

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 677**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 1/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.12.2015 PCT/DK2015/050399**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.06.2016 WO16095926**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2015 E 15812877 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.02.2020 EP 3234350**

54 Título: **Mejoras relacionadas con turbinas eólicas**

30 Prioridad:

**17.12.2014 DK 201470792**

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

**14.07.2020**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**OLESEN, IB SVEND**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 773 677 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

Mejoras relacionadas con turbinas eólicas

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere generalmente a turbinas eólicas y más específicamente a un método y sistema para determinar el grado de torsión de una pala de turbina eólica durante el uso de la turbina eólica.

10 **Antecedentes**

Las turbinas eólicas a escala de servicios públicos modernas tienen rotores que comprenden palas muy delgadas y largas. La figura 1 muestra una pala de turbina eólica común 10, que se reduce en sección longitudinalmente desde un extremo de raíz relativamente ancho 12 hacia un extremo de punta relativamente estrecho 14. Un eje longitudinal  $L$  de la pala 10 también se muestra en la figura 1. El extremo de raíz 12 de la pala es circular en sección transversal. Fuera de la raíz, la pala tiene un perfil aerodinámico 16 en sección transversal.

La raíz de la pala se conecta comúnmente a un buje del rotor mediante un mecanismo de paso, que gira la pala sobre el eje de paso longitudinal  $L$  con el fin de variar el paso de la pala. La variación del paso de una pala varía su ángulo de ataque con respecto al viento. Esto se utiliza para controlar la captura de energía de la pala, y por lo tanto para controlar la velocidad del rotor para que permanezca dentro de límites de funcionamiento cuando cambia la velocidad del viento. En vientos de leves a moderados, es particularmente importante controlar el paso de las palas con el fin de maximizar la captura de energía de las palas y maximizar la productividad de la turbina eólica.

La captura de energía de una pala de turbina eólica aumenta generalmente moviéndose de la raíz hacia la punta. Por lo tanto, la parte de raíz o de interior 12 de la pala 10 tiende a capturar la menor energía, mientras que la parte de punta o de exterior 14 de la pala tiende a capturar la mayor energía. Por lo tanto, es deseable el control preciso sobre el ángulo de paso de la parte de exterior de la pala con el fin de maximizar la salida de la turbina eólica.

Las palas de turbina eólica modernas comúnmente son de 50-80 metros de largo, y hay un impulso constante de desarrollar palas más grandes para capturar más energía del viento. Estas palas generalmente se hacen de materiales compuestos tales como plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Las palas son, por lo tanto, relativamente flexibles e inevitablemente se doblan y se giran en una extensión durante el funcionamiento. La parte de exterior relativamente estrecha de la pala es particularmente susceptible a la torsión y al doblado.

Mientras que el mecanismo de paso permite un control preciso sobre el ángulo de la raíz de la pala, esto no refleja necesariamente el ángulo de la punta de la pala, que es más susceptible al doblado y la torsión, como se mencionó anteriormente. La presente invención proporciona un método y aparato para medir un ángulo de torsión de la punta de pala con exactitud para que esta información pueda emplearse en estrategias de control. Por ejemplo, pueden emplearse mediciones exactas del ángulo de torsión en estrategias de control de paso permitiendo un control preciso sobre el ángulo de ataque de la parte de exterior de la pala para que pueda maximizarse la captura de energía de la pala. Las mediciones también pueden emplearse en cálculos de carga de pala y estrategias de control para proteger las palas de cargas extremas.

El ángulo de torsión de pala se define en el presente documento como el ángulo entre la línea de cuerda de la pala en la punta y un eje de referencia en un plano sustancialmente perpendicular al eje longitudinal  $L$  de la pala, tal como se describirá a continuación a modo de ejemplo con referencia a las figuras 2a y 2b. La línea de cuerda es la línea recta  $D$  que conecta el borde de ataque 18 de la pala 10 al borde de salida 20.

Las figuras 2a y 2b ilustran una sección transversal de la punta de la pala de turbina eólica 10 en un plano sustancialmente perpendicular al eje longitudinal  $L$  y tomada a lo largo de la línea  $A - A$  en la figura 1. En la figura 2a la pala 10 tiene un primer ángulo de torsión, mientras que en la figura 2b la pala 10 tiene un segundo ángulo de torsión. El ángulo de torsión está marcado con  $\theta$  en las figuras 2a y 2b. El eje longitudinal  $L$  es sustancialmente perpendicular al plano de la página en las figuras 2a y 2b.

El plano  $L - y$  define el plano de rotación del rotor, y el eje  $x$  es perpendicular a este plano. El sentido de rotación del rotor alrededor de un eje de rotor se indica por  $R$  en las figuras 2a y 2b, que traza un círculo en el plano  $L - y$  y cuando se gira el rotor a través de un ángulo de  $2\pi$  radianes. La dirección del viento se indica como  $W$  en las figuras 2a y 2b. En las figuras 2a y 2b la dirección del viento se ilustra como que es perpendicular al plano  $L - y$ , aunque en la práctica varía la dirección del viento relativa al plano  $L - y$ , y puede ser incidente en diferentes ángulos.

En la figura 2a, el ángulo de torsión de punta de pala  $\theta$  se define como 0 radianes, es decir, cuando la línea de cuerda  $D$  es paralela al eje  $x$  y, por lo tanto, perpendicular al plano  $L - y$ . La figura 2b ilustra la punta de pala girada a través de un ángulo  $\theta$  con respecto al eje  $x$  de manera que  $\theta > 0$ .

En la posterior discusión de la invención, se aplicará la definición anterior del ángulo de torsión de pala. En otras

palabras, el ángulo de torsión de pala  $\theta$  se define con respecto a un eje (el eje x de las figuras 2a y 2b) formado perpendicular al plano de rotación (el plano L - y de las figuras 2a y 2b) de la pala. Sin embargo, se apreciará que el ángulo de torsión puede definirse relativo a otra referencia arbitraria, y por tanto, esta definición no debería aceptarse como que limite excesivamente el alcance de la presente invención.

5 Las turbinas eólicas modernas son estructuras muy altas, y las palas son particularmente susceptibles a rayos. Por lo tanto, la mayoría de las palas de turbina eólica incorporan sistemas de protección contra rayos para conducir la energía eléctrica de los rayos de manera segura al suelo. La presente invención pretende evitar la utilización de partes metálicas o componentes eléctricos sobre las palas de turbina eólica, ya que estas pueden atraer rayos en preferencia a los receptores de rayos sobre la pala, que pueden causar daño a la pala. Los sistemas actuales para medir el grado de torsión de punta de pala son muy caros y frágiles. En cambio, el presente sistema y método son tanto simples como económicos de implementar, y son resistentes al daño causado por condiciones meteorológicas extremas a las que normalmente se someten las turbinas eólicas.

15 Un documento de la técnica anterior relacionado con la determinación del ángulo de torsión de una pala de turbina eólica es el documento WO2014/187463 A1.

### Sumario de la invención

20 Según un aspecto de la presente invención se proporciona un método para determinar un ángulo de torsión de una pala de turbina eólica, el método que comprende proporcionar transmisores primero y segundo sobre la pala de turbina eólica, estando separado el primer transmisor de un receptor una primera distancia, y estando separado el segundo transmisor del receptor una segunda distancia, estando dispuestos los transmisores de manera que la torsión de la pala provoca un aumento en una de las distancias primera o segunda y una disminución en la otra de las distancias primera o segunda. El método también comprende transmitir una señal de parpadeo desde cada uno de los transmisores primero y segundo hacia el receptor, teniendo las señales de parpadeo una frecuencia de parpadeo y variar la frecuencia de parpadeo de las señales de parpadeo. Adicionalmente, el método comprende monitorizar la amplitud de la señal de parpadeo recibida por el receptor cuando se varía la frecuencia de parpadeo, determinar una frecuencia de parpadeo particular que da como resultado una amplitud aumentada de la señal de parpadeo recibida por el receptor, y utilizar la frecuencia de parpadeo particular determinada para calcular el ángulo de torsión de pala.

Este método puede implementarse ventajosamente sin la necesidad de componentes caros y/o frágiles. Específicamente, no hay necesidad de partes eléctricas en la pala de turbina eólica y el hardware utilizado es robusto, fácil de disponer y barato.

Los transmisores primero y segundo pueden separarse mutuamente en una dirección en el sentido de la cuerda de la pala de turbina eólica. Adicional o alternativamente, el primer transmisor puede ubicarse en o cerca de un borde de ataque de la pala de turbina eólica y el segundo transmisor puede ubicarse en o cerca de un borde de salida de la pala de turbina eólica. Los bordes de la pala están sometidos a una mayor cantidad del movimiento relativo causado por torsión y por tanto, la separación de los transmisores primero y segundo en bordes opuestos da una indicación más precisa del grado de torsión de pala.

Los transmisores primero y segundo pueden ubicarse cerca de la punta de la pala de turbina eólica. Los transmisores pueden ubicarse ventajosamente cerca de la punta de pala ya que esta es la parte de la pala que va a someterse al doblado más severo.

