

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 626 910**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

G01P 5/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.11.2010 PCT/EP2010/068301**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.06.2011 WO11064329**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.11.2010 E 10790628 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.03.2017 EP 2507511**

54 Título: **Pala de turbina eólica dotada de sistema de medición óptico de la velocidad del viento**

30 Prioridad:

30.11.2009 EP 09177500

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

26.07.2017

73 Titular/es:

**LM WP PATENT HOLDING A/S (100.0%)
Jupitervej 6
6000 Kolding, DK**

72 Inventor/es:

**FUGLSANG, PETER;
FUGLSANG, LARS y
HAMMER, LARS CHRISTIAN HVIDEGAARD**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 626 910 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

Pala de turbina eólica dotada de sistema de medición óptico de la velocidad del viento

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende varias palas que incluyen al menos una primera
 pala de turbina eólica que se extiende de manera sustancialmente radial desde un buje en un árbol principal que
 tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo las palas junto con el buje un rotor con un plano de
 rotor, y que puede ponerse en rotación por el viento, y teniendo cada pala una parte más interior que comprende una
 sección de raíz de la pala y una parte más exterior que comprende una sección de punta de la pala, en la que la
 10 turbina eólica comprende un sistema de medición óptico que comprende una fuente de luz, tal como un láser, una
 parte de transmisor óptico, una parte de receptor óptico y un procesador de señales. La fuente de luz está
 ópticamente acoplada a la parte de transmisor óptico. La parte de transmisor óptico comprende un punto de emisión
 y está adaptada para emitir luz en una dirección de sondeo desde dicho punto de emisión. La parte de receptor
 óptico comprende un punto de recepción y un detector, en la que la parte de receptor óptico está adaptada para
 15 recibir una parte reflejada de luz desde una región de sondeo a lo largo de la dirección de sondeo en el punto de
 recepción y dirigir dicha parte reflejada de luz al detector para generar una señal a partir del detector basándose en
 la luz reflejada recibida. El procesador de señales está adaptado para determinar al menos una primera componente
 de velocidad del flujo entrante a partir de la señal generada por la parte de receptor óptico. La invención se refiere
 además a un método de hacer funcionar una turbina eólica que comprende varias palas que incluyen al menos una
 20 primera pala de turbina eólica que se extiende de manera sustancialmente radial desde un buje en un árbol principal
 que tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo las palas junto con el buje un rotor con un plano
 de rotor, y que puede ponerse en rotación por el viento, y teniendo cada pala una parte más interior que comprende
 una sección de raíz de la pala y una parte más exterior que comprende una sección de punta de la pala.

Antecedentes

25 Las turbinas eólicas modernas se usan para producir electricidad. Con frecuencia son estructuras muy grandes con
 palas de hasta, y más de, 60 metros y compuestas por estructuras de polímeros reforzados con fibra, tales como
 elementos de carcasa. Estas turbinas eólicas están dotadas de dispositivos de control que pueden impedir una
 sobrecarga de la turbina eólica y las palas con ráfagas de viento y a altas velocidades del viento. Tales dispositivos
 de control también pueden usarse para ralentizar el rotor y llevarlo a una parada completa, si la velocidad del viento
 se vuelve demasiado alta. Además de estos dispositivos, la turbina puede comprender un sistema de frenado
 30 dispuesto en comunicación con el árbol principal de la turbina eólica.

Los dispositivos de control pueden estar formados por palas controladas por cabeceo montadas en el buje de tal
 manera que pueden girar alrededor de su eje longitudinal. Por tanto, las palas pueden ajustarse de manera continua
 para proporcionar la sustentación que produce la potencia deseada. En las denominadas turbinas eólicas
 controladas por entrada en pérdida, las palas están montadas de manera fija en el buje y por tanto no pueden girar
 35 alrededor de su eje longitudinal. En este caso, las propiedades de entrada en pérdida de las palas se usan para
 reducir la sustentación aerodinámica y por tanto la salida de potencia.

