

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 998 734**

51 Int. Cl.:

F03D 13/20 (2006.01)

F03D 80/50 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.12.2020** **PCT/DK2020/050363**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2021** **WO21121505**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.12.2020** **E 20828276 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2024** **EP 4077924**

54 Título: **Método de modernización de una turbina eólica con una unidad de generación de energía**

30 Prioridad:

16.12.2019 DK PA201970773

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

21.02.2025

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.00%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

MANE, SIDDHESH GOPAL y
SAHOO, NIBEDITA

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 998 734 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

Método de modernización de una turbina eólica con una unidad de generación de energía

Campo técnico

5 La invención se refiere generalmente a turbinas eólicas, y más particularmente a un método de modernización de una turbina eólica que tiene una torre y una primera unidad de generación de energía con una segunda unidad de generación de energía mejorada y a un funcionamiento de la turbina eólica modernizada de tal manera que se extienda la vida útil de la torre.

Antecedentes

10 Las turbinas eólicas se usan para producir energía eléctrica usando un recurso renovable y sin quemar un combustible fósil. Generalmente, una turbina eólica convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Una turbina eólica de eje horizontal incluye una torre y una unidad de generación de energía colocada encima de la torre. La unidad de generación de energía normalmente incluye una góndola para alojar componentes mecánicos y eléctricos, tales como un generador, y un rotor acoplado operativamente a los componentes en la góndola a través de un árbol principal que se extiende desde la góndola. El rotor, a su vez, incluye un buje central y una pluralidad de
15 palas que se extienden radialmente desde el mismo y están configuradas para interaccionar con el viento para provocar la rotación del rotor. El rotor está soportado por el árbol principal, que está acoplado operativamente, directa o indirectamente, con el generador que está alojado en el interior de la góndola. Por consiguiente, cuando el viento obliga a las palas a rotar, el generador produce energía eléctrica.

20 A menudo, durante la vida útil de una turbina eólica, que puede durar varias décadas, aparece nueva tecnología. A modo de ejemplo, se encuentran disponibles turbinas de nueva generación que tienen una mayor producción de electricidad a un menor precio (coste nivelado de energía - LCOE). En algún momento, antes de que finalice la vida útil de algunos componentes de una turbina eólica, puede resultar económico reemplazar una turbina de generación antigua por una de nueva generación. Esto se hace a menudo reemplazando toda la turbina eólica, incluyendo la cimentación. Sin embargo, esto es bastante costoso, por lo que la industria de las turbinas eólicas está buscando
25 soluciones para mejorar la rentabilidad de la modernización con una turbina de nueva generación. El documento WO 2018/184642 A1 es un ejemplo de modernización de una turbina eólica en una torre existente.

Sumario

30 Con estos y otros fines, se proporciona un método de modernización de una turbina eólica. La turbina eólica tiene una torre y una primera unidad de generación de energía. Durante la modernización, la primera unidad de generación de energía se reemplaza con una segunda unidad de generación de energía. El método incluye analizar una primera frecuencia natural de la torre en relación con las primeras frecuencias de funcionamiento nominales de la torre que tiene la segunda unidad de generación de energía; cuando la primera frecuencia natural está dentro de las primeras frecuencias de funcionamiento nominales, modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía de modo que la una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía
35 modificadas tienen una segunda frecuencia natural y segundas frecuencias de funcionamiento nominales que no se superponen; y reemplazar la primera unidad de generación de energía con la segunda unidad de generación de energía.

40 En una realización, modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye aumentar la altura de la torre desde una primera altura de torre hasta una segunda altura de torre, siendo la diferencia de altura entre la primera altura de torre y la segunda altura de torre suficiente para reducir la primera frecuencia natural a la segunda frecuencia natural y que la segunda frecuencia natural no esté dentro de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales. A modo de ejemplo, modificar la torre puede incluir añadir un adaptador a la torre para aumentar la primera altura de torre hasta la segunda altura de torre.

45 En una realización, modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye disminuir la altura de la torre desde una primera altura de torre hasta una segunda altura de torre, siendo la diferencia de altura entre la primera altura de torre y la segunda altura de torre suficiente para reducir la primera frecuencia natural a la segunda frecuencia natural y que la segunda frecuencia natural no esté dentro de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales.

50 En una realización, la torre tiene al menos una primera sección y una segunda sección y añadir el adaptador a la torre incluye posicionar el adaptador entre la primera sección y la segunda sección. El adaptador puede ser generalmente cilíndrico en esta realización. En una realización alternativa, añadir el adaptador a la torre incluye posicionar el adaptador encima de la torre y reemplazar la primera unidad de generación de energía con la segunda unidad de generación de energía incluye acoplar la segunda unidad de generación de energía al adaptador. El adaptador puede ser generalmente cónico en esta realización.

55 Además, en una realización, la torre tiene al menos una primera sección y una segunda sección y añadir el adaptador a la torre incluye retirar la primera unidad de generación de energía y la primera sección, acoplar el

adaptador a una de la primera sección y la segunda sección y acoplar la otra de la primera sección y la segunda sección al adaptador, estando el adaptador entre la primera sección y la segunda sección.

En aún una realización adicional, la torre está acoplada a una cimentación y añadir el adaptador a la torre incluye posicionar el adaptador entre la torre y la cimentación y reemplazar la primera unidad de generación de energía con la segunda unidad de generación de energía incluye acoplar la segunda unidad de generación de energía a la torre. El adaptador puede ser generalmente cilíndrico o cónico en esta realización.

En una realización, modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye limitar un parámetro de funcionamiento de la segunda unidad de generación de energía para cambiar un límite de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales para estar por debajo o por encima de la segunda frecuencia natural. Más específicamente, modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye limitar un parámetro de funcionamiento de la segunda unidad de generación de energía para aumentar un límite inferior de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales hasta una frecuencia por encima de la segunda frecuencia natural. A modo de ejemplo, alterar el funcionamiento de la turbina eólica para cambiar la frecuencia de funcionamiento nominal puede incluir ajustar el paso de una o más palas en la segunda unidad de generación de energía. Alternativamente, alterar el funcionamiento de la turbina eólica para cambiar la frecuencia de funcionamiento nominal en la torre puede incluir limitar la velocidad del rotor en la segunda unidad de generación de energía.

En un ejemplo adicional que no forma parte de la invención, un método de modernización de una turbina eólica que tiene una primera unidad de generación de energía con una segunda unidad de generación de energía, en el que la turbina eólica incluye una torre modular con al menos una primera sección y una segunda sección, incluye insertar un adaptador entre la primera sección y la segunda sección para aumentar la altura de la torre, y acoplar la segunda unidad de generación de energía a una de la primera sección y la segunda sección.

En aún otro ejemplo que no forma parte de la invención, una turbina eólica incluye una torre modular que tiene al menos dos secciones cónicas configuradas para acoplarse a una sección cilíndrica, en la que la sección cilíndrica está configurada para estar entre las al menos dos secciones cónicas. La turbina eólica puede incluir además una segunda sección cilíndrica configurada para acoplarse entre una de las secciones cónicas y una cimentación. Una unidad de generación de energía está configurada para acoplarse a la otra sección cónica.

Breve descripción de los dibujos

Los dibujos adjuntos, que se incorporan en y constituyen una parte de esta memoria descriptiva, ilustran una o más realizaciones de la invención y, junto con una descripción general de la invención proporcionada anteriormente, y la descripción detallada proporcionada a continuación, sirven para explicar la invención.

La figura 1 es una vista en perspectiva de una turbina eólica que tiene una torre y una primera unidad de generación de energía;

la figura 2 es una vista en perspectiva de una turbina eólica que tiene la torre de la figura 1 modernizada con una segunda unidad de generación de energía;

la figura 3A es un diagrama esquemático de una frecuencia natural y frecuencias de funcionamiento nominales de la turbina eólica mostradas en la figura 1;

la figura 3B es un diagrama esquemático de una frecuencia natural de una torre existente y frecuencias de funcionamiento nominales tras la modernización según una realización de la presente invención;

la figura 3C es un diagrama esquemático de una frecuencia natural de una torre existente y la frecuencia natural tras la modificación de la torre según una realización de la presente invención;

la figura 4 ilustra un sistema a modo de ejemplo para controlar una unidad de generación de energía;

las figuras 5A, 5B, y 5C ilustran un procedimiento de modernización según una realización de la presente invención;

las figuras 6A, 6B, 6C, y 6D ilustran un procedimiento de modernización según una realización de la presente invención; y

la figura 7 ilustra un adaptador de cimentación según una realización de la presente invención.

Descripción detallada

Con referencia a la figura 1, una turbina eólica 10 incluye una torre modular 12 y una unidad de generación de energía 14 dispuesta en la cúspide de la torre 12. Como es convencional, la torre modular 12 puede estar acoplada a una cimentación 16 en un extremo inferior de la misma. La torre modular 12 a modo de ejemplo incluye tres secciones 12a, 12b, y 12c que definen de manera colectiva un eje de torre generalmente vertical 18 sobre el que la unidad de generación de energía 14 puede rotar a través de un mecanismo de guiñada (no mostrado). La

cimentación 16 puede ser una masa relativamente grande, por ejemplo, hormigón, acero, etc., incrustada en el suelo y a través de la cual pueden transferirse finalmente las fuerzas sobre la turbina eólica 10. Aunque no se muestra, en una realización alternativa, la cimentación 16 puede incluir una plataforma marítima o similar usada en aplicaciones de turbinas eólicas marítimas. La unidad de generación de energía 14 incluye la parte de la turbina eólica que transforma la energía del viento en energía eléctrica. A este respecto, la unidad de generación de energía 14 incluye normalmente un alojamiento o una góndola 20, un rotor 22 que tiene un buje central 24 y una o más palas 26 (por ejemplo, tres palas) montadas en el buje central 24 y que se extienden radialmente a partir del mismo, y un generador (no mostrado) para convertir la energía mecánica en energía eléctrica. En una realización, la unidad de generación de energía 14 puede incluir además un tren de transmisión (no mostrado), que incluye una disposición de engranajes, que interconecta el rotor 22 y el generador. El generador y una porción sustancial del tren de transmisión pueden estar posicionados en el interior de la góndola 20 de la turbina eólica 10. Además del generador, la góndola 20 aloja normalmente diversos componentes requeridos para convertir la energía eólica en energía eléctrica y diversos componentes necesarios para hacer funcionar, controlar, y optimizar el rendimiento de la turbina eólica 10. Las palas de turbina eólica 26 están configuradas para interaccionar con un flujo de aire de corriente libre (el viento 62) para producir la sustentación que hace que el rotor 22 gire o rote generalmente dentro de un plano definido por las palas de turbina eólica 26. Por tanto, la unidad de generación de energía 14 puede generar potencia a partir del flujo de aire que pasa a través del área de barrido del rotor 22. La unidad de generación de energía 14 está unida a la torre 12 en una brida superior 28. La torre 12 soporta la carga presentada por la unidad de generación de energía 14 y funciona para elevar la unidad de generación de energía 14, y especialmente el rotor 22, a una altura por encima del nivel del suelo o el nivel del mar en la que se hallan normalmente corrientes de aire que se mueven más rápido con menor turbulencia.

En algún punto en la vida útil de la turbina eólica, puede reemplazarse una turbina eólica existente. Durante un procedimiento de modernización, puede reemplazarse una unidad de generación de energía existente por otra unidad de generación de energía mejorada. Esto se muestra, a modo de ejemplo, en la figura 2. Un enfoque de modernización requiere que se use la misma torre 12 para una segunda unidad de generación de energía 42. Una turbina eólica modernizada 40 debe funcionar de manera que se amplíe la vida de servicio de la torre 12 al menos a y preferiblemente más allá del valor de diseño de la vida útil de la torre 12.

Con este fin, los inventores identificaron un problema que debe analizarse antes de la instalación de la segunda unidad de generación de energía 42 en la torre 12. Ese problema implica la consideración de una frecuencia natural de una turbina eólica en relación con un intervalo de frecuencias de funcionamiento nominales de la turbina eólica 40 con una nueva unidad de generación de energía 42 tras un procedimiento de modernización, descrito a continuación. Las frecuencias de funcionamiento nominales son frecuencias de vibración que se producen durante la generación de potencia óptima de la turbina eólica. La nueva unidad de generación de energía, cuando se instala en una torre existente, no debe producir frecuencias de funcionamiento nominales que se superpongan a la frecuencia de vibración natural de la nueva unidad de generación de energía en la torre de turbina eólica durante el funcionamiento normal de la turbina eólica modernizada. La frecuencia natural de la turbina eólica es la frecuencia a la que la torre de turbina eólica oscilará en ausencia de cualquier fuerza de accionamiento o amortiguación.

