

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 961 979**

(51) Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.04.2020 E 20167775 (4)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.07.2023 EP 3722596**

(54) Título: **Sistema y procedimiento para mitigar daños en una pala de rotor de una turbina eólica**

(30) Prioridad:

12.04.2019 US 201916382416

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

14.03.2024

(73) Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC RENOVABLES ESPAÑA, S.L. (100.0%)
Calle Roc Boronat 78
08005 Barcelona, ES**

(72) Inventor/es:

**RIZZO, MICHAEL JAMES y
MIHOK, JOHN JOSEPH**

(74) Agente/Representante:

DE ROOIJ, Mathieu Julien

ES 2 961 979 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

Sistema y procedimiento para mitigar daños en una pala de rotor de una turbina eólica

5 Campo

[0001] La presente divulgación se refiere en general a turbinas eólicas, y más en particular a sistemas y procedimientos para mitigar daños en una pala de rotor de una turbina eólica.

10 Antecedentes

[0002] La energía eólica se considera una de las fuentes de energía más limpias y más respetuosas con el medioambiente disponibles actualmente, y las turbinas eólicas han obtenido una creciente atención a este respecto. Una turbina eólica moderna incluye típicamente una torre, un generador, una caja de engranajes, una góndola y una o más palas de rotor. La góndola incluye un conjunto de rotor acoplado a la caja de engranajes y al generador. El conjunto de rotor y la caja de engranajes están montados en un bastidor de soporte de bancada localizado dentro de la góndola. Más específicamente, en muchas turbinas eólicas, la caja de engranajes está montada en la bancada por medio de uno o más brazos de par de torsión o brazos. La una o más palas de rotor captan energía cinética del viento usando principios de perfil alar conocidos. Las palas de rotor transmiten la energía cinética en forma de energía rotativa para hacer girar un eje que acopla las palas de rotor a una caja de engranajes o, si no se usa una caja de engranajes, directamente al generador. A continuación, el generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica que se puede distribuir en una red de suministro.

[0003] Durante su ciclo de vida, las palas de rotor pueden estar sujetas a diversas condiciones que provocan daños de pala. Por ejemplo, durante el funcionamiento de la turbina eólica, las palas de rotor se pueden cargar excesivamente debido a diversas condiciones de funcionamiento y/o ambientales y/o las palas de rotor pueden incluir diversos puntos de tensión debido a defectos de fabricación. Independientemente de lo que provoca el daño, las concentraciones de tensión localizadas se pueden convertir en grietas, que se pueden extender rápidamente y finalmente dar lugar a la falla de la pala. En el peor de los casos, una falla de pala catastrófica puede requerir el reemplazo de la torre, o incluso de toda la turbina eólica. El documento EP2610604 divulga un procedimiento para evaluar señales de oscilación en palas de rotor de instalaciones de energía eólica.

[0004] En vista de lo mencionado anteriormente, la técnica busca continuamente sistemas y procedimientos nuevos y mejorados para detectar y mitigar daños de pala de rotor.

35 Breve descripción

[0005] Los aspectos y ventajas de la invención se expondrán en parte en la siguiente descripción, o pueden ser obvios a partir de la descripción, o se pueden aprender a través de la práctica de la invención.

[0006] En un aspecto, la presente divulgación está dirigida a un procedimiento para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor de una turbina eólica. El procedimiento incluye recibir, por medio de un controlador, una pluralidad de señales de aceleración desde la pluralidad de las palas de rotor en al menos una dirección generadas por los respectivos sistemas de *pitch* de la pluralidad de palas de rotor. El procedimiento también incluye generar, por medio del controlador, una densidad espectral de potencia ("power spectral density") para cada una de la pluralidad de señales de aceleración. Además, el procedimiento incluye determinar, por medio del controlador, las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado. Además, el procedimiento incluye comparar las energías de pala con al menos uno de las otras o un umbral de daño predeterminado. Además, el procedimiento incluye implementar una acción de control cuando una o más de las energías de pala varían entre sí en una cantidad predeterminada o una o más de las energías de pala exceden el umbral de daño predeterminado.

[0007] En un modo de realización, por ejemplo, la pluralidad de señales de aceleración se puede generar por respectivos sistemas de *pitch* de la pluralidad de palas de rotor. En otro modo de realización, la(s) dirección/direcciones puede(n) incluir una dirección Z en términos de gravedad.

[0008] En otros modos de realización, el procedimiento puede incluir determinar el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado en base a una salida de potencia de la turbina eólica, el tipo de pala de rotor, el tipo de turbina eólica y/o un ángulo de una o más de la pluralidad de palas de rotor. Como tal, a medida que se incrementa la salida de potencia, se incrementa el umbral de daño predeterminado.

[0009] En modos de realización adicionales, determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor puede incluir determinar un área bajo una curva de las densidades espectrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado.

[0010] Más específicamente, en un modo de realización, el/los intervalo(s) de frecuencia predeterminado(s) puede(n) incluir una pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados. Por ejemplo, en dichos modos de realización, la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados puede incluir un primer intervalo de frecuencia de desde aproximadamente 25 hercios (Hz) a aproximadamente 30 Hz y un segundo intervalo de frecuencia de aproximadamente 35 Hz a aproximadamente 40 Hz. En dichos modos de realización, determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados puede incluir determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales para un logaritmo de cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados.

[0011] Aún en otro modo de realización, el procedimiento puede incluir determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales para el logaritmo de cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados usando la regla de Simpson ("Simpson's rule").

[0012] Todavía en otro modo de realización, el procedimiento puede incluir determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el intervalo de frecuencia predeterminado durante un período de tiempo de entrenamiento para determinar un umbral de pala en buen estado como valor de referencia para cada una de la pluralidad de palas de rotor.

[0013] En determinados modos de realización, determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a las densidades espectrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado puede incluir determinar un valor máximo y un valor mínimo del área bajo la curva de las densidades espectrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado y determinar una diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de la pluralidad de señales de aceleración.