Las longitudes de palas de turbina eólica han aumentado a lo largo de los años y, tal como se mencionó
 anteriormente, ahora pueden superar 60 metros. Este aumento de la longitud también conduce a un aumento de las
 40 cargas mecánicas debidas a fuertes vientos y debidas a fluctuaciones en el viento. Las cargas están provocadas
 principalmente por cambios en el flujo entrante local o turbulencia. A su vez, esto provoca cambios de presión sobre
 la superficie de la pala de turbina eólica, lo que finalmente cambia las cargas en la pala. Normalmente, las cargas se
 miden mediante el uso de extensómetros, que están montados en la pala o incrustados en la estructura de carcasa
 de una pala de este tipo. Tales extensómetros pueden, por ejemplo, ser resistivos o estar en forma de fibras ópticas,
 por ejemplo dotadas de redes de Bragg. Sin embargo, una vez detectado el efecto sobre la carga, ya es demasiado
 45 tarde para compensar completamente los cambios de la carga. Para hacerlo, se necesita de antemano información
 sobre los cambios en el flujo entrante o la turbulencia, es decir antes de que estos cambios del flujo entrante tengan
 un impacto sobre la pala de turbina eólica. Esto puede obtenerse, por ejemplo, disponiendo tubos de Pitot en el
 borde de ataque de la pala con el fin de sondear la velocidad del viento. Sin embargo, tales tubos de Pitot influyen
 sobre las características de flujo de la pala, y además los tubos de Pitot pueden actuar como receptor de rayos,
 50 atrayendo por tanto impactos de rayos potencialmente dañinos para la pala de turbina eólica. Pueden usarse
 sistemas de medición y detección de distancia por luz (LIDAR) para el sondeo no invasivo de velocidades del viento
 corriente arriba con respecto a la turbina eólica y se ha propuesto su uso en relación con compensación de errores
 de guiñada o manteniendo la velocidad de rotación del rotor sustancialmente constante sometiendo a cabeceo las
 palas de turbina eólica individuales. Normalmente se propone montar el sistema LIDAR encima de la góndola de la
 55 turbina eólica y sondea velocidades del viento en una región de sondeo ubicada a cientos de metros por delante de
 la turbina eólica.

El documento US6320272 describe una turbina eólica dotada de un sistema LIDAR encima de la góndola. El sistema

LIDAR se usa para anticipar la velocidad del viento corriente arriba con respecto a la turbina eólica y someter a cabeceo la pala con el fin de obtener una velocidad de rotación sustancialmente constante del rotor.

5 El documento US2006140764 da a conocer un sistema LIDAR montado en el buje de una turbina eólica. El sistema LIDAR tiene una dirección de observación que está inclinada con respecto al eje de rotación de modo que la rotación del buje garantiza un barrido por delante del rotor.

El documento US 2007075546 da a conocer una turbina eólica dotada de un sistema LIDAR para medir velocidades del viento por delante de una parte de una pala de turbina eólica. El sistema LIDAR está montado en el buje o en una base de la torre.

10 Sin embargo, el viento no es uniforme a lo largo de la longitud de una pala de turbina eólica debido a la turbulencia, sombra de la torre, cizalladura del viento, errores de guiñada, efectos de estela y similares. Esta falta de uniformidad provoca fuerzas variables a lo largo de las palas, lo que a su vez causa cargas de fatiga y cargas extremas sobre la turbina eólica. Estos fenómenos se vuelven incluso más pronunciados a medida que las palas de turbina eólica se vuelven cada vez más largas. Para compensar tales fluctuaciones, no es suficiente con obtener una única medida a cientos de metros por delante del rotor.

15 El documento WO2007045940 da a conocer una pala de turbina eólica que tiene un perfil aerodinámico variable. El documento menciona además que puede usarse un anemómetro por láser para medir la velocidad del viento por delante de la pala y que puede disponerse un anemómetro cerca de la punta de la pala. Sin embargo, el documento no proporciona ningún detalle sobre cómo debe montarse en la pala un anemómetro de este tipo ni dónde exactamente debe sondear el anemómetro la velocidad del viento.