En algunas realizaciones, el método comprende calcular la diferencia entre la primera distancia y la segunda distancia utilizando la frecuencia de parpadeo particular determinada y calcular el ángulo de torsión de pala utilizando la diferencia calculada entre la primera distancia y la segunda distancia. Las señales de parpadeo de los transmisores primero y segundo pueden transmitirse de manera sustancialmente simultánea. Esto permite que se calcule más fácilmente la diferencia entre las distancias primera y segunda.

Las amplitudes de las señales de parpadeo de los transmisores primero y segundo pueden ser sustancialmente idénticas. Transmitir las señales de parpadeo en la frecuencia particular puede dar como resultado la amplitud de la señal recibida en el receptor, que es aproximadamente dos veces la amplitud de las señales de parpadeo transmitidas. Esto hace más simple determinar el valor de la frecuencia particular.

El receptor puede proporcionarse sobre una segunda pala de la turbina eólica. Esto da un punto de referencia constante para los transmisores primero y segundo. El receptor puede ubicarse adicionalmente cerca de la punta de la segunda pala de turbina eólica.

En algunas realizaciones se proporciona una pluralidad de primeros transmisores y una pluralidad de segundos transmisores sobre la pala de turbina eólica. En tales realizaciones los primeros transmisores están separados mutuamente a lo largo de la longitud de al menos parte de la pala de turbina eólica y los segundos transmisores están separados mutuamente a lo largo de la longitud de al menos parte de la pala de turbina eólica. Adicional o

alternativamente, el método puede comprender proporcionar una pluralidad de receptores sobre la segunda pala de turbina eólica, los receptores están separados mutuamente a lo largo de la longitud de al menos parte de la segunda pala de turbina eólica. Esto permite que se determine la torsión de diferentes partes de la pala, y también que se aproxime la torsión global de la pala.

5 El método puede comprender comunicar señales de parpadeo de una fuente ubicada de manera remota a los transmisores primero y segundo mediante una primera fibra óptica que se extiende longitudinalmente a lo largo de la pala de turbina eólica, y comunicar las señales de parpadeo recibidas a un detector ubicado de manera remota mediante una segunda fibra óptica que se extiende longitudinalmente a lo largo de la pala de turbina eólica. Esto impide ventajosamente la necesidad de componentes eléctricos sobre la pala y en su lugar proporciona un método que puede implementarse con hardware que es inmune a rayos.

15 Según otro aspecto de la presente invención se proporciona un sistema para determinar un ángulo de torsión de pala de una pala de turbina eólica, comprendiendo el sistema transmisores primero y segundo sobre la pala de turbina eólica configurado cada uno para transmitir una señal de parpadeo que tiene una frecuencia de parpadeo, un receptor configurado para recibir las señales de parpadeo, y un controlador configurado para variar la frecuencia de parpadeo de las señales de parpadeo. El sistema comprende además un procesador configurado para monitorizar una amplitud de la señal de parpadeo recibida por el receptor cuando se varía la frecuencia de parpadeo, para determinar una frecuencia de parpadeo particular que da como resultado una amplitud aumentada de la señal de parpadeo recibida por el receptor, y para calcular el ángulo de torsión de pala utilizando la frecuencia de parpadeo particular determinada. El primer transmisor está separado del receptor una primera distancia y el segundo transmisor está separado del receptor una segunda distancia, y los transmisores se disponen de manera que la torsión de la pala provoca un aumento en una de las distancias primera o segunda y una disminución en la otra de las distancias primera o segunda.

25 El receptor puede ubicarse sobre una segunda pala de turbina eólica.

30 Uno o más de los transmisores y/o receptores pueden clasificarse como seguros. El procesador puede clasificarse como seguro o el sistema puede comprender un procesador clasificado como seguro independiente. El sistema puede comprender también un controlador de seguridad configurado para invalidar otros sistemas de control de la turbina eólica en el caso de que sea probable que el grado calculado de torsión de pala cause problemas de seguridad con el funcionamiento de la turbina eólica. Una invalidación de este tipo puede comprender el controlador de seguridad que controla el paso de pala de manera que se previene el funcionamiento inseguro de la pala.

35 El sistema puede implementar también un grado de autocomprobación para garantizar que está funcionando correctamente. Por ejemplo, cuando el sistema está en funcionamiento, entonces los receptores esperan recibir señales de los transmisores en determinados intervalos. Si las señales no se reciben como se espera, entonces el sistema puede considerar que la pala de turbina eólica no está funcionando de manera segura y el controlador de seguridad puede tomar una acción apropiada.

40 Según aún otro aspecto de la presente invención se proporciona una turbina eólica que comprende cualquiera de los sistemas dados a conocer anteriormente.

45 **Breve descripción de los dibujos**

Las figuras 1, 2a y 2b ya se han descrito mediante los antecedentes con respecto a la presente invención en las que:

50 la figura 1 es una ilustración en perspectiva de una pala de turbina eólica de ejemplo que tiene una sección transversal circular en la raíz, y un perfil en sección transversal aerodinámico fuera de la raíz; y

la figura 2a es una ilustración esquemática de la sección transversal de la punta de la pala de la figura 1 que tiene un ángulo de torsión de pala de 0 radianes, mientras que la figura 2b ilustra un ángulo de torsión de pala de  $\theta > 0$  radianes.

55 Se describirán ahora realizaciones de la invención mediante ejemplos no limitantes solo con referencia a las siguientes figuras, en las que:

60 la figura 3 es una ilustración esquemática de vista frontal en perspectiva de un conjunto de buje-rotor como se utiliza en una turbina eólica de eje horizontal, configurado según una realización de la invención;

la figura 4 es una ilustración esquemática de vista lateral en perspectiva del conjunto de buje-rotor de la figura 3;

65 las figuras 5a, 5b y 5c muestran ilustraciones esquemáticas de dos transmisores ópticos que se ubican sobre una primera pala del conjunto de buje-rotor de las figuras 3 y 4, y que emiten parpadeos de luz en una frecuencia dada  $f$  que posteriormente se reciben por un receptor óptico que se ubica sobre una segunda pala del conjunto de buje-rotor de las figuras 3 y 4; la figura 5a muestra el caso en el cual  $\theta = 0$  y  $f$  es arbitraria; la figura 5b muestra el caso en

el cual  $\theta > 0$  y  $f$  toma un valor de manera que los parpadeos de luz de respectivos transmisores no se reciben por el receptor sustancialmente en el mismo momento; la figura 5c muestra el caso en el cual  $\theta > 0$  y  $f$  toma un valor de manera que los parpadeos de luz de respectivos transmisores se reciben por el receptor de manera sustancialmente simultánea;

5 las figuras 6a, 6b y 6c muestran gráficos esquemáticos de la amplitud de los parpadeos de luz recibidos en el receptor mostrado en las figuras 5a y 5b, representándose gráficamente la amplitud frente al tiempo; la figura 6a muestra el caso en el cual  $\theta = 0$  y  $f$  es arbitraria; la figura 6b muestra el caso en el cual  $\theta > 0$  y  $f$  toma un valor de manera que los parpadeos de luz de respectivos transmisores no se reciben por el receptor sustancialmente en el mismo momento; la figura 6c muestra el caso en el cual  $\theta > 0$  y  $f$  toma un valor de manera que los parpadeos de luz de respectivos transmisores se reciben por el receptor de manera sustancialmente simultánea;

10 las figuras 7a y 7b son ilustraciones esquemáticas que muestran cómo los dos transmisores ópticos mostrados en las figuras 5a y 5b se ubican a diferentes distancias del receptor óptico ubicado sobre la segunda pala cuando la punta de la primera pala mostrada en las figuras 3 y 4 se rota en relación con el eje  $x$ ; la figura 7b muestra como los puntos  $ABB'$  forman un triángulo rectángulo cuando se hacen determinadas aproximaciones específicas; y

15 las figuras 8a, 8b y 8c ilustran el triángulo rectángulo  $ABB'$  de la figura 7b presentado dentro de un círculo que tiene un diámetro igual a la distancia física de separación, indicada por  $AB$ , de los dos transmisores ópticos ubicados sobre la primera pala de la figura 3 o 4, e ilustran cómo el ángulo de torsión de pala está relacionado con las distancias  $AB$  y  $BB'$ ; la figura 8a ilustra el triángulo rectángulo  $ABB'$  formado cuando el ángulo de torsión de pala se encuentra dentro del intervalo  $0 < \theta < \pi/2$  radianes; la figura 8b muestra la cuerda horizontal  $AB$  formada cuando el ángulo de torsión de pala es 0 radianes; y la figura 8c muestra la cuerda vertical  $AB$  formada cuando el ángulo de torsión de pala es  $\pi/2$  radianes.

#### 25 Descripción detallada

La figura 3 ilustra esquemáticamente un conjunto de buje-rotor 22 tal como se presenta en una turbina eólica de eje horizontal. El conjunto de buje-rotor ilustrado 22 comprende tres palas de turbina 24a, 24b, 24c fijadas a un buje central 26 por medio de un mecanismo de paso (no ilustrado). Las palas 24a, 24b, 24c tienen un perfil en sección transversal 16 tal como se ilustra en la figura 1, y se disponen para provocar rotación en sentido antihorario del buje-rotor, tal como se indica mediante las flechas direccionales 28, cuando el viento es incidente sobre las palas 24a, 24b, 24c en una dirección sustancialmente perpendicular a y en el plano de la página.