En general y con referencia a la figura 1, a medida que aumenta la rotación del rotor 22, aumenta la frecuencia de vibración en la torre de turbina eólica 12. La vibración en la torre de turbina eólica 12 puede deberse al movimiento periódico de cada pala 26 mientras barre más allá de la torre 12. En el arranque, la frecuencia de rotación del rotor 22 aumenta desde una posición estacionaria. La rotación del rotor 22 aumenta hasta que alcanza una velocidad de rotación óptima en la que se optimiza la salida de potencia. Esto se produce a una velocidad del viento predeterminada, que se determina mediante una velocidad nominal del rotor 22. La salida de potencia de la turbina eólica 10 se mantiene relativamente constante en condiciones variables de viento controlando el paso de las palas 26. Por tanto, con la variación en la velocidad del viento, puede ajustarse el paso de las palas 26 para mantener una velocidad de rotación óptima. Aunque hay controles diseñados para optimizar la producción de potencia, por ejemplo, el control de paso de pala, durante la generación de potencia óptima todavía hay alguna variación en la frecuencia de rotación del rotor 22. Es decir, durante el funcionamiento nominal hay alguna variación en la frecuencia de funcionamiento nominal en la torre de turbina eólica 12. Esta variación produce un intervalo en las frecuencias de funcionamiento nominales. Tal como se hace referencia en el presente documento, una frecuencia de funcionamiento nominal no incluye frecuencias de vibración en la torre de turbina eólica 12 durante el arranque o la parada. Cada uno de estos puede provocar frecuencias de vibración que pueden coincidir con la frecuencia natural de la torre de turbina eólica. Sin embargo, el tiempo de coincidencia es corto porque la velocidad de rotación del rotor 22 está aumentando hacia la velocidad de rotación óptima a la que se producen las frecuencias de funcionamiento nominales o la velocidad de rotación está disminuyendo hacia una posición estacionaria desde la velocidad de rotación óptima.

Como ejemplo y con referencia a la turbina eólica 10 a modo de ejemplo de las figuras 1 y 3A, el viento 62 mueve la góndola 20. Es decir, el viento 62 hace que la torre 12 se flexione (en la dirección de la flecha 62) de modo que la góndola 20 se desplaza desde el 18. Además de ese movimiento de desplazamiento periódico, el viento hace rotar el rotor 22. La rotación del rotor produce vibraciones periódicas que se transmiten a toda la turbina eólica 10, incluyendo la torre 12. Al considerar la turbina eólica 10, la torre 12 tiene una frecuencia natural 64 (figura 3A). Si la torre 12 se somete a una fuerza periódica externa (por ejemplo, el viento 62 y/o rotación del rotor) cerca de su frecuencia natural 64, la torre 12 resonará. Por ese motivo, tal como se muestra en la figura 3A, la turbina eólica 10

está diseñada con la frecuencia natural 64 fuera de las frecuencias de funcionamiento nominales 66 de la turbina eólica 10. Las frecuencias de funcionamiento nominales 66 resultan de la rotación del rotor 22, descrita anteriormente, durante la generación de potencia óptima. Tal como se muestra, no hay superposición entre la frecuencia natural 64 y un intervalo de las frecuencias de funcionamiento nominales 66. La torre 12 está diseñada para resonar a una frecuencia que no se produce normalmente durante la generación de potencia óptima de la turbina eólica 10. Este diseño evita vibraciones excesivas, que pueden dar como resultado la degradación de la torre 12 por resonancia durante el funcionamiento. De esta manera, puede prolongarse la vida útil de la torre de turbina eólica 12.

Aunque las frecuencias de funcionamiento nominales 66 ilustradas en la figura 3A abarcan un intervalo de frecuencias por encima de 0 Hz y por encima de la frecuencia natural 64, se apreciará que estas no son las únicas frecuencias que produce la turbina eólica 10 durante el funcionamiento. Tal como se describe anteriormente, por ejemplo, antes del arranque, el rotor 22 es estacionario. Durante el arranque, aumenta la velocidad de rotación del rotor 22, y a medida que el rotor 22 acelera el giro hacia una velocidad de rotación para la generación de potencia óptima, las frecuencias de vibración experimentadas por la turbina eólica 10 pueden superponerse a la frecuencia natural 64. Esto es normalmente una aparición momentánea porque la velocidad de rotación de rotor continua para aumentar hasta que se alcanza la velocidad de rotación óptima momento en el cual la torre de turbina eólica 12 experimenta frecuencias de funcionamiento nominales 66. Asimismo, durante la parada, la velocidad de rotación del rotor 22 producirá una frecuencia de vibración que se superpone momentáneamente con la frecuencia natural 64 a medida que se reduce la velocidad de rotación del rotor 22. A este respecto, las frecuencias de funcionamiento nominales 66 representan un Intervalo de funcionamiento nominal de frecuencias de vibración experimentadas por la turbina eólica 10 durante la generación de potencia óptima. Las frecuencias de funcionamiento nominales excluyen esas frecuencias observadas durante el arranque y la parada de la turbina eólica 10.

Tras modernización de la turbina eólica 10 con la segunda unidad de generación de energía 42, tal como se describe a continuación, el objetivo es maximizar la producción de potencia hasta que se alcance la vida útil de la segunda unidad de generación de energía 42 y/o la torre 12 (tal como se indicó anteriormente, preferiblemente alcanzan el final de su vida de servicio a la vez). A ese respecto, el objetivo es prolongar la vida útil de la torre 12 siempre que sea posible. Con ese fin, la frecuencia natural 64 se considera en relación con una predicción de frecuencias de funcionamiento nominales de la torre con la segunda unidad de generación de energía 42. Dependiendo del resultado de ese análisis, varios escenarios son posibles para abordar una superposición entre las frecuencias de funcionamiento nominales y la frecuencia natural de la torre con la segunda unidad de generación de energía 42.

Con ese fin, tal como se muestra en la figura 3B, cuando la torre 12 se moderniza con la segunda unidad de generación de energía 42, la nueva turbina eólica 40 tendrá probablemente nuevas frecuencias de funcionamiento nominales 68. Las nuevas frecuencias de funcionamiento nominales 68 podrían presentar un problema con respecto a la frecuencia natural 64 de torre 12. La frecuencia natural 64 de la torre 12 depende principalmente de su rigidez y una masa de la torre 12. Sin querer limitarse a la teoría, se cree que reemplazar la unidad de generación de energía 14 con la segunda unidad de generación de energía 42 tiene un efecto despreciable sobre la frecuencia natural 64 de la torre 12 (es decir, la frecuencia natural no cambia de manera apreciable), pero la segunda unidad de generación de energía 42 puede provocar un desplazamiento significativo en las frecuencias de funcionamiento nominales 68 en relación con las frecuencias de funcionamiento nominales 66 debido a las eficiencias mejoradas proporcionadas con la segunda unidad de generación de energía 42. Sin embargo, cabe destacar que si una nueva unidad de generación de energía tiene una masa que es significativamente diferente de la unidad de generación de energía existente, puede producirse un desplazamiento en la frecuencia natural.

A modo de ejemplo y con referencia continua a la figura 3B, las nuevas frecuencias de funcionamiento nominales 68 de la turbina eólica 40 con la nueva segunda unidad de generación de energía 42 en ausencia de modificaciones a la torre 12 pueden abarcar la frecuencia natural 64 de la torre 12. Es decir, un análisis del funcionamiento de la operación de la turbina eólica 40 a través de modelización u otros medios matemáticos puede revelar que a determinadas velocidades del viento una o más de las frecuencias de funcionamiento nominales se acercarán o incluso coincidirán con la frecuencia natural 64 de la torre 12. La superposición de la frecuencia de funcionamiento nominal 68 con la frecuencia natural 64 debe evitarse si debe mantenerse o prolongarse la vida útil de la torre 12.

Con ese fin, los inventores han desarrollado soluciones que abordan la superposición de las frecuencias de funcionamiento nominales 68 y la frecuencia natural 64 de la torre 12 durante un procedimiento de modernización. Generalmente, la solución implica desplazar la frecuencia natural 64 de la torre 12 modificando la torre 12 y/o desplazar las frecuencias de funcionamiento nominales 68 de la turbina eólica modernizada 40. Al modificar o bien la frecuencia natural o bien las frecuencias de funcionamiento nominales, se evita una superposición entre las dos.

Un método de desplazamiento de las frecuencias de funcionamiento nominales 68 es a través del control del funcionamiento de la turbina eólica modernizada 40. Tal como se indicó anteriormente, la tasa de vida de la torre depende de las frecuencias de vibración que se imponen a la torre 12 durante el funcionamiento de la turbina eólica modernizada 40. Las frecuencias de vibración impuestas a la torre 12 pueden controlarse en cierta medida a través del funcionamiento de la turbina eólica 40. Con referencia a la figura 3B, una vez que se conocen o determinan las frecuencias de funcionamiento nominales 68, pueden compararse con la frecuencia natural 64 de la torre 12 (tal

como en la memoria de un controlador; véase a continuación). Con esa información, puede determinarse cualquier superposición entre las frecuencias de funcionamiento nominales 68 y la frecuencia natural 64 de la torre 12. El funcionamiento de la turbina eólica 40 puede controlarse para cambiar las frecuencias de funcionamiento nominales 68 a frecuencias diferentes de (por ejemplo, menores o mayores que) la frecuencia natural 64 de la torre 12. Como un ejemplo, las frecuencias de funcionamiento pueden cambiarse cambiando la velocidad del rotor 22.

En una realización a modo de ejemplo y con referencia continuada a las figuras 3B y 4, un sistema 50 a modo de ejemplo puede monitorizar las frecuencias de vibración que actúan sobre la torre 12, incluyendo la frecuencia de funcionamiento nominal de la turbina eólica 40. A este respecto, el sistema 50 incluye un controlador central 52 y uno o más sensores 54 acoplados operativamente a la turbina eólica 40 y configurados para indicar, directa o indirectamente, las vibraciones de la torre 12. A modo de ejemplo, los sensores 54 pueden estar acoplados directamente a la torre 12 en una realización. En una realización alternativa, sin embargo, los sensores 54 pueden estar acoplados a otra parte de la turbina eólica 40, pero configurados para medir un parámetro que por supuesto se refiere a las vibraciones que actúan sobre la torre 12 (por ejemplo, acelerómetros ubicados en la góndola 20). El controlador central 52 puede ser el controlador principal para la turbina eólica 40 o puede ser un controlador independiente que está acoplado operativamente al controlador principal de la turbina eólica 40.

Tal como se muestra, el controlador 52 puede estar acoplado operativamente a un mecanismo de paso 56 que puede ajustar el paso de una o más de las palas 26 en la segunda unidad de generación de energía 42. Al ajustar el paso de las palas 26 de una manera apropiada, puede aprovecharse la energía eólica (es decir, capturarse por la turbina eólica) para mantener la velocidad de rotación del rotor 22. Esto puede establecer un límite inferior 70 (la figura 3B) en las frecuencias de funcionamiento nominales para estrechar las frecuencias de funcionamiento nominales 68 a nuevas frecuencias de funcionamiento nominales 72. En este caso, el límite inferior de las frecuencias de funcionamiento nominales 68 se aumenta según la flecha 74 de modo que el límite inferior 70 de las frecuencias de funcionamiento nominales 72 es mayor que la frecuencia natural 64 de la torre 12. De esta manera, se evita la superposición de las frecuencias de funcionamiento nominales 72 y la frecuencia natural 64 de la torre 12. Tal como se muestra, el controlador 52 está acoplado operativamente a un mecanismo de resistencia 58 (por ejemplo, un generador) que proporciona resistencia mecánica a la rotación del rotor 22 y, por tanto, controla la velocidad a la que rota el rotor 22.

Otra solución que puede usarse independientemente o junto con el sistema 50 mostrado en la figura 4 es cambiar una masa o una rigidez de la torre 12 durante el procedimiento de modernización. Es decir, durante la modernización para instalar la segunda unidad de generación de energía 42, se modifica una o ambas de la masa o la rigidez de la torre 12. Esta modificación estructural a la torre 12 desplaza la frecuencia natural alejándose de las frecuencias de funcionamiento nominales de la turbina eólica 40.

En la figura 3C, la frecuencia natural 64 se desplaza alejándose de las frecuencias de funcionamiento nominales 68. Específicamente, la frecuencia natural 64 es directamente proporcional a la rigidez e inversamente proporcional a la masa de la torre 12. Según una realización de la invención, cambiar uno o ambos de la rigidez y la masa desplaza la frecuencia natural 64 de la torre 12 fuera de las frecuencias de funcionamiento nominales 68 de la turbina eólica modernizada 40. La rigidez es la resistencia a la deformación. A modo de ejemplo únicamente, cambiar la rigidez de la torre 12 puede lograrse cambiando la altura de la torre 12. Al aumentar la altura disminuye la rigidez y, por tanto, disminuye la frecuencia natural de la torre 12. Y, disminuyendo la altura de la torre 12 aumenta la rigidez y aumenta la frecuencia natural.

Tal como se muestra en la realización a modo de ejemplo de la figura 3C, la frecuencia natural 64 se disminuye en relación con las frecuencias de funcionamiento nominales 68 de la turbina eólica 10 aumentando la altura de la torre 12. Una torre modificada 82 se muestra en las figuras 5A-6D y se describe a continuación. Es decir, al aumentar la altura disminuye la rigidez y disminuye la frecuencia natural. Con un aumento suficiente de altura, la nueva frecuencia natural 76 de la torre modificada es menor que las frecuencias de funcionamiento nominales 68 tras modernizar con la segunda unidad de generación de energía 42. Este se muestra esquemáticamente mediante la flecha 78 en la figura 3C. Ventajosamente, una torre más alta puede ser beneficiosa por otros motivos.