20 El documento WO2004075681 da a conocer un método de control de la carga aerodinámica de una turbina eólica basándose en una medición de flujo de pala local. El documento menciona que puede usarse un anemómetro por láser con efecto Doppler para medir el ángulo de ataque instantáneo o la velocidad del viento. Sin embargo, el documento no proporciona ningún detalle sobre dónde y cómo disponer el anemómetro.

Divulgación de la invención

25 Un objeto de la invención es, tal como se define en la reivindicación 1, obtener una turbina eólica con una nueva pala, que supere o mejore al menos una de las desventajas de la técnica anterior o que proporcione una alternativa útil.

30 Según un primer aspecto de la invención, el punto de emisión de la parte de transmisor óptico está ubicado en la primera pala a una primera distancia radial del eje central, y el punto de recepción de la parte de transmisor óptico está ubicado en la primera pala a una segunda distancia radial del eje central. De esta manera, la turbina eólica facilita un sistema de medición óptico, tal como un sistema LIDAR (medición y detección de distancia por luz), para medir al menos un primer parámetro de un flujo entrante, tal como velocidad del viento o dirección del viento, localmente en la primera pala de turbina eólica. Los medios de emisión ópticos y los medios de recepción en conjunto definen una región de sondeo o volumen de sondeo, en el que puede realizarse una medición.

35 A lo largo de este documento, el flujo entrante debe entenderse como la dirección del viento aparente tal como se observa desde un punto en la primera pala, es decir, como la diferencia de vectores del vector de velocidad del viento y el vector de velocidad de rotor relativa local en la sección transversal particular en la primera pala.

40 Una parte reflejada de la luz emitida desde los medios de emisión ópticos debe entenderse como cualquier parte de la luz que vuelve hacia los medios de recepción mediante reflexión sobre aerosoles, mediante difracción, mediante dispersión elástica o inelástica, o mediante cualquier otro fenómeno físico. Como tal, no debe limitarse a la reflexión pura en un sentido óptico.

En una realización preferida, la turbina eólica comprende dos o tres palas. Preferiblemente, la turbina eólica es una turbina eólica a barlovento con un árbol sustancialmente horizontal. Según una realización ventajosa, la dirección de sondeo se dirige en una dirección corriente arriba con respecto a la primera pala de turbina eólica.

45 En una realización ventajosa, el punto de emisión está sustancialmente a nivel con una superficie de la primera pala de turbina eólica. Por tanto, el sistema de medición óptico está realmente libre de obstrucciones, ya que no se encuentra ningún saliente o indentaciones en la superficie de pala, y sólo se envía luz a la región de sondeo, sin influir por tanto sobre el flujo alrededor de una pala.

50 Según una realización ventajosa, la primera posición radial es sustancialmente idéntica a la segunda posición radial. Por tanto, la luz reflejada se recoge sustancialmente en la misma posición radial en la que se emite.

Según una realización preferida, la primera pala comprende además medios de alteración de flujo ajustables, tales como accionadores, alerones o microaletas distribuidos, para ajustar un parámetro aerodinámico de la pala y ubicados a una tercera distancia radial del buje, controlándose los medios de alteración de flujo ajustables mediante unos medios de control, y en la que los medios de control están adaptados para recibir una señal del procesador de señales, basándose la señal al menos en la primera componente de velocidad. Por tanto, los medios de alteración de flujo se ajustan en respuesta a una componente de velocidad del viento medida, pudiendo de ese modo la turbina eólica ajustar para compensar fluctuaciones en la velocidad del viento. Ventajosamente, la tercera posición radial es sustancialmente idéntica a la primera posición radial. Por tanto, los medios de alteración de flujo se ajustan localmente según una medida de velocidad del viento local.

