

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 996 266**

51 Int. Cl.:

F03D 1/00 (2006.01)

F03D 80/80 (2006.01)

F03D 13/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.02.2017** **E 17156987 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.08.2024** **EP 3211218**

54 Título: **Sistema de amortiguación acústica para una torre de turbina eólica**

30 Prioridad:

25.02.2016 US 201615052993

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
12.02.2025

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC RENOVABLES ESPAÑA,
S.L. (100.00%)
Calle Roc Boronat 78
08005 Barcelona, ES**

72 Inventor/es:

**DROBIETZ, ROGER;
RUNDE, HANS-GERD;
DUETTMANN, MARTIN;
PETERSEN, ANDREAS HEINZ;
KOSCHINSKY, MARKUS y
KLASS, BERND**

74 Agente/Representante:

DE ROOIJ, Mathieu Julien

ES 2 996 266 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 de amortiguación acústica para una torre de turbina eólica

5 **[0001]** La presente invención se refiere, en general, a turbinas eólicas, y más en particular, a un sistema y procedimiento para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica.

[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.
10 Una turbina eólica moderna típicamente incluye una torre, un generador, una caja de engranajes, una góndola y un rotor que tiene un buje rotatorio con una o más palas de rotor. Las palas de rotor capturan energía cinética del viento usando principios de perfil alar conocidos. Las palas de rotor transmiten la energía cinética en forma de energía de rotación para 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
15 energía eléctrica que se puede distribuir en una red de suministro.

[0003] Como la mayoría de los sistemas dinámicos, las turbinas eólicas están sujetas a vibraciones indeseables que pueden afectar de forma perjudicial a la operación y/o a la integridad estructural de la turbina eólica. Además, dichas vibraciones pueden contribuir al ruido indeseable en el área que rodea a la turbina eólica. Por ejemplo, las
20 vibraciones generadas por el tren de potencia se pueden radiar como sonido por la estructura de torre, contribuyendo significativamente, de este modo, a una tonalidad audible en la proximidad de la turbina eólica. Este ruido puede ser una molestia para los vecinos de la turbina eólica, así como para el personal que trabaja en el emplazamiento de turbina eólica.

[0004] Un enfoque de diseño para minimizar las vibraciones en la torre de turbina eólica es reforzar estructuralmente la turbina eólica para alterar su respuesta a la vibración (por ejemplo, hacer la torre más rígida). Sin embargo, una solución de este tipo puede ser prohibitivamente costosa, especialmente a medida que las
25 alturas de torre continúan incrementando.

[0005] Otro enfoque es el uso de elementos de amortiguación. Véanse, por ejemplo, los documentos WO 2009/080028, US 6.213.721 y EP 1 533 521.

[0006] En vista de lo mencionado anteriormente, existe una necesidad de obtener un sistema de amortiguación acústica mejorado para torres de turbina eólica. En consecuencia, la presente divulgación está dirigida a un sistema
35 y procedimiento que tienen una pluralidad de elementos de amortiguación que reducen la tonalidad audible generada por la turbina eólica al reducir las vibraciones superficiales de la torre.

[0007] Diversos aspectos y ventajas de la invención se expondrán, en parte, en la siguiente descripción, o pueden resultar evidentes a partir de la descripción, o se pueden aprender a través de la puesta en práctica de la
40 invención.

[0008] Más específicamente, se proporciona la presente invención, como se define por las reivindicaciones adjuntas.

[0009] Diversas características, 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 esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, conjuntamente con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención. La invención está definida por las
45 reivindicaciones adjuntas.

[0010] En los dibujos:

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

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

la FIG. 3 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de un sistema para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 4 ilustra un diagrama esquemático de otro modo de realización de un sistema para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 5 ilustra una vista lateral de un modo de realización de un elemento de amortiguación del sistema de la FIG. 3 de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 6 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de un elemento de amortiguación del sistema de la FIG. 3 de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 7 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de los diversos componentes de un elemento de amortiguación del sistema de la FIG. 3 de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 8 ilustra un diagrama esquemático de diversos modos de realización de sistemas para reducir la tonalidad audible generada por una torre de turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación, que ilustra, en particular, diferentes configuraciones de los elementos de amortiguación dispuestos en una superficie interior de la torre de la turbina eólica;

la FIG. 9 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación; y

la FIG. 10 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación.

[0011] 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, será 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 como se define por las reivindicaciones adjuntas. Por ejemplo, se pueden usar características ilustradas o descritas como parte de un modo de realización con otro modo de realización para proporcionar todavía además otro modo de realización. Por tanto, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones que entran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

[0012] En general, la presente divulgación está dirigida a un sistema y procedimiento para reducir la tonalidad audible de una turbina eólica provocada por las vibraciones generadas por el conjunto de tren de potencia de la misma. El sistema incluye una pluralidad de elementos de amortiguación montados en una pluralidad de ubicaciones en una superficie interior de una torre de la turbina eólica, teniendo la pluralidad de ubicaciones niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado. Por tanto, durante la operación de la turbina eólica, la pluralidad de elementos de amortiguación están configurados para amortiguar las vibraciones de la torre, como el ruido generado de ese modo.

[0013] La presente divulgación proporciona muchas ventajas no presentes en la técnica anterior. Por ejemplo, el sistema de amortiguación de acuerdo con la presente divulgación se puede adaptar fácilmente a las turbinas eólicas existentes. Además, el sistema de amortiguación de la presente divulgación proporciona una solución rentable para mejorar la eficacia acústica de la turbina. Por tanto, al reducir las vibraciones de torre, el sistema de amortiguación de la presente invención reduce el ruido en la proximidad de la turbina eólica. Además, el sistema de amortiguación de la presente divulgación cubre un amplio intervalo de frecuencias y, por tanto, funciona de forma sólida durante su vida útil sin la necesidad de mantenimiento y/o ajuste adicional.

[0014] En referencia ahora a los dibujos, la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica 10. Como se muestra, la turbina eólica 10 incluye, en general, 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 20 rotatorio y al menos una pala de rotor 22 acoplada a y que se extiende hacia fuera 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. 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 a partir del viento en energía mecánica utilizable y, posteriormente, en 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.