Al colocar la segunda unidad de generación de energía 42 más alta dentro de la atmósfera donde existen corrientes de aire más rápidas y menos turbulencia, se cree que la producción anual de energía (AEP) de la turbina eólica se aumentará como resultado de la altura aumentada. La altura aumentada de la torre 12 aumenta el momento de flexión que actúa sobre la torre modificada 82 (por ejemplo, piense en una viga en voladizo con una gran carga en su extremo) y, por tanto, reduce la vida útil de la torre 12. No obstante, dependiendo de la aplicación particular, puede ser posible aumentar la altura de la torre 12 y hacer funcionar la segunda unidad de generación de energía 42 a una curva de potencia nominal de modo que la torre modificada de turbina eólica y la segunda unidad de generación de energía 42 alcancen el final de su vida de servicio al mismo tiempo.

Un ejemplo de una modificación de altura de la torre 12 en combinación con una modernización para incluir la segunda unidad de generación de energía 42 se ilustra en las figuras 5A-5C. En las figuras, una altura H1 (figura 5A) de la torre 12 se aumenta hasta una nueva altura, H2 (figura 5C) con la segunda unidad de generación de energía 42 a la nueva altura H2. Una vez modernizada, una torre eólica modificada 82 (figura 5C) corresponde a la frecuencia natural 76 y las frecuencias de funcionamiento nominales 68 mostradas en la figura 3C. Es decir, la torre

12 mostrada en la figura 1 que tiene una frecuencia natural 64 se modifica durante un procedimiento de modernización. Como resultado de la modificación, la torre modificada de la turbina eólica 82 tiene una altura H2 que tiene la frecuencia natural 76. Esta frecuencia natural está por debajo de las frecuencias de funcionamiento nominales 68 de la torre modificada 82 que tiene la segunda unidad de generación de energía 42 tal como se muestra, por ejemplo, en la figura 3C.

Con ese fin, en la modernización a modo de ejemplo, la torre 12 mostrada en la figura 5A se construye en secciones. En el ejemplo mostrado, la torre 12 incluye tres secciones 12a, 12b, y 12c que definen colectivamente la altura H1. Las realizaciones de la invención no se limitan a tres secciones ya que una torre con dos o más secciones puede modernizarse tal como se describe en el presente documento. Con referencia a la figura 5A, en una realización, la primera unidad de generación de energía 14 se retira del extremo superior 84 de la sección de torre 12c. Esto puede lograrse mediante una grúa (no mostrada) u otro dispositivo de elevación.

En las figuras 5B y 5C, la altura H1 de la torre 12 se aumenta añadiendo un adaptador de transición de torre 86 en la sección de torre 12c del extremo superior 84. Es decir, la altura H2 de la torre modificada 82 (mostrada en la figura 5C) es igual a la altura H1 más la longitud del adaptador de transición de torre 86. Además de aumentar la altura en relación con la torre 12, el adaptador de transición de torre 86 también puede proporcionar una coincidencia de geometría entre el extremo superior 96 de la torre modificada 82 y la segunda unidad de generación de energía 42. A modo de ejemplo, la segunda unidad de generación de energía 42 puede ser de un fabricante diferente que el fabricante de la torre 12 de modo que existe un desajuste de geometría entre la torre 12 y segunda unidad de generación de energía 42. El adaptador de transición de torre 86 puede aumentar la altura de la torre 12 mientras que también remedia una variación en la geometría entre la primera unidad de generación de energía 14 y la segunda unidad de generación de energía 42.

A este respecto y con referencia a la figura 5B, el adaptador de transición de torre 86 incluye un primer extremo 92 con una primera superficie de contacto 94 dimensionada para engancharse con la superficie de contacto 90 en el extremo superior 84 de la sección de torre 12c. El adaptador de transición de torre 86 incluye además un segundo extremo 96 con una segunda superficie de contacto 98 dimensionada para engancharse en una superficie de contacto 100 en la segunda unidad de generación de energía 42. El adaptador de transición de torre 86 está acoplado al extremo superior 84 de la sección de torre 12c. Más particularmente, la primera superficie de contacto 94 en el primer extremo 92 del adaptador de transición de torre 86 puede estar acoplada a la superficie de contacto 90 en el extremo superior 84 de la sección de torre 12c, tal como mediante soldadura o una conexión bridada. En una realización a modo de ejemplo, las superficies de contacto 94, 98 del adaptador de transición de torre 86 pueden incluir una brida (por ejemplo, una brida anular). Las superficies de contacto 90, 100 en la sección de torre 12c y la segunda unidad de generación de energía 42, respectivamente, también pueden incluir una brida. Un elemento de sujeción, tal como una tuerca/perno puede usarse para acoplar las bridas respectivas entre sí, tal como se conoce generalmente en la técnica. En una realización alternativa, pueden omitirse las bridas y el adaptador de transición de torre 86 puede estar acoplado a la sección de torre 12c a través de soldadura, por ejemplo.

En una realización a modo de ejemplo, para resolver el posible desajuste entre la torre modificada 82 y la segunda unidad de generación de energía 42, el tamaño de las superficies de contacto 94 y 98 puede ser diferente entre sí. Más particularmente, el diámetro de las superficies de contacto 94, 98 puede ser diferente. En una realización, por ejemplo, el diámetro de la primera superficie de contacto 94 puede ser de aproximadamente 3 metros y el diámetro de la segunda superficie de contacto 98 puede ser de aproximadamente 4 metros y viceversa. A ese respecto, el adaptador de transición de torre 86 puede tener una configuración cónica para tener en cuenta la diferencia de dimensiones. Otros tamaños y formas, sin embargo, son posibles dependiendo de la aplicación particular. Además, la longitud del adaptador de transición de torre 86 puede variar para ubicar la segunda unidad de generación de energía 42 a la altura H2 deseada. A modo de ejemplo, el adaptador de transición de torre 86 puede tener entre aproximadamente 2 metros y aproximadamente 30 metros de longitud. De nuevo, pueden ser posibles otras longitudes dependiendo de la aplicación particular y la frecuencia natural 76 deseada de la torre modificada 82 en relación con la frecuencia natural 64 de la torre 12 (mostrada en la figura 3C).

Haciendo referencia a la figura 5C, con el adaptador de transición de torre 86 unido a la sección de torre 12c, la altura de la torre modificada 82 es H2. La altura H2 de la torre modificada 82 es mayor que la altura H1 de la torre 12. Esto produce una disminución en la frecuencia natural de la torre modificada 82 en relación con la torre 12. A continuación, la segunda unidad de generación de energía 42 puede estar acoplada al adaptador de transición de torre 86. Más particularmente, la superficie de contacto 100 de la segunda unidad de generación de energía 42 puede estar acoplada a la segunda superficie de contacto 98 en el segundo extremo 96 del adaptador de transición de torre 86, tal como mediante soldadura o una conexión bridada, para completar el procedimiento de modernización.

Debe reconocerse que en una realización alternativa, la segunda unidad de generación de energía 42 puede acoplarse al segundo extremo 96 del adaptador de transición de torre 86 y luego ese conjunto se acopla posteriormente al extremo superior 84 de la sección de torre 12c. En cualquier caso, posteriormente al procedimiento de modernización, la turbina eólica modernizada 40 puede volver al servicio y hacerse funcionar. La turbina eólica modernizada 40 debe estar preferiblemente en funcionamiento hasta que la vida de servicio de la torre modificada 82 y la segunda unidad de generación de energía 42 haya expirado. Al extender la vida de servicio de la

turbina eólica a través del procedimiento de modernización, puede proporcionarse al operador de la turbina eólica tiempo adicional en el que rentabilizar su inversión en la turbina eólica.

En muchas regiones donde se ubican turbinas eólicas, pueden existir leyes, reglamentos, ordenanzas, etc. locales o regionales que limiten la altura a la que las estructuras, tales como las turbinas eólicas, pueden extenderse sobre el suelo. Estos pueden existir, por ejemplo, como medida de seguridad para evitar accidentes de aviación o por otras consideraciones de seguridad. En cualquier caso, al aumentar la altura total de la turbina eólica modernizada 40, el operador de la turbina eólica puede querer verificar la altura de la punta de la pala cuando una de las palas 26 de la segunda unidad de generación de energía 42 está en la posición de las doce en punto (es decir, a la altura máxima de la turbina eólica 40) para garantizar que la turbina eólica modernizada 40 cumple con las normas aplicables. Si la altura de la punta de las palas 26 supera un umbral predeterminado establecido por las leyes, reglamentos, ordenanzas, etc. en el que se encuentra la turbina eólica modernizada 40, entonces la altura del adaptador de transición de torre 86 (o posiblemente incluso la altura de la torre 12, véase a continuación) puede tener que reducirse para cumplir con las leyes, reglamentos, ordenanzas, etc. aplicables.

Tal como se describió anteriormente, el adaptador de transición de torre 86 se añadió al extremo superior 84 de la torre 12, de modo que sustancialmente toda la torre 12 se "reutiliza" en la turbina eólica modernizada 40. Esto representa un uso eficiente de la estructura existente en el procedimiento de modernización. La invención, sin embargo, no se limita a una realización. A este respecto y en una realización alternativa, una porción de la torre original 12 puede retirarse para establecer una nueva superficie de contacto de torre en la que puede acoplarse el adaptador de transición de torre 86 para cambiar la altura total de la torre modificada 82.

Tal como se ilustra en las figuras 6A-6D, en una realización, la altura H1 de la torre 12 puede aumentarse mediante la inserción de un adaptador en ubicaciones distintas de en el extremo superior 84 de la torre 12. A ese respecto, pueden separarse cualesquiera dos secciones 12a, 12b, y 12c de la torre 12 y puede acoplarse un adaptador de transición de torre 110 entre las secciones de torre. A modo de ejemplo y tal como se ilustra en las figuras 6A y 6B, el adaptador de transición de torre 110 se inserta entre la sección de torre 12b y 12c. Aunque no se muestra, un adaptador de transición de torre puede insertarse entre las secciones 12a y 12b o entre la sección 12a y la cimentación 16 tal como se describe junto con la figura 7.

Con ese fin, y con referencia a las figuras 6A y 6B, pueden retirarse la unidad de generación de energía 14 y la sección de torre 12c. Esto deja las secciones de torre 12a y 12b restantes en posición. Tal como se muestra, un extremo superior 112 de la sección de torre 12b forma una superficie de contacto 114 para recibir el adaptador de transición de torre 110.

A continuación, y con referencia a la figura 6B, el adaptador de transición de torre 110 tiene un primer extremo 116 que define una primera superficie de contacto 120 para acoplarse a la sección de torre 12b y tiene un segundo extremo 122 que define una segunda superficie de contacto 124. La primera superficie de contacto 120 en el primer extremo 116 del adaptador de transición de torre 110 se acopla a la superficie de contacto 114 de la sección de torre 12b. En la realización a modo de ejemplo mostrada, el adaptador de transición de torre 110 es cilíndrico. Como un ejemplo, cada una de las superficies de contacto 120 y 124 definen un círculo que tiene el mismo diámetro. Ventajosamente, se simplifica la construcción del adaptador de transición de torre 110 ya que las dimensiones de cada extremo 116 y 122 no varían con la longitud del adaptador de transición de torre 110. El adaptador de transición de torre 110 puede estar acoplado a la superficie de contacto 114 a través de una conexión bridada. De manera alternativa, el adaptador de transición de torre 110 puede soldarse a la superficie de contacto 114.

Una vez que el adaptador de transición de torre 110 se fija a la sección de torre 12b, la sección de torre 12c se fija al adaptador de transición de torre 110. A ese respecto y con referencia a las figuras 6C y 6D, la sección 12c incluye un primer extremo 126 que define una primera superficie de contacto 130 e incluye un segundo extremo 132 que define una segunda superficie de contacto 134. La segunda superficie de contacto 134 puede ser la brida superior 28 (en la figura 1). La primera superficie de contacto 130 en el primer extremo 126 de la sección de torre 12c está acoplada a la superficie de contacto 124 en el segundo extremo 122 del adaptador de transición de torre 110. A modo de ejemplo, el adaptador de transición de torre 110 puede estar acoplado en el extremo 126 a través de una conexión bridada. Alternativamente, el adaptador de transición de torre 110 puede estar soldado al extremo 126. La longitud del adaptador de transición de torre 110 puede variar para ubicar la segunda unidad de generación de energía 42 a la altura deseada H3, siendo H3 mayor que H1 por la longitud del adaptador de transición de torre 110. A modo de ejemplo, el adaptador de transición de torre 110 puede tener entre aproximadamente 2 metros y aproximadamente 30 metros de longitud. De nuevo, pueden ser posibles otras longitudes dependiendo de la aplicación particular y la frecuencia natural deseada 76 de la torre modificada 82 en relación con la frecuencia natural 64 de la torre 12 (mostrada en la figura 3C). Aunque no se muestra, el adaptador de transición de torre 110 puede incluir una plataforma interna y una escalera que hace la transición entre las escaleras internas de secciones adyacentes 12b y 12c.