En otra realización, la turbina eólica comprende una segunda pala de turbina eólica, y en la que la segunda pala de turbina eólica está dotada de medios de alteración de flujo ajustables, tales como accionador, alerones o microaletas distribuidos, para ajustar un parámetro aerodinámico de la segunda pala, controlándose los medios de alteración de flujo ajustables mediante unos medios de control, y en la que los medios de control están adaptados para recibir una señal del procesador de señales, basándose la señal al menos en la primera componente de velocidad. Por tanto, el parámetro aerodinámico de la segunda pala se ajusta según mediciones llevadas a cabo mediante la primera pala. Por tanto, la segunda pala puede ajustarse en consecuencia antes de encontrarse en la posición de la primera pala que adopta en el momento de llevar a cabo la medición de la velocidad del viento. Queda claro que los medios de alteración de flujo pueden estar dispuestos a una distancia radial correspondiente a la primera (o segunda) distancia radial del buje. Por tanto, los medios de alteración de flujo de la segunda pala están situados aproximadamente a la misma distancia del buje a la que se lleva la medición a partir de la primera pala.

En una realización ventajosa, el sistema de medición óptico está adaptado para sondear la componente de velocidad en un intervalo de 0,5-10 m o 0,75-8 m o 1-5 m del punto de emisión. Por tanto, queda claro que lo que se mide es, de hecho, un campo de velocidad del viento cercano, local, y que los medios de alteración de flujo deben ajustarse en el plazo de décimas de segundos con el fin de compensar las fluctuaciones.

En aún otra realización ventajosa, el punto de emisión y/o el punto de recepción de la primera pala de turbina eólica están ubicados entre un borde de ataque de la primera pala y un punto de grosor máximo en un lado de presión de la pala. El punto de emisión y/o el punto de recepción pueden estar ubicados, por ejemplo, en la proximidad del borde de ataque de la primera pala. El punto de emisión y/o el punto de recepción también pueden estar ubicados en un lado de presión de la primera pala de turbina eólica. De ese modo se garantiza que la dirección de sondeo se establece sustancialmente en una dirección a barlovento tal como se observa desde el perfil de pala.

En una primera realización, el punto de emisión durante la rotación del rotor sigue un círculo concéntrico que tiene un radio que corresponde a la primera distancia radial del eje central, y en el que la dirección de sondeo está dispuesta sustancialmente de manera tangencial al círculo concéntrico. Por tanto, el haz de sondeo se emite de manera sustancialmente tangencial desde un círculo concéntrico ubicado a la primera distancia radial del eje central. En una segunda realización, el punto de emisión durante la rotación del rotor sigue un círculo concéntrico que tiene un radio correspondiente a la primera distancia radial del eje central, y en el que el sistema óptico está adaptado para sondear velocidades del viento en un volumen de sondeo ubicado sustancialmente a la primera distancia radial del eje central. Por tanto, el sistema óptico puede sondear velocidades del viento desde una región en el mismo círculo concéntrico o desde otra región ubicada en un círculo concéntrico adicional que tiene un radio correspondiente a la primera distancia radial del eje central, estando el círculo concéntrico adicional ubicado, por ejemplo, corriente arriba con respecto al plano de rotor.

En una realización ventajosa, la dirección de sondeo se encuentra en un cuadrante entre una dirección de cuerda, observada desde el borde de ataque de la pala, y una normal perpendicular a dicha dirección de cuerda y que se extiende desde el lado de presión de la pala. Por tanto, la dirección de sondeo se establece hacia delante desde el borde de ataque de la pala y/o hacia delante desde el lado de presión de la pala. Si la dirección de cuerda se define como 0 grados y la normal como 90 grados, la dirección de sondeo se encontrará ventajosamente en un intervalo de desde 0 hasta 60 grados, o incluso más ventajosamente de 0 a 45 grados. Si se usa más de un haz de sondeo en una única sección transversal de la pala, todos los haces de sondeo pueden estar ventajosamente ubicados dentro de estos intervalos.

Según una realización ventajosa, el sistema de medición óptico está adaptado para sondear velocidades del viento en un volumen de sondeo ubicado en un plano a barlovento corriente arriba con respecto al plano de rotor. Ventajosamente, el volumen de sondeo está ubicado en el plano a barlovento a la primera distancia radial del eje central. Eligiendo de manera apropiada la distancia entre el plano a barlovento y el plano de rotor, el sistema de medición óptico puede sondear la velocidad del viento de partículas o aerosoles, con los que posteriormente impactará la pala. Por tanto, los medios de alteración de flujo pueden ajustarse de manera muy precisa con el fin de compensar las fluctuaciones de velocidad del viento que impacta contra la pala.