[0015] La turbina eólica 10 también puede incluir un sistema de control de turbina o controlador de turbina 26 centralizado dentro de la góndola 16. En general, el controlador de turbina 26 puede incluir un ordenador u otra unidad de procesamiento adecuada. Por tanto, en varios modos de realización, el controlador de turbina 26 puede incluir instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan, configuran el controlador 26 para realizar diversas funciones diferentes, tales como recibir, transmitir y/o ejecutar señales de control de turbina eólica. De este modo, el controlador de turbina 26 se puede configurar, en general, para controlar los diversos modos operativos (por ejemplo, secuencias de arranque o parada) y/o componentes de la turbina eólica 10. Por ejemplo, el controlador 26 se puede configurar para ajustar el *pitch* de pala o ángulo de *pitch* de cada pala de rotor 22 (es decir, un ángulo que determina una perspectiva de la pala 22 con respecto a la dirección del viento) alrededor de su eje de *pitch* 28 para controlar la velocidad de rotación de la pala de rotor 22 y/o la salida de potencia generada por la turbina eólica 10. Además, el controlador de turbina 26 puede controlar la orientación de la góndola 16 con respecto a la dirección del viento 58 transmitiendo señales de control adecuadas a uno o más mecanismos de

accionamiento de orientación 60 que se engranan con un rodamiento de orientación 62 (FIG. 2). Por tanto, la rotación del rodamiento de orientación 62 cambia la orientación de la góndola 16.

[0016] 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 mostrada en la FIG. 1. Como se muestra, se puede disponer un generador 24 dentro de la góndola 16. En general, el generador 24 se puede acoplar al rotor 18 para producir potencia eléctrica a partir de la energía de rotación generada por el rotor 18. Por ejemplo, como se muestra en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 puede incluir un eje de rotor 32 acoplado al buje 20 para la rotación con el mismo. El eje de rotor 32, a su vez, se puede acoplar de forma rotatoria a un eje de generador 34 del generador 24 a través de una caja de engranajes 36. Como se entiende, en general, el eje de rotor 32 puede proporcionar una entrada de baja velocidad y alto par de torsión a la caja de engranajes 36 en respuesta a la rotación de las palas de rotor 22 y del buje 20. La caja de engranajes 36 se puede configurar, a continuación, para convertir la entrada de baja velocidad y alto par de torsión en una salida de alta velocidad y bajo par de torsión para accionar el eje de generador 34 y, por tanto, el generador 24.

[0017] Adicionalmente, el controlador de turbina 26 también se puede ubicar dentro de la góndola 16. Como se entiende, en general, el controlador de turbina 26 se puede acoplar en comunicación a cualquier número de los componentes de la turbina eólica 10 para controlar la operación de dichos componentes. Por ejemplo, como se indica anteriormente, el controlador de turbina 26 se puede acoplar en comunicación a cada mecanismo de ajuste de *pitch* 30 de la turbina eólica 10 (uno de los cuales se muestra) para facilitar la rotación de cada pala de rotor 22 alrededor de su eje de *pitch* 28.

[0018] En general, cada mecanismo de ajuste de *pitch* 30 puede incluir cualesquiera componentes adecuados y puede tener cualquier configuración adecuada que permita que el mecanismo de ajuste de *pitch* 30 funcione como se describe en el presente documento. Por ejemplo, en varios modos de realización, cada mecanismo de ajuste de *pitch* 30 puede incluir un motor de accionamiento de *pitch* 38 (por ejemplo, cualquier motor eléctrico adecuado), una caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 40 y un piñón de accionamiento de *pitch* 42. En dichos modos de realización, el motor de accionamiento de *pitch* 38 se puede acoplar a la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 40 de modo que el motor de accionamiento de *pitch* 38 confiera fuerza mecánica a la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 40. De forma similar, la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 40 se puede acoplar al piñón de accionamiento de *pitch* 42 para su rotación con el mismo. El piñón de accionamiento de *pitch* 42, a su vez, se puede engranar en rotación con un rodamiento de *pitch* 44 acoplado entre el buje 20 y una correspondiente pala de rotor 22 de modo que la rotación del piñón de accionamiento de *pitch* 42 provoque la rotación del rodamiento de *pitch* 44. Por tanto, en dichos modos de realización, la rotación del motor de accionamiento de *pitch* 38 acciona la caja de engranajes de accionamiento de *pitch* 40 y el piñón de accionamiento de *pitch* 42, rotando, de este modo, el rodamiento de *pitch* 44 y la pala de rotor 22 alrededor del eje de *pitch* 28. En modos de realización alternativos, se debe apreciar que cada mecanismo de ajuste de *pitch* 30 puede tener cualquier otra configuración adecuada que facilite la rotación de una pala de rotor 22 alrededor de su eje de *pitch* 28.

[0019] Durante la operación de la turbina eólica 10, el conjunto de tren de potencia (es decir, el generador 24, la caja de engranajes 36 y los correspondientes ejes 32, 34) provocan vibraciones que se generan como sonido por toda la góndola 16 y torre 12, en particular, en la parte superior de la torre 12. Estas vibraciones contribuyen significativamente a una tonalidad audible en la proximidad de la turbina 10. Más específicamente, el conjunto de tren de potencia puede provocar vibraciones superficiales de torre que generan ruido que puede ser una molestia para los vecinos de la turbina eólica 10. Por tanto, las FIGS. 3 y 4 ilustran diagramas esquemáticos de diversos modos de realización de un sistema 100 para reducir la tonalidad audible cerca de una turbina eólica (por ejemplo, la torre 12 de la turbina eólica 10) que aborda las cuestiones mencionadas anteriormente.

[0020] Como se muestra en los modos de realización ilustrados, el sistema 100 incluye una pluralidad de elementos de amortiguación 102 montados en una superficie interior 104 de la torre 12 de la turbina eólica 10. Más específicamente, en determinados modos de realización, la pluralidad de elementos de amortiguación 102 se pueden montar en una sección superior 106 de la superficie interior 104 de la torre 12, sin embargo, se debe entender que los elementos de amortiguación 102 también se pueden montar en cualquier otra ubicación adecuada dentro de la torre 12. Además, los elementos de amortiguación 102 están montados en una pluralidad de ubicaciones en la superficie interior 104 de la torre 12, donde los niveles de vibración están por encima de un umbral predeterminado.