Haciendo referencia a la figura 6D, la segunda unidad de generación de energía 42 luego puede acoplarse a la sección de torre 12c. Más particularmente, la superficie de contacto 100 de la segunda unidad de generación de energía 42 puede acoplarse a la segunda superficie de contacto 134 en el segundo extremo 132 de la sección de torre 12c. Debe reconocerse que en una realización alternativa, la segunda unidad de generación de energía 42

- puede acoplarse al segundo extremo 132 de la sección de torre 12c y luego ese conjunto se acopla posteriormente al adaptador de transición de torre 110. Ventajosamente, cuando el operador de la turbina eólica está modernizando la primera unidad de generación de energía 14 con la segunda unidad de generación de energía 42 fabricada por el mismo fabricante, puede que no haya necesidad de resolver un desajuste entre la torre modificada 82, es decir, la sección de torre 12c, y la segunda unidad de generación de energía 42. El tamaño de las superficies de contacto 100 y 134 puede ser igual. Más particularmente, el diámetro de las superficies de contacto 100 y 134 puede ser igual. Al insertar el adaptador de transición de torre 110 entre cualesquiera dos secciones de torre 12a, 12b, y 12c se elimina un requisito para la transición entre la torre modificada 82 y la segunda unidad de generación de energía 42.
- En una realización, por ejemplo, el diámetro de la superficie de contacto 100 puede ser de aproximadamente 3 metros y el diámetro de la segunda superficie de contacto 134 puede ser de aproximadamente 3 metros. Sin embargo, son posibles otros tamaños dependiendo de la aplicación particular. Puede que la adición del adaptador de transición de torre 110 entre las secciones de torre 12a y 12b o 12b y 12c evite problemas asociados con el diseño y la construcción de un adaptador que puede recibir la segunda unidad de generación de energía 42 en una superficie de contacto del adaptador. Es comparativamente más sencillo y menos costoso construir un adaptador cilíndrico, tal como el adaptador de transición de torre 110. A modo de ejemplo, el adaptador de transición de torre 110 puede construirse con bridas en L superior e inferior en las superficies de contacto 130, 134 que se acoplan a cada una de las secciones 12b y 12c (o entre las secciones 12a y 12b) mientras que un adaptador que sea para acoplarse directamente a la segunda unidad de generación de energía 42 es más difícil de diseñar y más costoso de construir.
- En esta realización y similar a lo anterior, debe reconocerse que la nueva altura de la torre modificada 82 de la turbina eólica modernizada 40 puede ser mayor que o menor que la altura original de la torre 12 dependiendo del desplazamiento deseado en la frecuencia natural en relación con las frecuencias de funcionamiento nominales anticipadas de la turbina eólica 40. También puede comprobarse la altura de la punta de las palas 26 para confirmar que la altura de la turbina eólica modernizada 40 está dentro de las normas aplicables.
- Otra realización de la invención se muestra en las figuras 6D y 7. Además de o como alternativa al adaptador de transición de torre 86, 110, puede insertarse un adaptador entre la torre 12 y la cimentación 16. Tal como se muestra en la figura 6D, la altura aumentada H3 en relación con H1 puede deberse totalmente o en parte a un adaptador de cimentación 156. Además de modificar la frecuencia natural de la torre 12, por ejemplo, mostrada en la figura 3C, el adaptador de cimentación 156 puede resolver otros problemas de la industria.
- A modo de ejemplo y con referencia a la figura 7, un problema de la industria es que hay un exceso de cimentaciones de turbina eólica sin usar 150. Las cimentaciones 150 se construyen de hormigón reforzado con acero 152. Incrustados en el hormigón 152 hay una pluralidad de anclajes 154. Estos se posicionan en el hormigón antes de que fragüe el hormigón y, por tanto, no pueden retirarse sin destruir la cimentación 150. Aunque no se muestra, los anclajes 154 pueden estar dispuestos en un anillo de un tamaño predeterminado y adaptarse para recibir un diseño de torre específico. Generalmente, el tamaño y las dimensiones de una disposición en planta de los anclajes 154 son específicos del fabricante y pueden estar personalizados al sitio. Esto presenta el problema específico de que un fabricante de turbinas puede generalmente no utilizar la cimentación de otro fabricante de turbinas debido a las variaciones de diseño entre torres eólicas. Por tanto, una vez se instala la cimentación 150, si no se usa para fijar una turbina eólica específica para esa cimentación, no puede utilizarse la cimentación.
- En una realización de la invención, un adaptador de cimentación 156 está acoplado entre la sección de torre 12a y la cimentación 150 donde el tamaño y la disposición de los pernos entre la sección de torre 12a y los anclajes 154 no actúan conjuntamente. A ese respecto, el adaptador de cimentación 156 incluye una carcasa 160 que define una pared lateral 162. La pared lateral 162 puede tener forma de un cilindro circular que coincida con las dimensiones de la sección 12a. En un extremo 164 de la pared lateral 162, una brida en L 166 que se extiende hacia dentro con una pluralidad de orificios pasantes 170 que están separados para recibir cada uno un anclaje 154. Tal como se muestra, una tuerca se enrosca en el anclaje 154 y fija el adaptador 156 a la cimentación 150. Opuesto al extremo 164, en un extremo 172, una brida en T 178 define una pluralidad de orificios pasantes interiores 174 y una pluralidad de orificios pasantes exteriores 176. Los orificios 174 y 176 se alinean con orificios 180 correspondientes en la sección de torre 12a. Los orificios alineados 174 y 180 y 176 y 180 reciben pernos u otros elementos de sujeción 184 de modo que la sección de torre 12a puede fijarse al adaptador 156. Los orificios 174 en la brida en T 178 no se alinean con los orificios 170 en la brida en L 166. De esta manera, el adaptador de cimentación 156 permite a un fabricante utilizar la cimentación sin usar de otro fabricante y permite ventajosamente que se instale una turbina eólica en una cimentación que de otra manera no podría utilizarse. El adaptador 156 también eleva la altura de la segunda unidad de generación de energía 42 y modifica la frecuencia natural de la torre modificada 82 según las realizaciones mostradas en las figuras 5A-5C y 6A-6D. Aunque la figura 7 ilustra un adaptador que tiene una brida en L inferior y una brida en T superior, las realizaciones de la invención no se limitan a la configuración mostrada. A modo de ejemplo, un adaptador de cimentación puede incluir una brida en L inferior y una brida en L superior, una brida en T inferior y una brida en L superior, o una brida en T inferior y una brida en T superior. Además, aunque se describe un adaptador cilíndrico, el adaptador de cimentación 156 no se limita a un cilindro (por ejemplo, circular). A ese respecto, el adaptador de cimentación 156 puede tener una configuración de cono inverso que hace la transición entre diferentes diferencias dimensionales totales entre la cimentación 150 y la sección de torre 12a.

5 Aunque la presente invención se ha ilustrado mediante una descripción de diversas realizaciones preferidas y aunque estas realizaciones se han descrito con cierto detalle, no es la intención del solicitante restringir ni limitar de ninguna manera el alcance de las reivindicaciones adjuntas a tal detalle. Ventajas y modificaciones adicionales se presentarán a los expertos en la técnica. Por tanto, las diversas características de la invención pueden usarse solas o en cualquier combinación dependiendo de las necesidades y preferencias del usuario. La invención se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de modernización de una turbina eólica, teniendo la turbina eólica una torre (12) y una primera unidad de generación de energía (14), en el que la primera unidad de generación de energía (14) se reemplaza con una segunda unidad de generación de energía (42), comprendiendo el método:

5 analizar una primera frecuencia natural (64) de la torre en relación con las primeras frecuencias de funcionamiento nominales (68) de la torre que tiene la segunda unidad de generación de energía (42);

cuando la primera frecuencia natural (64) está dentro de las primeras frecuencias de funcionamiento nominales (68), modificar una o ambas de la torre (12) y la segunda unidad de generación de energía (42) de modo que la una o ambas de la torre (12) y la segunda unidad de generación de energía (42)
10 modificadas tengan una segunda frecuencia natural (76) y segundas frecuencias de funcionamiento nominales que no se superpongan; y

reemplazar la primera unidad de generación de energía (14) con la segunda unidad de generación de energía (42).
2. El método según la reivindicación 1, en el que modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye disminuir una altura de la torre desde una primera altura de torre (H1) hasta una segunda altura de torre (H2), siendo la diferencia de altura entre la primera altura de torre y la segunda altura de torre suficiente para reducir la primera frecuencia natural a la segunda frecuencia natural y que la segunda frecuencia natural no esté dentro de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales.
3. El método según la reivindicación 1, en el que modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye aumentar una altura de la torre desde una primera altura de torre (H1) hasta una segunda altura de torre (H2), siendo la diferencia de altura entre la primera altura de torre y la segunda altura de torre suficiente para cambiar la primera frecuencia natural a la segunda frecuencia natural y que la segunda frecuencia natural no esté dentro de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales.
4. El método según la reivindicación 3, en el que modificar la torre incluye añadir un adaptador (86; 110; 156) a la torre (12) para aumentar la primera altura de torre hasta la segunda altura de torre.
5. El método según la reivindicación 4, en el que la torre (12) tiene al menos una primera sección (12c) y una segunda sección (12b) y el adaptador es cilíndrico y añadir el adaptador (86; 110; 156) incluye posicionar el adaptador entre la primera sección y la segunda sección.
6. El método según la reivindicación 4, en el que el adaptador (86; 110; 156) es cónico y añadir el adaptador incluye posicionar el adaptador encima de la torre (12) y reemplazar la primera unidad de generación de energía (14) con la segunda unidad de generación de energía (42) incluye acoplar la segunda unidad de generación de energía (42) al adaptador (86; 110; 156).
7. El método según la reivindicación 4, en el que la torre está acoplada a una cimentación (150) y el adaptador (86; 110; 156) es cilíndrico, y en el que añadir el adaptador (86; 110; 156) incluye posicionar el adaptador en la cimentación (150).
8. El método según la reivindicación 3, en el que la torre (12) tiene al menos una primera sección (12c) y una segunda sección (12b) y añadir el adaptador (86; 110; 156) incluye:

retirar la primera unidad de generación de energía (14) y la primera sección (12c);

acoplar el adaptador (86; 110; 156) a una de la primera sección y la segunda sección; y
40 acoplar la otra de la primera sección y la segunda sección al adaptador (86; 110; 156),

estando el adaptador entre la primera sección y la segunda sección.
9. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye limitar un parámetro de funcionamiento de la segunda unidad de generación de energía para cambiar un límite de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales para que esté por debajo o por encima de la segunda frecuencia natural.
10. El método según cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en el que modificar una o ambas de la torre y la segunda unidad de generación de energía incluye limitar un parámetro de funcionamiento de la segunda unidad de generación de energía para reducir un límite superior de las segundas frecuencias de funcionamiento nominales a una frecuencia por debajo de la segunda frecuencia natural.
11. El método según cualquiera de las reivindicaciones 1-8, que comprende además:

proporcionar un controlador (52) y uno o más sensores (54) acoplados operativamente a la turbina eólica;

recibir información del uno o más sensores en el controlador para indicar las segundas frecuencias de funcionamiento nominales que actúan en la torre; y

5 alterar el funcionamiento de la segunda unidad de generación de energía usando el controlador para cambiar un límite en las segundas frecuencias de funcionamiento nominales de modo que la segunda frecuencia natural está por debajo o por encima del límite y que no está dentro del intervalo de segundas frecuencias de funcionamiento modificado.

12. El método según la reivindicación 11, en el que alterar el funcionamiento de la turbina eólica para cambiar el límite en las segundas frecuencias de funcionamiento nominales en la torre comprende ajustar el paso
10 (56) de una o más palas en la segunda unidad de generación de energía.

13. El método según la reivindicación 11 ó 12, en el que alterar el funcionamiento de la turbina eólica para cambiar el límite en las segundas frecuencias de funcionamiento nominales en la torre comprende limitar
 (58) la velocidad del rotor en la segunda unidad de generación de energía.