En una realización ventajosa según la invención, la fuente de luz está separada del punto de emisión, estando la fuente de luz ópticamente conectada al punto de emisión mediante unos medios de guiado de luz, tales como una

fibra óptica. De esta manera, una única fuente de luz puede suministrar de manera conveniente luz a múltiples medios de emisión de luz dentro de la pala. Además, la posición radial de la fuente de luz no se ve por tanto limitada a ser sustancialmente la primera distancia radial, sino que puede elegirse más libremente. Por tanto, los medios de emisión de luz pueden estar ubicados donde una fuente de luz no cabría físicamente, o donde una fuente de luz no podría funcionar de manera fiable, por ejemplo debido a la influencia mecánica del rotor rotación. Además, resulta más fácil acceder a la fuente de luz, por ejemplo si se necesita mantenimiento. En una realización preferida, los medios de guiado de luz son una fibra óptica. De esta manera, los medios de emisión de luz pueden estar eléctricamente aislados de la fuente de luz, reduciendo de ese modo en gran medida el riesgo de impactos de rayos en los medios de emisión de luz. La fuente de luz puede estar ubicada ventajosamente en el buje o en una góndola de la turbina eólica. De esta manera, puede usarse convenientemente una única fuente de luz para suministrar luz a múltiples medios de emisión de luz ubicados en diferentes palas.

La fuente de luz o los medios de guiado de luz comprenden medios de división de haz, y en los que los medios de división de haz están ópticamente conectados tanto a los medios de guiado de luz como a una segunda parte de transmisor que tiene un segundo punto de emisión a través de unos segundos medios de guiado de luz. Por tanto, se proporciona una solución sencilla para proporcionar luz a sistemas de medición ópticos separados en palas individuales o posiciones individuales en la misma pala. Alternativamente, la fuente de luz está conectada a medios de multiplexado, con el fin de suministrar luz a las diferentes partes de transmisor óptico de manera secuencial, es decir una ranura de tiempo para los primeros medios de emisión, después una ranura de tiempo para los segundos medios de emisión, etc. Por tanto, según una realización ventajosa, el punto de emisión está ubicado en una primera pala, y el segundo punto de emisión está ubicado en una segunda pala, es decir, palas de turbina eólica diferentes. En otra realización ventajosa, los puntos de emisión están ubicados en la misma pala de turbina eólica de modo que el primer punto de emisión está ubicado a una primera distancia radial del buje o eje central, y el segundo punto de emisión está ubicado a una primera distancia radial adicional del buje o eje central.

En una realización, la parte de transmisor comprende una trayectoria de transmisor para luz saliente, y la parte de receptor comprende una trayectoria de receptor para recibir la parte reflejada de luz, y en la que la trayectoria de transmisor y la trayectoria de receptor tienen una parte solapante, en la que la trayectoria de transmisor y la trayectoria de receptor son sustancialmente solapantes. Por tanto, la parte solapante puede usarse tanto para la parte de transmisor como para la parte de receptor del sistema de medición óptico, y en particular la parte solapante puede comprender el punto de emisión y el punto de recepción. Por tanto, el punto de emisión y el punto de recepción son coincidentes. Por tanto, el punto de emisión, tal como una lente de enfoque, también puede usarse para recoger la luz reflejada y guiarla hacia el detector.

Ventajosamente, un divisor de haz está dispuesto tanto en la trayectoria de transmisor entre una fuente de luz y el punto de emisión como en la trayectoria de receptor entre el punto de recepción y el detector. Por tanto, se observa que la trayectoria común se extiende desde el punto de emisión/recepción hasta el divisor de haz.

