo de prueba.

55

60

Un método de prueba de dos ejes convencional es la prueba de desplazamiento forzado en la cual la paleta se carga en las direcciones axial y transversal mediante actuadores lineales unidos a estructuras fijas. Las cargas se pueden aplicar con el ángulo de fase correcto entre ellas, lo que resuelve el problema de las pruebas excesivas, pero como se aplican a una frecuencia sustancialmente diferente a la frecuencia natural de la paleta, la carga es efectivamente casi estática. Esto significa que la porción de la paleta más allá del punto de fijación del cilindro está descargada y la distribución del momento de flexión entre la raíz y el cilindro es lineal. En la práctica, esto significa que las cargas objetivo solo se pueden lograr en una pequeña parte del tramo de la paleta. Además de estos problemas, las altas cargas y los desplazamientos que se requieren significan que se utiliza una gran cantidad de energía y que los costos iniciales de capital también son muy altos. Por estas razones, las pruebas de desplazamiento forzado se vuelven menos atractivas a medida que las paletas aumentan de tamaño.

65

Un sistema de excitación híbrido (como se describe en el documento US2006/0037402) aplica cargas de aleta a una paleta utilizando excitación resonante y cargas transversales se aplican a la paleta mediante desplazamiento forzado. La distribución del momento de flexión en la dirección axial se puede ajustar alterando la forma del modo de la paleta con una masa estática adicional para que la paleta se pruebe con las cargas correctas en una parte mucho mayor de su tramo. Sin embargo, la carga transversal todavía tiene los mismos problemas descritos anteriormente y el método no es factible para paletas grandes. Por ejemplo, tanto el actuador transversal como el actuador resonante son grandes y engorrosos, y el actuador resonante incluye una gran masa recíproca para hacer que la paleta vibre, lo que no sería adecuado para paletas grandes en vista de la masa requerida. Además, si el centro de gravedad del actuador resonante está desplazado del eje de la paleta, se impone un momento irreal en la paleta, particularmente cuando se mueve por el actuador transversal.

El documento EP2720024 A2 revela un método y un sistema para el monitoreo de la salud estructural donde se utiliza un método de modelado de elementos finitos para mejorar el rendimiento de la detección de daños.

El documento US2009/0306909 A1 describe un método para evaluar el valor medido para identificar la fatiga del material mediante la comparación de los valores medidos actuales con los valores medidos previos.

El documento EP2803968 A1 describe un proceso para calcular la fatiga y la falla por fatiga de estructuras utilizando un modelado de estructuras para determinar la tensión debido a los ciclos de carga y luego predecir un daño acumulado debido al ciclo de carga.

Otro método de prueba convencional consiste en agregar una masa adicional a la dirección transversal, que se aísla de la dirección axial mediante el uso de una varilla de empuje con rótulas esféricas en cada extremo. Esto reduce la frecuencia transversal al mismo nivel que la frecuencia axial para que las dos cargas puedan aplicarse a la misma frecuencia con el ángulo de fase correcto entre ellas. Sin embargo, un problema asociado con este método es que se necesita una cantidad significativa de tiempo para configurarlo porque el bastidor que soporta la masa adicional es una estructura grande que debe moverse y fijarse en una posición óptima a lo largo de la paleta.

Además, el tamaño de las masas requeridas para unirse a una paleta relativamente grande significa que el método no es particularmente escalable y no es práctico para probar paletas grandes.

Resumen de la invención

Es un objetivo de la presente invención mitigar al menos parcialmente los problemas mencionados anteriormente.

Es un objetivo de ciertas modalidades de la presente invención proporcionar un método para probar muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas, que es capaz de aplicar simultáneamente carga de fatiga axial y transversal de la muestra de una manera controlada y práctica para simular condiciones de servicio en la vida real.

Es un objetivo de ciertas modalidades de la presente invención proporcionar un método para analizar muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas, que determina las condiciones óptimas de prueba de dos ejes de la cantidad de daño que se acumulará en una o más ubicaciones en una muestra de prueba bajo diferentes condiciones de prueba de doble eje.

Es un objetivo de ciertas modalidades de la presente invención proporcionar un método para analizar muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas, que determina la cantidad de daño que se acumula en una o más ubicaciones en una muestra de prueba durante la prueba y sobre la marcha para permitir que se realicen ajustes en la configuración de la prueba y en los niveles de carga que modifican la forma en que se acumula el daño alrededor de la muestra.

Es un objetivo de ciertas modalidades de la presente invención proporcionar un método para probar muestras alargadas, tales como paletas de turbinas eólicas, que permita una mayor correspondencia con el daño de la vida útil mientras se conservan los beneficios de las pruebas resonantes. De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método para probar la fatiga en una muestra alargada de acuerdo con la reivindicación 1.

Apropiadamente, cada uno de la pluralidad de bloques de prueba predeterminados se define por al menos una primera carga cíclica que tiene una primera amplitud de carga cíclica y una primera duración de prueba para aplicar dicha primera carga cíclica a la muestra.

Apropiadamente, la primera carga cíclica es aplicable a la muestra en una dirección sustancialmente perpendicular con respecto a un eje longitudinal de la muestra.

De manera adecuada, cada uno de la pluralidad de bloques de prueba predeterminados se define adicionalmente por una carga cíclica adicional que tiene una amplitud de carga cíclica adicional y una duración de prueba adicional para aplicar dicha carga cíclica adicional a la muestra.

Apropiadamente, la carga cíclica adicional es aplicable a la muestra en una dirección sustancialmente perpendicular con respecto a un eje longitudinal de la muestra.

Apropiadamente, la primera carga cíclica es sustancialmente perpendicular a la carga cíclica adicional.

5

Apropiadamente, el método comprende, además:

determinar una combinación de una pluralidad de dichos bloques de prueba asociados con la pluralidad de bloques de prueba predeterminados, en donde dicha combinación provoca una suma de daños de prueba en cada una de las ubicaciones que coincide al menos sustancialmente con la suma de daños de vida útil en cada una de las ubicaciones cuando dichos bloques de prueba se aplican a la muestra.

10

Apropiadamente, el método comprende, además:

determinar la combinación de dichos bloques de prueba que se aplicarán a la muestra en respuesta a la aplicación de una rutina de optimización basada en mínimos cuadrados restringidos para comparar la suma de daños prevista con la suma de daños de la vida útil para las ubicaciones.

15

Apropiadamente, el método comprende, además:

aplicar físicamente al menos un bloque de prueba a la muestra.

20

Apropiadamente, el método comprende, además:

determinar una suma de daños de prueba en las ubicaciones mientras se aplica al menos un bloque de prueba a la muestra de prueba.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema para probar la fatiga en una muestra alargada de acuerdo con la reivindicación 9 y que comprende:

25

un controlador para realizar el método de acuerdo con el primer aspecto de la presente invención; y aparato operativamente asociado con el controlador para aplicar al menos un bloque de prueba seleccionado a una muestra alargada.

30

Apropiadamente, al menos un bloque de prueba comprende una primera carga cíclica aplicada en una primera dirección a la muestra alargada y una carga cíclica adicional aplicada en una dirección adicional a la muestra alargada.

Apropiadamente, el sistema comprende al menos un sensor asociado operativamente con la muestra y con el controlador.

35

Según un tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un producto de programa informático en el que se almacena un programa informático de acuerdo con la reivindicación 12.

Ciertas modalidades de la presente invención pueden proporcionar un método de prueba de fatiga optimizado para analizar muestras alargadas, como paletas de turbinas eólicas, que determina la cantidad de daño que se acumula en una o más ubicaciones en una muestra de prueba durante la prueba y "sobre la marcha" para permitir que se realicen ajustes en la configuración de la prueba y en los niveles de carga que modifican la forma en que se acumula el daño alrededor de la muestra y, a su vez, se aseguran de que la prueba progrese correctamente.

40

Breve descripción de los dibujos

45

Las modalidades de la presente invención se describirán de ahora en adelante, a modo de un único ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la Figura 1 ilustra las diferentes cargas que actúan sobre una paleta de turbina eólica;

la Figura 2 ilustra un ejemplo de la numeración de nodos de sección transversal alrededor de una sección de una paleta de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención;

50

la Figura 3 ilustra las curvas SN para un material compuesto de las paletas;

la Figura 4 ilustra un aparato para aplicar cargas cíclicas de dos ejes optimizadas, de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, a una paleta de turbina eólica;

55

la Figura 5 ilustra un ejemplo de cinco bloques de prueba seleccionados para una prueba optimizada de una paleta de turbina eólica, de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención;

la Figura 6 ilustra el efecto de daño de los bloques de prueba (bloques de carga) de la Figura 5 cuando se aplica individualmente a la sección de la raíz de la paleta;

la Figura 7 ilustra el efecto de daño acumulativo de los bloques de prueba de la Figura 5 cuando se aplica de manera acumulativa a la sección de la raíz de la paleta;

60

las Figuras 8 a 13 ilustran una comparación de la suma de daños en cada ubicación alrededor de diferentes secciones de las paletas para un método de prueba de fatiga optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención y métodos de prueba de fatiga no optimizados; y

la Figura 14 ilustra un diagrama de flujo del método de prueba de fatiga optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención.

65

Descripción de las modalidades

En los dibujos los mismos números de referencia se refieren a las partes similares.

5 De acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, se analizan y describen en este documento múltiples casos de carga para pruebas de fatiga de paletas de turbinas eólicas. Estos casos de carga se denominan en este documento "bloques de prueba" (o "bloques de carga") con el propósito de describir ciertas modalidades de la presente invención. Sin embargo, se entenderá que otros tipos de muestras alargadas, como un ala de avión, una paleta de rotor de helicóptero, una paleta de turbina de marea o similares, pueden probarse de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención y la presente invención no está limitada a probar las paletas de turbinas eólicas.

10 Los casos de carga más importantes generalmente dependen de los diseños individuales de las paletas pero, para un análisis de fatiga de una paleta de turbina eólica, los casos de carga generalmente incluyen lo siguiente: estacionados en un viento turbulento por encima y por debajo de las velocidades del viento de conexión y desconexión (en etapas de hasta aproximadamente 2 m/s), operacional en viento turbulento (en etapas de hasta aproximadamente 2 m/s) entre la velocidad del viento de conexión y desconexión, operacional con fallas y arranques y paradas normales en las velocidades de viento de conexión/desconexión/intermedio.