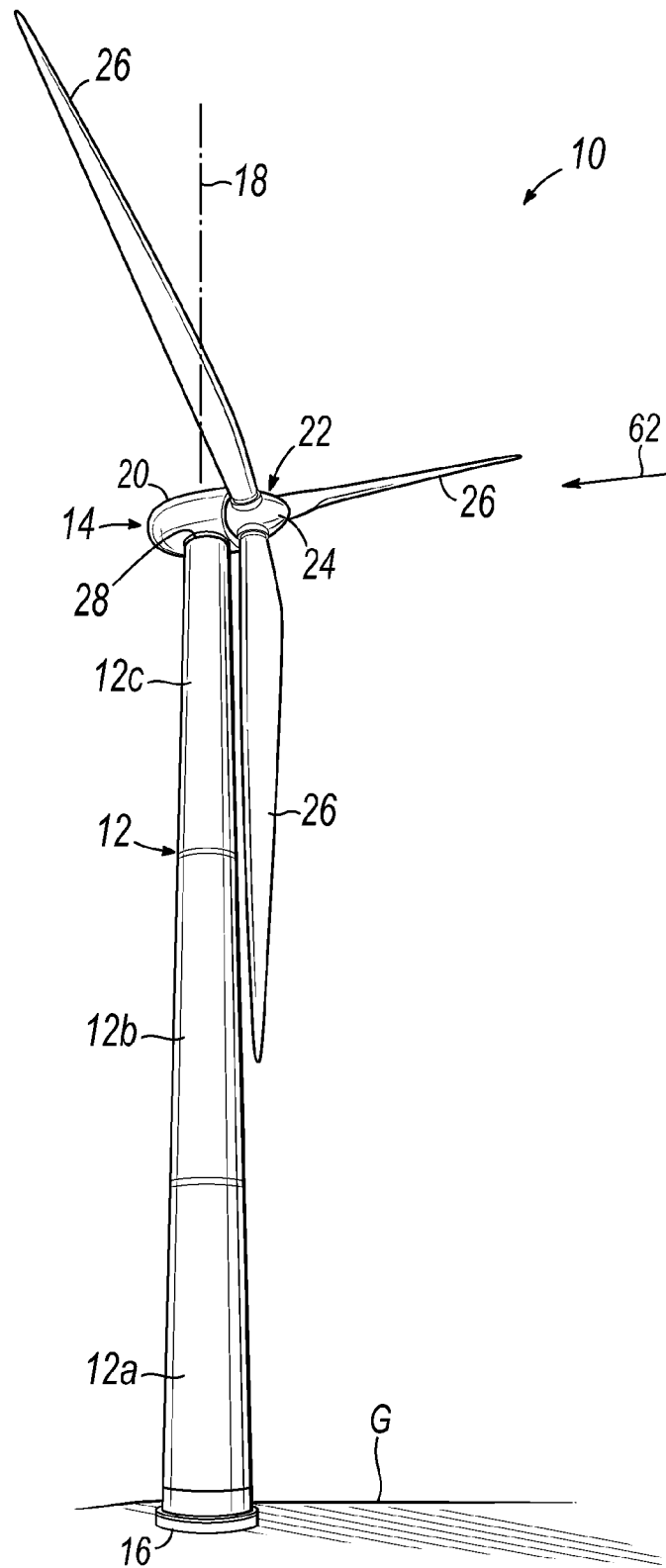


FIG. 1A

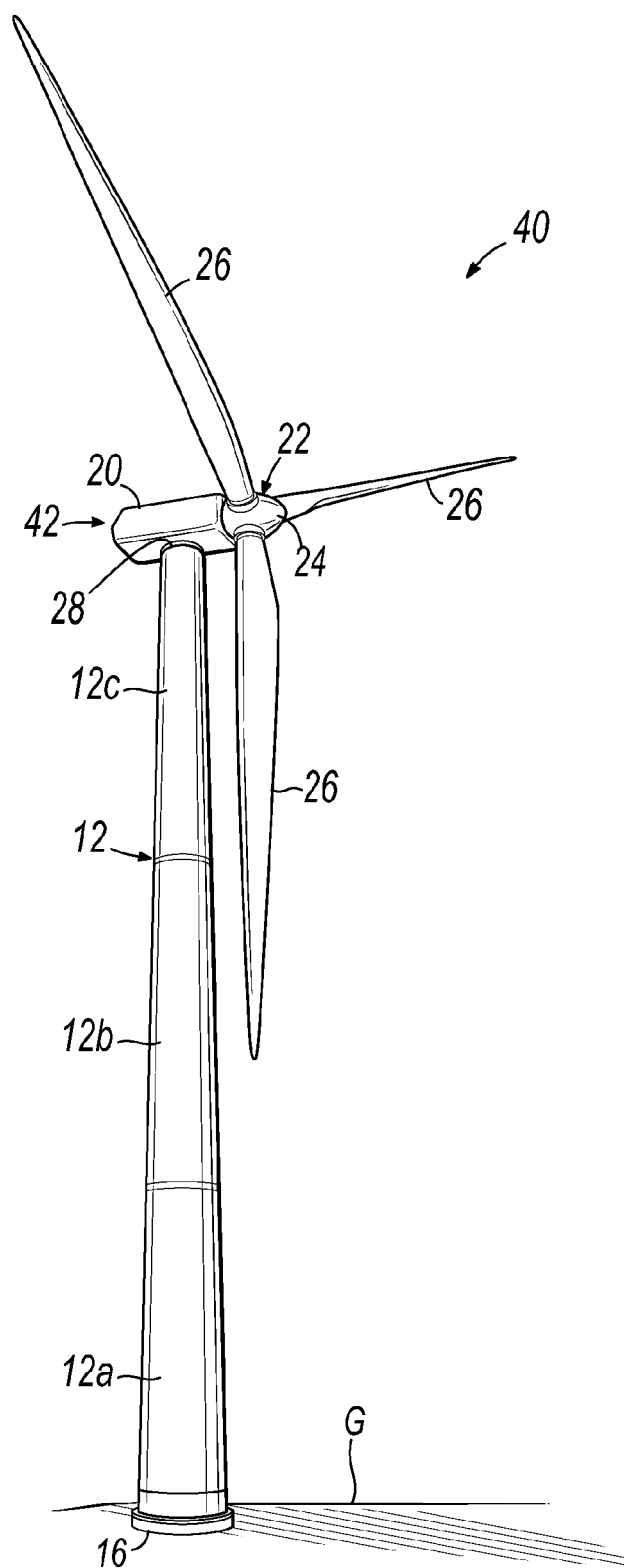


FIG. 1B

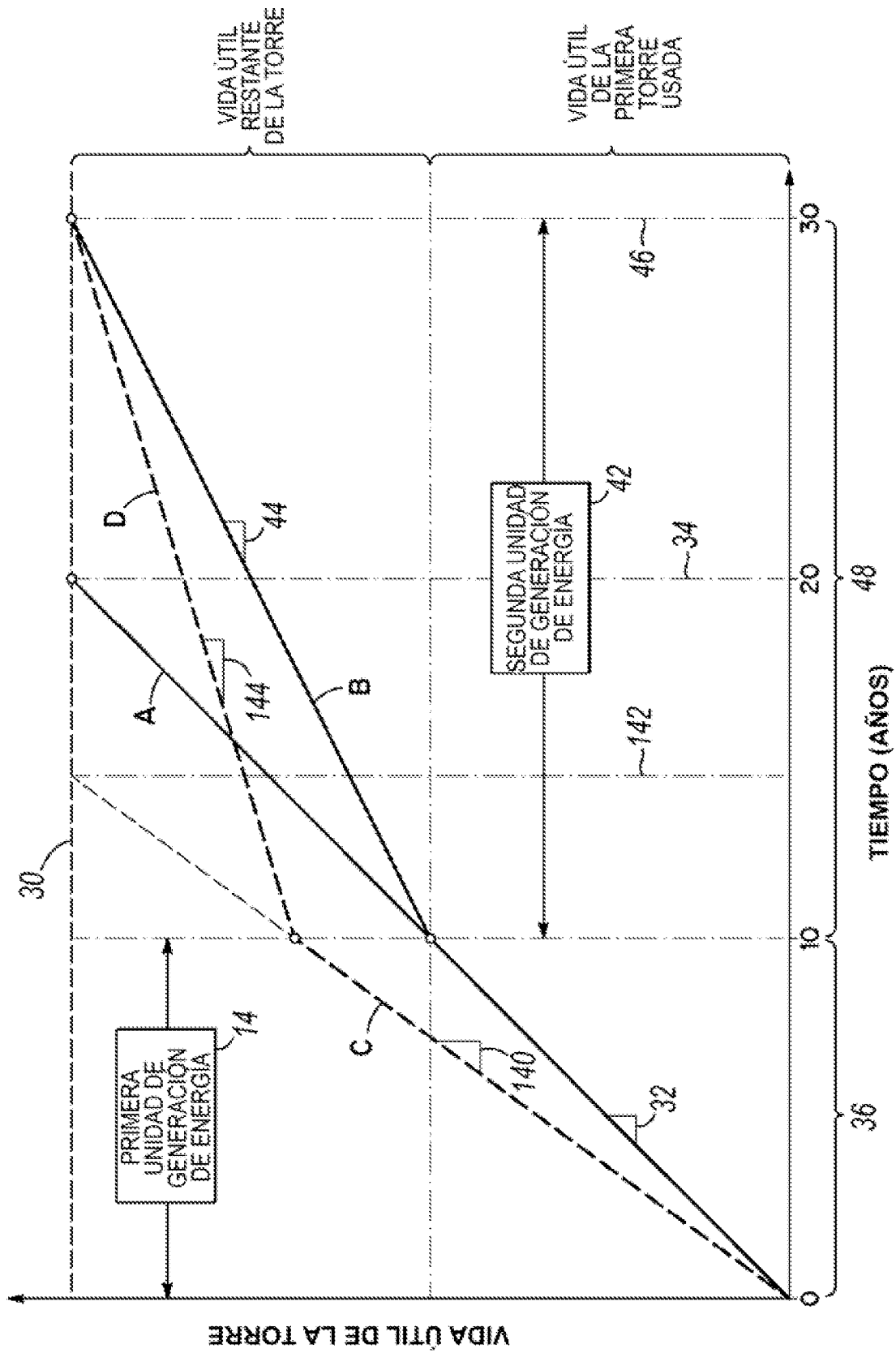


FIG. 2

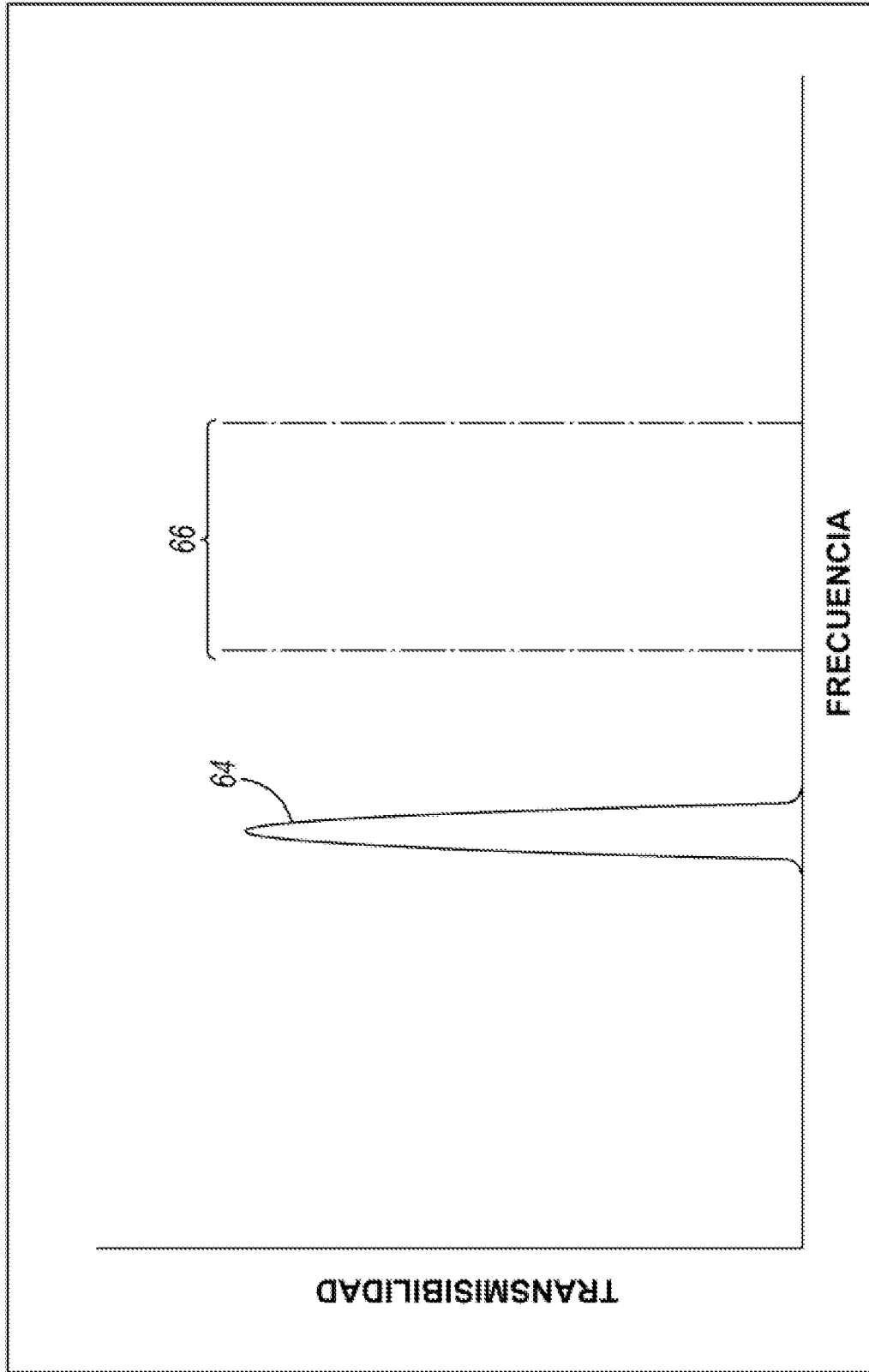