[0014] En dichos modos de realización, comparar las energías de pala con al menos uno de las otras o un umbral de daño predeterminado puede incluir comparar cada una de las diferencias entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de la pluralidad de señales de aceleración con el umbral de daño predeterminado.

[0015] De acuerdo con la invención, la densidad espectral para cada una de la pluralidad de señales de aceleración corresponde a una densidad espectral de potencia. Por lo tanto, en determinados modos de realización, el procedimiento puede incluir determinar la densidad espectral de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración que comprende además utilizar el procedimiento de Welch ("Welch's method").

[0016] En modos de realización particulares, la acción de control puede incluir, por ejemplo, generar una alarma o señal de notificación, parar la turbina eólica y/o reducir la potencia de la turbina eólica.

[0017] En otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a un sistema para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor de una turbina eólica. El sistema incluye un sistema de *pitch* acoplado de forma comunicativa a cada una de la pluralidad de palas de rotor. Cada uno de los sistemas de *pitch* puede generar una pluralidad de señales de aceleración. El sistema incluye además un controlador que comprende al menos un procesador. El/los procesador(es) está(n) configurado(s) para realizar una pluralidad de operaciones, incluyendo pero sin limitarse a recibir la pluralidad de señales de aceleración de los sistemas de *pitch*, determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a la pluralidad de señales de aceleración durante al menos un intervalo de frecuencia predeterminado, comparar las energías de pala con al menos uno de las otras o un umbral de daño predeterminado, e implementar una acción de control cuando una o más de las energías de pala varían entre sí en una cantidad predeterminada o una o más de las energías de pala excede el umbral de daño predeterminado.

[0018] Estos y otros rasgos característicos, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y reivindicaciones adjuntas. Los dibujos adjuntos, que se incorporan en y constituyen una parte de la presente memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, conjuntamente con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

55 Breve descripción de los dibujos

[0019] Una divulgación completa y suficiente de la presente invención, incluyendo el mejor modo de la misma, dirigida a un experto en la técnica, se expone en la memoria descriptiva, que hace referencia a las figuras adjuntas, en las que:

60 la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de una turbina eólica de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

65 la FIG. 2 ilustra una vista interna, en perspectiva, de una góndola de una turbina eólica de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 3 ilustra una diagrama esquemático de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir en un controlador de turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

5 la FIG. 4 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de un sistema de *pitch* de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

10 la FIG. 5 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

15 la FIG. 6 ilustra un gráfico de un modo de realización de aceleración (eje y) frente al tiempo (eje x) para una pala de rotor de acuerdo con la presente divulgación;

20 la FIG. 7 ilustra un gráfico de densidad espectral de potencia (eje y) frente a la frecuencia (eje x) para una turbina eólica que tiene palas de rotor en buen estado de acuerdo con la presente divulgación; y

25 la FIG. 8 ilustra un gráfico de densidad espectral de potencia (eje y) frente a la frecuencia (eje x) para una turbina eólica que tiene al menos una pala de rotor en mal estado de acuerdo con la presente divulgación.

Descripción detallada

20 [0020] Ahora se hará referencia en detalle a modos de realización de la invención, ilustrándose uno o más de sus ejemplos en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, no de limitación de la invención. De hecho, resultará evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones y variaciones en la presente invención sin apartarse del alcance de la invención. Por ejemplo, se pueden usar los rasgos característicos ilustrados o descritos como parte de un modo de realización con otro modo de realización para proporcionar todavía otro modo de realización. Por tanto, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones como vengan dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

30 [0021] En referencia ahora a los dibujos, la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica 10 de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra, la turbina eólica 10 incluye una torre 12 que se extiende desde una superficie de soporte 14, una góndola 16 montada en la torre 12 y un rotor 18 acoplado a la góndola 16. El rotor 18 incluye un buje rotatorio 20 y al menos una pala de rotor 22 acoplada a y que se extiende hacia afuera del buje 20. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 incluye tres palas de rotor 22. Sin embargo, en un modo de realización alternativo, el rotor 18 puede incluir más o menos de tres palas de rotor 22. 35 Cada pala de rotor 22 se puede espaciar alrededor del buje 20 para facilitar la rotación del rotor 18 para posibilitar que la energía cinética se transfiera del viento para convertirse en energía mecánica utilizable y, posteriormente, energía eléctrica. Por ejemplo, el buje 20 se puede acoplar de forma rotatoria a un generador eléctrico 24 (FIG. 2) situado dentro de la góndola 16 para permitir que se produzca energía eléctrica.

40 [0022] En referencia ahora a la FIG. 2, se ilustra una vista interna simplificada de un modo de realización de la góndola 16 de la turbina eólica 10. Como se muestra, un generador 24 se puede disponer dentro de la góndola 16. En general, el generador 24 se puede acoplar al rotor 18 de la turbina eólica 10 para generar potencia eléctrica a partir de la energía rotativa generada por el rotor 18. Por ejemplo, el rotor 18 puede incluir un eje principal 40 acoplado al buje 20 para su rotación con el mismo. A continuación, el generador 24 se puede acoplar al eje principal 40 de modo que la rotación del eje principal 40 accione el generador 24. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el generador 24 incluye un eje de generador 42 acoplado de forma rotatoria al eje principal 40 a través de una caja de engranajes 44. Sin embargo, en otros modos de realización, se debe apreciar que el eje de generador 42 se puede acoplar de forma rotatoria directamente al eje principal 40. De forma alternativa, el generador 24 se puede acoplar de forma rotatoria directamente al eje principal 40.

50 [0023] Se debe apreciar que el eje principal 40 se puede soportar, en general, dentro de la góndola 16 por un bastidor de soporte o bancada 46 situado encima de la torre de turbina eólica 12. Por ejemplo, el eje principal 40 se puede soportar por la bancada 46 por medio de un par de cojinetes de apoyo montados en la bancada 46.