[0021] Por ejemplo, en determinados modos de realización, los elementos de amortiguación 102 se pueden montar en áreas de torre críticas como se determina midiendo las vibraciones o a través de modelado, por ejemplo, simulación con el procedimiento de elementos finitos (FEM)/procedimiento de elementos de contorno (BEM) o similar. Más específicamente, como se muestra en la FIG. 4, los elementos de amortiguación 102 se pueden ubicar dentro de un área de vibración 128 que tenga niveles de vibración por encima del umbral predeterminado. Por ejemplo, como se muestra, una vibración típicamente tiene una conformación que tiene nodos de vibración (es decir, donde la amplitud de vibración es cero) y antinodos de vibración (es decir, donde la amplitud de vibración es máxima). Como tales, los elementos de amortiguación 102 se pueden montar en o cerca de la(s)

ubicación/ubicaciones antinodo. En determinados modos de realización, puede que no existan ubicaciones antinodo únicas, es decir, porque una ubicación que está en el antinodo de un tipo de vibración a una frecuencia puede no ser la ubicación antinodo para otro tipo de vibración a otra frecuencia. Por tanto, al montar los elementos de amortiguación 102 a través de áreas críticas de la torre, al menos una parte de los elementos de amortiguación 102 siempre estará fuera de los nodos de los diversos tipos de vibración.

[0022] En otros modos de realización, se pueden determinar áreas críticas de punto único de la torre 12 que tengan los antinodos de vibración más fuerte/amplitudes de vibración más altas (usando simulaciones y/o mediciones) y los elementos de amortiguación 102 se pueden ubicar en dichos puntos. Como tal, la presente divulgación proporciona un sistema y procedimiento para amortiguar vibraciones donde se puedan determinar distintos tipos de vibración con distintos antinodos, así como en casos donde no se puedan determinar distintas áreas antinodo (es decir, debido a múltiples tipos de vibración).

[0023] Además, la sección superior 106 de la torre 12 se refiere, en general, a la parte superior de la torre 12 más cercana a la góndola 16 y, por lo tanto, la porción típicamente más afectada por las vibraciones inducidas por el tren de potencia. Por tanto, en determinados modos de realización, la sección superior 106 de la torre 12, en general, engloba desde aproximadamente un 15 % a aproximadamente un 40 % de la altura global de la torre 12 medida desde la parte superior 15 de la torre 12. En consecuencia, durante la operación de la turbina eólica 10, la pluralidad de elementos de amortiguación 102 están configurados para amortiguar las vibraciones de la sección superior 106 de la torre 12 para reducir la tonalidad audible cerca de la turbina eólica 10.

[0024] En referencia ahora a la FIGS. 5 y 6, los elementos de amortiguación 102 son amortiguadores de masa sintonizada ("*tuned-mass dampers*"). Como se usa en el presente documento, un amortiguador de masa sintonizada se refiere, en general, a un dispositivo de amortiguación montado en estructuras para reducir la amplitud de las vibraciones mecánicas. Por tanto, los amortiguadores de masa sintonizada están configurados para estabilizarse contra el movimiento violento provocado por la vibración armónica. Más específicamente, como se muestra en el modo de realización ilustrado, cada uno de los elementos de amortiguación 102 incluye un elemento de masa cilíndrico 108 configurado o montado con un elemento elastomérico cilíndrico 110. En determinados modos de realización, el elemento de masa 108 se selecciona de modo que su masa modal sea menor de aproximadamente un 1 % a aproximadamente un 5 % de la masa modal de la torre 12, de acuerdo con la invención, menor de aproximadamente un 2 % de la masa modal de la torre 12. De acuerdo con la invención, menor de un 2 % de la masa modal de la torre 12 corresponde al número total de elementos de amortiguación 102, por ejemplo, aproximadamente 1000, pesando de cada elemento de aproximadamente uno (1) a aproximadamente dos (2) kilogramos. Además, el elemento de masa 108 se puede construir de cualquier material adecuado, incluyendo, pero sin limitarse a, un metal (por ejemplo, acero) o una aleación de metales.

[0025] Además, el elemento elastomérico 110 se puede construir de cualquier material elastomérico adecuado, incluyendo, pero sin limitarse a, caucho, silicona o similares. Por tanto, el elemento elastomérico 110 está diseñado, en general, en términos de constantes de rigidez y amortiguación. Como tales, la masa modal del elemento de masa 108 y la rigidez del elemento elastomérico 110 pueden establecer la frecuencia objetivo del elemento de amortiguación 102. En determinados modos de realización, se pretende que la relación de amortiguación de los elementos de amortiguación 102 sea desde aproximadamente un 1 % a aproximadamente un 25 %. Por tanto, en determinados modos de realización, la pluralidad de elementos de amortiguación 102 puede tener un intervalo de frecuencias desde aproximadamente 80 Hertz (Hz) a aproximadamente 800 Hz, que corresponde al intervalo de frecuencias audibles de torres de acero típicas, aunque se debe entender que se puede seleccionar cualquier intervalo de frecuencias adecuado para cubrir grandes partes de la operación de velocidad variable de turbina eólica, así como múltiples tipos de torres. Más específicamente, la torre 12 puede tener un tipo específico de vibración/conformación de vibración, que sea crítica con respecto a la tonalidad, aunque las torres típicas pueden tener múltiples conformaciones de vibración críticas a diferentes frecuencias. Por tanto, los elementos de amortiguación 102 de la presente divulgación se pueden sintonizar a una frecuencia específica, con una eficacia lo suficientemente amplia para cubrir y contrarrestar múltiples tipos de vibración a diferentes frecuencias.

[0026] Se debe entender que se puede utilizar cualquier número de elementos de amortiguación 102 en el sistema 100. Por ejemplo, se pueden utilizar de uno (1) a más de quinientos (500) elementos de amortiguación 102 en el sistema 100. En modos de realización adicionales, se pueden utilizar más de quinientos (500) elementos de amortiguación 102 en el sistema 100. Con el tamaño de los elementos de amortiguación 102, el sistema 100 global todavía minimiza el peso adicional añadido a la turbina 10 durante la operación. Por ejemplo, para los modos de realización descritos en el presente documento, el sistema 100 añade menos de 1,5 toneladas a la masa global de la turbina eólica 10.