15 Bajo estos escenarios operacionales, las principales fuentes de carga de paletas son aerodinámica, gravitacional, centrífuga, giroscópica y operativa. La carga aerodinámica es inevitable y es vital para la función del turbina eólica. A medida que las turbinas aumentan de tamaño, la masa de la paleta generalmente aumenta proporcionalmente a una velocidad cúbica. Las fuerzas gravitacionales y centrífugas se vuelven críticas debido al aumento de la masa de la paleta. Las cargas giroscópicas resultan de la orientación de la turbina durante la operación.

20 Las cargas aerodinámicas se generan al elevar y arrastrar la sección del perfil aerodinámico de la paleta, que depende de la velocidad del viento, la velocidad de la paleta, el perfil aerodinámico y el ángulo de ataque. El ángulo de ataque depende de la torsión y la inclinación de la paleta. La elevación y el arrastre aerodinámicos producidos resultan en empuje en la dirección del eje del cubo y el par alrededor de este eje que es absorbido por el generador y las fuerzas de reacción. Las fuerzas de reacción actúan sustancialmente en el plano de flexión axial y deben ser toleradas por la paleta con una deformación limitada. Las fuerzas aerodinámicas se calculan utilizando la teoría convencional del momento de la paleta (BEM), como se entenderá en la técnica.

25 Las fuerzas gravitacionales y centrífugas dependen de la masa y generalmente aumentan cúbicamente al aumentar el diámetro de la turbina. Por lo tanto, las cargas inerciales son críticas para turbinas que tienen un diámetro de alrededor de 70 metros o más. La fuerza centrífuga es un producto de la velocidad de rotación al cuadrado y de la masa y actúa radialmente hacia afuera, por lo tanto, el aumento de la demanda exige una mayor velocidad de la punta de la paleta. Las cargas centrífugas y gravitacionales se superponen para dar una condición alterna desplazada positivamente con una frecuencia dictada por la velocidad angular de la revolución de la paleta del rotor.

30 Una paleta de turbina se puede dividir en tres áreas principales clasificadas por función aerodinámica y estructural. La "raíz de la paleta" es la transición entre el montaje circular y el primer perfil del perfil aerodinámico y lleva las cargas más altas. El diseño del 'tramo medio' de la paleta equilibra las consideraciones aerodinámicas y estructurales y la 'punta' de la paleta es aerodinámicamente crítica y donde se maximizará la relación de elevación a arrastre.

35 Las diferentes cargas que actúan sobre la raíz de una paleta de turbina eólica y sobre una sección a lo largo del tramo medio de la paleta se ilustran en la Figura 1.

El momento de flexión axial que actúa sobre la paleta es sustancialmente el resultado de las cargas aerodinámicas.

40 El momento de flexión transversal es sustancialmente el resultado de la masa y la gravedad de la paleta. Las leyes de escalamiento simple dictan un aumento cúbico en la masa de la paleta al aumentar el tamaño de la turbina, de modo que para tamaños de turbina que superen los 70 metros, se dice que este caso de carga es cada vez más crítico. El momento de flexión en el borde está en su máximo cuando la paleta alcanza la posición horizontal.

45 Las cargas que actúan sobre una sección transversal dada de la paleta (momentos de flexión axial y transversal, fuerza axial, fuerzas de cizallamiento axial y transversal y momento de torsión alrededor del eje longitudinal) se calculan utilizando un software de simulación de turbina eólica como Bladed, HAWC2 o FAST, o similares.

50 Este software de simulación comprenderá típicamente un modelo estructural de la turbina completa, y contará con cargas aerodinámicas, cargas hidrodinámicas (para turbinas eólicas marinas), carga inercial, carga desde dispositivos de control tal como actuadores de inclinación de la paleta o de la góndola, y carga eléctrica provocada por el comportamiento de la rejilla.

55 Los momentos de flexión axial y transversal tienen la mayor influencia sobre la tensión axial de la paleta en uso. Estas cargas tienen un componente cíclico que surge del hecho de que la velocidad del viento tiende a aumentar con la altura y el aire tiende a estancarse frente a la torre de la turbina. Sobrepuesta a esta carga periódica está la carga aleatoria

provocada por la turbulencia. Por lo tanto, las principales condiciones de carga aplicadas a la paleta no son estáticas sino cíclicas en la forma de carga de fatiga que puede ocurrir cuando un material se somete a una carga repetida no continua que hace que se exceda la vida de fatiga del material. La carga de fatiga es el resultado de las cargas cíclicas gravitacionales que son iguales al número de rotaciones del rotor durante toda la vida útil de la turbina, generalmente alrededor de 20 años. Además, las cargas estocásticas relativamente pequeñas se crean con ráfagas de viento que contribuyen aproximadamente a 1×10^9 Cargas cíclicas durante la vida útil de la turbina.

De acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, los historiales de tiempo de carga se generan para un intervalo de diferentes secciones transversales a lo largo de la paleta para todos los casos de carga especificados en los estándares de diseño (consulte la etapa S140 de la Figura 14) y que son representativos del entorno de servicio experimentado por la paleta. Los estándares de diseño varían de acuerdo con el país, pero se utilizan opcionalmente las directrices de DNV-GL para la certificación de turbinas eólicas e IEC 61400-1 Wind turbines - Part 1: Design requirements. Un caso de carga de fatiga puede comprender 10 minutos de funcionamiento normal a una velocidad media del viento dada (por ejemplo, alrededor de 10 m/s) utilizando el modelo de turbulencia normal. Los modelos de turbulencia explican la naturaleza estocástica de la velocidad del viento en 3 dimensiones, y se especifican en los estándares de diseño descritos anteriormente.

La frecuencia de ocurrencia de cada caso de carga operacional y estacionada se calcula a partir de la distribución estadística de la velocidad del viento utilizando un método descrito en los estándares de diseño. Este método implica asumir que la distribución estadística de la velocidad promedio del viento de 10 minutos se puede describir mediante una distribución de Weibull con un factor de forma de 2 (un caso especial, conocido como distribución de Rayleigh). La velocidad del viento se divide en intervalos desde 0 m/s hasta un máximo especificado en las pautas de diseño, y la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre en un intervalo determinado se calcula integrando la distribución de Rayleigh entre el inicio y el final del intervalo.

La frecuencia de ocurrencia de los casos de arranque y apagado y otros casos de carga a menudo está dictada por el comportamiento del sistema de control, y generalmente está de acuerdo con el organismo de certificación en una base ad-hoc.

Como se muestra en la etapa S142 de la Figura 14, los historiales de tiempo de tensión se generan a partir de los historiales de tiempo de carga en un intervalo de ubicaciones separadas alrededor de la superficie de la paleta en cada sección transversal, utilizando por ejemplo la teoría de vigas o un modelo de elementos finitos de la paleta, o similar. Un "historial de tiempo de tensión" es una lista del valor de la tensión (la relación de la deformación total a la dimensión inicial del cuerpo del material) en puntos discretos (a los que se hace referencia aquí como "ubicaciones" o "nodos") en el tiempo. En la Figura 2 se ilustran, por ejemplo, las ubicaciones numeradas alrededor de una sección de la paleta a mitad del tramo. Se han utilizado treinta y seis ubicaciones en esta modalidad solo a manera de ejemplo y se entenderá que puede preverse cualquier número deseado de ubicaciones y secciones transversales.

Como se muestra en la etapa S144 de la Figura 14, el historial de tiempo de tensión de amplitud variable en cada ubicación alrededor de la sección de la paleta se reduce a una serie de ciclos de amplitud constante utilizando un método de conteo de ciclos, como el conteo de flujo de lluvia.

Como se muestra en la etapa S146 de la Figura 14, el análisis de fatiga de los historiales de tiempo de tensión en cada ubicación alrededor de la sección elegida se realiza para calcular una suma de daños en la vida útil prevista D para cada ubicación. La suma de los daños en la vida útil D provocado por el historial de casos de carga se calcula utilizando el supuesto de daño lineal Palmgren-Miner de acuerdo con la ecuación (1) siguiente. Sin embargo, se entenderá que se pueden usar otros métodos adecuados para realizar un análisis de fatiga de los historiales de tiempo de tensión en cada ubicación para una sección de la paleta respectiva.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n}{N_i} \quad (1)$$

En la ecuación (1), N es el número de ocurrencias del caso de carga durante la vida útil de la turbina, k es el número total de ciclos en el historial de tiempo, N_i es el número de repeticiones hasta el fallo de un ciclo con las características del ciclo i y D es la suma de los daños, un número generalmente de 0 a alrededor de 1 que representa la proporción de la vida que se ha consumido.

El número de repeticiones hasta el fallo para un ciclo dado N_i se calcula utilizando una curva SN (a veces llamada curva de Wöhler) para el material de la paleta. Las paletas de las turbinas eólicas generalmente están hechas de materiales compuestos que tienen propiedades de fatiga muy diferentes dependiendo de si están sufriendo compresión, resistencia a la tracción o fatiga reversa. Se realizan pruebas de cupones a pequeña escala para caracterizar el material en un intervalo de condiciones, y las curvas SN para ciclos entre las condiciones para las cuales se ha caracterizado el material se calculan por interpolación. Las curvas SN típicas para un intervalo de diferentes condiciones de carga se ilustran en la

Figura 3. El método de prueba de dos ejes de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención explota el hecho de que los materiales compuestos exhiben un comportamiento de fatiga diferente dependiendo del nivel de deformación medio.

5 El daño de la vida útil es la suma de daños resultante del historial de tiempo de tensión provocado por las cargas de la vida útil. Es este daño en la vida útil que las pruebas físicas de muestras de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención buscan replicar.

10 El historial de tiempo de tensión se calcula utilizando el supuesto de daño lineal de Palmgren-Miner o similar. Este proceso se puede aplicar en más de una ubicación en la paleta (las cargas y las tensiones serán diferentes en cada ubicación, y las propiedades de fatiga del material también pueden ser diferentes en cada ubicación).

15 Las etapas S140 a S148, como se muestra en la Figura 14, pueden denominarse etapas de diseño de la paleta del método de prueba optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención. Las etapas S150 a S162, como se muestra en la Figura 14, pueden denominarse etapas de prueba de paletas a escala completa de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención. Esta etapa incluye la aplicación física y técnica de bloques de prueba en una paleta física para realizar pruebas de fatiga de dos ejes en la paleta física de una manera optimizada de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención. Si bien se usa un método matemático para obtener la mejor combinación de bloques de prueba, por ejemplo, la etapa S156, es perfectamente posible que se pueda usar el método de prueba y error o un método de optimización diferente para encontrar la mejor combinación de bloques de prueba para aplicar a la paleta física muestra.