55 [0024] Como se muestra en las FIGS. 1 y 2, la turbina eólica 10 también puede incluir un sistema de control de turbina o un controlador de turbina 26 dentro de la góndola 16. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 2, el controlador de turbina 26 está dispuesto dentro de un armario de control 52 montado en una parte de la góndola 16. Sin embargo, se debe apreciar que el controlador de turbina 26 se puede disponer en cualquier localización sobre o en la turbina eólica 10, en cualquier localización sobre la superficie de soporte 14 o, en general, en cualquier otra localización. El controlador de turbina 26 se puede configurar, en general, para controlar los diversos modos de funcionamiento (por ejemplo, secuencias de arranque o parada) y/o componentes de la turbina eólica 10.

60 [0025] Como se muestra en las FIGS. 2 y 4, la turbina eólica 10 puede además tener un sistema de *pitch* 50 que incluye un mecanismo de ajuste de *pitch* 32 para cada una de las palas de rotor 22 que está configurado para rotar cada pala de rotor 22 alrededor de su eje de *pitch* 34. Además, cada mecanismo de ajuste de *pitch* 32 puede incluir un motor de accionamiento de *pitch* 33 (por ejemplo, cualquier motor eléctrico, hidráulico o neumático adecuado), una

caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 35 y un piñón de accionamiento de *pitch* 37. En dichos modos de realización, el motor de accionamiento de *pitch* 33 se puede acoplar a la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 35 de modo que el motor de accionamiento de *pitch* 33 imparta fuerza mecánica a la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 35. De forma similar, la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 35 se puede acoplar al piñón de accionamiento de *pitch* 37 para su rotación con el mismo. El piñón de accionamiento de *pitch* 37 puede estar, a su vez, en acoplamiento rotativo con un rodamiento de *pitch* 54 acoplado entre el buje 20 y una correspondiente pala de rotor 22 de modo que la rotación del piñón de accionamiento de *pitch* 37 provoca la rotación del rodamiento de *pitch* 54. Por tanto, en dichos modos de realización, la rotación del motor de accionamiento de *pitch* 33 acciona la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 35 y el piñón de accionamiento de *pitch* 37, rotando de este modo el rodamiento de *pitch* 54 y la pala de rotor 22 alrededor del eje de *pitch* 34. De forma similar, la turbina eólica 10 puede incluir uno o más mecanismos de accionamiento de orientación 38 acoplados de forma comunicativa al controlador 26, estando configurado cada mecanismo de accionamiento de orientación 38 para cambiar el ángulo de la góndola 16 en relación con el viento (por ejemplo, acoplándose a un rodamiento de orientación 56 de la turbina eólica 10).

5 [0026] Además, como se muestra, el controlador de turbina 26 también se puede acoplar de forma comunicativa a cada mecanismo de ajuste de *pitch* 32 de la turbina eólica 10 a través de un controlador de *pitch* integral o separado 30 (FIGS. 1 y 4) para controlar y/o modificar el ángulo de *pitch* de cada respectiva pala de rotor 22 (es decir, un ángulo que determina una perspectiva de las palas de rotor 22 con respecto a la dirección 28 del viento).

10 20 [0027] Además, como se muestra en la FIG. 2, se pueden proporcionar uno o más sensores 57, 58 en la turbina eólica 10. Más específicamente, como se muestra, se puede configurar un sensor de pala 57 con una o más de las palas de rotor 22 para monitorizar las palas de rotor 22. Además, como se muestra, se puede proporcionar un sensor de viento 58 en la turbina eólica 10. Por ejemplo, el sensor de viento 58 puede ser una veleta, un anemómetro, un sensor LIDAR u otro sensor adecuado que mida la velocidad y/o la dirección del viento. Como tales, los sensores 57, 58 pueden estar además en comunicación con el controlador 26, y pueden proporcionar información relacionada al controlador 26.

15 25 [0028] También se debe apreciar que, como se usa en el presente documento, el término "monitorizar" y las variaciones del mismo indican que los diversos sensores de la turbina eólica 10 se pueden configurar para proporcionar una medición directa de los parámetros que se monitorizan y/o una medición indirecta de dichos parámetros. Por tanto, se pueden usar los sensores descritos en el presente documento, por ejemplo, para generar señales relativas al parámetro que se monitoriza, que, a continuación, se puede utilizar por el controlador 26 para determinar la condición.

30 35 [0029] En referencia ahora a la FIG. 3, se ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir dentro del controlador 26 (o del controlador de *pitch* 30) de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) incluir uno o más procesadores 60 y dispositivos de memoria asociados 62 configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, realizar los procedimientos, etapas, cálculos y similares y almacenar datos pertinentes como se divulga en el presente documento). Adicionalmente, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) incluir también un módulo de 40 comunicaciones 64 para facilitar las comunicaciones entre el/los controlador(es) 26, 30 y los diversos componentes de la turbina eólica 10. Además, el módulo de comunicaciones 64 puede incluir una interfaz de sensor 66 (por ejemplo, uno o más convertidores de analógico a digital) para permitir que las señales transmitidas desde uno o más sensores 57, 58 se conviertan en señales que se puedan entender y procesar por los procesadores 60. Se debe apreciar que los sensores 57, 58 se pueden acoplar de forma comunicativa al módulo de comunicaciones 64 usando cualquier medio adecuado. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 3, los sensores 57, 58 están acoplados a la interfaz de 45 sensor 66 por medio de una conexión por cable. Sin embargo, en otros modos de realización, los sensores 57, 58 se pueden acoplar a la interfaz de sensor 66 por medio de una conexión inalámbrica, tal como usando cualquier protocolo de comunicaciones inalámbrico adecuado conocido en la técnica.

50 [0030] Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a circuitos integrados que en la técnica se refiere a que están incluidos en un ordenador, sino que también se refiere a un controlador, un microcontrolador, un microordenador, un controlador de lógica programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación y otros circuitos programables. Adicionalmente, el/los dispositivo(s) de memoria 62 puede(n) comprender, en general, elemento(s) de memoria, que incluye(n), pero sin limitarse a, medio legible por ordenador (por ejemplo, memoria de acceso aleatorio (RAM)), medio no volátil legible por ordenador (por ejemplo, una memoria flash), un disquete, una memoria de solo lectura en disco compacto (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD) y/u otros elementos de memoria adecuados. Dicho(s) dispositivo(s) de memoria 62 se puede(n) configurar, en general, para almacenar instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan por el/los procesador(es) 60, configuran el/los controlador(es) 26, 30 para que realice(n) diversas funciones que incluyen, pero sin limitarse a, transmitir señales de control adecuadas para implementar acción/acciones correctiva(s) en respuesta a una señal de distancia que excede un umbral predeterminado como se describe en el presente documento, así como otras diversas funciones implementadas por ordenador adecuadas.