FIG. 3A

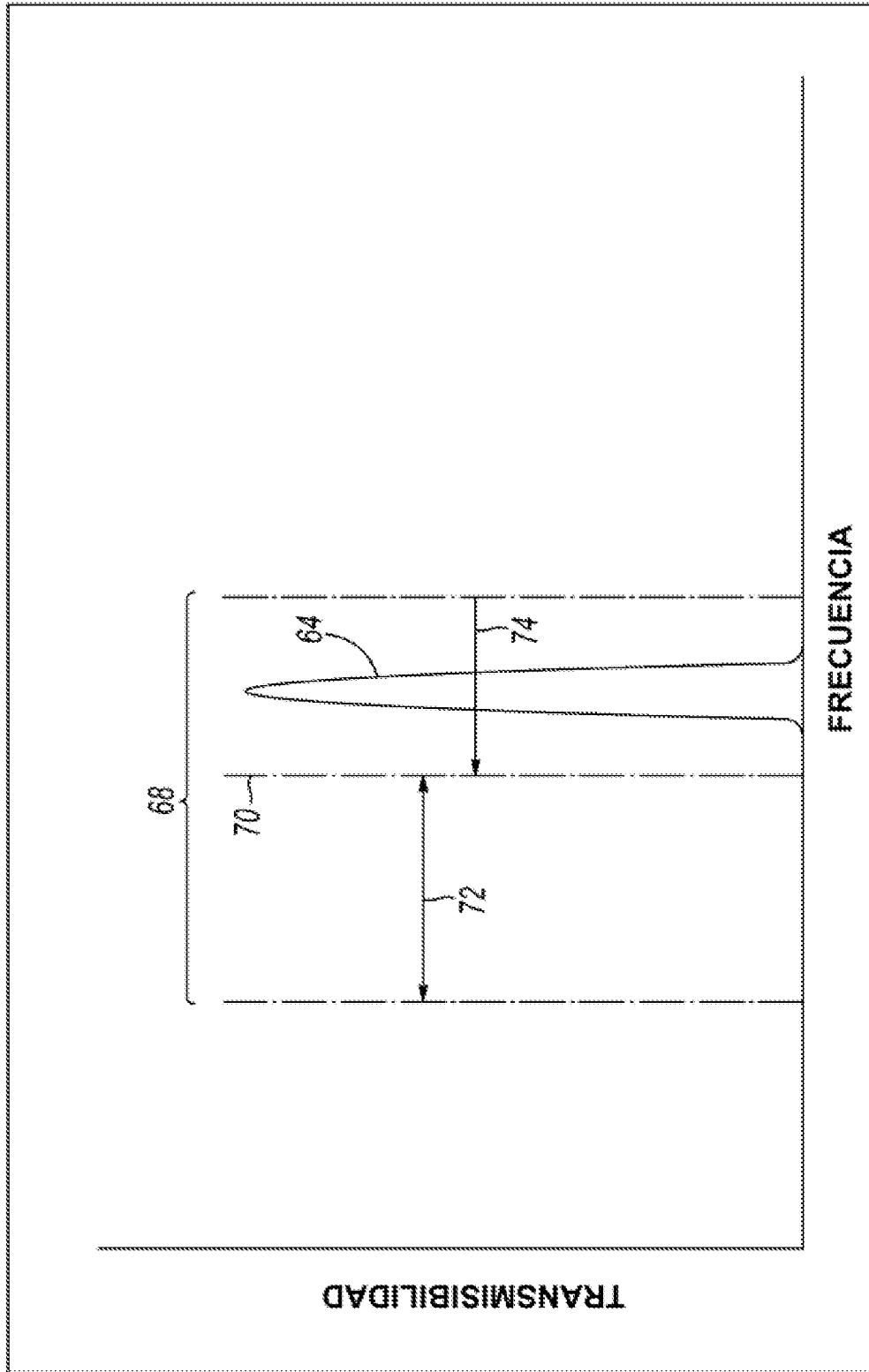


FIG. 3B

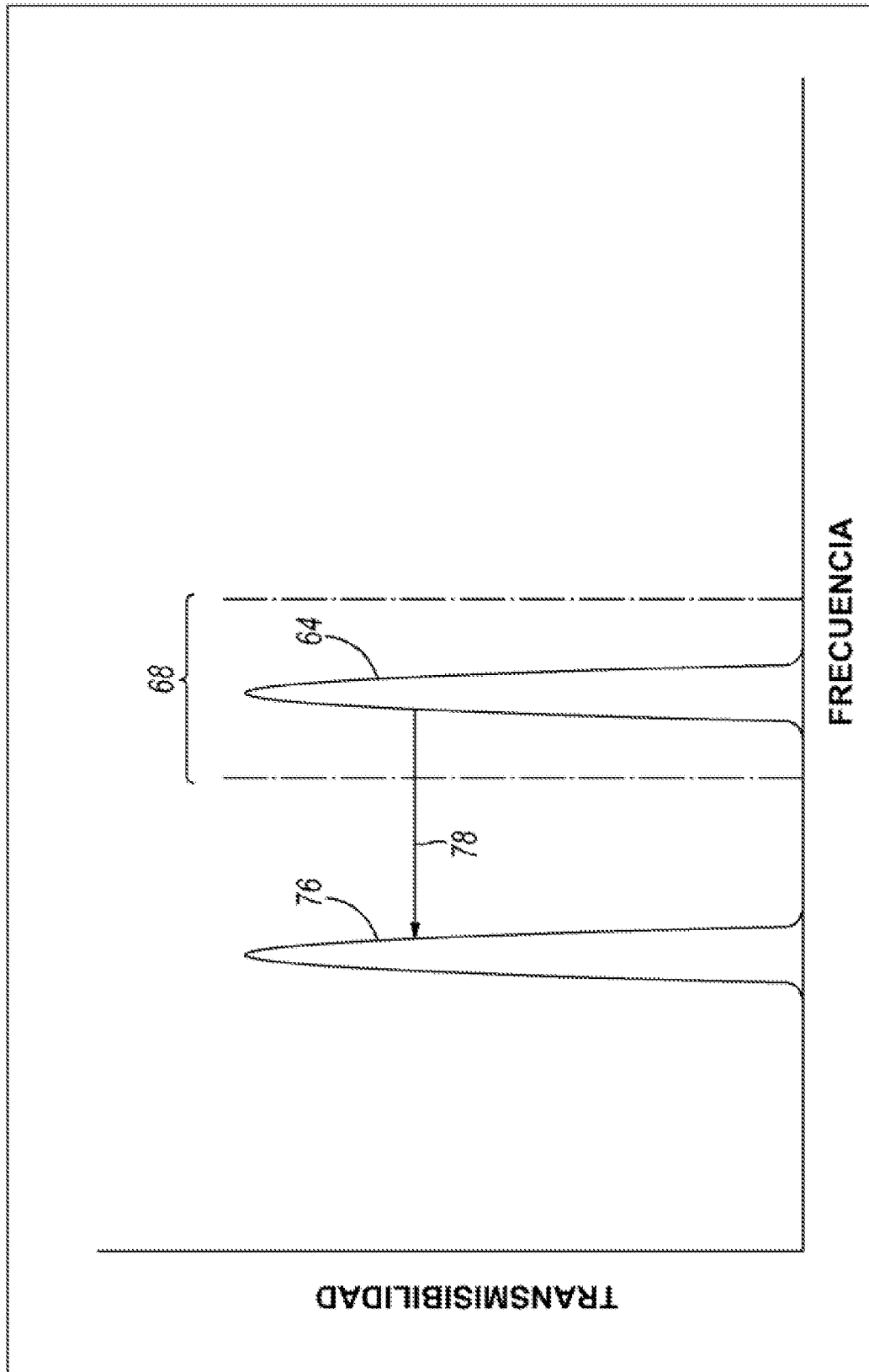


FIG. 3C

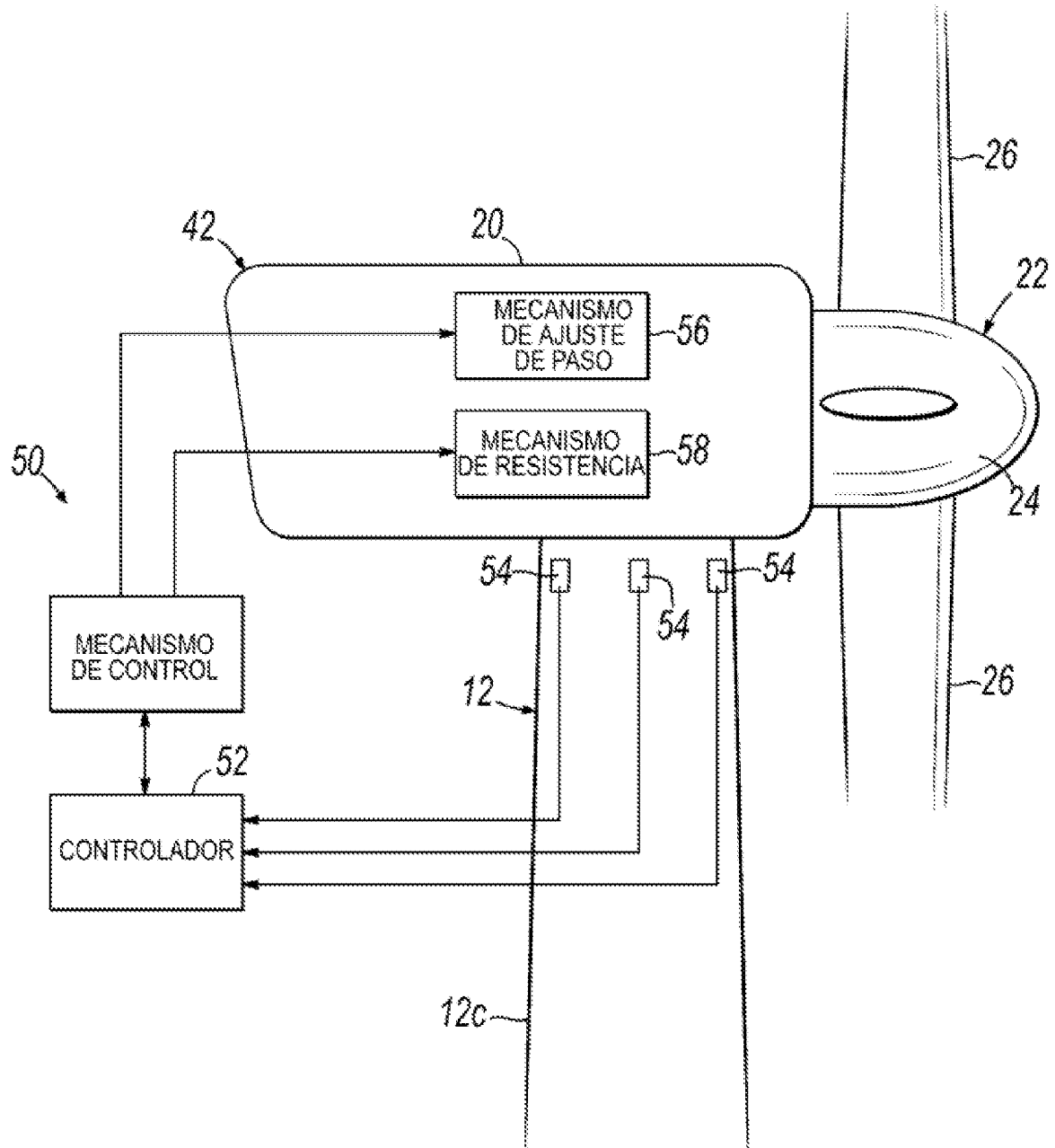


FIG. 4