25 Después de que se hayan realizado los cálculos de daños en la vida útil para cada ubicación alrededor de una sección de la paleta respectiva, las amplitudes del momento de flexión objetivo en las direcciones axial y transversal se calculan para esa sección utilizando el mismo método de análisis de fatiga descrito anteriormente (como se muestra en la etapa S150 de la Figura 14). Sin embargo, a medida que el comportamiento de la fatiga cambia de acuerdo con la relación de tensión, no existe una solución de forma cerrada para determinar la amplitud de la tensión que provoca la misma cantidad de daño que en la vida útil en una ubicación específica en una sección de la paleta, por lo que este proceso generalmente es iterativo (por ejemplo, una búsqueda en bisección es un método particularmente robusto para determinar la amplitud de tensión correcta, como se describe a continuación). Las amplitudes de los momentos de flexión objetivo se calculan para cada sección de modo que el momento de flexión axial provoque sustancialmente la misma cantidad de daño $D_{objetivo}$ en ubicaciones clave en el lado de presión (PS como se indica en la Figura 2) de la paleta después de un número predeterminado de ciclos N , como alrededor de unos 5 millones de ciclos, como el daño en la vida útil D previamente calculado para esos lugares. Para la dirección transversal, el borde de salida (TE, como se indica en la Figura 2) es generalmente la parte más dañada, por lo que el daño es prácticamente igual en las ubicaciones clave allí durante un número predeterminado de ciclos.

35 Si el daño de la vida útil en las ubicaciones clave toma el valor D y n es el número de ciclos en la prueba (típicamente 5 millones), entonces, utilizando la regla de Palmgren-Miner, el número de ciclos N el fallo de la paleta se puede calcular utilizando la siguiente ecuación como se resuelve de la ecuación (1) anterior:

$$N = \frac{n}{D} \quad (2)$$

45 El diagrama de Goodman es lineal por partes, por lo que la curva SN varía con el valor R del ciclo, como se entenderá en la técnica. Esto significa que no hay una fórmula simple para calcular qué amplitud de momento de flexión dará como resultado N ciclos hasta el fallo.

50 El momento de flexión objetivo que resulta en la amplitud de tensión correcta se determina numéricamente mediante una búsqueda de bisección. Esto se realiza de la siguiente manera:

1. Se eligen los límites inferior y superior para la amplitud del momento de flexión y se calcula el punto medio entre los dos límites;
2. El límite inferior y el punto medio o el punto medio y el límite superior incluirán un valor de la amplitud del momento de flexión que dará como resultado un valor correcto para N ;
- 55 3. Los límites se redefinen como el punto medio y cualquiera de los dos límites de la solución, y se calcula un nuevo punto medio; y
4. Las etapas 2 a 3 se repiten hasta que la diferencia entre los dos límites se encuentre dentro de una tolerancia predefinida.

60 La amplitud del momento de flexión que resultará en una amplitud de tensión dada se calcula utilizando la siguiente ecuación, donde ϵ_a es la amplitud de la tensión, IE es la rigidez a la flexión en la dirección en cuestión, y y es la distancia al eje neutral.

$$65 \quad M_a = \frac{\epsilon_a EI}{y} \quad (3)$$

Como se muestra en la etapa S152 de la Figura 14, ya sea mediante simulación o utilizando datos de tensión obtenidos de una muestra de prueba física, los historiales de tiempo de tensión correspondientes a las respectivas amplitudes de tensión objetivo se crean para al menos las ubicaciones clave alrededor de la sección elegida de la paleta, en donde cada amplitud de tensión objetivo se basa en una duración de prueba predeterminada y un bloque de prueba predeterminado. El bloque de prueba está predeterminado porque los niveles de carga axial y transversal y el ángulo de inclinación se determinan antes de que comience la prueba como parte del proceso de especificar las condiciones de prueba. Un método de optimización de acuerdo con la presente invención (en la etapa S156) se usa más adelante para determinar cuántas veces hay que repetir cada uno de los bloques de prueba predeterminados para obtener un daño de prueba en cada ubicación (nodo) en la sección transversal respectiva de la paleta que coincide sustancialmente con el daño de vida útil predeterminado en cada ubicación respectiva (nodo).

Apropiadamente, los historiales de tiempo de tensión correspondientes se crean para varios bloques de prueba predeterminados diferentes, en donde cada bloque de prueba predeterminado se define por un ángulo de inclinación de la paleta, una amplitud del momento de flexión objetivo axial y una amplitud del momento de flexión objetivo transversal (ver Figura 5). Por ejemplo, la paleta puede inclinarse en varios ángulos diferentes, como 10 ángulos igualmente separados entre 0 y 360 grados alrededor de un eje longitudinal de la paleta, lo que altera la tensión media alrededor de la sección transversal de la paleta debido al peso propio de la paleta, mientras que los momentos de flexión objetivos axial y transversal se pueden elegir para que aumenten desde un valor más pequeño que la carga objetivo a un valor más grande que la carga objetivo en, por ejemplo, 10 etapas. Esto significaría $10 \times 10 \times 10 = 1000$ análisis. Estos análisis son para un período relativamente corto (pero lo suficientemente largo como para que el comportamiento sea representativo de las condiciones a largo plazo, pero no tanto como para que el tiempo de cálculo sea excesivo). Una duración de simulación de alrededor de 100 segundos es suficiente para capturar el comportamiento. Para los fines de describir la presente invención, los bloques de prueba se denominan bloques de prueba "predeterminados" porque los niveles de carga axial y transversal y el ángulo de inclinación se determinan antes de que comience la prueba física como parte del proceso de determinación de las condiciones de prueba óptimas para una muestra particular de prueba.

Como se describió anteriormente, los historiales de tiempo de tensión creados en la etapa S152 para al menos las ubicaciones clave alrededor de la sección elegida de la paleta pueden determinarse utilizando datos de tensión obtenidos de una muestra de prueba física. Por ejemplo, se pueden llevar a cabo una serie de pruebas físicas cortas y representativas en la muestra utilizando diferentes combinaciones de carga axial y transversal para obtener historiales de tiempo de tensión para diferentes combinaciones de carga y ángulos de inclinación. Esto implicaría montar la paleta en el banco de pruebas (como se muestra en la Figura 4) y colocar medidores de tensión en los puntos de interés en la paleta, por ejemplo, en una parte de la paleta más dañada por la vida útil, o cerca de un detalle estructural. Los historiales de tiempo de tensión se podrían registrar directamente para establecer la duración de la carga en diferentes niveles de carga axial y transversal y diferentes ángulos de inclinación (esto se podría lograr variando las amplitudes los excitadores axial (412 en la Figura 4) y transversal (414 en la Figura 4) independientemente). Estos historiales de deformación se analizarían para calcular la suma de daños utilizando el mismo método aplicado para la vida útil. Entonces se podría determinar la mejor combinación de bloques de prueba para igualar el daño de vida útil calculado en estos puntos de interés.

Como se muestra en la etapa S154 de la Figura 14, los historiales de tiempo de tensión asociados con las amplitudes de la tensión objetivo se analizan utilizando los mismos métodos y datos de materiales utilizados anteriormente para calcular el daño en la vida útil en cada ubicación para obtener una suma de daños prevista en cada ubicación para cada bloque de prueba predeterminado.

Como se muestra en la etapa S156 de la Figura 14, luego se usa un método de ajuste de curva de mínimos cuadrados restringidos no negativos para encontrar qué combinación de las amplitudes de deformación objetivo y, por lo tanto, de los bloques de prueba predeterminados provocan una suma de daños prevista en cada ubicación que mejor se adapta a la distribución de daños en la vida útil como se determinó previamente para cada ubicación alrededor de una sección transversal respectiva de la paleta. Esta combinación de bloques de prueba también se puede encontrar por prueba y error o un método de optimización alternativo.

La forma de este problema de optimización se muestra a continuación mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} D_{S_1L} \\ D_{S_2L} \\ \vdots \\ D_{S_{n-1}L} \\ D_{S_nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{S_1T_1} & D_{S_1T_2} & \dots & D_{S_1T_{N-1}} & D_{S_1T_N} \\ D_{S_2T_1} & D_{S_2T_2} & \dots & D_{S_2T_{N-1}} & D_{S_2T_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D_{S_{n-1}T_1} & D_{S_{n-1}T_2} & \dots & D_{S_{n-1}T_{N-1}} & D_{S_{n-1}T_N} \\ D_{S_nT_1} & D_{S_nT_2} & \dots & D_{S_nT_{N-1}} & D_{S_nT_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix} \quad \text{sujeto a } x \geq 0 \quad (4)$$

En la ecuación anterior (4), D se refiere a la suma de daños y x es el número de repeticiones de la prueba. El subíndice S se refiere a una ubicación del medidor de tensión (con n medidores de tensión), el subíndice T se refiere al bloque de prueba (con N bloques de prueba) y el subíndice L se refiere a la vida útil prevista. La ecuación se resuelve para x .

5 En otras palabras, el método de prueba de fatiga optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención determina la mejor combinación de bloques de prueba, es decir, bloques de prueba predeterminados, cada uno de los cuales está definido por los momentos de flexión axial y transversal que se aplicarán a una sección de la paleta, y un ángulo de inclinación de la paleta, que replica lo más cerca posible del daño provocado a la paleta en su vida útil. Esta combinación óptima de bloques de prueba también se puede encontrar usando prueba y error o una metodología de optimización alternativa. En el enfoque de prueba y error, la persona responsable de definir la combinación de bloques de prueba que se aplicarán a la paleta podría preparar gráficos de la suma de daños contra la posición en la paleta para cada bloque de prueba. Estos gráficos podrían compararse con un gráfico de la suma de los daños de la vida útil frente a la posición en la paleta a simple vista, y el ingeniero de pruebas podría decidir cuántos ciclos de cada bloque de prueba aplicar de acuerdo con su criterio.

15 Como se muestra en la etapa S158 de la Figura 14, la combinación de bloques de prueba determinada por el procedimiento de prueba optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención se aplica luego a una muestra de prueba de paletas físicas. Los bloques de prueba están definidos por el ángulo de inclinación, la amplitud axial y la amplitud transversal. Es una práctica real en el sector que, al probar las paletas, realizar dos bloques de prueba por separado (uno solo con cargas axiales y otro solo con cargas transversales), sin variación del ángulo de inclinación durante la prueba. Si se realizan pruebas biaxiales, las cargas y el ángulo de inclinación no varían y solo se realiza un bloque de prueba. Aplicados por su cuenta, los bloques de carga separados no coinciden bien con los daños en la vida útil. Sin embargo, al realizar la carga con múltiples bloques de prueba con diferentes niveles de carga axial y transversal y diferentes ángulos de inclinación de la paleta en el banco de pruebas (ver Figuras 6 y 7) de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, es posible crear un efecto acumulativo para igualar, al menos acercarse, el daño provocado por la prueba al daño provocado por la vida útil con un nivel de precisión mucho mayor como se demuestra en las Figuras 8 a 13.