55 60 [0031] En referencia ahora a la FIG. 4, se ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización del sistema de *pitch* global 50 para la turbina eólica 10. Más específicamente, como se muestra, el sistema de *pitch* 50 puede incluir una pluralidad de mecanismos de accionamiento de *pitch* 32, es decir, uno para cada eje de *pitch* 34. Además,

como se muestra, cada uno de los mecanismos de accionamiento de *pitch* se puede acoplar de forma comunicativa a la red eléctrica 45. Por tanto, durante el funcionamiento normal de la turbina eólica 10, los motores de accionamiento de *pitch* 33 se pueden accionar por la red eléctrica 45.

5 [0032] Más específicamente, como se muestra en la FIG. 5, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 100 para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor de una turbina eólica. El procedimiento 100 se puede implementar usando, por ejemplo, la turbina eólica 10 y el controlador 26, las palas de rotor 22 y el sistema de *pitch* 50 analizados anteriormente con referencia a las FIGS. 1-4. La FIG. 5 representa las etapas realizadas en un orden particular para propósitos de ilustración y análisis. Los expertos en la técnica, usando 10 las divulgaciones proporcionadas en el presente documento, entenderán que diversas etapas del procedimiento 100, o cualquiera de los otros procedimientos divulgados en el presente documento, se pueden adaptar, modificar, reordenar, realizar simultáneamente o modificar de diversas maneras sin desviarse del alcance de la presente divulgación.

15 [0033] Como se muestra en (102), el procedimiento 100 incluye recibir una pluralidad de señales de aceleración desde la pluralidad de las palas de rotor 22 en al menos una dirección (por ejemplo, las direcciones X, Y y Z en términos de gravedad). Por ejemplo, en un modo de realización, la pluralidad de señales de aceleración se pueden 20 generar por el sistema de *pitch* 50 de la pluralidad de palas de rotor 22. La FIG. 6 ilustra un gráfico 70 de un modo de realización de aceleración (eje y) frente al tiempo (eje x) para una pala de rotor 22 de acuerdo con la presente divulgación. Más específicamente, como se muestra, se ilustran las señales de aceleración 72, 72, 76 para una de las 25 palas de rotor 22 en las direcciones X, Y y Z en términos de gravedad. Por tanto, el controlador de *pitch* 30 y/o el controlador de turbina 26 pueden recibir dichas señales desde cada una de las palas de rotor 22 y usar las señales de aceleración en la dirección Z 76 de cada pala de rotor 22 para un procesamiento adicional como se describe en el presente documento. Por lo tanto, usando las señales de aceleración en la dirección Z de cada pala de rotor 22 (que, en general, ya están recopiladas por el sistema de *pitch* 50), es posible que no se requieran sensores adicionales, simplificando de este modo el sistema descrito en el presente documento.

30 [0034] En referencia de nuevo a la FIG. 5, como se muestra en (104), el procedimiento 100 incluye generar una densidad espectral para cada una de la pluralidad de señales de aceleración. Por ejemplo, la densidad espectral para 35 cada una de la pluralidad de señales de aceleración puede corresponder a una densidad espectral de potencia, que describe la distribución de potencia en componentes de frecuencia de cada señal de aceleración.

[0035] Como se muestra en (106), el procedimiento 100 incluye determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor 22 en base a las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado. Por ejemplo, en determinados 40 modos de realización, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar la densidad espectral de potencia para cada una de las señales de aceleración usando el procedimiento de Welch. Como se describe en el presente documento, el procedimiento de Welch, en general, se refiere a un procedimiento para la estimación de densidad espectral y engloba su definición entendida por los expertos en la técnica.

45 [0036] Más específicamente, en determinados modos de realización, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor 22 determinando un área bajo una curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el/los intervalo(s) de frecuencia predeterminado(s). Además, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar el/los 50 intervalo(s) de frecuencia predeterminado(s) en base a una salida de potencia de la turbina eólica 10, el tipo/fabricante de pala de rotor, el tipo/fabricante de turbina eólica y/o un ángulo de una o más de la pluralidad de palas de rotor 22.

[0037] Aún en otro modo de realización, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar una pluralidad de 55 intervalos de frecuencia predeterminados. Por ejemplo, en dichos modos de realización, la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados puede incluir un primer intervalo de frecuencia de desde aproximadamente 25 hercios (Hz) a aproximadamente 30 Hz y un segundo intervalo de frecuencia de aproximadamente 35 Hz a aproximadamente 40 Hz.

[0038] En dichos modos de realización, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de las señales de aceleración determinando el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para un logaritmo de cada una de las señales de aceleración. En 60 modos de realización particulares, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para el logaritmo de cada una de las señales de aceleración usando la regla de Simpson. Como se describe en el presente documento, la regla de Simpson se refiere, en general, a un procedimiento para la integración numérica y engloba su definición entendida por los expertos en la técnica.

[0039] En determinados modos de realización, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor 22 en base a las densidades espectrales de potencia para cada una de las señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado determinando un valor 65 máximo y un valor mínimo del área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de las

señales de aceleración y determinando una diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de las señales de aceleración.

5 [0040] En referencia de nuevo a la FIG. 5, como se muestra en (108), el procedimiento 100 incluye comparar las energías de pala entre sí y/o con un umbral de daño predeterminado. En determinados modos de realización, a medida que se incrementa la salida de potencia, el umbral de daño predeterminado también se puede incrementar. En dichos modos de realización, por ejemplo, el/los controlador(es) 26, 30 puede(n) comparar cada una de las diferencias entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de las señales de aceleración entre sí y/o con un umbral de daño predeterminado.