35 Figura 4 es una vista en perspectiva lateral del conjunto de buje-rotor 22 de la figura 3.

Cada pala 24a, 24b, 24c del conjunto de buje-rotor 22 está configurada con al menos dos transmisores ópticos 30a, 30b (ubicados en posiciones  $A$  y  $B$ , respectivamente), y al menos un receptor óptico 32 (ubicado en posición  $C$ ). Uno primero de los transmisores ópticos 30a se dispone en el borde de ataque 18 de cada pala 24a, 24b, 24c, y uno segundo de los transmisores ópticos 30b se dispone en el borde de salida 20. Los transmisores ópticos primero y segundo 30a, 30b están separados en una dirección en sentido de la cuerda  $D$  de cada pala 24a, 24b, 24c, la cual es sustancialmente perpendicular al eje longitudinal  $L$  de cada pala. Los transmisores ópticos 30a, 30b se ubican sustancialmente en las proximidades de la punta de cada pala 24a, 24b, 24c, para permitir la determinación precisa del ángulo de torsión de pala  $\theta$ .

45 Los al menos dos transmisores 30a, 30b ubicados sobre una primera pala 24a están configurados cada uno para emitir parpadeos de luz 34a, 34b (también denominados señales de parpadeo 34a, 34b) en frecuencias de parpadeos conocidas, sustancialmente idénticas, indicadas por  $f$ ; es decir, el período de tiempo entre cada parpadeo de luz emitido es sustancialmente igual para los transmisores 30a y 30b. Adicionalmente, cada parpadeo de luz del transmisor 30a se emite en sustancialmente el mismo momento que se emite cada parpadeo de luz del transmisor 30b. Los parpadeos de luz 34a, 34b se reciben posteriormente por el receptor 32 ubicado sobre una segunda pala adyacente 24b. El receptor 32 está configurado para medir la amplitud de los parpadeos de luz recibidos 34a, 34b. Obsérvese que los transmisores 30a, 30b ubicados sobre la segunda pala 24b emiten parpadeos de luz 34a, 34b que se reciben por el receptor 32 sobre una tercera pala 24c, y que los transmisores 30a, 30b ubicados sobre la tercera pala 24c emiten parpadeos de luz 34a, 34b que se reciben por el receptor 32 sobre la primera pala 24a. Los transmisores 30a, 30b están configurados de manera que la frecuencia de los parpadeos de luz emitidos 34a, 34b puede variarse de manera controlable, tal como se discute más adelante.

50 Se calcula el ángulo de torsión  $\theta$  de la primera pala 24a con respecto a la segunda pala 24b basándose en las características de los parpadeos de luz 34a, 34b recibidos por el receptor 32 desde los transmisores 30a, 30b, tal como se explicará en detalle con referencia a las figuras restantes.

55 Las figuras 5a y 5b muestran diagramas esquemáticos de transmisores 30a, 30b en posiciones  $A$ ,  $B$ , que están emitiendo parpadeos de luz 34a, 34b, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, cada parpadeo de luz 34a del transmisor 30a se emite en sustancialmente el mismo momento que un parpadeo de luz correspondiente

34b del transmisor 30b. Adicionalmente, se emiten parpadeos de luz 34a, 34b desde los transmisores 30a, 30b, respectivamente, en intervalos de tiempo constantes  $t_1$ , lo cual significa que la distancia entre cada parpadeo de luz 34a desde el transmisor 30a, y la distancia entre cada parpadeo de luz 34b desde el transmisor 30b, se proporciona mediante  $s_1 = vt_1$ , donde  $v$  es la velocidad de la luz. Además, las amplitudes de los parpadeos de luz transmitidos 34a, 34b son sustancialmente iguales.

Las figuras 5a y 5b también muestran que los transmisores 30a, 30b están separados una distancia que se indica por  $AB$ .

La figura 5a muestra el caso de torsión de pala nula, es decir, cuando  $\theta = 0$ . En este caso, la disposición de los transmisores 30a, 30b y el receptor 32 está configurada de manera que la distancia entre el transmisor 30a y el receptor 32, indicada por  $AC$ , es igual a la distancia entre el transmisor 30b y el receptor 32, indicada por  $BC$  (es decir,  $AC = BC$ ). Esto significa que los respectivos parpadeos de luz 34a, 34b que se emiten desde los transmisores 30a, 30b se reciben en el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea para todos los valores de la frecuencia de parpadeo  $f$ .

La figura 5b muestra el caso de torsión de pala no nula, es decir, cuando  $\theta > 0$ . En este caso, la distancia entre el transmisor 30a y el receptor 32 es menor que la distancia entre el transmisor 30b y el receptor 32 (es decir,  $AC < BC$ ). Esto significa que los parpadeos de luz respectivos 34a, 34b que se emiten desde los transmisores 30a, 30b ya no se reciben en el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea para todos los valores de la frecuencia de parpadeo  $f$ .

La figura 5c también muestra el caso de torsión de pala no nula,  $\theta > 0$ ; sin embargo, al contrario que en la figura 5b, la frecuencia de parpadeo  $f$  es igual a una denominada frecuencia de parpadeo particular, indicada por  $f_0$ , de manera que los parpadeos de luz 34a, 34b se reciben en el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea. Esto se discute en mayor detalle a continuación.

Las figuras 6a, 6b y 6c muestran gráficos esquemáticos de la amplitud de las señales recibidas en el receptor 32 en los casos  $\theta = 0$  para un valor arbitrario de la frecuencia de parpadeo  $f$  (ilustrado en la figura 5a),  $\theta > 0$  con  $f \neq f_0$  (ilustrado en la figura 5b), y  $\theta > 0$  con  $f = f_0$  (ilustrado en la figura 5c), respectivamente. En particular, la figura 6a muestra que cuando  $\theta = 0$ , dos parpadeos de luz (uno desde cada transmisor 30a, 30b) alcanza el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea, de manera que estas señales recibidas se superponen, y por lo tanto se registran como un único pico cuando se mide por el receptor 32. El intervalo de tiempo entre cada pico,  $t_1$ , es igual al intervalo de tiempo entre cada parpadeo de luz transmitido 34a, 34b desde respectivos transmisores 30a, 30b (es decir,  $t_1 = 1/f$ ).

Por el contrario, la figura 6b muestra que cuando  $\theta > 0$  con  $f \neq f_0$ , hay una diferencia de tiempo, indicada por  $t_d$ , entre los parpadeos de luz 34a y 34b que se transmiten de manera sustancialmente simultánea recibándose en el receptor 32. Esto significa que estas señales recibidas no se superponen, y por lo tanto se registran como dos picos separados cuando se miden por el receptor 32. Obsérvese que los picos medidos en la figura 6b, por lo tanto, son sustancialmente el doble en número, pero la mitad en amplitud, de los de la figura 6a.

La figura 6c muestra que cuando  $\theta > 0$  con  $f = f_0$ , dos parpadeos de luz (uno desde cada transmisor 30a, 30b) alcanzan el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea, de manera que estas señales recibidas se superponen, y por lo tanto se registran como un único pico cuando se miden por el receptor 32 (como en el caso de  $\theta = 0$  mostrado en la figura 6a).

Con el fin de que pueda determinarse el ángulo de torsión  $\theta$ , la diferencia en la distancia desde el transmisor 30a hasta el receptor 32 y desde transmisor 30b hasta el receptor 32, indicada por  $s_d$ , debe determinarse (donde  $s_d = AC - BC$ ). Un método en el cual esto podría lograrse es mediante la medición del tiempo,  $t_d$ , entre parpadeos de luz 34a, 34b desde respectivos transmisores 30a, 30b, utilizando entonces la relación  $s_d = vt_d$ , donde  $v$  se toma de nuevo para que sea la velocidad de la luz. Sin embargo, este enfoque necesitaría equipamiento avanzado diseñado para medir el tiempo entre respectivos parpadeos de luz recibidos 34a, 34b, la cual podría ser caro y posiblemente demasiado frágil para ubicarse sobre una pala de turbina eólica.

En cambio, se describe un método alternativo que evita la necesidad de tal equipamiento. En particular, la frecuencia de parpadeo  $f$  (es decir, el intervalo de tiempo entre cada parpadeo de luz 34a desde el transmisor 30a y el intervalo de tiempo entre cada parpadeo de luz 34b desde el transmisor 30b) se varía sustancialmente la misma cantidad para cada transmisor 30a, 30b. Esto a su vez significa que la distancia entre cada parpadeo de luz desde un transmisor dado,  $s_1$ , también varía.

Específicamente, la frecuencia de parpadeo  $f$  con la cual se emiten parpadeos de luz 34a, 34b se varía hasta la distancia entre cada parpadeo de luz desde un transmisor dado iguala sustancialmente la diferencia en la distancia desde el transmisor 30a hasta el receptor 32 y desde el transmisor 30b hasta el receptor 32, es decir, hasta  $s_1 = s_d$ . Como se mencionó anteriormente, la frecuencia de parpadeo  $f$  en la cual ocurre esto se denomina la frecuencia

particular  $f_0$  (y se ilustra en la figura 5c).