30 Como se muestra en la etapa S160 de la Figura 14, es posible recalcular los bloques de prueba (casos de carga) usando condiciones de prueba reales si las cargas de prueba física son sustancialmente diferentes a las previstas por las etapas anteriores en el proceso. Por ejemplo, si los historiales de tiempo de tensión creados en la etapa S152 resultan ser incorrectos, pueden actualizarse en parte a través de la prueba física utilizando valores reales obtenidos de la prueba.

35 Como se muestra en la etapa S162 de la Figura 14, el programa de prueba física se completa cuando todos los bloques de prueba se han aplicado a la paleta física en una prueba física a escala completa.

40 El aparato para aplicar la carga de dos ejes a una paleta de turbina eólica se ilustra en la Figura 4. Tal aparato 400 se describe en el documento WO2009/1278521. Una paleta de prueba 402 está montada en su extremo de la raíz 404 en un lecho de prueba 406 de manera que la paleta se extiende sustancialmente horizontal desde el banco de prueba en una disposición en voladizo. De acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, la paleta 402 puede girar en su extremo de la raíz alrededor de un eje longitudinal de la paleta de tal manera que un ángulo de inclinación de la paleta puede ajustarse selectivamente en respuesta al ángulo de inclinación de un bloque de prueba que se aplica a la paleta. Una parte con brida en la raíz de la paleta 400 se atornilla a un concentrador de montaje 408 del banco de pruebas 404 para restringir el extremo de la paleta en todas las direcciones durante una prueba. El concentrador de montaje 408 es giratorio selectivamente para ajustar el ángulo de inclinación de la paleta durante la configuración de la prueba o entre pruebas. El concentrador de montaje 408 gira mediante un motor eléctrico, hidráulico o similar, y puede ser operado de forma remota desde una sala de control o automáticamente mediante un controlador. Durante la prueba, cuando una paleta está sujeta a una carga cíclica de doble eje, el concentrador de montaje 408 se fija y restringe la raíz de la paleta en los seis grados de libertad. El controlador también opera el aparato de carga 410 montado en una ubicación a lo largo de la paleta para aplicar una carga cíclica de dos ejes optimizada de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención a una sección transversal seleccionada de la paleta. El aparato de carga 410 (no mostrado en detalle) comprende una porción de montaje para montar el aparato a una paleta, y dos pares de masas recíprocas separadas para aplicar una carga cíclica de dos ejes a la paleta. Un par de masas separadas 412 se mueve a lo largo de una primera trayectoria de desplazamiento lineal correspondiente en una dirección que es perpendicular al eje longitudinal de la paleta y sustancialmente perpendicular a la cuerda de la paleta (la dirección axial), mientras que el otro par de masas separadas 414 se mueve a lo largo de una trayectoria de desplazamiento lineal adicional correspondiente que es sustancialmente paralela a la dirección de la cuerda de la paleta y perpendicular al eje longitudinal de la paleta (la dirección transversal). Por lo tanto, se aplica un bloque de prueba de dos ejes optimizado que comprende una carga cíclica axial y transversal a una paleta de prueba que está orientada en un ángulo de inclinación determinado para provocar sustancialmente una suma de daños de prueba en cada ubicación alrededor de una sección transversal de la paleta seleccionada que coincide sustancialmente con el daño de la vida útil previsto en esos lugares.

60 Como se entenderá, el controlador (no mostrado) puede comprender un dispositivo informático que incluye un procesador o procesadores y una memoria y es capaz de realizar el método de prueba optimizado como se describe anteriormente de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención. Un sistema de control que incluye el controlador puede comprender además cualquiera de un ordenador personal, teléfono inteligente, tableta o similar, a través de la cual se

puede proporcionar una instrucción para controlar de forma remota el aparato 400 de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención. Uno o más medidores, sensores y/o acelerómetros (no mostrados) pueden montarse en la superficie de la paleta para medir/monitorear un parámetro correspondiente, como tensión, esfuerzo, aceleración, desplazamiento o similar, en una ubicación correspondiente en la paleta. También se pueden usar una o más cámaras y/o láseres como dispositivo de rastreo de datos para medir el desplazamiento de la paleta durante la prueba y asociarse operativamente con el controlador. El sistema de control puede ser un sistema de lazo abierto o un sistema de lazo cerrado que responda a una señal de realimentación proporcionada por un sensor de realimentación. Los datos pueden intercambiarse entre el aparato de carga 400, uno o más medidores, sensores o similares, y el controlador a través de un enlace de comunicación inalámbrico o por cable, por ejemplo, una conexión Ethernet fija. Por lo tanto, se puede aplicar un bloque de prueba optimizado o una combinación de bloques de prueba a una paleta para someter la paleta a una carga de fatiga cíclica de dos ejes para replicar sustancialmente la carga de la vida real a lo largo de una vida útil de la paleta, al tiempo que permite parámetros de prueba, tales como como daño, tensión o similares, que se medirá y controlará durante una prueba de tal manera que otros parámetros de prueba, como la amplitud de la carga, la inclinación de la paleta, la frecuencia, o similares, se puedan ajustar de manera selectiva para provocar que ocurra el daño objetivo deseado en uno o más ubicaciones alrededor de una sección transversal de la paleta que coincida sustancialmente con un daño de vida útil previsto en esa ubicación en la paleta. En otras palabras, ciertas modalidades de la presente invención pueden proporcionar un método optimizado para la prueba de fatiga de las paletas de turbinas eólicas que determina la cantidad de daño que se acumula en una o más ubicaciones en una paleta de prueba durante la prueba y "sobre la marcha" para permitir ajustes a la configuración de la prueba que se realizará que modifica la forma en que se acumula el daño alrededor de la muestra y, a su vez, garantiza que la prueba progrese correctamente.

En el siguiente ejemplo, se analizaron seis secciones transversales de la paleta utilizando las etapas anteriores y los bloques de prueba optimizados determinados para que coincidan sustancialmente con el daño de la vida útil de la paleta.

La Figura 6 ilustra el efecto que cada uno de los cinco bloques de prueba (bloques de carga) en la tabla de la Figura 5 tiene cuando se aplica individualmente a la sección raíz de la lámina de prueba. Como se muestra en la Figura 6, solo el bloque de prueba 4 provoca una suma de daños que es relativamente cercana a la suma de daños de vida útil prevista y solo en relación con las ubicaciones alrededor del borde posterior (TE) de la paleta. En contraste, como se ilustra en la Figura 7, si, de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, se aplican varios bloques de prueba individuales a la paleta de prueba física en lugar de un bloque de prueba, que es el estado actual de la técnica, la suma de daños acumulativos en cada ubicación alrededor de la sección de raíz de la paleta se acerca al daño de vida útil prevista en cada ubicación, hasta que los cinco bloques de prueba se combinan para coincidir sustancialmente con el daño de vida útil prevista para cada ubicación alrededor de la sección de raíz de la paleta de prueba.

Después de que se hayan calculado las cargas equivalentes de diseño para cada sección transversal, se multiplican por factores de seguridad para tener en cuenta la variación en los materiales y la fabricación de las paletas, etcétera. Sin embargo, estos factores de seguridad se han omitido en los cálculos utilizados para generar los siguientes resultados para facilitar las comparaciones entre los métodos. En las siguientes comparaciones, el proceso de optimización de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención se realiza para seis secciones transversales de la paleta a la vez, por lo que la coincidencia no es tan buena como cuando el método de optimización se realiza para una sola sección transversal (como se describió anteriormente en relación con a la sección raíz). Sin embargo, todavía hay una mejora significativa con respecto a la prueba incompleta provocada por los métodos de prueba de fatiga de un solo eje y la prueba excesiva provocada por los métodos de prueba de fatiga de eje doble no optimizados, como se ilustra en la Figura 8.

Como se ilustra en las Figuras 8 a 13, se puede ver que cuando se aplica el método de prueba de fatiga de dos ejes (DA) no optimizado a la paleta de prueba, la suma de daños en las ubicaciones de análisis debajo del número 16, es decir, para la mayoría del lado de presión (PS) de la paleta de prueba, para las seis secciones de la paleta, es significativamente mayor que el daño de vida útil previsto para esas ubicaciones respectivas. Para el caso de la sección de 1.15 m, como se ilustra en la Figura 8, el pico de daño entorno a las ubicaciones de análisis 12 a 13 es mayor que para la vida útil calculada, pero también es indeseable un pico de daño adicional entorno a la ubicación de análisis 6. Por lo tanto, el método de prueba de fatiga de dos ejes no optimizado da como resultado un daño que no es representativo del servicio, mientras que las pruebas de un solo eje (SA) no dañan partes de la paleta que podrían dañarse en la práctica. Esto también se muestra en las comparaciones de daños para las otras secciones, como se ilustra en las Figuras 9 a 13.

En la prueba optimizada de dos ejes (ODA) de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención, el análisis se llevó a cabo aplicando efectivamente la etapa física de rotación de la paleta en el banco de pruebas a la mitad de la prueba y continuando, lo que conduce a una carga media para el siguiente segmento de prueba. Combinando diferentes segmentos de prueba con diferentes rotaciones de paletas y, por lo tanto, diferentes cargas medias, el análisis muestra que la curva de daños para todas las secciones coincidía sustancialmente con la vida útil y fue el más cercano de todos los métodos de prueba. Ciertas modalidades de la presente invención proporcionan así un método de prueba de fatiga de dos ejes que representa sustancialmente las condiciones de servicio de una paleta de turbina eólica.

Por lo tanto, en lugar de calcular una carga equivalente para un número dado de ciclos y luego asegurar que se alcanza esta carga durante la prueba y contar los ciclos, el método de prueba de fatiga optimizado de acuerdo con ciertas modalidades de la presente invención puede calcular el daño "sobre la marcha". A su vez, esto puede permitir que se realicen ajustes en la configuración de la prueba y que se realicen niveles de carga que modifiquen la forma en que se

acumula el daño alrededor de la paleta, lo que permite un ajuste mucho más cercano al daño de la vida útil y al mismo tiempo conserva los beneficios de las pruebas de resonancia.

5 Ciertas modalidades de la presente invención pueden implementarse en forma de un producto de programa informático que comprende instrucciones (es decir, un programa informático) que pueden implementarse en un procesador, almacenado en un subportador de datos tal como un disquete, disco óptico, disco duro, PROM, RAM, memoria flash o cualquier combinación de estos u otros medios de almacenamiento, o transmitidos a través de señales de datos en una red como Ethernet, una red inalámbrica, Internet o cualquier combinación de éstas de otras redes, o realizadas en hardware como un ASIC (circuito integrado de aplicación específica) o un FPGA (arreglo de compuertas de campo programable) u otro circuito configurable o personalizado adecuado para usar en la adaptación del dispositivo equivalente convencional.