10 [0041] En otros modos de realización, el procedimiento 100 puede incluir determinar el área bajo la curva de las densidades espetrales para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el intervalo de frecuencia predeterminado durante un período de tiempo de entrenamiento para determinar un umbral de pala en buen estado como valor de referencia para cada una de la pluralidad de palas de rotor 22. Por ejemplo, la comparación de la energía de pala (por ejemplo, el área bajo la curva para un intervalo de frecuencia) de una pala con otra permite la detección inmediata de daños de pala. Sin embargo, usar el área bajo la curva de la pala de rotor para intervalos de frecuencia aprendidos también puede mostrar anomalías a lo largo del tiempo. Como tal, si la energía de pala para ese intervalo de frecuencia se incrementa a lo largo del tiempo, es probable que se haya producido daño en esa pala de rotor particular. Este análisis puede comenzar usando el período de tiempo de entrenamiento en el que se determina que la pala de rotor está en buen estado como valor de referencia. En los casos en que se produzcan daños en múltiples palas, la comparación a lo largo del tiempo puede ser importante para captar dichos eventos de daños.

15 [0042] Los procedimientos de detección de energía de pala de acuerdo con la presente divulgación se pueden entender mejor con referencia a las FIGS. 7 y 8. Como se muestra, la FIG. 7 ilustra un gráfico 80 de densidad espectral de potencia (eje y) frente a la frecuencia (eje x) para una turbina eólica que tiene palas de rotor en buen estado de acuerdo con la presente divulgación, mientras que la FIG. 8 ilustra un gráfico 90 de densidad espectral de potencia (eje y) frente a la frecuencia (eje x) para una pala de rotor en mal estado de acuerdo con la presente divulgación. Más en particular, la FIG. 7 destaca dos primer y segundo intervalos de frecuencia predeterminados de ejemplo 85, 87, en los que, dentro de los dos intervalos de frecuencia predeterminados 85, 87, el logaritmo de las densidades espetrales de potencia 82, 84, 86 para las tres palas de rotor 22 (por ejemplo, el área bajo la curva de cada una de las tres palas de rotor 22) es aproximadamente igual. Por el contrario, la FIG. 8 destaca dos primer y segundo intervalos de frecuencia predeterminados de ejemplo 95, 97, en los que, dentro del primer intervalo de frecuencia predeterminado 95, el logaritmo de la densidad espectral de potencia 94 para una de las palas de rotor 22 es mayor que las densidades espetrales de potencia 92, 96 para las otras dos palas de rotor 22 (por ejemplo, el área bajo la curva de cada una de las tres palas de rotor 22).

20 [0043] En referencia de nuevo a la FIG. 5, como se muestra en (110), el procedimiento 100 puede incluir implementar una acción de control cuando una o más de las energías de pala varían entre sí en una cantidad predeterminada o una o más de las energías de pala exceden el umbral de daño predeterminado. Por ejemplo, en modos de realización particulares, la acción de control puede incluir, por ejemplo, generar una alarma o señal de notificación, parar la turbina eólica y/o reducir la potencia de la turbina eólica 10. Como tal, se puede realizar una acción de mantenimiento y/o reparación en la pala de rotor dañada según sea necesario.

25 [0044] El alcance patentable de la invención se define por el conjunto de reivindicaciones adjunto.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (100) para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor (22) de una turbina eólica (10), comprendiendo el procedimiento:

5 recibir, por medio de un controlador (26,30), una pluralidad de señales de aceleración (72, 74, 76) desde la pluralidad de las palas de rotor en al menos una dirección generadas por los respectivos sistemas de *pitch* de la pluralidad de palas de rotor;

10 generar, por medio del controlador, una densidad espectral de potencia (82, 84, 86) para cada una de la pluralidad de señales de aceleración;

15 determinar, por medio del controlador, energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado;

20 comparar las energías de pala con al menos uno de las otras o un umbral de daño predeterminado; e

25 implementar una acción de control cuando una o más de las energías de pala varían entre sí en una cantidad predeterminada o una o más de las energías de pala exceden el umbral de daño predeterminado.

2. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que al menos una dirección comprende una dirección Z en términos de gravedad.

25 3. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además determinar el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado en base a una salida de potencia de la turbina eólica, el tipo de pala de rotor, el tipo de turbina eólica y/o un ángulo de una o más de la pluralidad de palas de rotor, en el que a medida que se incrementa la salida de potencia, se incrementa el umbral de daño predeterminado.

30 4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor comprende además determinar un área bajo una curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado.

35 5. El procedimiento de la reivindicación 4, en el que el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado comprende una pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados.

40 6. El procedimiento de la reivindicación 5, en el que la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados comprende de aproximadamente 25 hercios (Hz) a aproximadamente 30 Hz o de aproximadamente 35 Hz a aproximadamente 40 Hz.

45 7. El procedimiento de la reivindicación 5 o 6, en el que determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados comprende además determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para un logaritmo de cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados.

50 8. El procedimiento de la reivindicación 7, que comprende además determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para el logaritmo de cada una de la pluralidad de señales de aceleración para la pluralidad de intervalos de frecuencia predeterminados usando la regla de Simpson.

55 9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8, que comprende además determinar el área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el intervalo de frecuencia predeterminado durante un período de tiempo de entrenamiento para determinar un umbral de pala en buen estado como un valor de referencia para cada una de la pluralidad de palas de rotor.

60 10. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 4 a 9, en el que determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado comprende además:

65 determinar un valor máximo y un valor mínimo del área bajo la curva de las densidades espectrales de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración para el al menos un intervalo de frecuencia predeterminado; y

determinar una diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de la pluralidad de señales de aceleración.