Según una primera realización ventajosa, el sistema de medición óptico es un sistema de anemometría por láser con efecto Doppler (LDA). Según una realización particularmente ventajosa, el sistema de LDA es un anemómetro de tipo Michelson. Por tanto, el divisor de haz anteriormente mencionado puede usarse para dirigir una parte de la luz entrante hacia un espejo de referencia, que posteriormente se mezcla con la luz reflejada recibida a partir de las partículas o aerosoles. El desplazamiento de frecuencia medido corresponde a la velocidad del viento en la dirección de sondeo. Cuando se usa un sistema de LDA montado sobre o en una pala de turbina eólica, debe observarse que el desplazamiento por efecto Doppler se produce parcialmente debido al movimiento de la fuente de luz, es decir a la rotación del punto de emisión junto con la pala, y debido al movimiento de las partículas o aerosoles que reflejan la luz. El desplazamiento por efecto Doppler medido corresponde a la velocidad del viento "observada" por la pala en la dirección de sondeo, es decir el flujo entrante que es una combinación de la velocidad de rotor local y la velocidad del viento.

Según otra realización, el sistema de medición óptico se basa en realimentación a la fuente de luz, es decir el láser. Por tanto, al menos una parte de la luz reflejada recibida se transmite a la fuente de luz con el fin de alterar la salida de potencia de la fuente de luz. Por tanto, el detector detecta la salida de potencia alterada, y se calcula la velocidad del viento a partir de la salida de potencia alterada.

Resulta ventajoso usar una fuente de luz coherente, por ejemplo un láser. El láser puede ser un láser de onda continua o un láser pulsado. El láser puede ser, por ejemplo, un láser de CO₂, un láser de argón o un láser de Nd:YAG. Sin embargo, el láser también puede ser un diodo de láser o un VCSEL, lo que es particularmente adecuado para unidades compactas. En principio, también puede ser suficiente usar LED u OLED en la medida en que lo permite la coherencia de tales fuentes de luz.

Los detectores pueden ser cualquier detector adecuado, tal como un fotorresistor, un tubo de fotomultiplicador, un fotodiodo o similares. El procesador de señales puede comprender ventajosamente un bucle de enganche de fase o un bucle de enganche de frecuencia, derivando de ese modo, por ejemplo, el desplazamiento por efecto Doppler de la longitud de onda de la fuente de luz.

5 La fuente de luz significa cualquier fuente de luz que es adecuada para sondear velocidades del viento, ventajosamente un láser tal como se mencionó anteriormente. La longitud de onda del haz de láser puede encontrarse en el rango ultravioleta, el rango visible o el rango infrarrojo. Por tanto, la longitud de onda puede ser cualquiera en el intervalo de desde, por ejemplo 100 nm hasta 20 μm . Sin embargo, la invención no se limita a esas longitudes de onda.

Según una realización ventajosa, el punto de recepción (o la parte de receptor del sistema de medición óptico) tiene una dirección de alta sensibilidad, y en la que la dirección de alta sensibilidad está orientada para coincidir sustancialmente con la dirección de sondeo.

10 Según otra realización ventajosa, al menos la parte de transmisor, la parte de receptor y el detector están dispuestos en una primera unidad individual en la primera pala de turbina eólica. Preferiblemente, la fuente de luz y/o el procesador de señales también están dispuestos en dicha primera unidad. Por tanto, la primera unidad puede insertarse o sustituirse fácilmente en la primera pala de turbina eólica. Sin embargo, la primera unidad también puede estar dotada de un acoplamiento de entrada para acoplar luz de entrada de la fuente de luz y/o un acoplamiento de salida para acoplar luz de salida y guiar dicha luz al detector.

15 Ventajosamente, la primera unidad puede estar dispuesta en un cojinete, tal como un tubo de manguito, en la primera pala de turbina eólica. El cojinete puede moldearse, por ejemplo, en la primera pala de turbina eólica durante la fabricación. Por tanto, la primera unidad puede sustituirse fácilmente. Además, esto significa que fibras ópticas u otras guías de ondas no tienen que moldearse en la estructura durante la fabricación. Además, el cojinete puede disponerse previamente de modo que se establece la dirección de sondeo deseada. Por tanto, no se necesita ajustar la óptica del sistema de medición óptico después de instalarla en la turbina eólica. El cojinete también puede
20 contener medios de ajuste para alinear la primera unidad según la geometría de la pala.