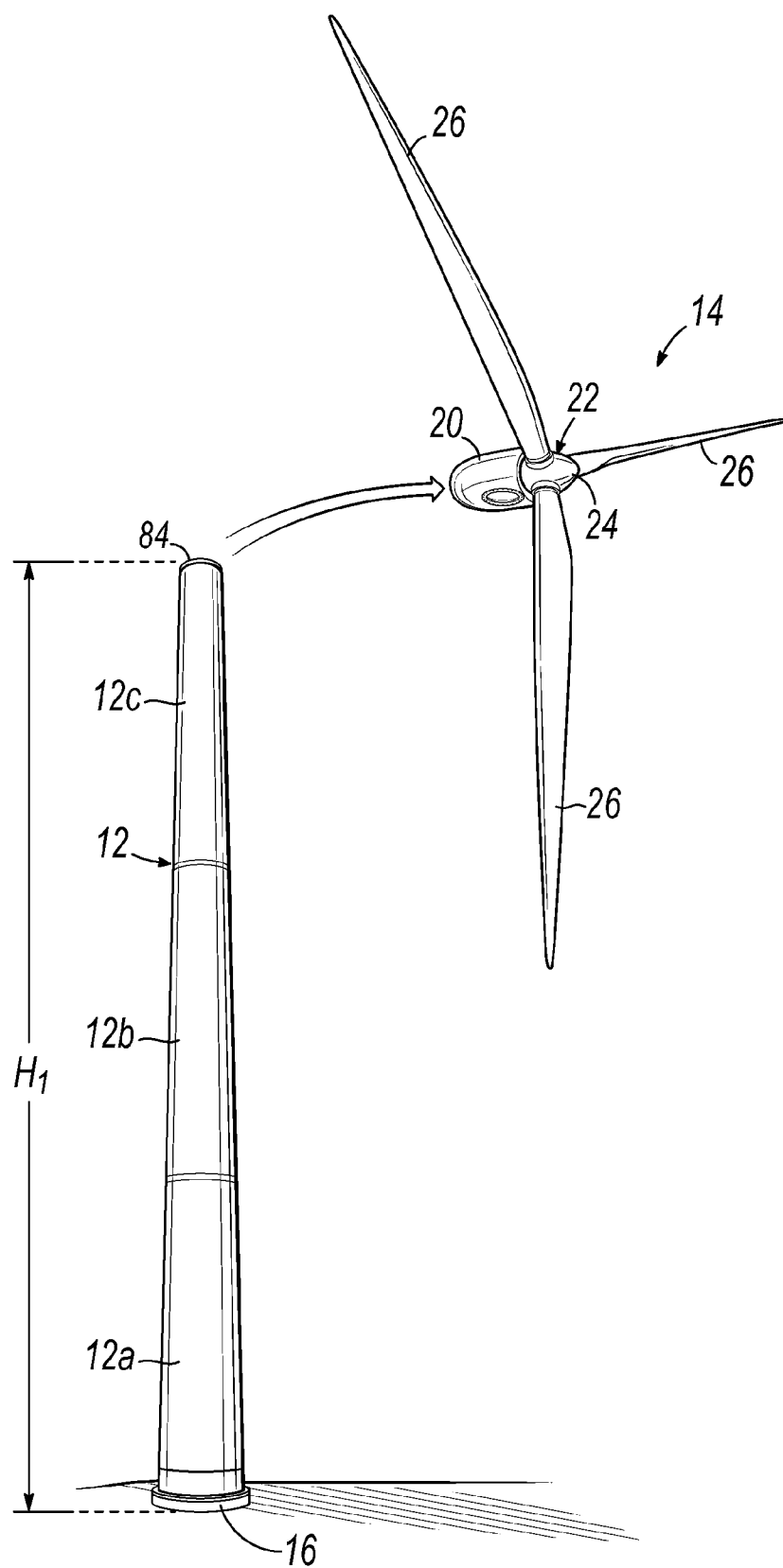


FIG. 5A

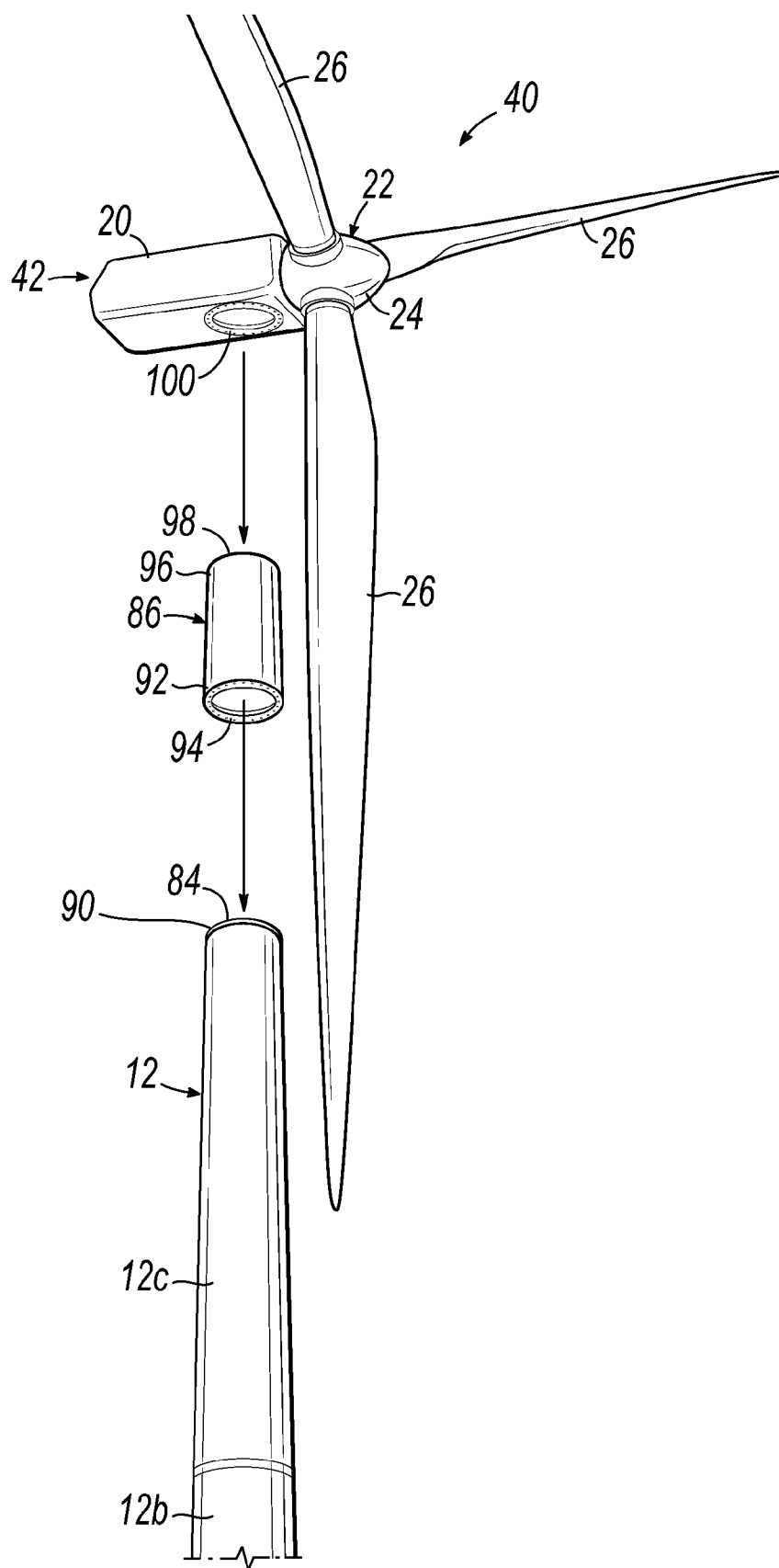


FIG. 5B

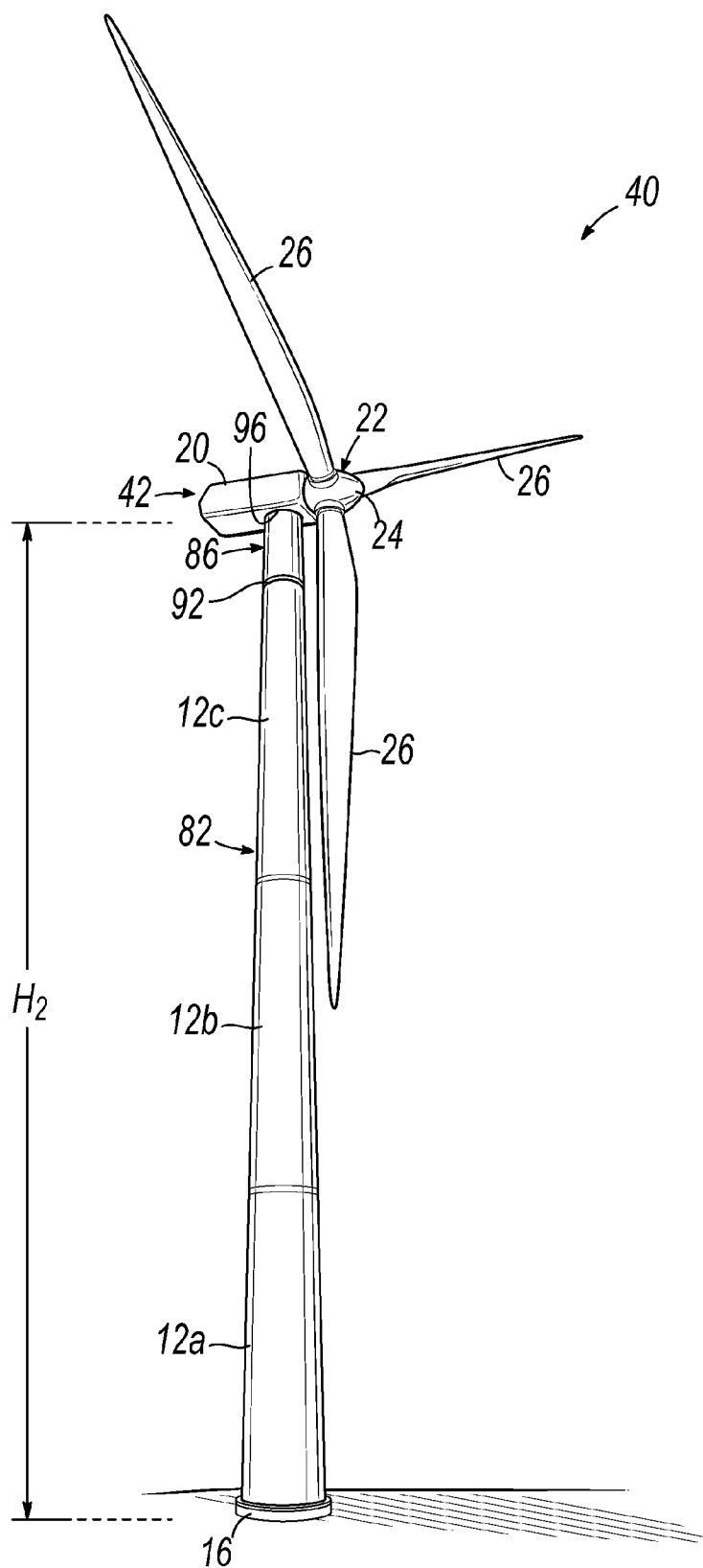


FIG. 5C

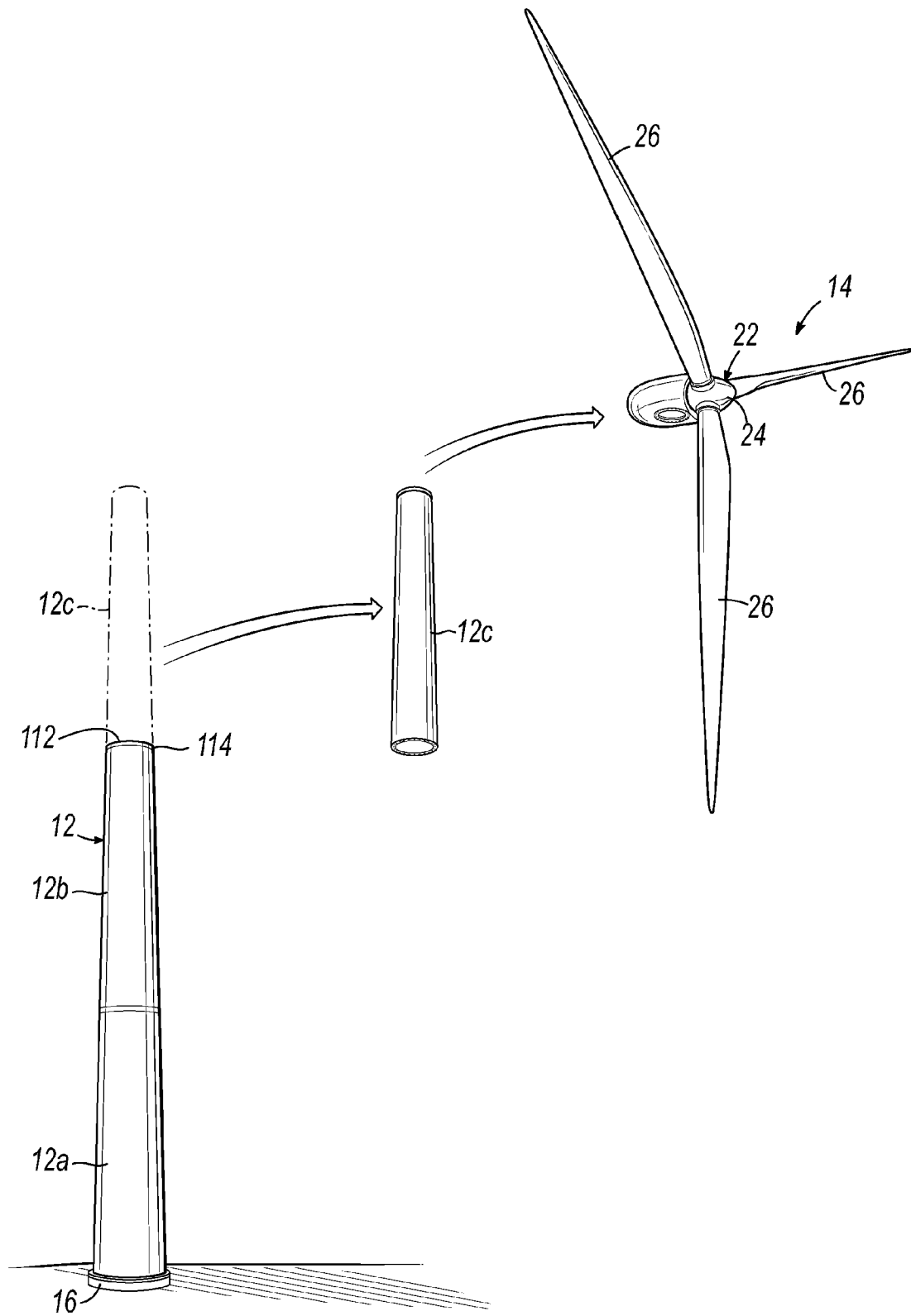


FIG. 6A