Cuando la frecuencia de parpadeo toma un valor de manera que  $s_1 = s_d$  (es decir, cuando  $f = f_0$ ), y en el caso en el que la torsión de pala da como resultado que el transmisor 30b está más lejos del receptor 32 que el transmisor 30a (es decir, cuando  $BC - AC > 0$  de manera que  $\theta > 0$ , como se ilustra en las figuras), un parpadeo de luz 34a desde el transmisor 30a y el parpadeo de luz 34b desde el transmisor 30b que se emitió inmediatamente antes de dicho parpadeo de luz 34a se reciben en el receptor 32 de manera sustancialmente simultánea (es decir, tal como se muestra en la figura 5c). Esto significa que estos dos parpadeos de luz 34a, 34b recibidos en el receptor 32 se registrarán como un único pico de amplitud de sustancialmente el doble que la cual se registraría a partir de un único parpadeo de luz (es decir, tal como se muestra en la figura 6c). Por lo tanto, en la práctica, la frecuencia  $f$  de los parpadeos de luz emitidos 34a, 34b se varía hasta una señal recibida de amplitud sustancialmente dos veces la que se obtiene de un único parpadeo de luz.

Obsérvese que este método puede adaptarse fácilmente para el caso en el que el transmisor 30b está más lejos del receptor 32 de lo que lo está el transmisor 30a (cuando  $AC > BC$  de manera que  $\theta < 0$ ).

El ángulo de torsión  $\theta$  puede entonces aproximarse como se describe a continuación.

La figura 7a es una ilustración esquemática que muestra cómo las distancias desde cada transmisor 30a, 30b hasta el receptor 32 no son iguales (en particular,  $AC < BC$ ) cuando la primera punta de pala 24a se rota con respecto al eje  $x$ . Las posiciones  $A$ ,  $B$  de los transmisores 30a, 30b se ilustran con respecto a la posición  $C$  del receptor 32. La distancia  $s_d = BC - AC$  se representa mediante el segmento de línea  $BB'$ . Como anteriormente, la distancia física real de separación entre transmisores 30a, 30b es  $AB$ . Los segmentos de línea  $AC$  y  $B'C$  son iguales en longitud (es decir,  $AC = B'C$ ). La distancia  $BB'$  es la distancia adicional que el segundo parpadeo de luz 34b emitido desde el segundo transmisor 30b viaja hasta el receptor 32 con respecto al primer parpadeo de luz 34a emitido desde el primer transmisor 30a. Cuando la distancia  $BB'$  es igual a la distancia entre cada respectivo parpadeo de luz 34a, 34b emitido desde los transmisores 30a, 30b, un único pico de amplitud sustancialmente el doble del que genera un parpadeo único de luz se registra en el receptor 32.

Con referencia al triángulo  $AB'C$ , ya que las distancias  $AC$  y  $B'C$  son significativamente más grandes que la distancia  $AB$ , una aproximación razonable es asumir que  $AC$  y  $B'C$  son sustancialmente paralelas en orientación. Esto es debido a que el ángulo  $\gamma$  formado entre  $AC$  y  $B'C$  es significativamente más pequeño que los ángulos formados entre tanto  $B'C$  y  $B'A$  como  $AB'$  y  $AC$ . La figura 7b ilustra  $AC$  y  $B'C$  siendo sustancialmente paralelas en orientación. Basándose en esta suposición, el triángulo  $ABB'$  es un triángulo rectángulo que tiene un ángulo de divergencia con respecto al eje  $x$  de  $\theta$ .

Las figuras 8a, 8b, y 8c ilustran el triángulo rectángulo  $ABB'$  representado gráficamente sobre un círculo que tiene un diámetro igual a la línea  $AB$  (es decir, el diámetro es igual a la distancia física de separación entre los transmisores 30a, 30b), para diferentes valores del ángulo de torsión  $\theta$ . La distancia física de separación  $AB$  entre los transmisores ópticos en la dirección en sentido de la cuerda a lo largo de una pala 24a, 24b, 24c es constante, y se mide de manera precisa cuando se instalan los transmisores sobre la pala (es decir,  $AB$  es un valor conocido).

La distancia  $BB'$  se determina empíricamente utilizando transmisores 30a, 30b y el receptor 32, mediante el análisis de las características de las señales medidas en el receptor 32. En la primera realización, la primera pala 24a se dispone relativa a la segunda pala 24b de manera que  $0 < \theta < \pi/2$  (como se ilustra en la figura 8a). La frecuencia  $f$  con la cual los parpadeos de luz 34a, 34b se emiten se varía entonces mediante una cantidad conocida. Variar la frecuencia  $f$  provoca que la distancia varíe entre sucesivos parpadeos de luz con respecto a un receptor dado. Por ejemplo, la frecuencia  $f$  puede variarse de una primera frecuencia conocida a una segunda frecuencia conocida diferente a la primera frecuencia. Asumiendo que la distancia  $BB'$  permanece sustancialmente constante (es decir, que el ángulo de torsión  $\theta$  permanece sustancialmente constante) cuando se varía la frecuencia, entonces  $BB'$  es sustancialmente igual a la distancia entre sucesivos parpadeos de luz desde un transmisor dado 30a, 30b cuando un parpadeo de luz 34a emitido desde el transmisor 30a y el parpadeo de luz 34b desde el transmisor 34b que se emite directamente tras dicho parpadeo de luz 34a se registra como un único pico en el receptor 32, tal como se describió anteriormente. Esto se ilustra en más detalle en el siguiente ejemplo, proporcionado solo para fines ilustrativos.

Cuando  $\theta > 0$ , la frecuencia particular  $f_0$  a la cual los respectivos parpadeos de luz 34a, 34b emitidos desde los transmisores 30a, 30b se superpondrán en el receptor 32 pueden determinarse variando de manera controlada  $f$ , como se describió anteriormente. La distancia  $BB'$  puede determinarse entonces utilizando la relación

$$BB' = \frac{v}{f_0}.$$

La figura 8a ilustra el caso en el cual el ángulo de torsión  $\theta$  está en el intervalo  $0 < \theta < \pi/2$ . Dado que la distancia  $AB$  se conoce previamente, y la distancia  $BB'$  se ha determinado utilizando el método descrito anteriormente, entonces

puede utilizarse la trigonometría simple para obtener el ángulo de torsión  $\theta$ , concretamente

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{BB'}{AB} \right).$$

5 En la práctica, el ángulo de torsión  $\theta$  está posiblemente restringido dentro del intervalo  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ . Esto da un aumento de la posibilidad de dos casos extremos, concretamente  $\theta = 0$  y  $\theta = \pi/2$ , como se ilustra respectivamente en las figuras 8b y 8c.

10 La figura 8b ilustra que en el caso  $\theta = 0$ , la distancia  $BB'$  es cero, de manera que los transmisores 30a, 30b son equidistantes con respecto al receptor 32. La figura 8c ilustra que en el caso  $\theta = \pi/2$ , la distancia  $BB'$  es igual a la distancia física de separación de los transmisores 30a, 30b, concretamente  $AB$ .

15 Si, por ejemplo, la frecuencia superpuesta se encuentra que es  $f_0 = 1$  Gigahercio (y utilizando la aproximación  $v = 3 \times 10^8$  metros por segundo), entonces la distancia  $BB'$  es 0,3 metros. Entonces si, por ejemplo, la distancia entre los transmisores 30a, 30b es 0,4 metros (es decir,  $AB = 0,3$ ), el ángulo de torsión se aproxima para ser  $\theta \cong 0,85$  radianes.

20 En resumen, la distancia  $BB'$  se determina variando de manera controlada la frecuencia de parpadeos de luz emitidos mediante los transmisores 30a, 30b y observando la amplitud de las señales recibidas en el receptor 32. La frecuencia se varía hasta que el receptor 32 detecta parpadeos de amplitud aumentada, por ejemplo, el doble de la amplitud en este ejemplo. Esto ocurre cuando la separación física entre sucesivos parpadeos coincide con la diferencia de trayectoria óptica ( $BB'$ ) entre los respectivos transmisores 30a, 30b y el receptor 32 de modo que el receptor 32 recibe parpadeos desde ambos transmisores 30a 30b de manera sustancialmente simultánea. La frecuencia  $f_0$  en la cual esto ocurre se utiliza entonces para calcular la distancia  $BB'$ .

25 En este ejemplo, los transmisores 30a, 30b pueden configurarse para transmitir parpadeos de luz en el intervalo 0,5-2 Gigahercios. Alternativamente, los transmisores 30a, 30b pueden configurarse para transmitir parpadeos de luz 34a, 34b en un intervalo de frecuencias diferente. Una vez que se ha determinado la distancia  $BB'$ , entonces el ángulo de torsión de pala  $\theta$  puede aproximarse como se ha descrito anteriormente.

30 En la utilización, los transmisores 30a, 30b pueden configurarse para emitir de manera continua parpadeos de luz 34a, 34b con el fin de medir el ángulo de torsión  $\theta$  de manera continua; o alternativamente, los transmisores 30a, 30b pueden activarse cuando se requiere una medición de punta de pala precisa.