10 Ciertas modalidades de la presente invención, aprovechan el hecho de que el daño generalmente se acumula más lentamente en condiciones de compresión y somete a partes de la paleta donde la vida útil a la compresión provoca menos daño al lanzar la paleta en el banco de pruebas. Por lo tanto, el daño se acumulará más lentamente en estas regiones, y el daño se puede agregar a otras partes de la paleta donde sea necesario, lo que proporciona un método de prueba de fatiga más eficiente y realista.

Reivindicaciones

1. Un método para probar la fatiga en una muestra alargada, que comprende:
 5 calcular una suma de daños en la vida útil en una o más ubicaciones en al menos una primera sección respectiva de una muestra alargada, en respuesta a al menos un historial de tiempo de tensión generado para las ubicaciones en la al menos una primera sección de la muestra en función de al menos un historial de tiempo de carga asociado con la primera sección de la muestra;
 10 determinar una suma de daños de prueba prevista en una o más ubicaciones para cada uno de una pluralidad de bloques de prueba predeterminados aplicables por separado a la muestra, en donde cada bloque de prueba predeterminada se define por una duración de prueba respectiva, un ángulo de inclinación de la muestra con respecto a un eje longitudinal de la muestra, una amplitud de carga axial y una amplitud de carga transversal; y
 15 seleccionar al menos un bloque de prueba asociado con la pluralidad de bloques de prueba predeterminados en base a una comparación de la suma de daños de prueba prevista con la suma de daños de vida útil para cada una de las una o más ubicaciones,
 en donde al menos un bloque de prueba seleccionado es aplicable a la muestra y comprende cuántas veces hay que repetir cada uno de los bloques de prueba predeterminados para provocar una suma de daños de prueba en cada una de las ubicaciones para al menos igualar sustancialmente la suma de daños de vida útil en cada una de las ubicaciones.
- 20 2. El método de conformidad con la reivindicación 1, en donde cada uno de la pluralidad de bloques de prueba predeterminados se define por al menos una primera carga cíclica que tiene una primera amplitud de carga cíclica y una primera duración de prueba para aplicar dicha primera carga cíclica a la muestra y en donde opcionalmente la primera carga cíclica es aplicable a la muestra en una dirección sustancialmente perpendicular con respecto a un eje longitudinal de la muestra.
- 25 3. El método de conformidad con la reivindicación 2, en donde cada uno de la pluralidad de bloques de prueba predeterminados se define adicionalmente por una carga cíclica adicional que tiene una amplitud de carga cíclica adicional y una duración de prueba adicional para aplicar dicha carga cíclica adicional a la muestra y en donde opcionalmente la carga cíclica es aplicable a la muestra en una dirección sustancialmente perpendicular con respecto a un eje longitudinal de la muestra.
- 30 4. El método de conformidad con la reivindicación 3, en donde la primera carga cíclica es sustancialmente perpendicular a la carga cíclica adicional.
- 35 5. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además:
 determinar una combinación de una pluralidad de dichos bloques de prueba asociados con la pluralidad de bloques de prueba predeterminados, en donde dicha combinación provoca una suma de daños de prueba en cada una de las ubicaciones que coincide al menos sustancialmente con la suma de daños de vida útil en cada una de las ubicaciones cuando dichos bloques de prueba se aplican a la muestra.
- 40 6. El método de conformidad con la reivindicación 5, que comprende, además: determinar la combinación de dichos bloques de prueba que se aplicaran a la muestra en respuesta a la aplicación de una rutina de optimización basada en mínimos cuadrados restringidos para comparar la suma de daños prevista con la suma de daños de la vida útil para la ubicación.
- 45 7. El método de acuerdo cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además: aplicar físicamente al menos un bloque de prueba a la muestra.
- 50 8. El método de conformidad con la reivindicación 7, que comprende, además:
 determinar una suma de daños de prueba en las ubicaciones mientras se aplica al menos un bloque de prueba a la muestra de prueba.
- 55 9. Un sistema para la prueba de fatiga de una muestra alargada, que comprende:
 un controlador para realizar el método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores; y
 aparato operativamente asociado con el controlador para aplicar al menos un bloque de prueba seleccionado a una muestra alargada.
- 60 10. El Sistema de acuerdo con la reivindicación 9, en donde al menos un bloque de prueba comprende una primera carga cíclica aplicada en una primera dirección a la muestra alargada y una carga cíclica adicional aplicada en una dirección adicional a la muestra alargada.
11. El Sistema de acuerdo con la reivindicación 9 o 10, que comprende además al menos un sensor asociado operativamente con la muestra y el controlador.

12. Un producto de programa informático en donde se almacena un programa informático que comprende instrucciones que, cuando se implementan en un ordenador, controlan el ordenador para realizar el método reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