- 5 11. El procedimiento de la reivindicación 10, en el que comparar las energías de pala con al menos una de las otras o con un umbral de daño predeterminado comprende además comparar cada una de las diferencias entre el valor máximo y el valor mínimo para cada una de la pluralidad de señales de aceleración con el umbral de daño predeterminado.
- 10 12. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 4 a 11, en el que determinar la densidad espectral de potencia para cada una de la pluralidad de señales de aceleración comprende además utilizar el procedimiento de Welch.
- 15 13. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la acción de control comprende al menos una de generar una señal de alarma o notificación, parar la turbina eólica y/o reducir la potencia de la turbina eólica.
- 20 14. Un sistema para mitigar daños en una pala de rotor de una pluralidad de palas de rotor (22) de una turbina eólica (10), comprendiendo el sistema:
 - un sistema de *pitch* (50) acoplado de forma comunicativa a cada una de la pluralidad de palas de rotor, generando cada uno de los sistemas de *pitch* una pluralidad de señales de aceleración; y
 - un controlador (26, 30) que comprende al menos un procesador (60), realizando el al menos un procesador una pluralidad de operaciones, comprendiendo la pluralidad de operaciones:
 - 25 recibir la pluralidad de señales de aceleración (72, 74, 76) desde los sistemas de *pitch*;
 - 30 generar, por medio del controlador, una densidad espectral de potencia (82, 84, 86) para cada una de la pluralidad de señales de aceleración;
 - 35 determinar las energías de pala para cada una de la pluralidad de palas de rotor en base a la pluralidad de señales de aceleración para al menos un intervalo de frecuencia predeterminado;
 - comparar las energías de pala con al menos uno de las otras o un umbral de daño predeterminado; e
 - implementar una acción de control cuando una o más de las energías de pala varían entre sí en una cantidad predeterminada o una o más de las energías de pala exceden el umbral de daño predeterminado.