35 Con el fin de evitar material eléctricamente conductor dentro de las palas 24a, 24b, 24c, se utilizan fibras ópticas para transmitir señales ópticas desde una fuente ubicada dentro del buje a los transmisores 30a, 30b ubicados sustancialmente en las proximidades de las puntas de pala.

40 Las realizaciones descritas en el presente documento pueden utilizarse en estrategias de control de paso y/o para controlar cargas de tensión sobre la pala.

45 Debe apreciarse que el método anterior para determinar el ángulo de torsión de pala  $\theta$  es válido para triángulos rectángulos. La utilización de estas ecuaciones proporciona una aproximación razonable del valor de  $\theta$  en casos en los que el triángulo  $ABB'$  puede aproximarse razonablemente como un triángulo rectángulo. Esta aproximación no introduce errores excesivos en el valor calculado de  $\theta$  cuando la distancia de separación entre las dos palas de turbina adyacentes 24a, 24b es mucho más grande que la distancia física de separación entre los transmisores 30a, 30b posicionados en  $A$ ,  $B$ , respectivamente. En la práctica, como puede verse a partir de la figura 6a, el triángulo  $ABB'$  no es un triángulo rectángulo.

50 El presente método aún puede utilizarse para determinar el ángulo de torsión incluso donde la aproximación anterior no es válida. En tales circunstancias, pueden utilizarse relaciones trigonométricas conocidas aplicables a triángulos no rectángulos. Por ejemplo, puede utilizarse una cualquiera o más de la ley de los senos, la ley de los cosenos, la ley de las tangentes y la ley de las cotangentes para determinar el ángulo de torsión de pala, o cualquier otra ecuación trigonométrica conocida válida para triángulos no rectángulos. Ya que las leyes trigonométricas mencionadas anteriormente son bien conocidas en la técnica, es innecesario proporcionar una discusión detallada de las mismas en el presente documento.

En diferentes realizaciones, las distancias  $AC$  y  $BC$  no necesitan ser iguales cuando  $\theta = 0$ .

60 La presente realización describe una disposición con dos transmisores ópticos y un receptor óptico sobre cada pala de turbina eólica; sin embargo, cada pala puede comprender más o menos transmisores y/o receptores según sea necesario. Por ejemplo, la figura 3 ilustra la primera pala 24a que comprende dos pares de transmisores ópticos 30a, 30b y 44a, 44b. El segundo par de transmisores ópticos 44a, 44b se ubica en una posición diferente a lo largo del



5 eje longitudinal  $L$  de la primera pala 24a, con respecto al primer par de transmisores ópticos 30a, 30b. Esta configuración de transmisores ópticos permite que el grado de torsión de la primera pala 24a se determine en diferentes posiciones longitudinales. Esto es ventajoso cuando el paso de la primera pala 24a varía a lo largo de su eje longitudinal  $L$ , que puede ocurrir cuando la primera pala 24a se somete a altas tensiones. A su vez, cada pala 24a, 24b, 24c puede dotarse de una pluralidad de diferentes receptores ópticos, estando dispuesto cada receptor diferente para medir las señales transmitidas generadas mediante un par diferente de transmisores ópticos.

10 El término 'ángulo de torsión' puede referirse al ángulo de la pala en cualquier punto a lo largo del eje longitudinal de la pala  $L$ , y no restringirse al ángulo en las proximidades de la punta de pala.

15 En diferentes realizaciones, los transmisores 30a, 30b pueden no emitir señales en forma de parpadeos de luz, y en su lugar emiten señales electromagnéticas desde una parte diferente del espectro. El receptor 32 entonces puede configurarse para recibir el tipo de señales emitidas por los transmisores.

20 La intensidad de los parpadeos de luz desde diferentes transmisores no necesita ser sustancialmente igual, y puede ser de cualquier intensidad.

25 El ángulo entre cada transmisor y cada receptor dependerá, por ejemplo, del número de palas unidas a la turbina eólica y la posición de los transmisores y receptores sobre palas respectivas. Estas variaciones se conocerán en cada caso individual y pueden incorporarse fácilmente en el método descrito anteriormente por una persona experta.

30 En lugar de una disposición que comprende un par de transmisores que transmiten señales de parpadeo a un único receptor, la disposición puede modificarse para incluir un único transmisor que transmite señales de parpadeo en dos direcciones diferentes hacia dos receptores. El método descrito anteriormente puede utilizarse de una manera similar para determinar el ángulo de torsión de pala que utiliza las señales recibidas en los dos receptores.

35 El presente método puede utilizarse para calcular el ángulo de torsión de pala para una turbina eólica que comprende cualquier número de palas de turbina. Mientras que las realizaciones descritas en el presente documento se refieren a una turbina eólica que comprende tres palas, esto es no limitativo solo para fines ilustrativos.

Adicionalmente, para determinar el ángulo de torsión de pala, también puede ser deseable determinar el grado al que se dobla la pala, especialmente cerca de la punta de pala. Tal información puede tenerse en cuenta también cuando se determina el ángulo de torsión de pala, y es particularmente útil en casos en los que el grado de doblado difiere entre las palas en un tiempo dado.

La realización descrita en el presente documento se proporciona solo para fines ilustrativos y no debe interpretarse como que limita el alcance de la invención, que se define en las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para determinar un ángulo de torsión de una pala de turbina eólica, el método que comprende:
  - 5 a. proporcionar transmisores primero y segundo sobre la pala de turbina eólica (24a, 24b, 24c), estando separado el primer transmisor (30a) de un receptor (32) una primera distancia, y estando separado el segundo transmisor (30b) del receptor (32) una segunda distancia, estando dispuestos los transmisores de manera que la torsión de la pala provoca un aumento en una de las distancias primera o segunda y una disminución en la otra de las distancias primera o segunda;
  - 10 b. transmitir una señal de parpadeo desde cada uno de los transmisores primero y segundo hacia el receptor, teniendo las señales de parpadeo una frecuencia de parpadeo; estando caracterizado el método por las siguientes etapas:
  - 15 c. variar la frecuencia de parpadeo de las señales de parpadeo;
  - d. monitorizar la amplitud de la señal de parpadeo recibida por el receptor cuando se varía la frecuencia de parpadeo;
  - 20 e. determinar una frecuencia de parpadeo particular que da como resultado una amplitud aumentada de la señal de parpadeo recibida por el receptor; y
  - f. utilizar la frecuencia de parpadeo particular determinada para calcular el ángulo de torsión de pala.
- 25 2. Un método según la reivindicación 1, en el que los transmisores primero y segundo están separados mutuamente en una dirección en el sentido de la cuerda de la pala de turbina eólica.
3. Un método según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el primer transmisor se ubica en o cerca de un borde de ataque de la pala de turbina eólica y el segundo transmisor se ubica en o cerca de un borde de salida de la pala de turbina eólica.
- 30 4. Un método según cualquier reivindicación precedente, en el que los transmisores primero y segundo se ubican cerca de la punta de la pala de turbina eólica.
- 35 5. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende calcular la diferencia entre la primera distancia y la segunda distancia utilizando la frecuencia de parpadeo particular determinada y calcular el ángulo de torsión de pala utilizando la diferencia calculada entre la primera distancia y la segunda distancia.
- 40 6. Un método según cualquier reivindicación precedente, en el que las señales de parpadeo de los transmisores primero y segundo se transmiten de manera sustancialmente simultánea.
7. Un método según cualquier reivindicación precedente, en el que las amplitudes de las señales de parpadeo desde los transmisores primero y segundo son sustancialmente idénticas, y transmitir las señales de parpadeo en la frecuencia particular da como resultado la amplitud de la señal recibida en el receptor que es aproximadamente dos veces la amplitud de las señales de parpadeo transmitidas.
- 45 8. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende proporcionar el receptor sobre una segunda pala de la turbina eólica.
- 50 9. Un método según la reivindicación 8, en el que el receptor se ubica cerca de la punta de la segunda pala de turbina eólica.
10. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende proporcionar una pluralidad de primeros transmisores y una pluralidad de segundos transmisores sobre la pala de turbina eólica, estando separados mutuamente los primeros transmisores a lo largo de la longitud de al menos parte de la pala de turbina eólica y estando separados mutuamente los segundos transmisores a lo largo de la longitud de al menos parte de la pala de turbina eólica.
- 55 11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, que comprende proporcionar una pluralidad de receptores sobre la segunda pala de turbina eólica, estando separados mutuamente los receptores a lo largo de la longitud de al menos parte de la segunda pala de turbina eólica.
- 60 12. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende comunicar señales de parpadeo desde una fuente ubicada de manera remota a los transmisores primero y segundo mediante una primera fibra óptica que se extiende longitudinalmente a lo largo de la pala de turbina eólica, y comunicar las señales de parpadeo recibidas a un detector ubicado de manera remota mediante una segunda fibra óptica
- 65

que se extiende longitudinalmente a lo largo de la pala de turbina eólica.