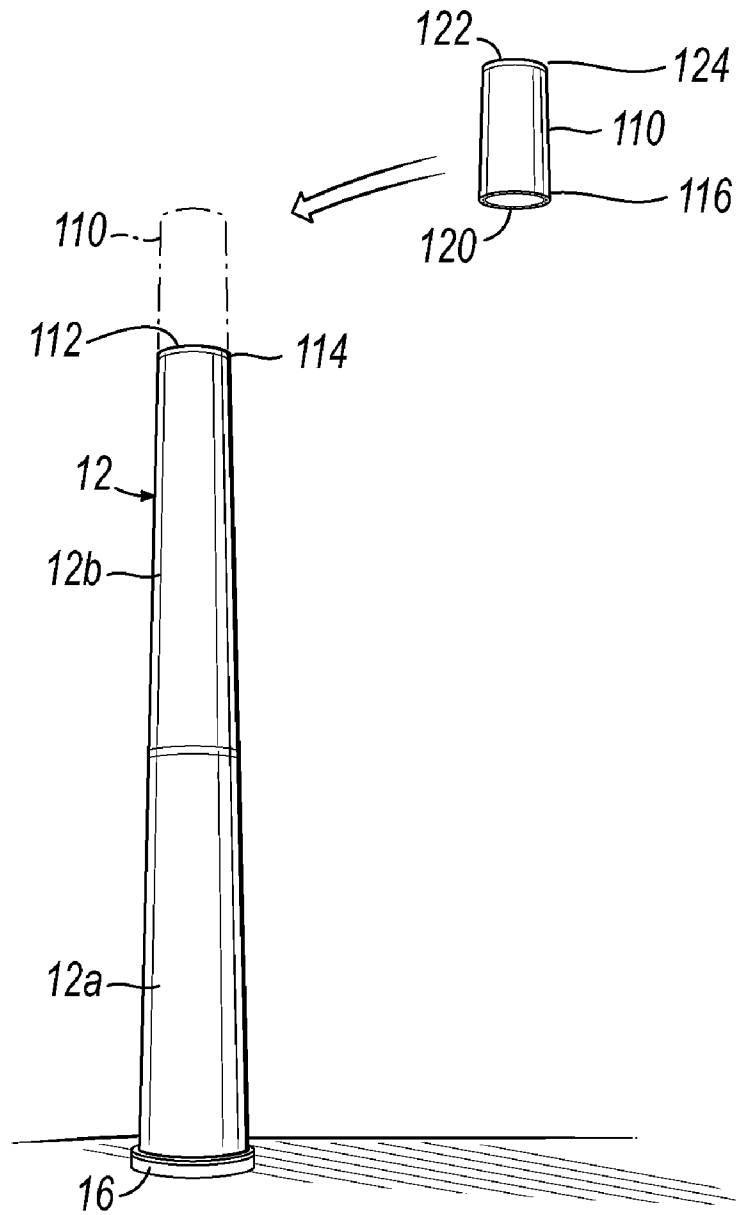


FIG. 6B

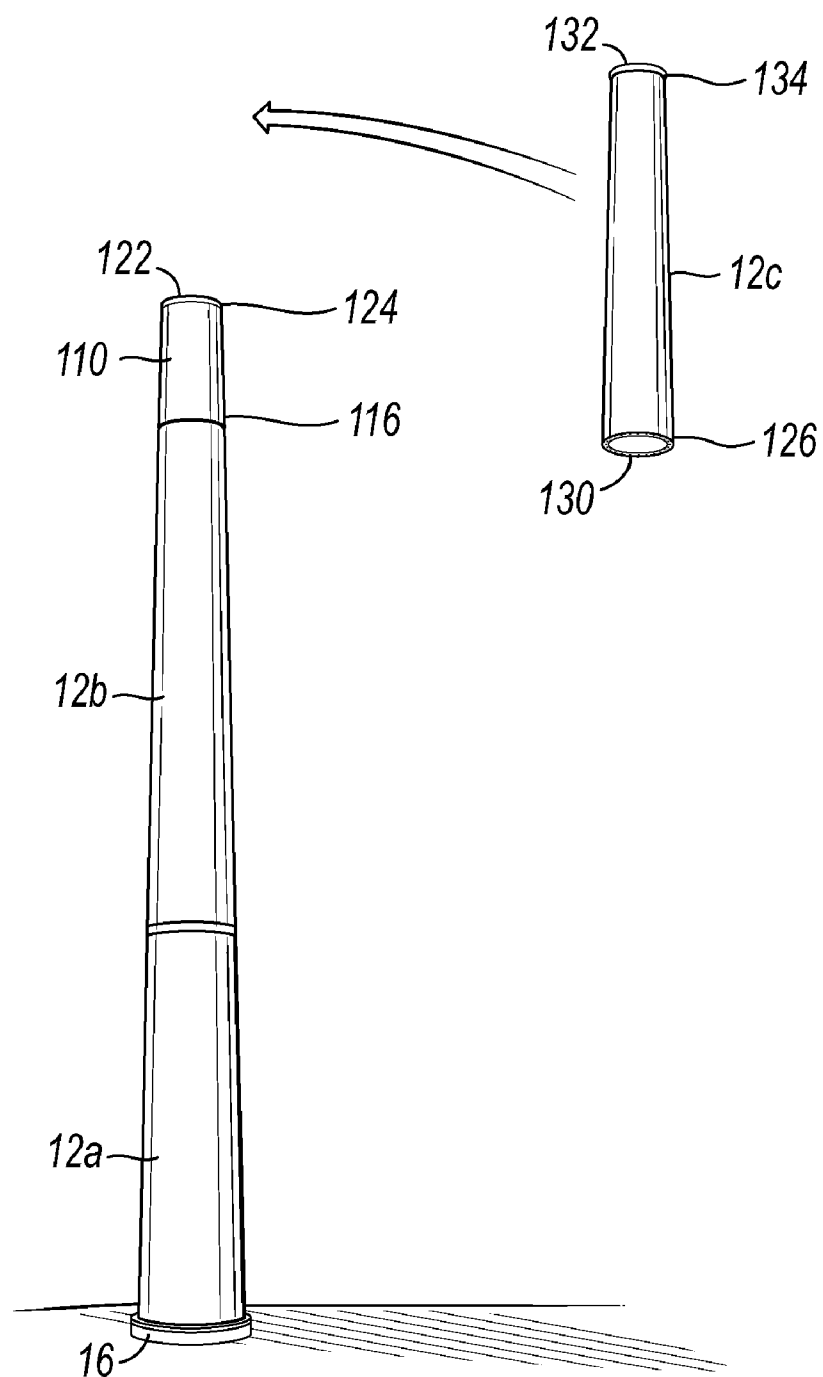
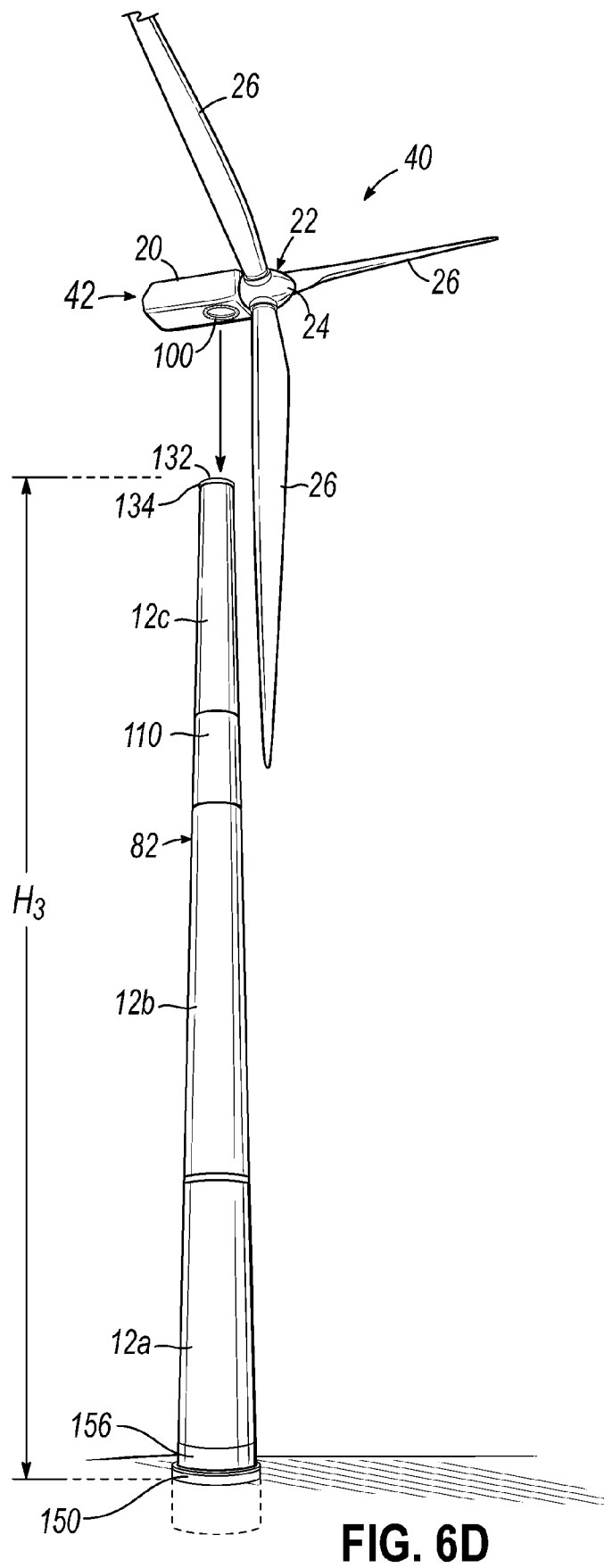


FIG. 6C



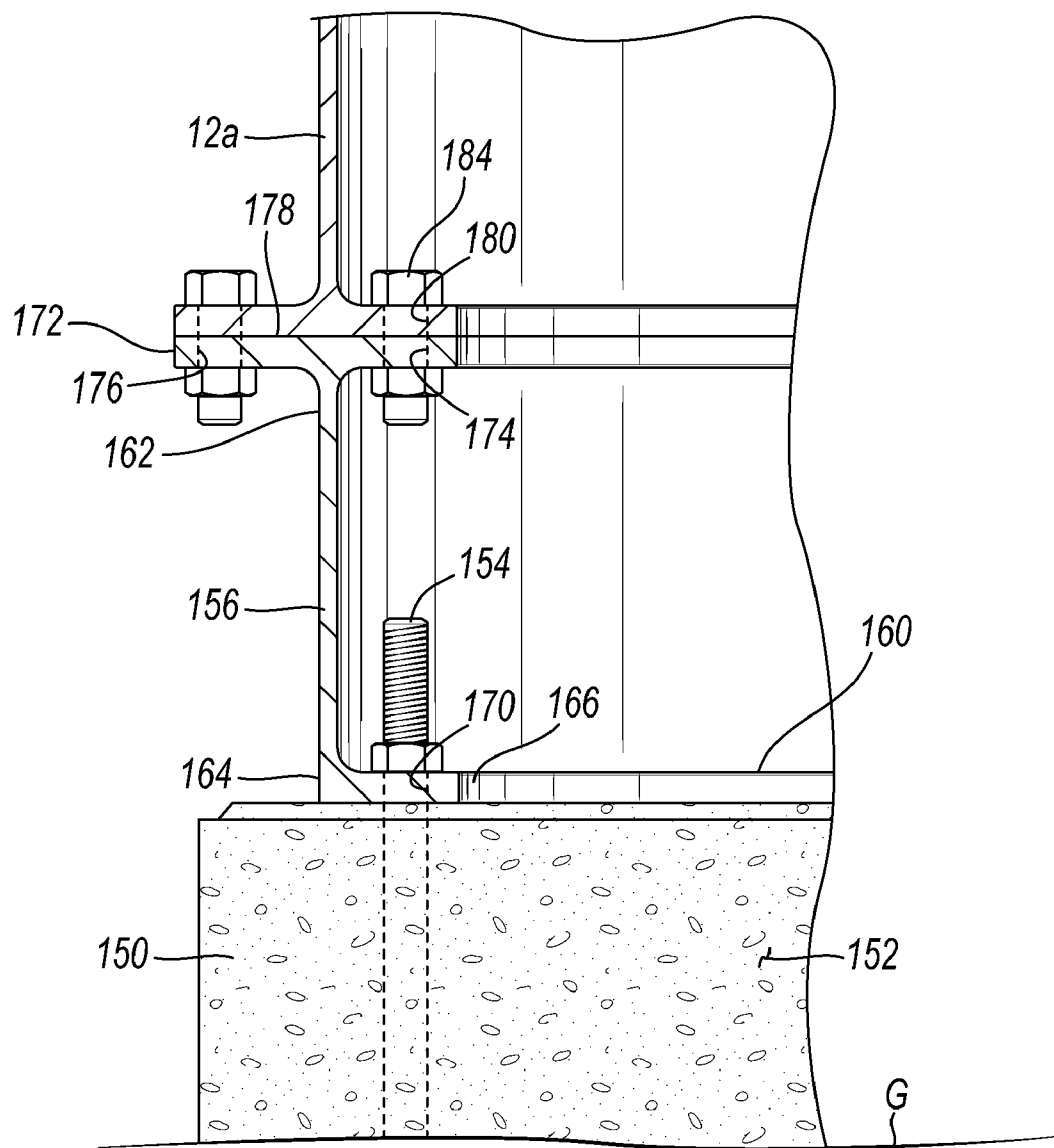


FIG. 7