[0027] En modos de realización adicionales, los elementos de amortiguación 102 se pueden montar en la superficie interior 104 de la torre 12 por medio de al menos uno de un imán 112, uno o más elementos de sujeción (por ejemplo, tornillos, pernos, etc.) y/o un adhesivo (por ejemplo, cola, cinta o similar). En modos de realización adicionales, el imán 112 puede incluir cualquier imán adecuado, incluyendo, por ejemplo, un elemento estándar de neodimio. En modos de realización que utilizan imanes, como se muestra en la FIG. 5, los componentes del elemento de amortiguación 102, es decir, el elemento de masa 108, el elemento elastomérico 110 y el imán 112,

se pueden asegurar entre sí por medio de uno o más elementos de sujeción 114 o tornillos configurados a través de un eje longitudinal central 116. Por ejemplo, en un modo de realización como se muestra en la FIG. 7, el elemento elastomérico 110 puede tener una placa metálica 122 configurada en el extremo orientado hacia la torre del mismo que contenga un orificio roscado 124. Como tal, el imán 112 puede tener un correspondiente cabezal de elemento de sujeción 126 configurado para encajarse dentro del orificio roscado 124 para asegurar los componentes entre sí.

[0028] En referencia a la FIGS. 3 y 8, los elementos de amortiguación 102 se pueden espaciar en cualquier patrón adecuado en la superficie interior 104 de la torre 12. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 3, los elementos de amortiguación 102 están espaciados uniformemente entre sí tanto en la dirección circunferencial (u horizontal) 118 como en la dirección vertical 120. Además, como se muestra en la FIG. 8, el espaciado de los elementos de amortiguación 102 en la dirección vertical 120 se puede determinar en función de los niveles de vibración en la superficie interior 104 de la torre 12. Por tanto, como se muestra, los elementos de amortiguación 102 se pueden espaciar uniforme o aleatoriamente en la dirección vertical 120. De forma alternativa, la pluralidad de elementos de amortiguación 102, no de acuerdo con la invención, pueden estar espaciados aleatoriamente tanto en la dirección horizontal como vertical 118, 120 en la superficie interior 104 de la torre 12. Además, como se muestra, los elementos de amortiguación 102 se pueden disponer conjuntamente en grupos. Después de la colocación de los elementos de amortiguación 102, se puede ejecutar, de nuevo, una simulación por ordenador y/o mediciones de sensor en la torre 12 para determinar la eficacia de los elementos de amortiguación 102.

[0029] En referencia ahora a la FIG. 9, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 200 para reducir la tonalidad audible generada por un conjunto de tren de potencia de una turbina eólica 10. Como se muestra en 202, el procedimiento 200 incluye determinar una o más ubicaciones en una superficie interior 104 de la torre 12 de la turbina eólica 10 que tienen niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado, por ejemplo, por encima de un nivel crítico que provoca niveles de ruido indeseable en las propiedades vecinas de la turbina eólica 10. Como se muestra en 204, el procedimiento 200 incluye montar un elemento de amortiguación 102 en cada una de las ubicaciones en la superficie interior 104 de la torre 12 de la turbina eólica 10 que tenga un alto nivel de vibración. Por tanto, durante la operación de la turbina eólica 10, los elementos de amortiguación 102 están configurados para amortiguar las vibraciones de la torre 12 para reducir la tonalidad audible generada por el conjunto de tren de potencia.

[0030] En un modo de realización, la etapa de determinar una o más ubicaciones en la superficie interior 104 de la torre 12 de la turbina eólica 10 que tienen niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado puede incluir medir los niveles de vibración en las una o más ubicaciones o determinar, por medio de simulación por ordenador, la(s) ubicación/ubicaciones en función de al menos uno del tamaño/conformación de torre de la torre 12 y/o ubicación de la torre 12. Más específicamente, las ubicaciones se pueden determinar usando simulación con FEM/BEM.

[0031] En otro modo realización, el procedimiento 200 puede incluir seleccionar la masa modal del elemento de masa y la rigidez del elemento elastomérico para establecer una frecuencia objetivo del elemento de amortiguación 102.

[0032] Además, el procedimiento 200 puede incluir omitir los elementos de amortiguación 102 en ubicaciones que contengan bridas. En modos de realización adicionales, el procedimiento 200 puede incluir espaciar la pluralidad de elementos de amortiguación 102 uniformemente entre sí en la dirección circunferencial 118. Además, el procedimiento 200 puede incluir espaciar la pluralidad de elementos de amortiguación 102 en una dirección vertical 120 en función de los niveles de vibración en la superficie interior 104 de la torre 12, por ejemplo, por medio de simulación.

[0033] De forma alternativa, sin ser parte de la invención, el procedimiento 200 puede incluir espaciar los elementos de amortiguación 102 aleatoriamente en la superficie interior 104 de la torre 12.

[0034] En referencia ahora a la FIG. 10, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 300 para reducir la tonalidad audible generada por un conjunto de tren de potencia de una turbina eólica 10. Como se muestra en 302, el procedimiento 300 incluye determinar un área de vibración 128 en una torre 12 de la turbina eólica 10 que tiene niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado. Como se muestra en 304, el procedimiento 300 también incluye montar una pluralidad de elementos de amortiguación 102 dentro del área de vibración 102 de la torre de la turbina eólica en o cerca de ubicaciones antinodo. Por tanto, durante la operación de la turbina eólica 10, los elementos de amortiguación 102 están configurados para amortiguar las vibraciones de la torre 12 para reducir la tonalidad audible generada de ese modo.

REIVINDICACIONES

1. Una turbina eólica (10) que tiene una torre (12) y un sistema (100) para reducir la tonalidad audible generada por la turbina eólica (10), comprendiendo el sistema (100):

una pluralidad de elementos de amortiguación (102) montados en una pluralidad de ubicaciones en una superficie interior (104) de la torre (12), teniendo la pluralidad de ubicaciones niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado durante la operación de la turbina eólica (10), y, en la que, durante la operación de la turbina eólica (10), la pluralidad de elementos de amortiguación (102) están configurados para amortiguar las vibraciones de la torre (12) para reducir la tonalidad audible generada de ese modo, y cada uno de la pluralidad de elementos de amortiguación (102) es un amortiguador de masa sintonizada y tiene un elemento de masa cilíndrico discreto (108), un elemento elastomérico cilíndrico discreto (110) y un imán discreto (112) asegurados entre sí, en la que una masa modal del elemento de masa cilíndrico discreto (108) y una rigidez del elemento elastomérico cilíndrico discreto (110) establecen una frecuencia objetivo del elemento de amortiguación (102); y en la que se selecciona una masa modal total de todos los elementos de masa discretos (108) de modo que su masa modal total sea menor de un 2 % de la masa modal de la torre (12).