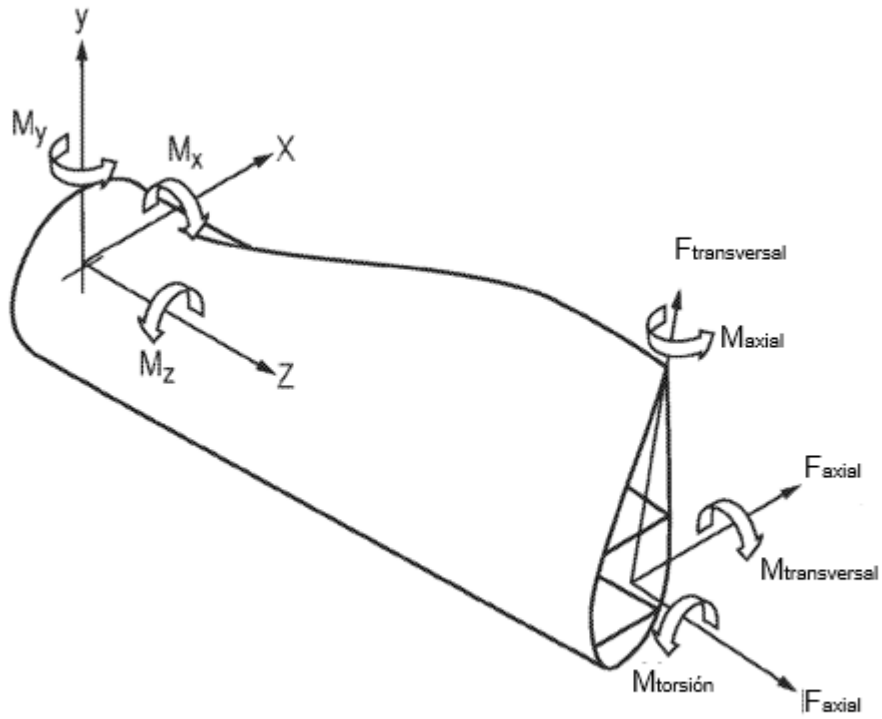


FIG. 1

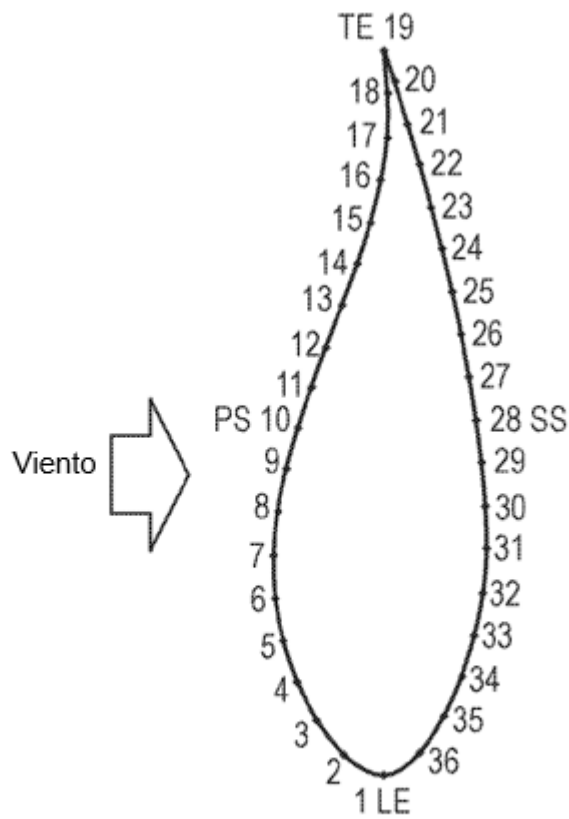


FIG. 2

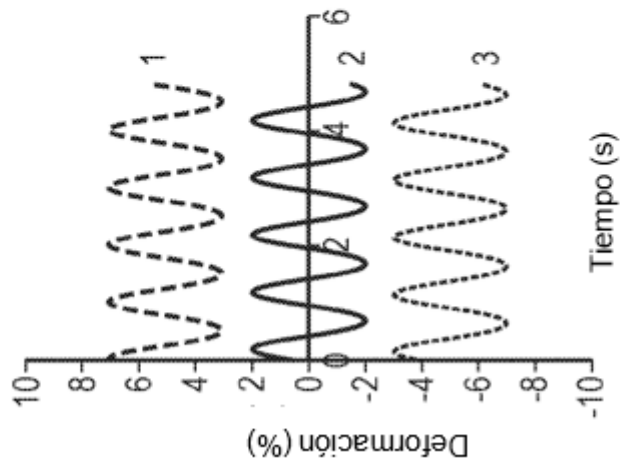
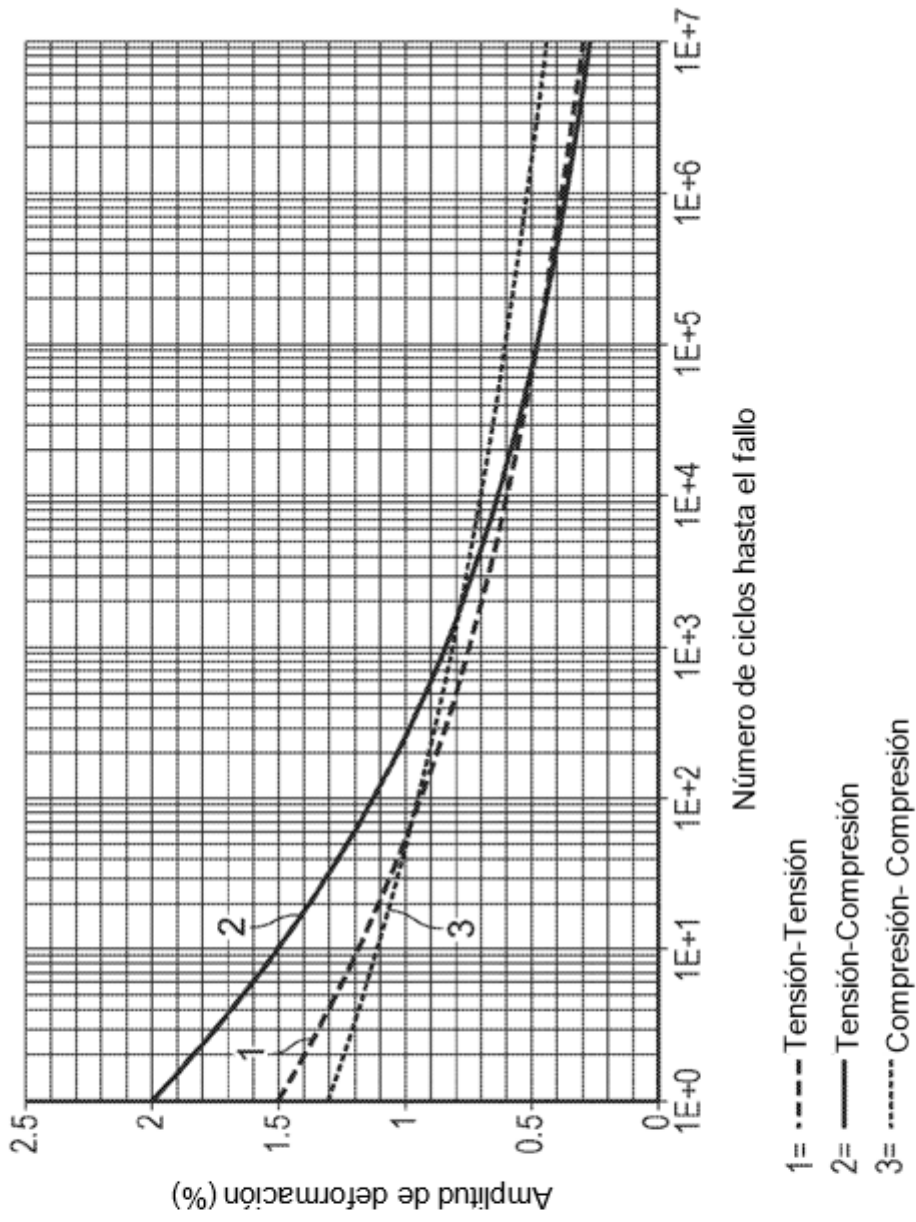


FIG. 3

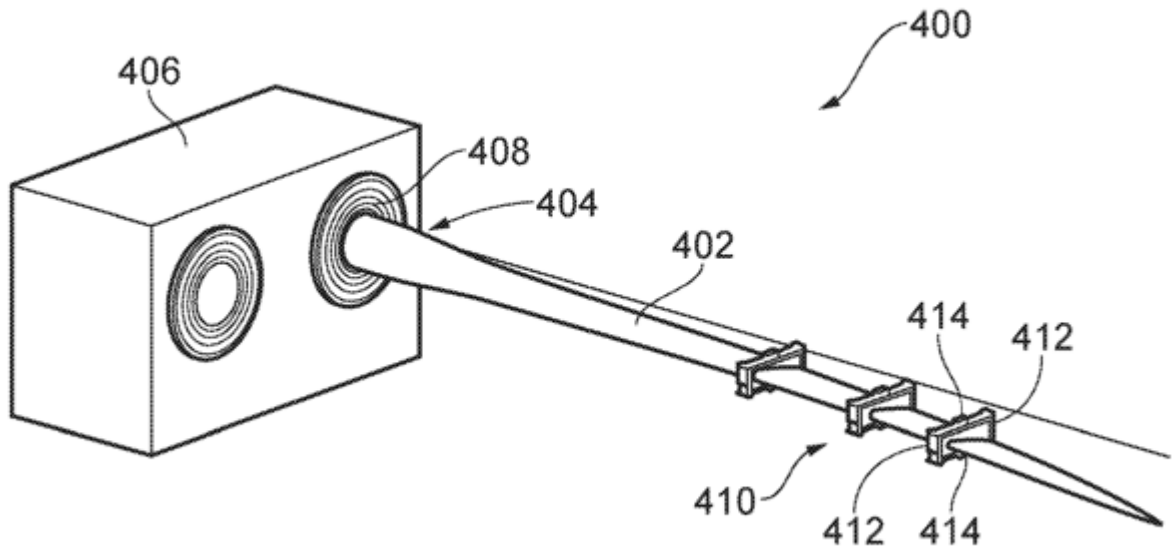


FIG. 4

Ángulo de inclinación	Amplitud Axial (% objetivo)	Amplitud Transversal (% objetivo)	Número de repeticiones
36	20	0	851155
36	30	0	200708
36	40	0	11088
36	30	20	220466
72	20	30	43427