- 5
13. Un sistema para determinar un ángulo de torsión de pala de una pala de turbina eólica, el sistema que comprende:
- 10
- transmisores primero y segundo sobre la pala de turbina eólica, configurado cada uno para transmitir una señal de parpadeo que tiene una frecuencia de parpadeo;
- un receptor configurado para recibir las señales de parpadeo;
- 15
- un controlador configurado para variar la frecuencia de parpadeo de las señales de parpadeo;
- un procesador configurado para monitorizar una amplitud de la señal de parpadeo recibida por el receptor cuando se varía la frecuencia de parpadeo, para determinar una frecuencia de parpadeo particular que da como resultado una amplitud aumentada de la señal de parpadeo recibida por el receptor, y para calcular el ángulo de torsión de pala utilizando la frecuencia de parpadeo particular determinada,
- 20
- en el que el primer transmisor está separado del receptor una primera distancia y el segundo transmisor está separado del receptor una segunda distancia, y los transmisores se disponen de manera que la torsión de la pala provoca un aumento en una de las distancias primera o segunda y una disminución en la otra de las distancias primera o segunda.
- 25
14. Un sistema según la reivindicación 13, en el que el receptor se ubica sobre una segunda pala de turbina eólica.
15. Una turbina eólica que comprende el sistema según la reivindicación 13 o la reivindicación 14.