2. La turbina eólica (10) de acuerdo con la reivindicación 1, en la que la pluralidad de elementos de amortiguación (102) están montados en una sección superior (106) de la superficie interior (104) de la torre (12), en la que la sección superior (106) de la torre (12) comprende desde aproximadamente un 15 % a aproximadamente un 40 % de la altura global de la torre (12) medida desde la parte superior de la torre (12).

3. La turbina eólica (10) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que los elementos de amortiguación (102) están configurados para que una relación de amortiguación de los elementos de amortiguación (102) se pretenda que sea de aproximadamente un 1 % a aproximadamente un 25 %.

4. La turbina eólica (10) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pluralidad de elementos de amortiguación (102) están montados en la superficie interior (104) de la torre (12) por medio de al menos uno de un imán (112), uno o más elementos de sujeción, o adhesivo.

5. El sistema (100) de la reivindicación 4, en el que el elemento de masa cilíndrico (108), el elemento elastomérico cilíndrico (110) y el imán (112) están asegurados entre sí por medio de un elemento de sujeción a través de un eje longitudinal central (116).

6. El sistema (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la pluralidad de elementos de amortiguación (102) están espaciados uniformemente entre sí en una dirección circunferencial, en particular, en el que los elementos de amortiguación (102) están espaciados uniformemente entre sí tanto en la dirección circunferencial (118) como en la dirección vertical (120).

7. El sistema (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que los elementos de amortiguación (102) están espaciados en cualquier patrón adecuado en la superficie interior (104) de modo que el espaciado de los elementos de amortiguación (102) en una dirección vertical (120) de la torre (12) se determine en función de los niveles de vibración en la superficie interior (104).

8. Un procedimiento (200) para reducir la tonalidad audible generada por una turbina eólica (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo el procedimiento:

determinar (202) una pluralidad de ubicaciones en la superficie interior (104) de la torre (12) de la turbina eólica (10) que tengan niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado; proporcionar una pluralidad de elementos de amortiguación (102), teniendo cada uno de la pluralidad de elementos de amortiguación (102) un elemento de masa cilíndrico discreto (108), un elemento elastomérico cilíndrico discreto (110) y un imán discreto (112) asegurados entre sí; montar (204) uno de la pluralidad de elementos de amortiguación (102) en la pluralidad de ubicaciones en la superficie interior (104) de la torre (12), en el que una masa modal total de todos los elementos de masa cilíndricos discretos (108) se selecciona de modo que su masa modal total sea menor de un 2 % de una masa modal de la torre (12); y en el que, durante la operación de la turbina eólica (10), la pluralidad de elementos de amortiguación (102) están configurados para amortiguar las vibraciones de la torre (12) para reducir la tonalidad audible generada de ese modo.

9. El procedimiento (200) de la reivindicación 8, en el que determinar una o más ubicaciones en la superficie interior (104) de la torre (12) de la turbina eólica (10) que tienen niveles de vibración por encima de un umbral predeterminado comprende además al menos una de medir los niveles de vibración en las una o más

ubicaciones o determinar, por medio de simulación por ordenador, las una o más ubicaciones en función de al menos uno de un tamaño o una ubicación de la torre (12).

- 5 **10.** El procedimiento (200) de la reivindicación 8 o 9, el procedimiento comprende además espaciar la pluralidad de elementos de amortiguación (102) en una dirección vertical en función de los niveles de vibración en la superficie interior (104) de la torre (12).
- 10 **11.** El procedimiento (200) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes 8 a 10, que comprende además omitir los elementos de amortiguación (102) en ubicaciones que contengan bridas.
- 10 **12.** El procedimiento (200) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes 8 a 11, que comprende además espaciar la pluralidad de elementos de amortiguación (102) uniformemente entre sí en una dirección circunferencial.