FIG. 5

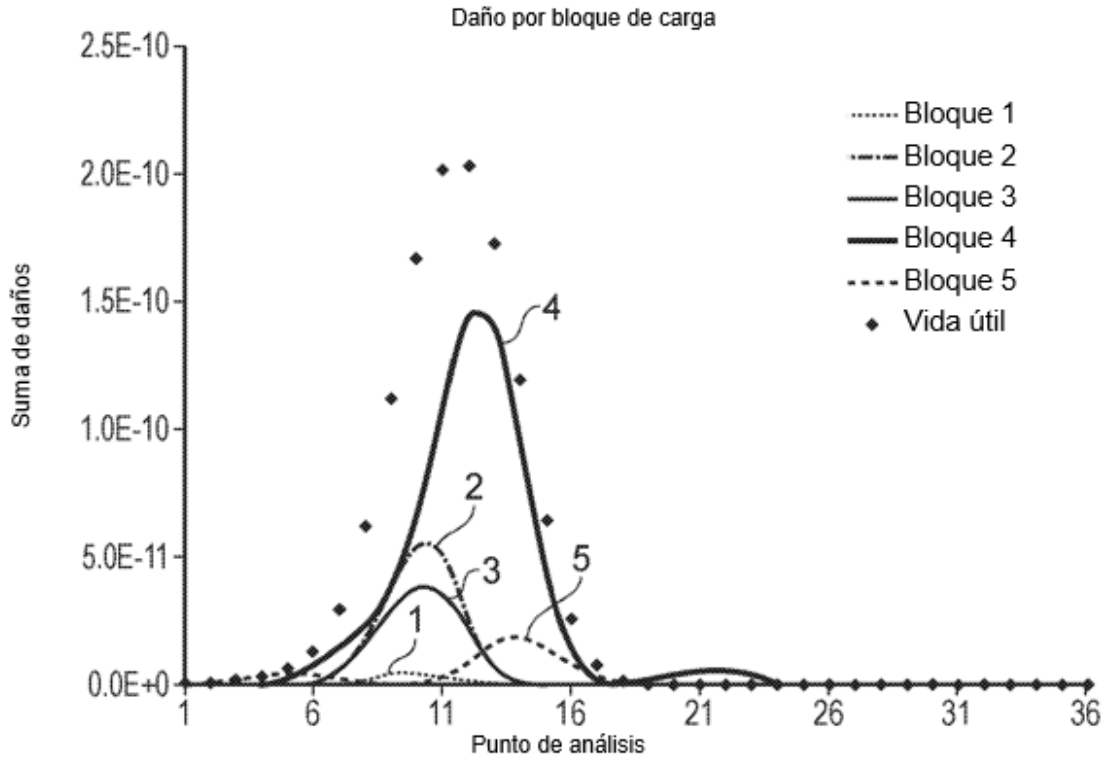


FIG. 6

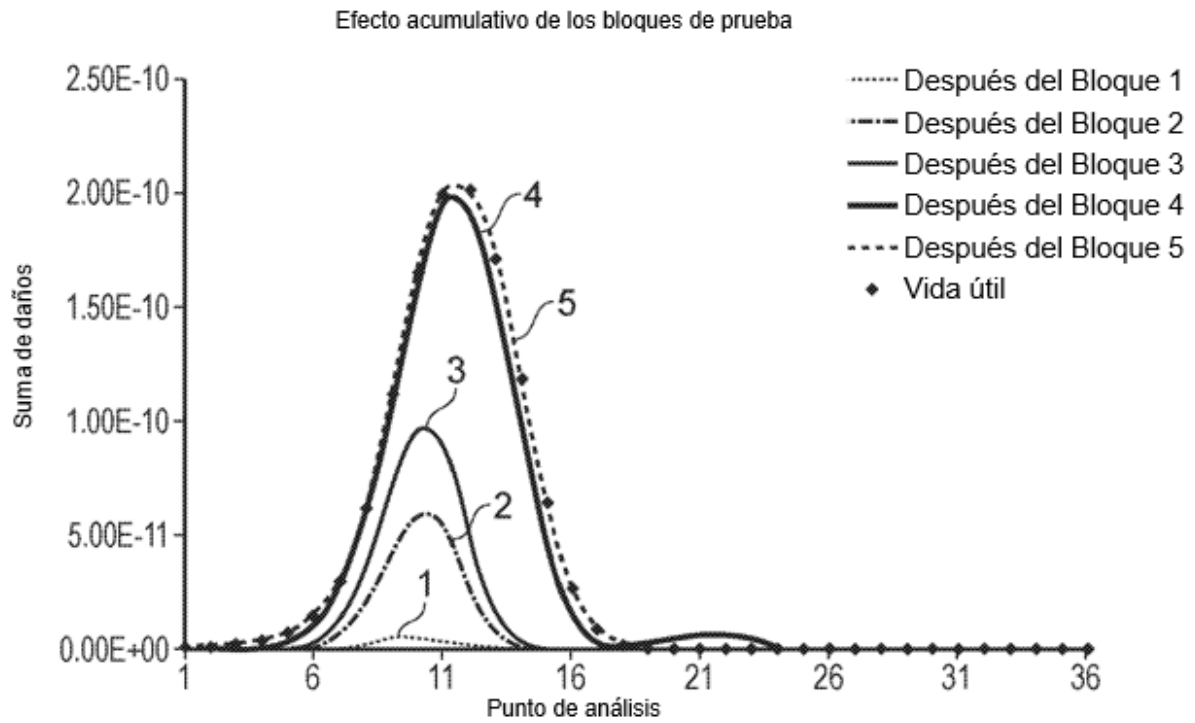


FIG. 7

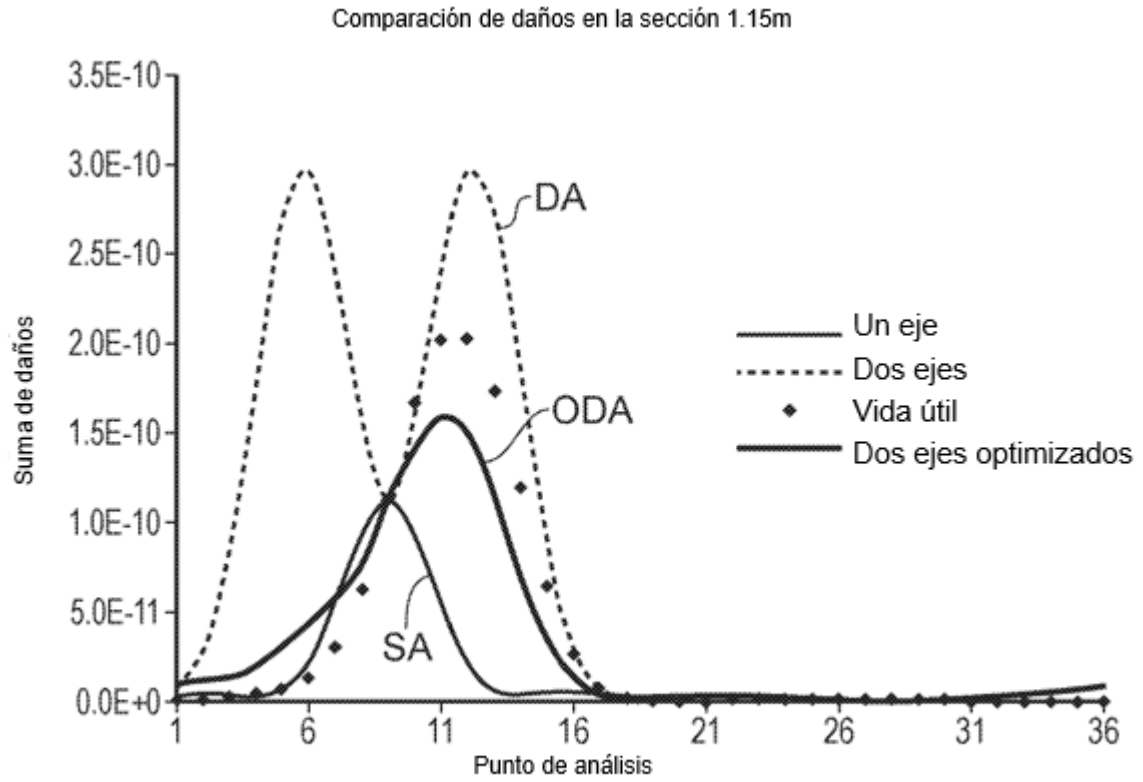


FIG. 8

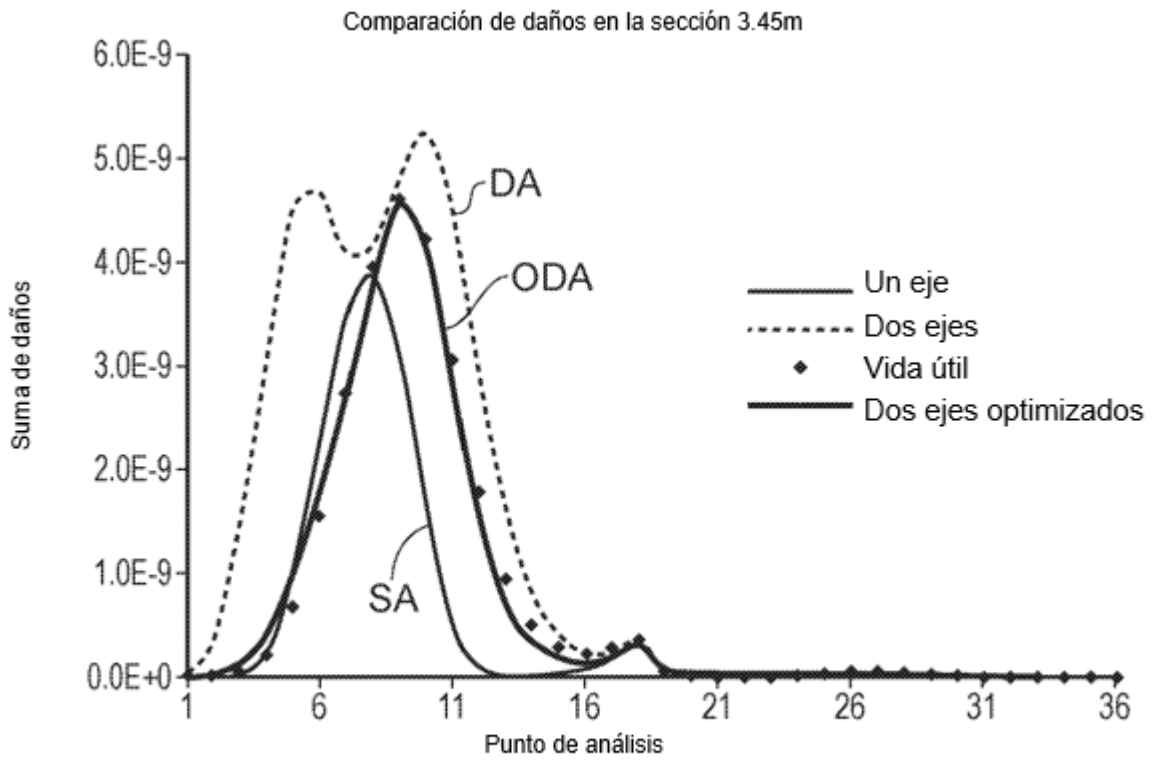


FIG. 9

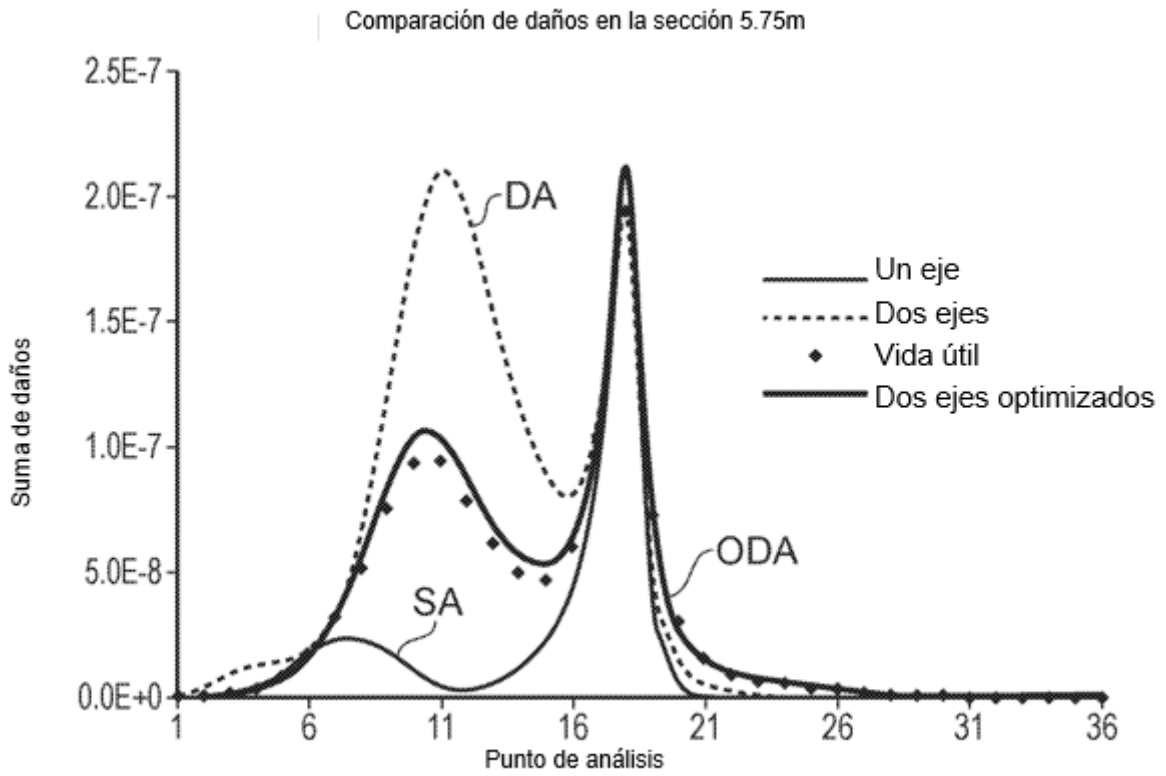