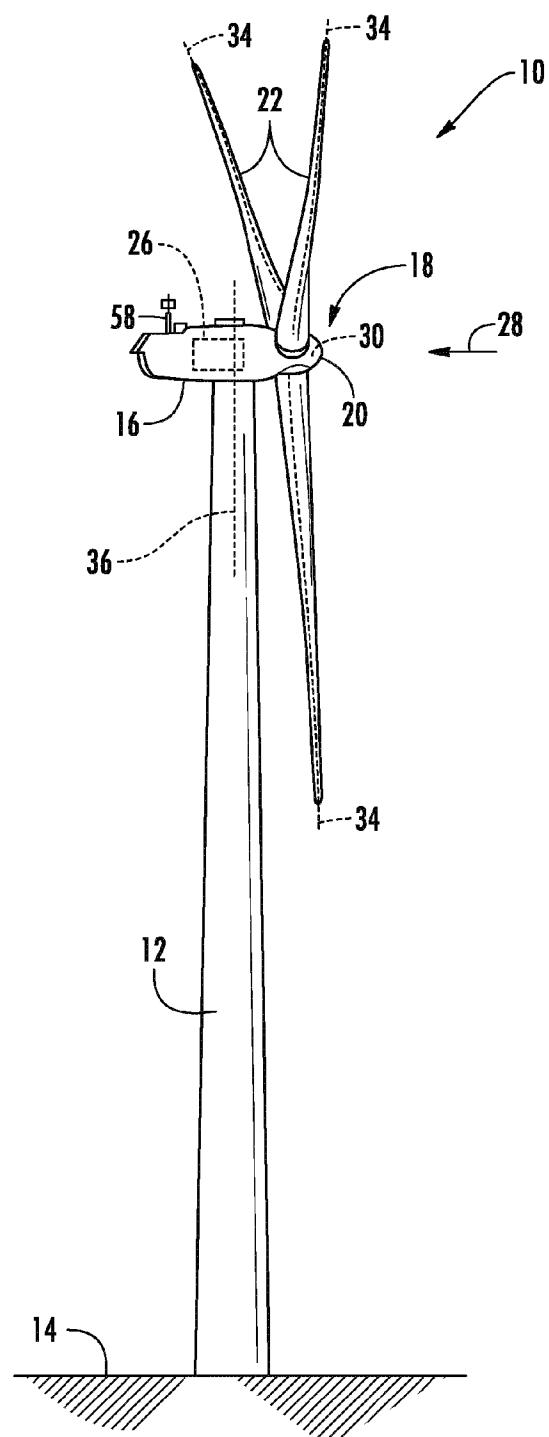


FIG. 1

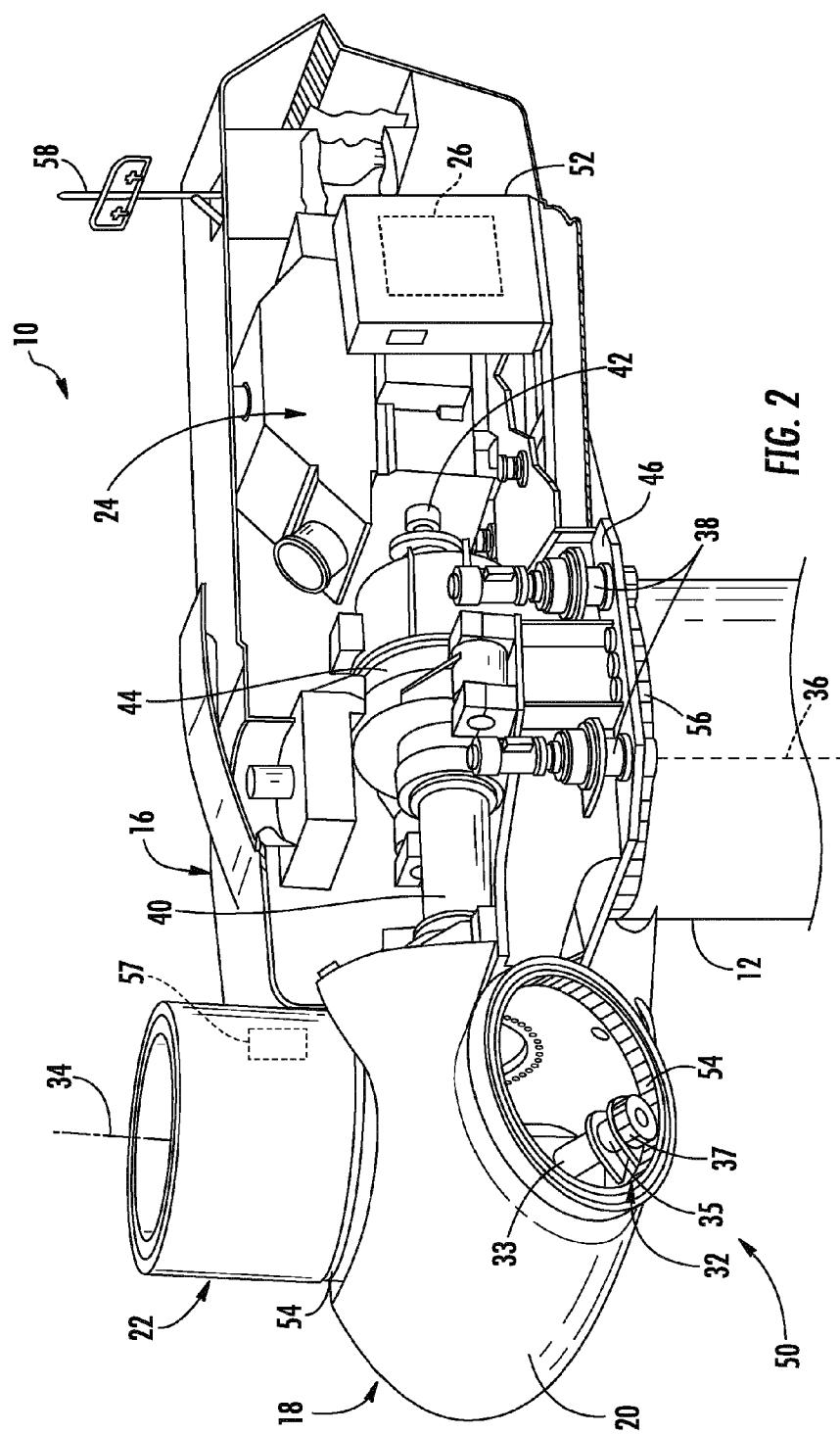


FIG. 2

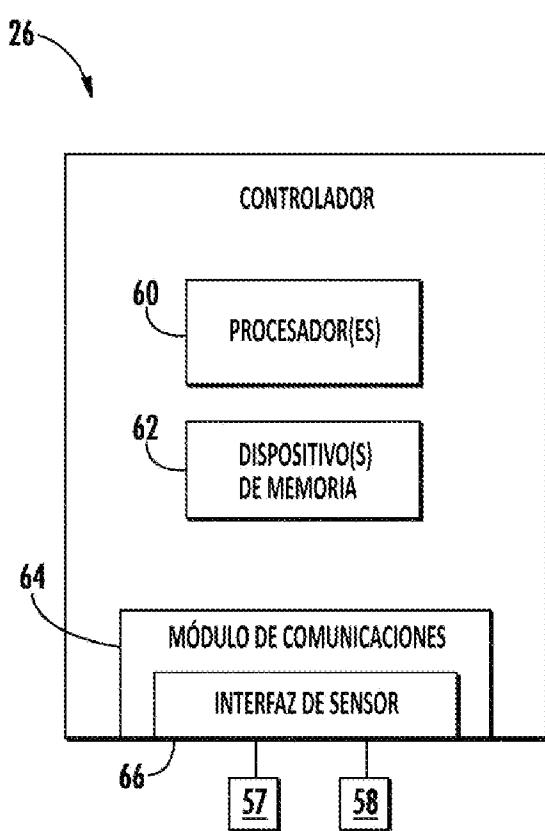


FIG. 3

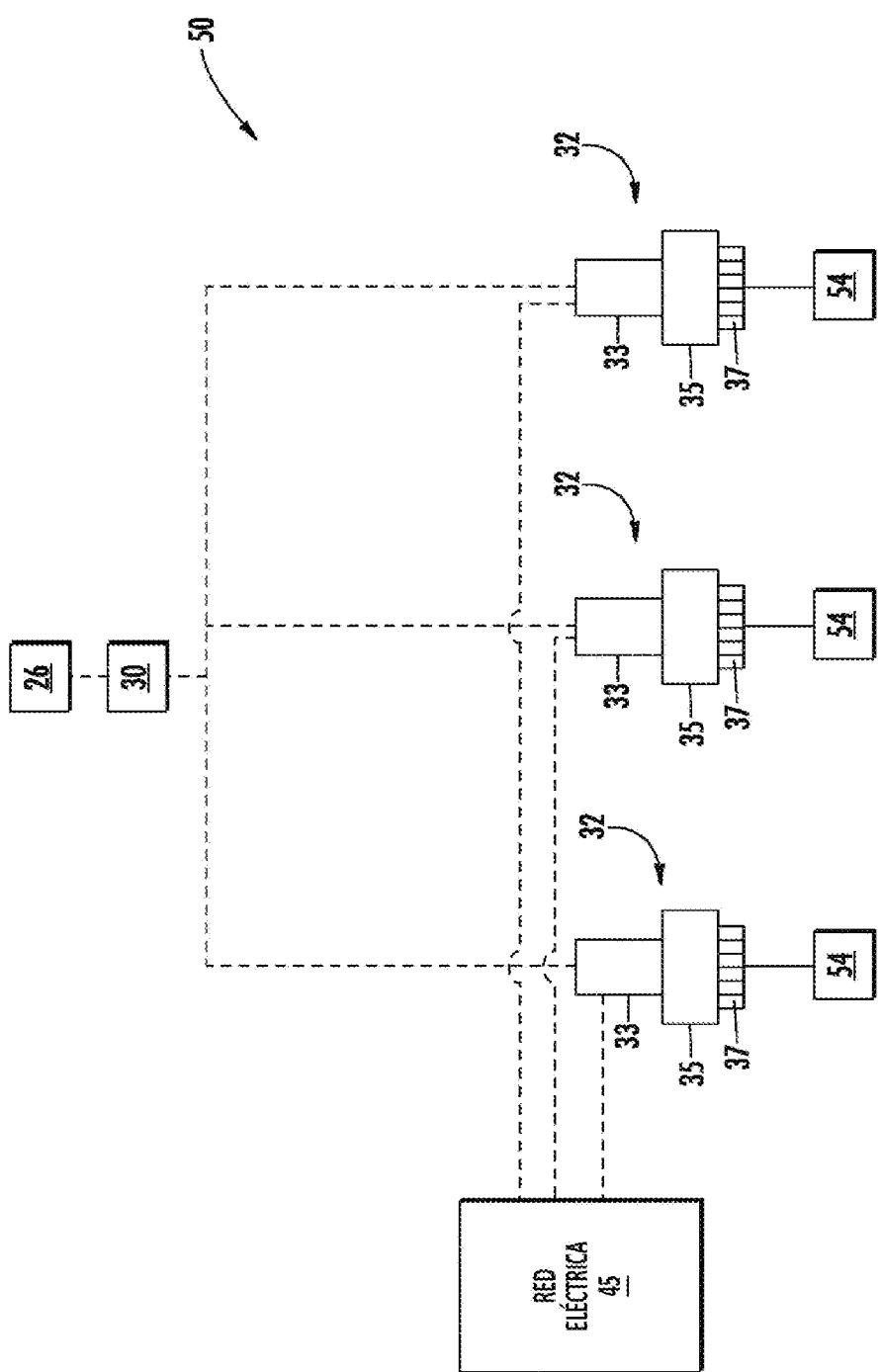