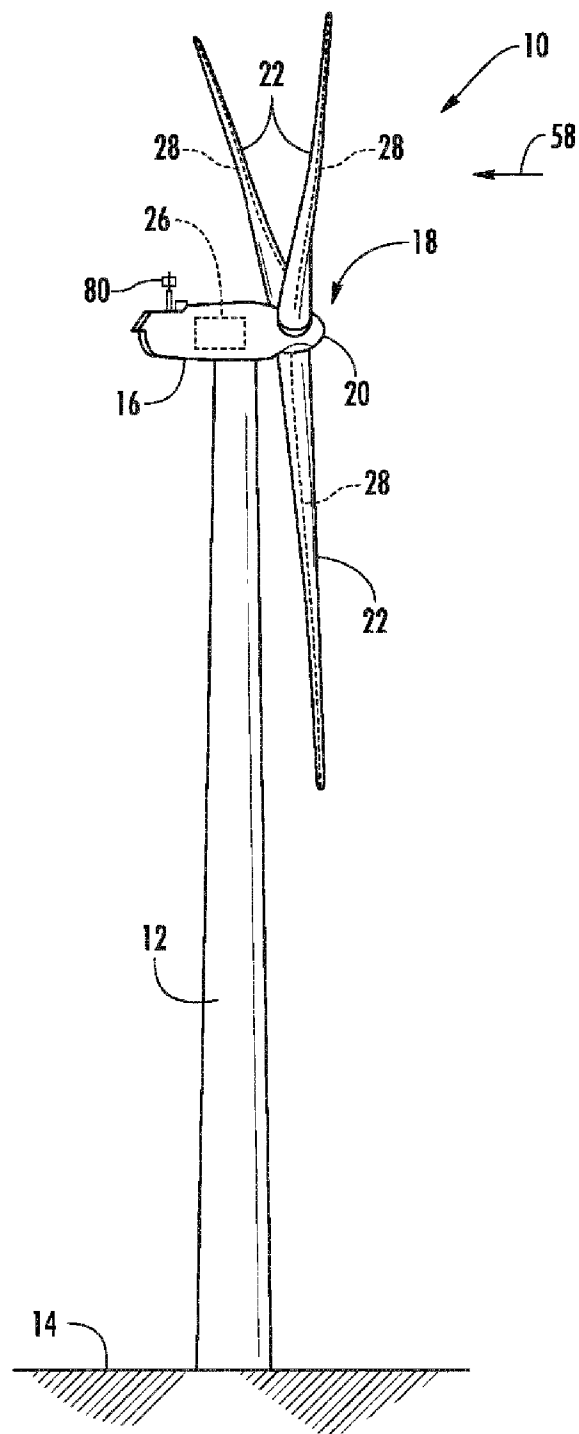
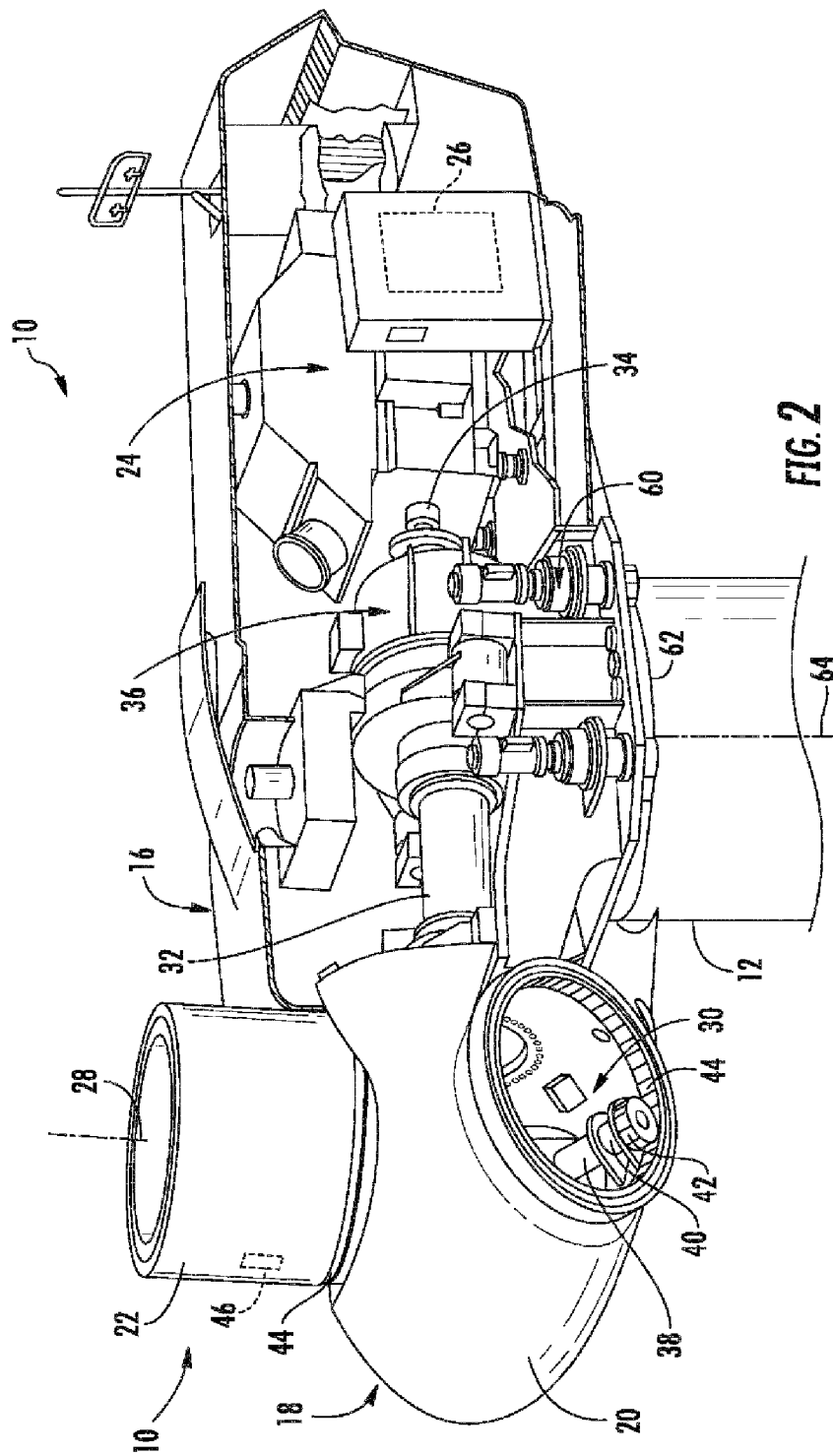