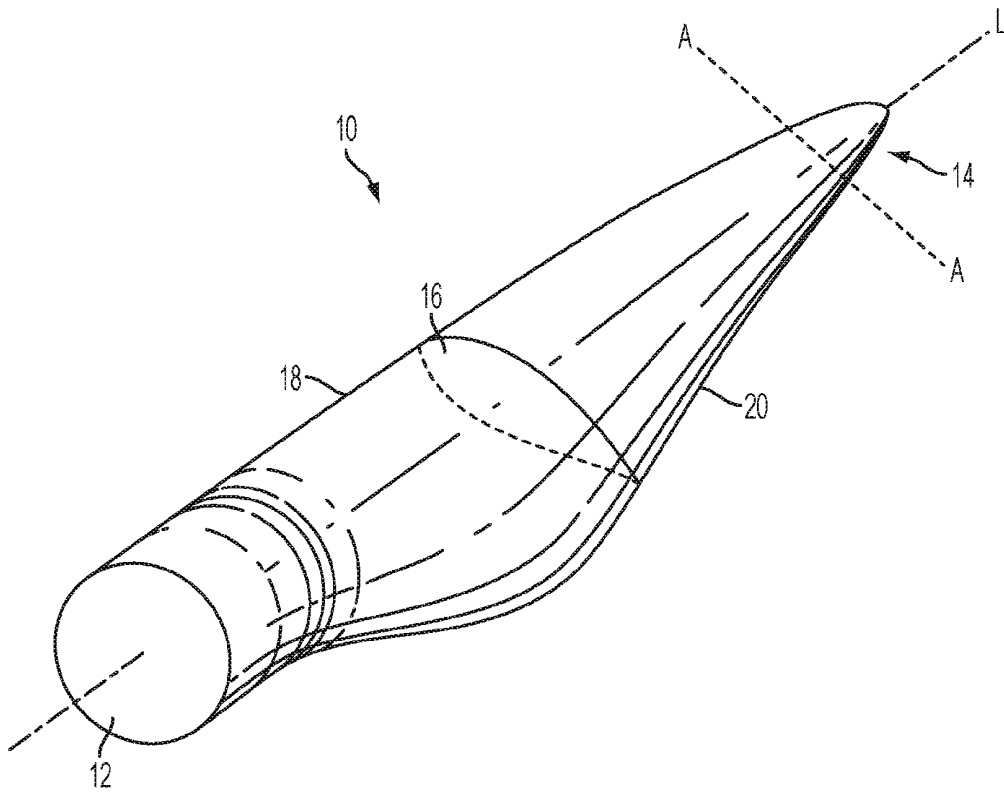


FIG. 1

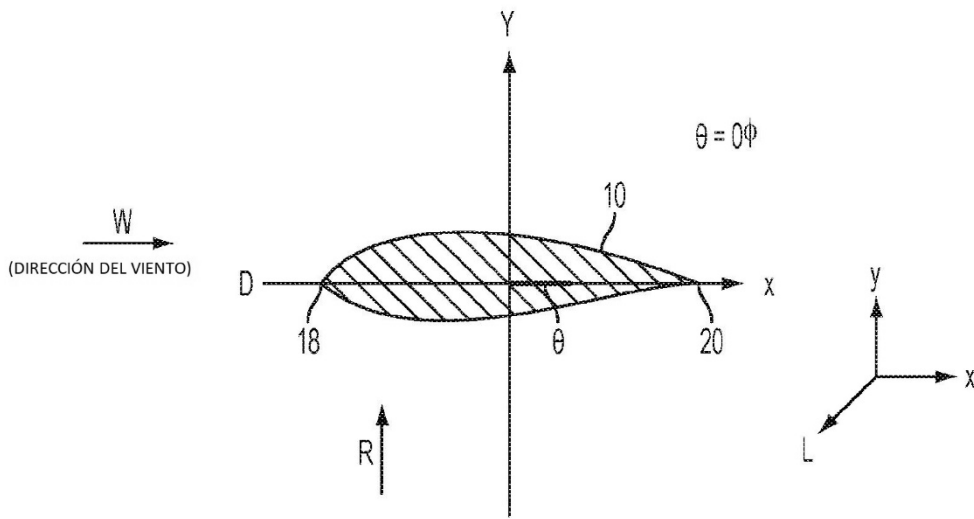


FIG. 2A

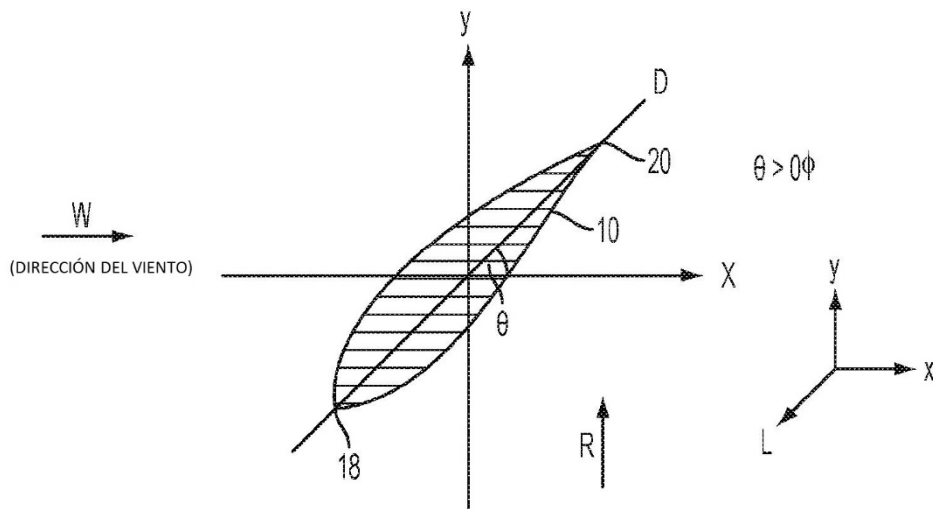


FIG. 2B

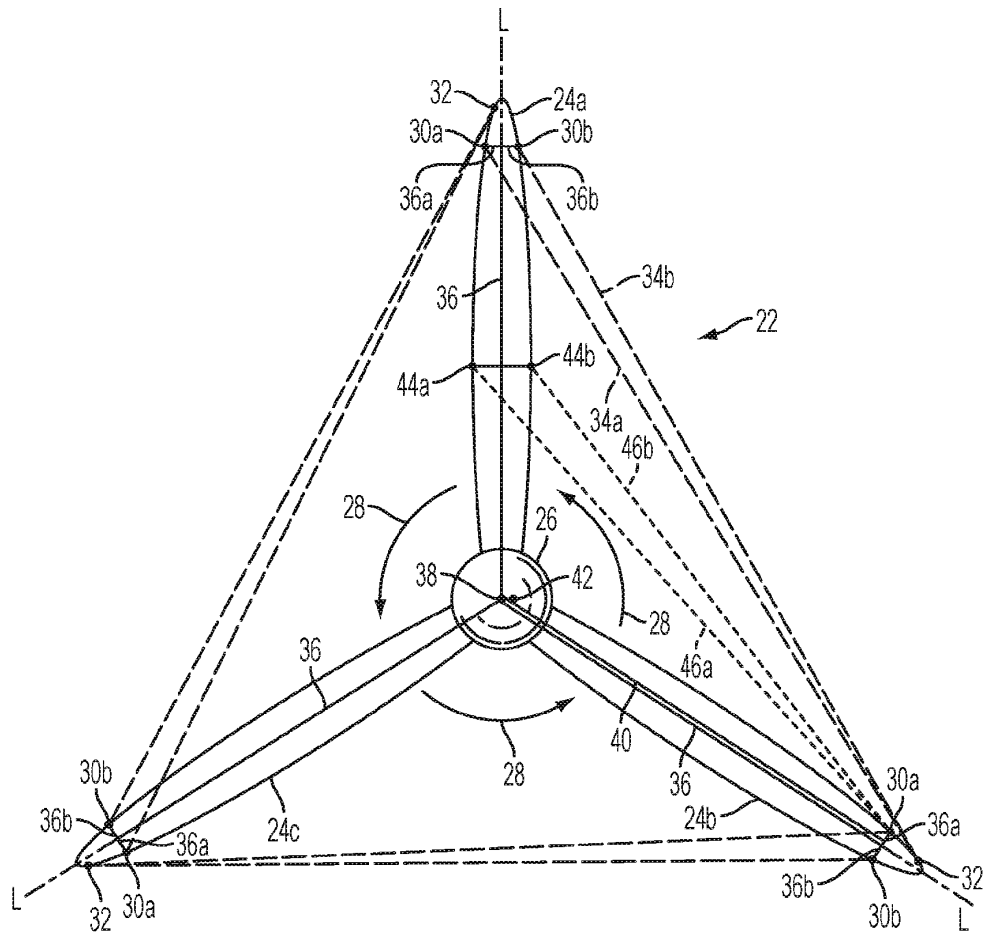


FIG. 3

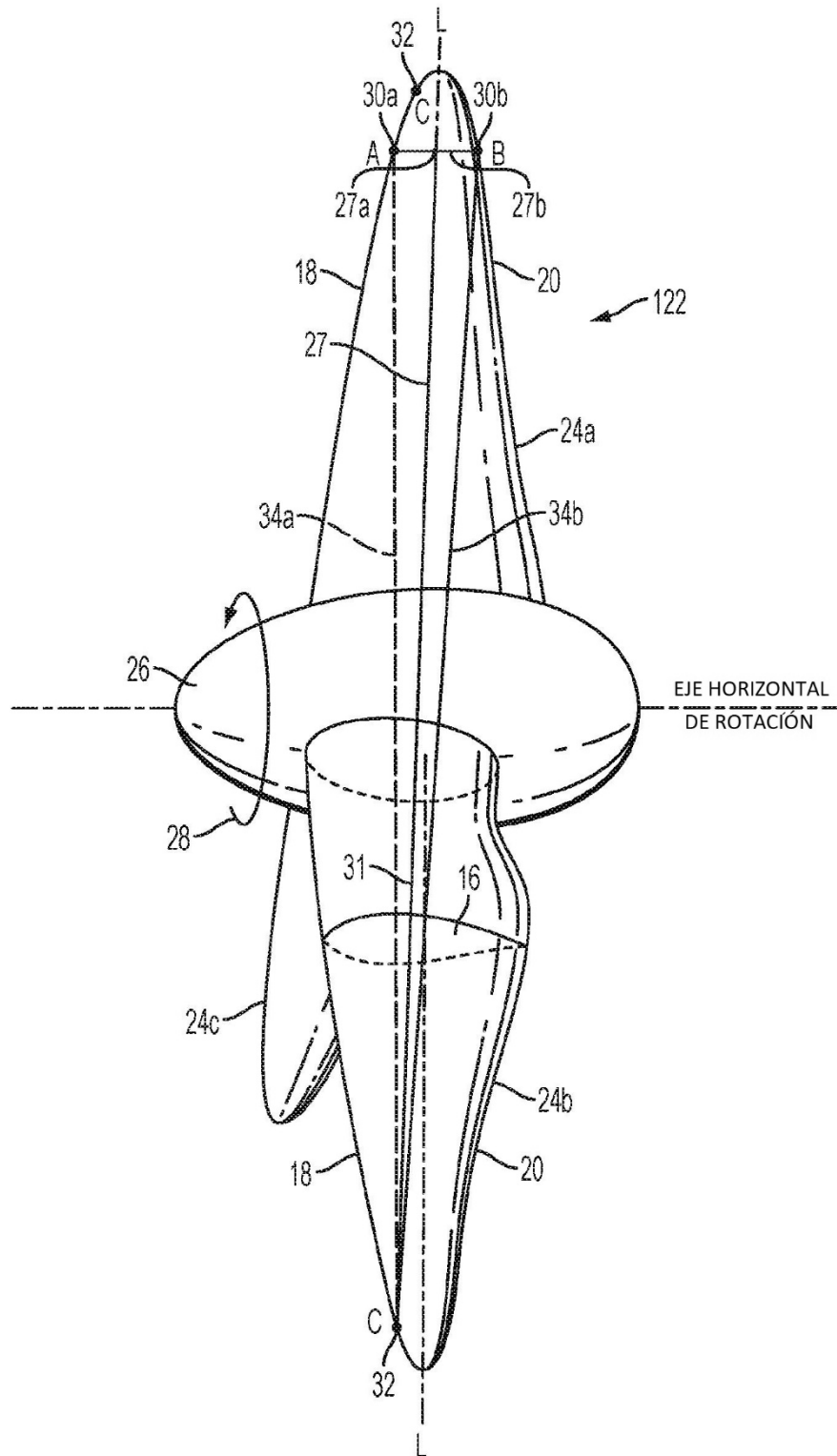


FIG. 4

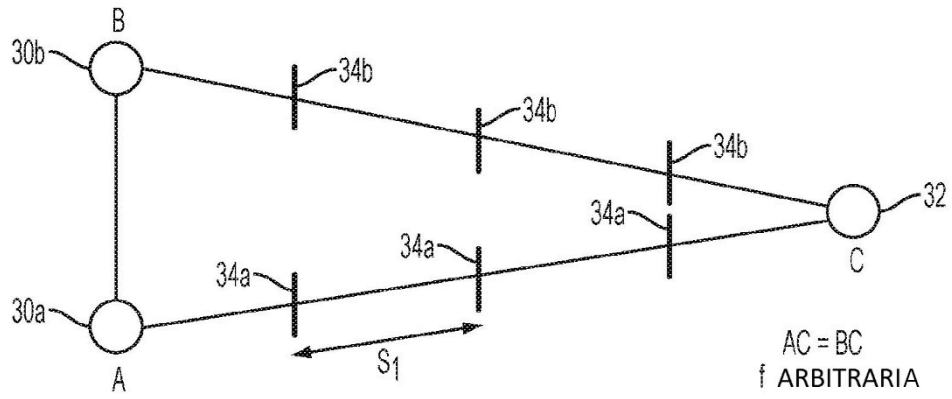


FIG. 5A

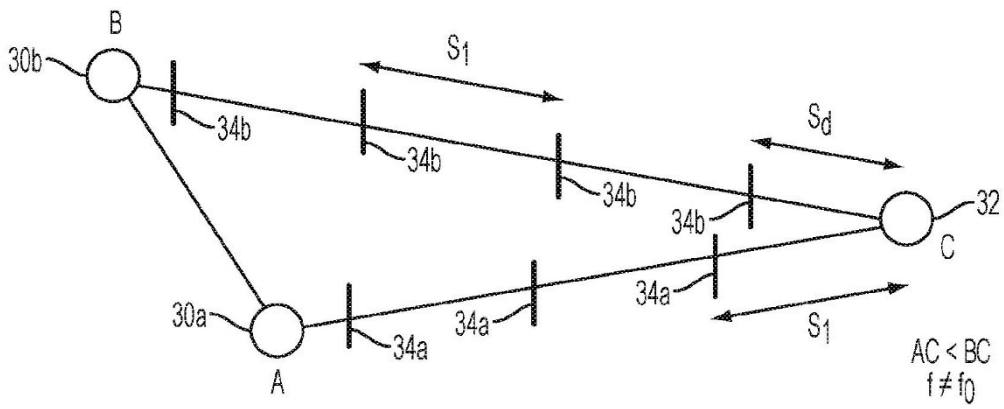


FIG. 5B

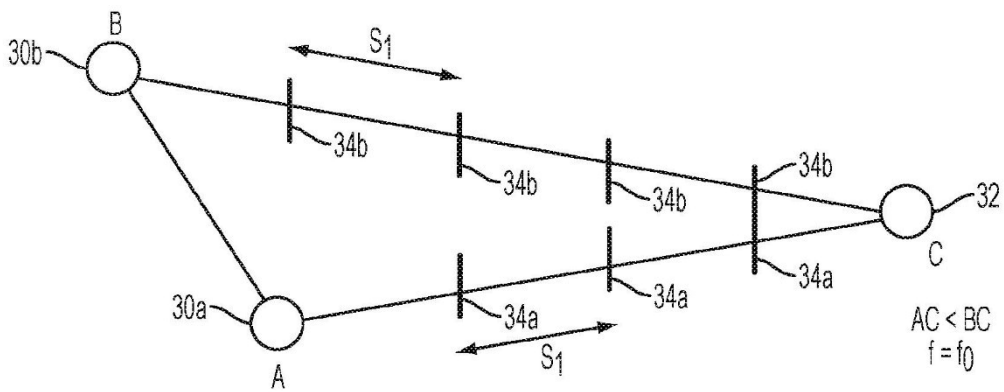