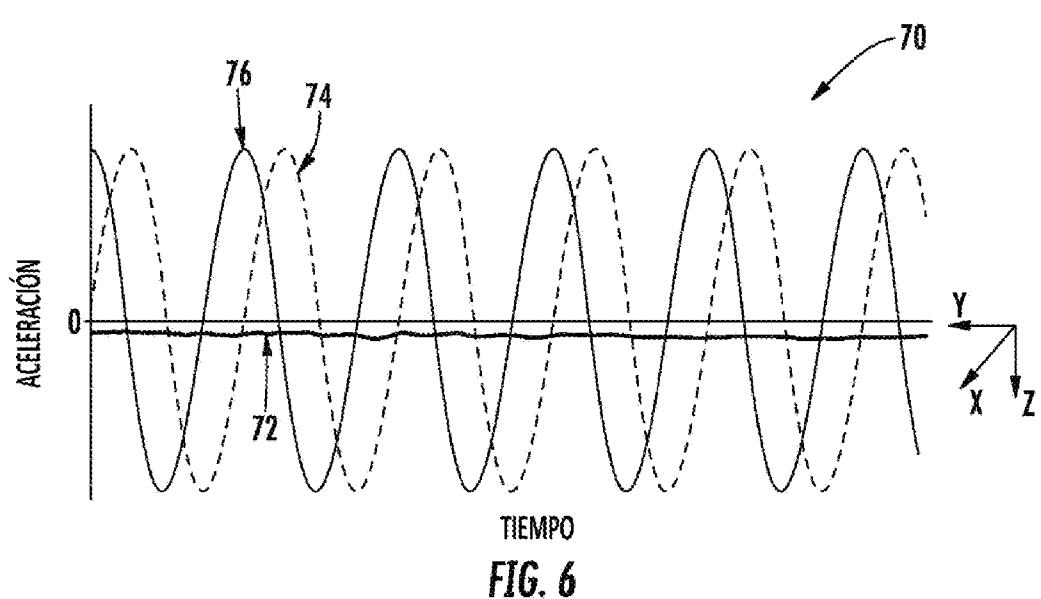


FIG. 4



FIG. 5



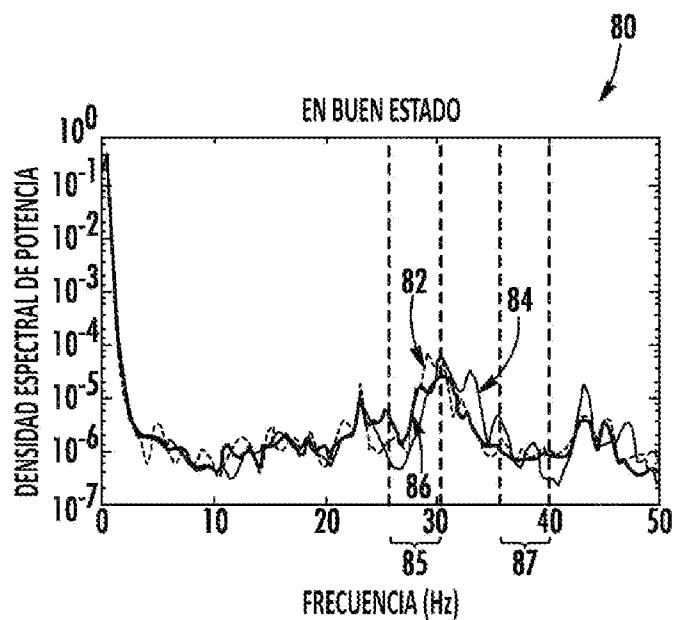


FIG. 7

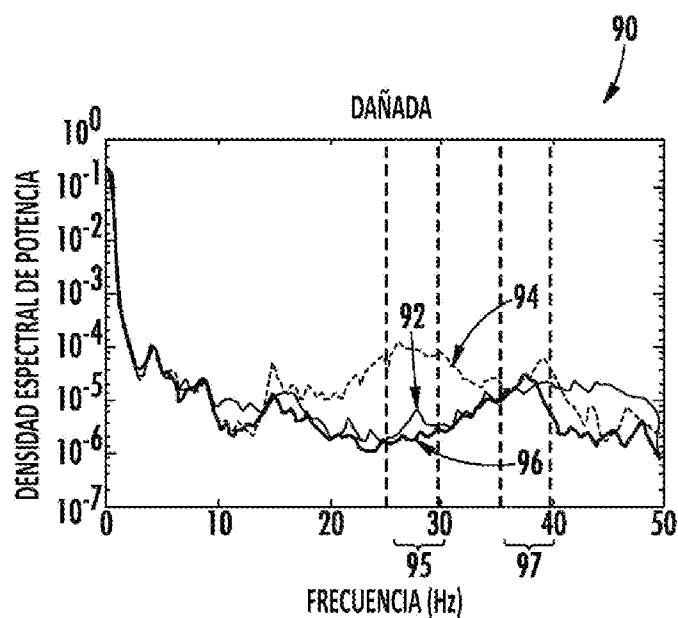


FIG. 8