FIG. 1



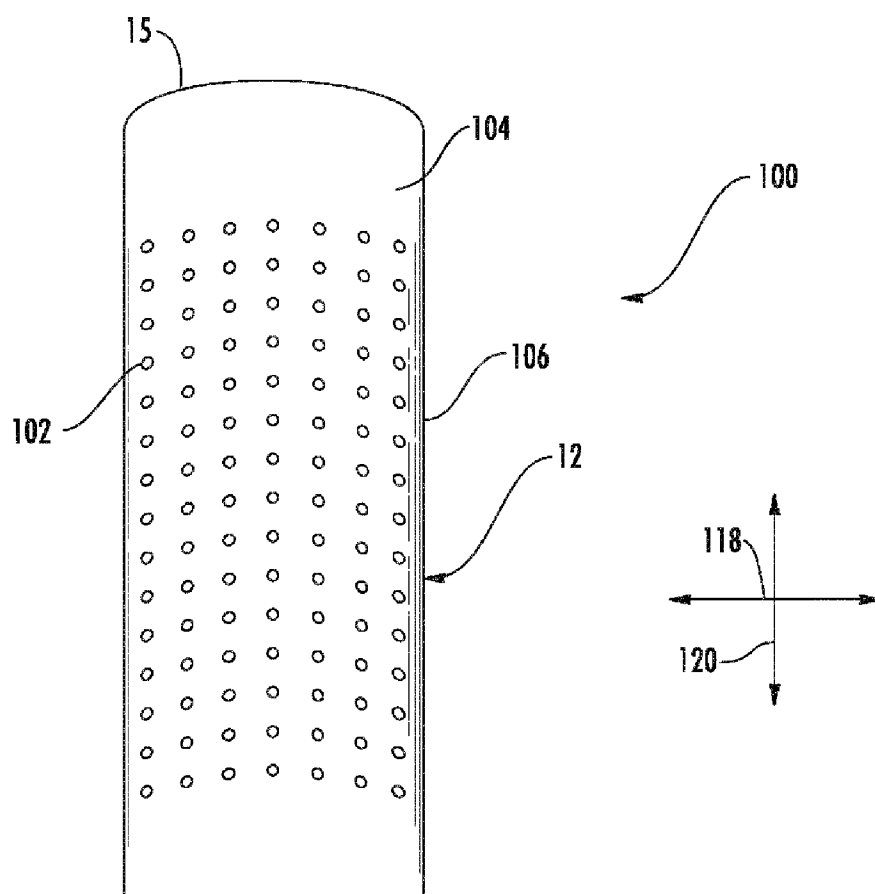


FIG. 3

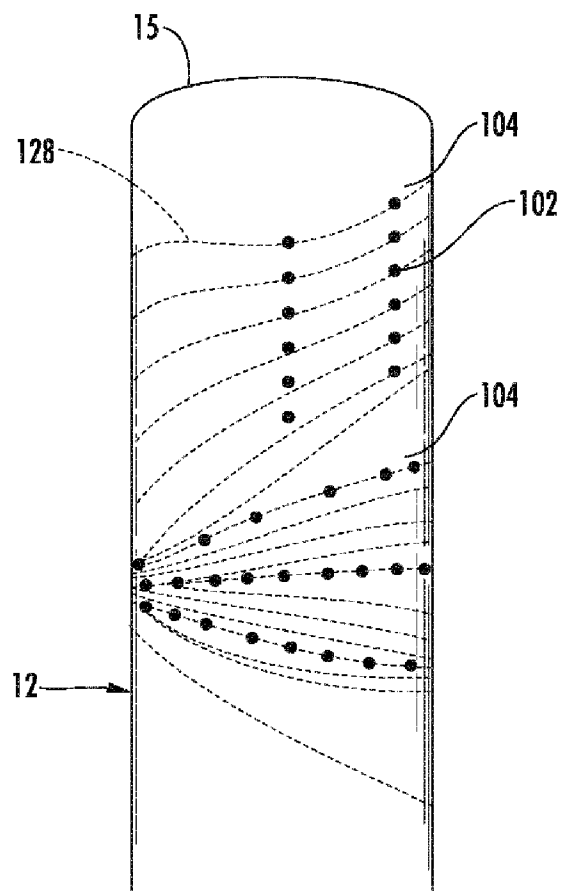
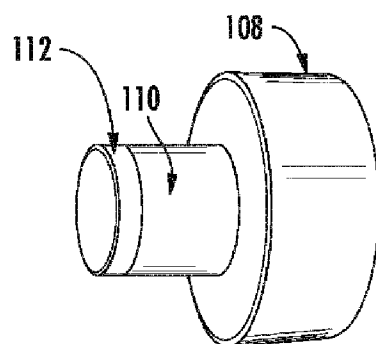
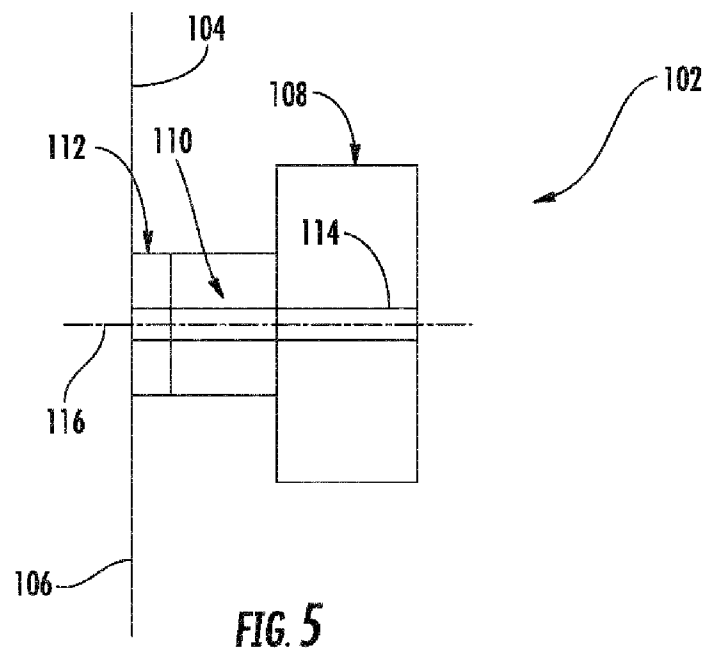