FIG. 10

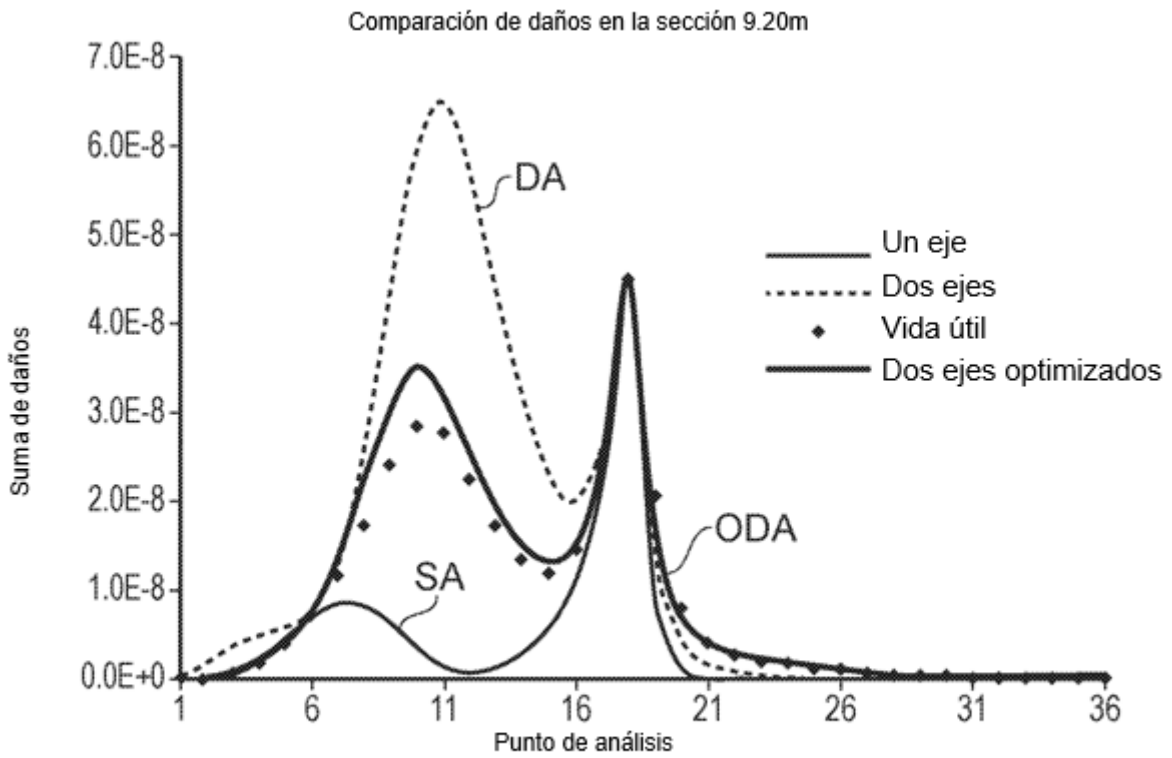


FIG. 11

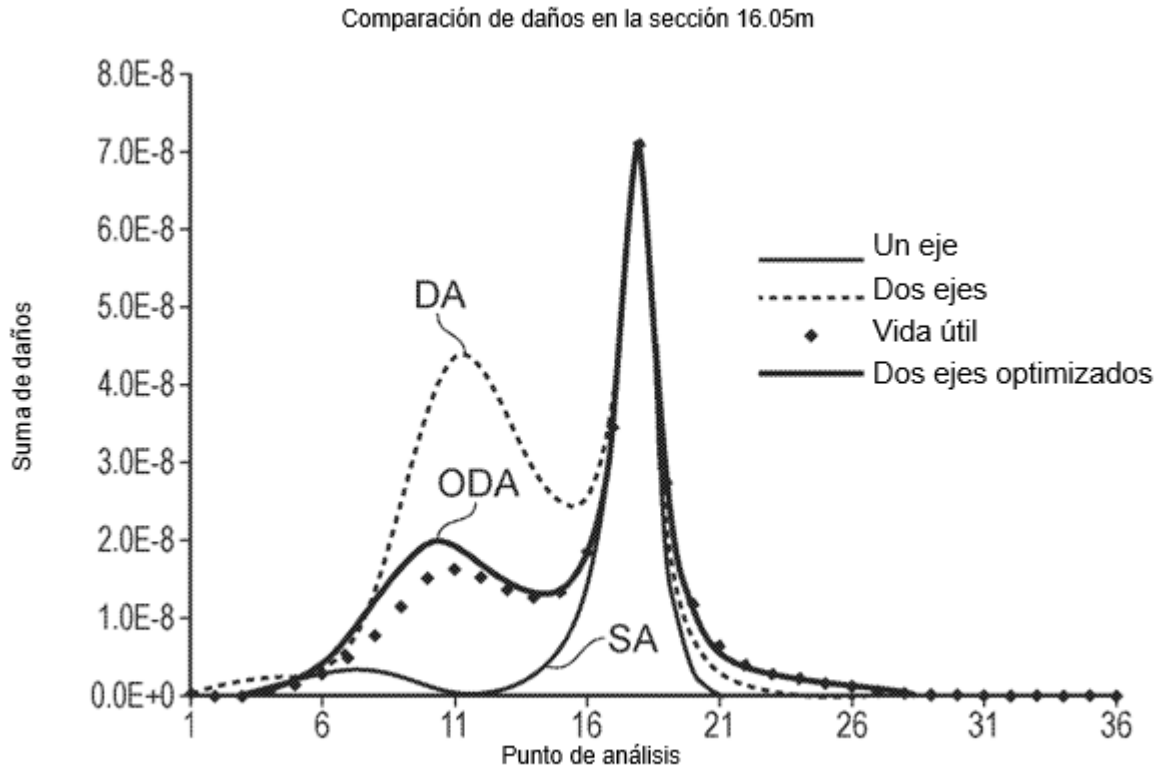


FIG. 12

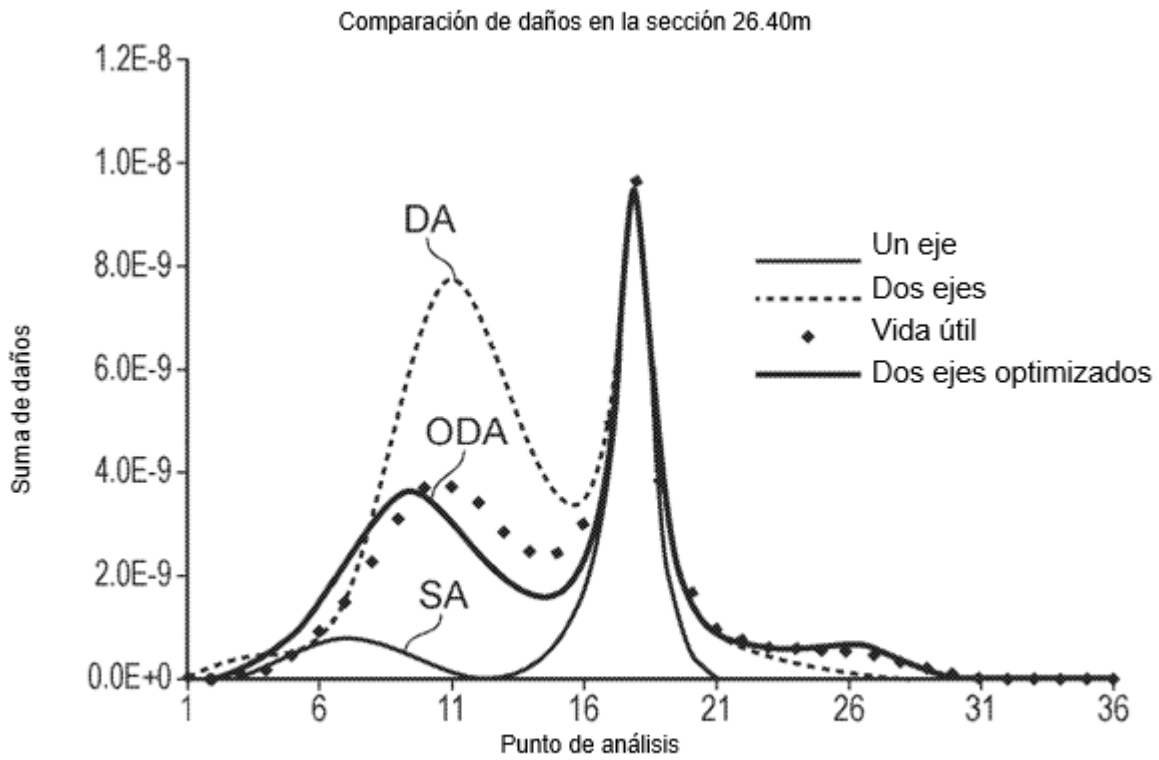


FIG. 13

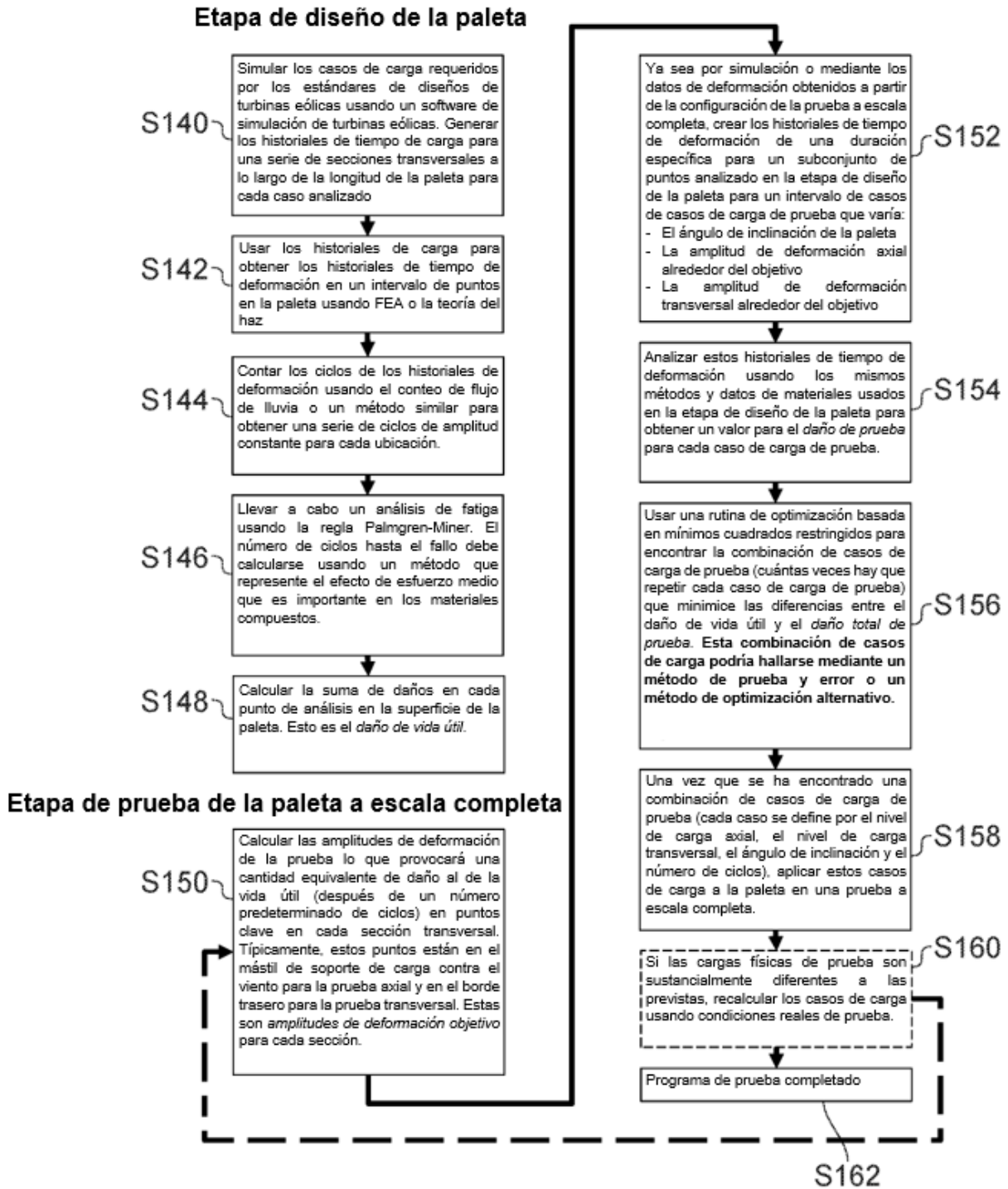


FIG. 14