FIG. 5C



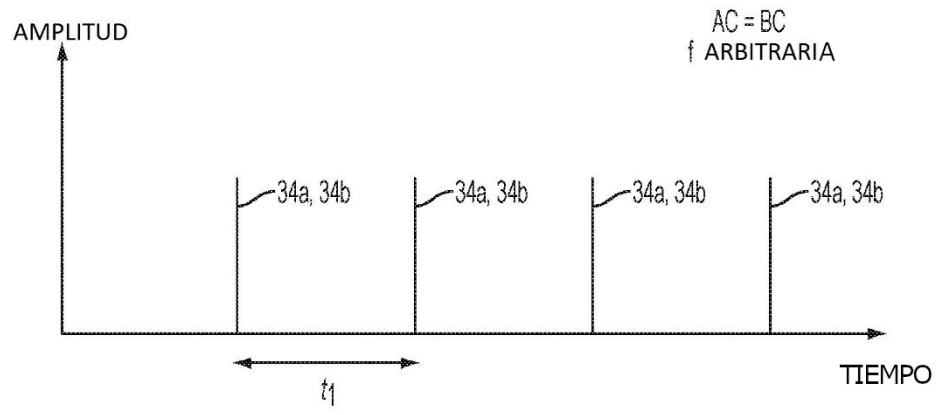


FIG. 6A

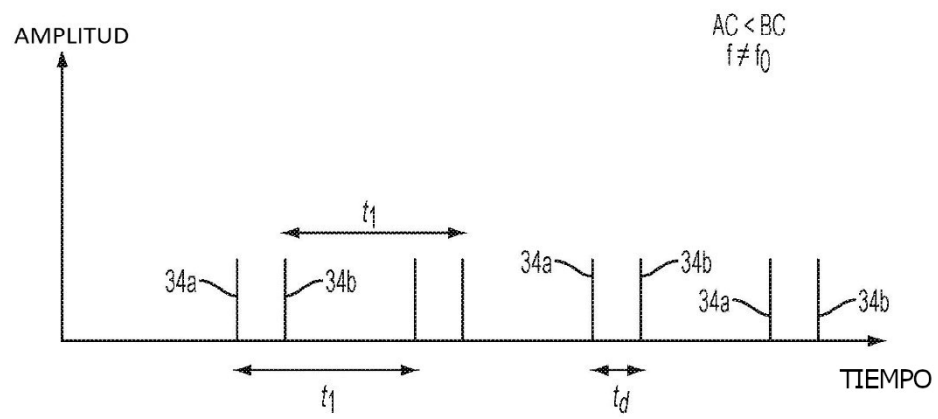


FIG. 6B

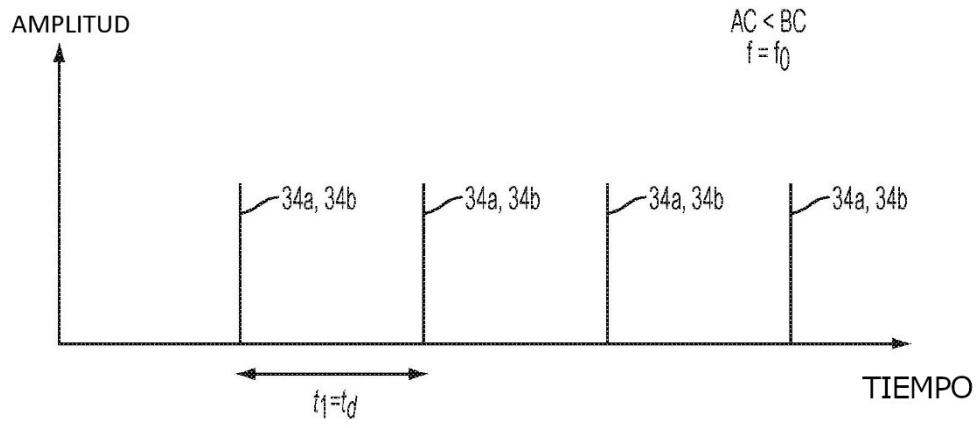
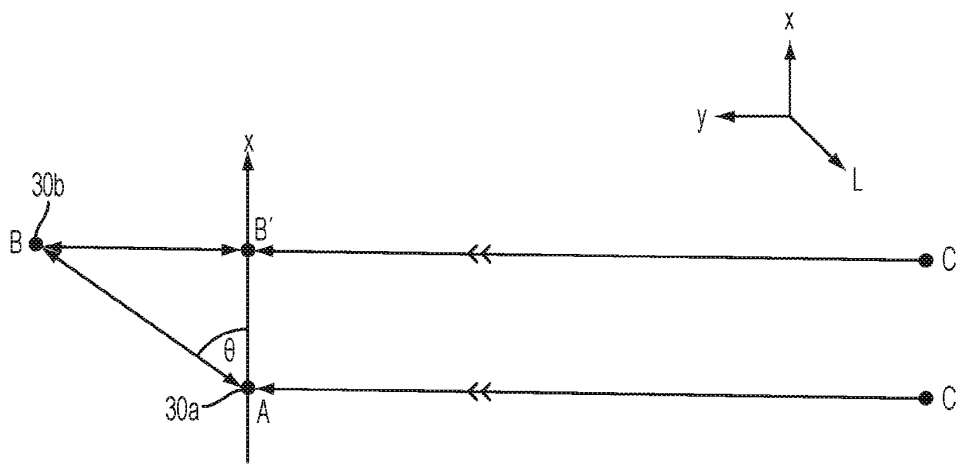
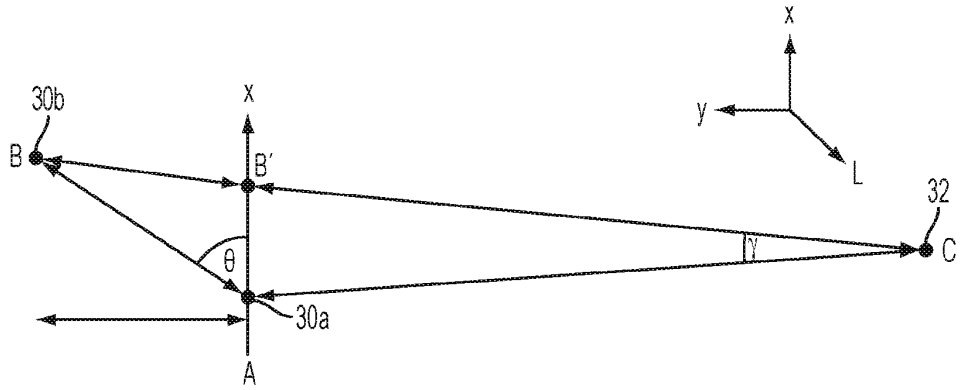


FIG. 6C



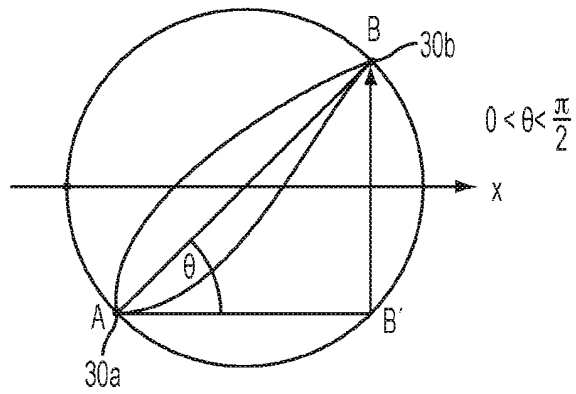


FIG. 8A

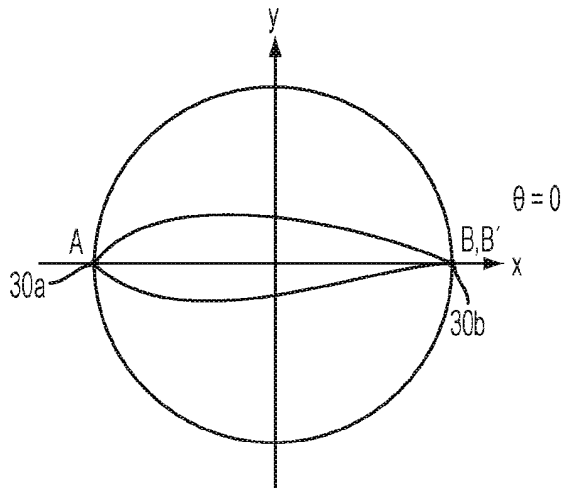


FIG. 8B

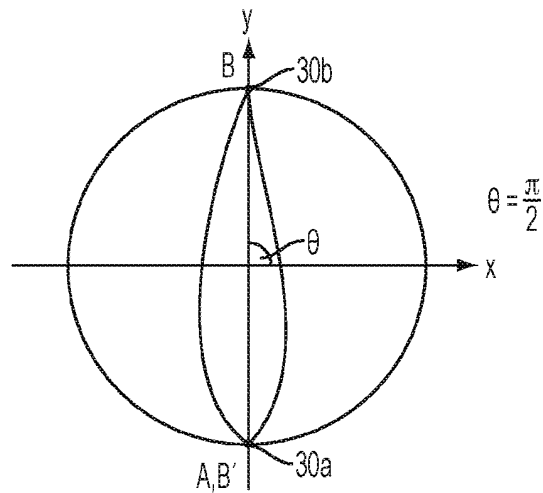


FIG. 8C