FIG. 4



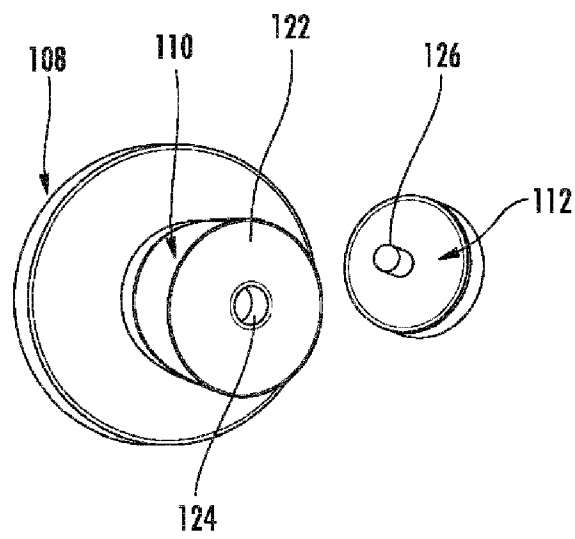


FIG. 7

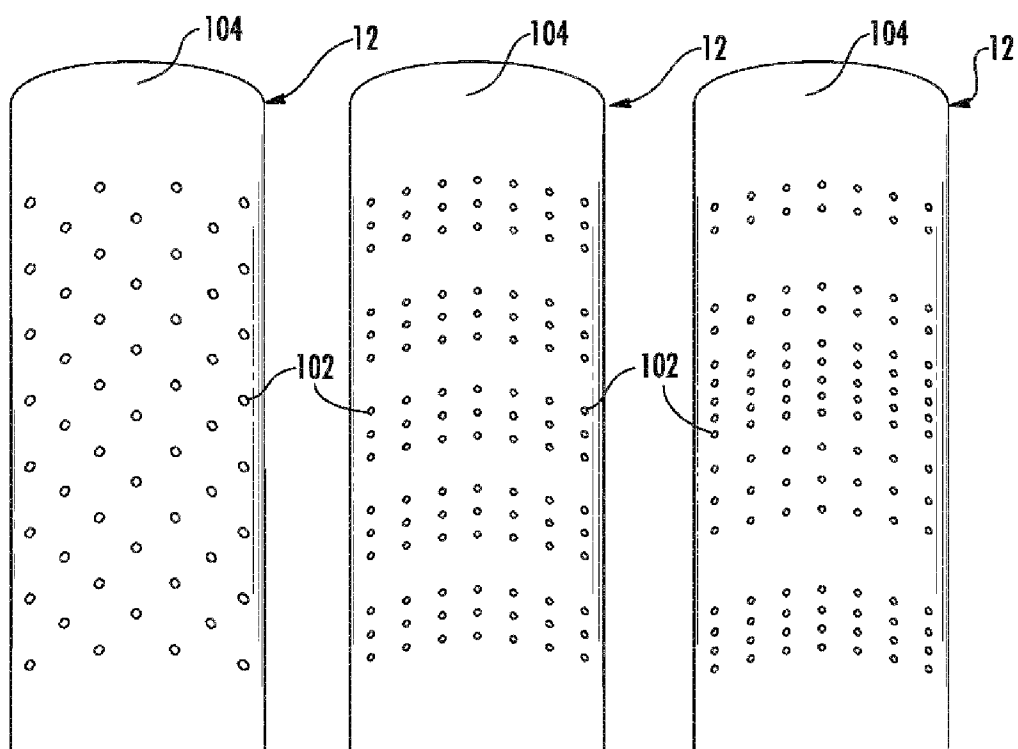


FIG. 8

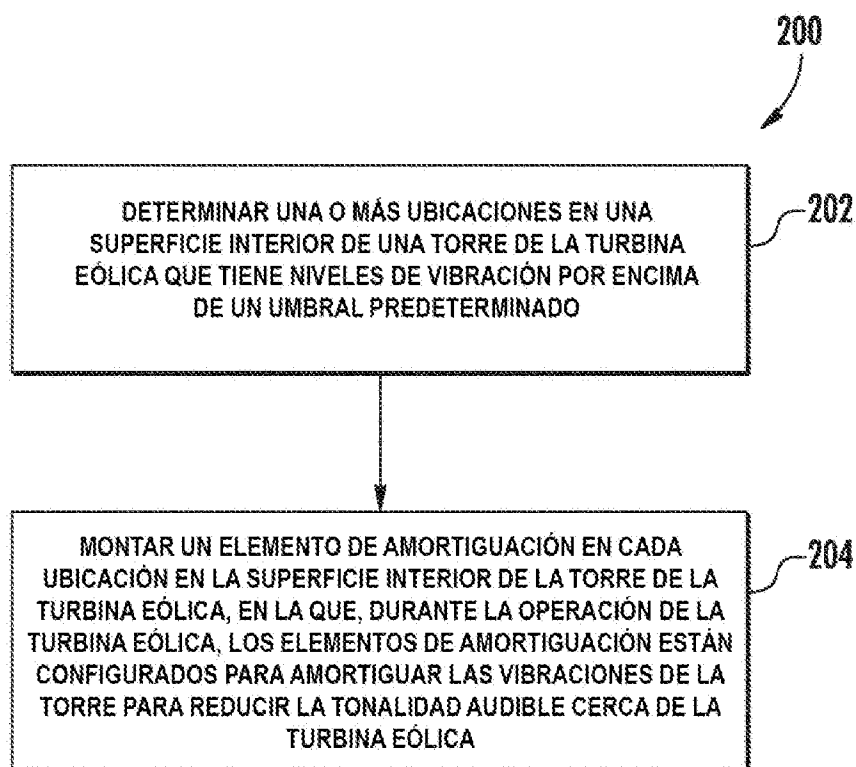


FIG. 9

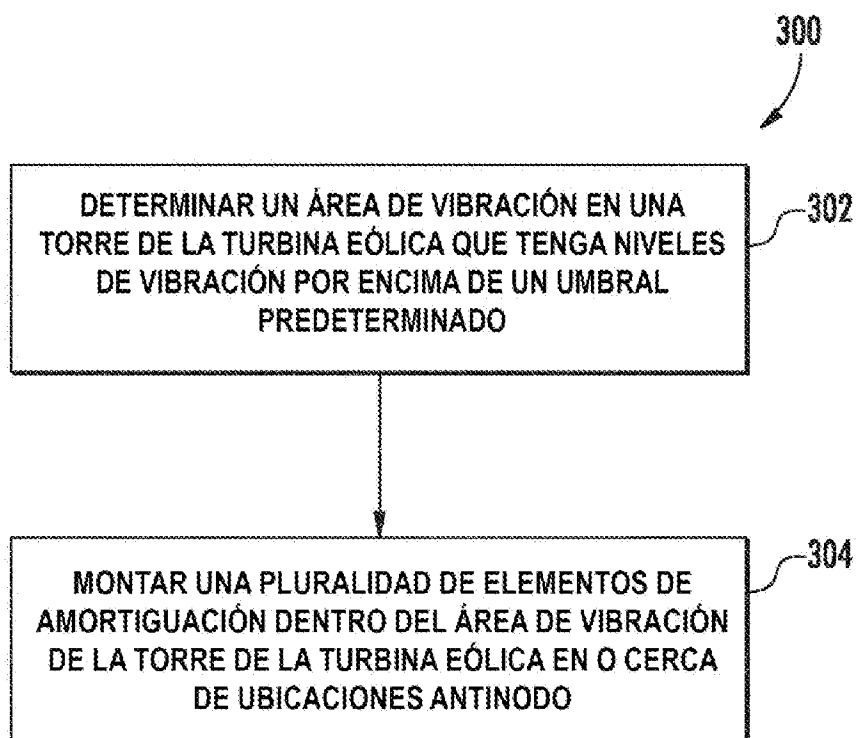


FIG. 10