El cojinete puede proporcionarse, por ejemplo, como un tubo de manguito. El tubo de manguito puede estar dotado, por ejemplo, de una rosca interior, mientras que la primera unidad puede estar dotada de una rosca exterior coincidente. Alternativamente, la primera unidad puede adherirse al tubo de manguito o puede engancharse
25 mecánicamente, por ejemplo mediante tornillos, tuercas y pernos o similares. Usar un tubo de manguito hará que las fibras ópticas puedan sustituirse y de ese modo garantizará un sistema de fácil mantenimiento. Además, el tubo de manguito puede estar dotado de un pequeño grado de posibilidades de ajuste con el fin de ajustar, por ejemplo, la dirección de sondeo en el intervalo de unos pocos grados, por ejemplo hasta dos grados.

30 En una realización, la primera pala de turbina eólica está dotada además de un sistema de limpieza, que usa por ejemplo aire a presión, adaptado para despejar una superficie del punto de emisión y/o el punto de recepción. Por tanto, el sistema de limpieza puede limpiar el sistema de medición óptico, que a lo largo del tiempo puede contaminarse con partículas transportadas por el viento y debido a la rotación de la pala de turbina eólica. El sistema de limpieza puede proporcionarse, por ejemplo, en conexión con el tubo de manguito.

35 Según una realización ventajosa, el sistema de medición óptico está adaptado para emitir al menos un primer haz de sondeo y un segundo haz de sondeo. Esto puede lograrse, por ejemplo, dejando que el sistema de medición óptico comprenda dos unidades de transmisor/receptor separadas. También puede lograrse dividiendo el haz de luz en dos haces separados y emitiendo luz desde dos puntos de emisión separados. Por tanto, la luz también se recoge ventajosamente en dos puntos de recepción separados. Sin embargo, también puede ser posible emitir dos o más haces de láser desde el mismo punto de emisión, por ejemplo mediante el uso de una red óptica. Los dos haces
40 separados pueden sondear velocidades del viento en dos volúmenes de sondeo diferentes, ventajosamente ubicados en proximidad uno de otro. Por tanto, el ajuste de los medios de alteración de flujo puede llevarse a cabo según una ponderación entre dos medidas, por ejemplo el promedio entre las dos medidas, compensando por tanto la turbulencia local o fluctuaciones de la velocidad del viento.

45 En una realización, el primer haz de sondeo y el segundo haz de sondeo forman un ángulo de sondeo que se encuentra en un intervalo de 5-90 grados, o ventajosamente de 7-75 grados, o ventajosamente de 10-60 grados. Al sondear en dos direcciones diferentes, es posible derivar dos componentes de velocidad del vector de flujo entrante de velocidad del viento o de manera correspondiente una velocidad del viento en un plano y el ángulo de ataque. Al añadir una tercera dirección de sondeo, puede ser posible además derivar una tercera componente de velocidad.

50 En principio, también puede ser posible dividir la luz en dos haces de sondeo separados que se emiten desde dos puntos de emisión separados, y que se cruzan entre sí en un volumen de sondeo o volumen de medición común. De ese modo puede surgir un patrón de franjas en el volumen de sondeo, y la velocidad del viento puede medirse midiendo la frecuencia de partículas del viento que pasan a través del volumen común. Sin embargo, esta realización requiere una alta precisión de los dos haces de sondeo separados.

55 Según una realización ventajosa, el primer haz de sondeo y el segundo haz de sondeo están orientados sustancialmente en un plano en sección transversal de una sección transversal local de la pala. Por tanto, los dos

haces se emiten en el mismo plano en sección transversal del perfil de pala local. Por tanto, es posible derivar las dos componentes de velocidad en el plano en sección transversal, por ejemplo la velocidad del viento y la velocidad de rotor local, pudiendo por tanto derivar el flujo entrante exacto, tal como velocidad del viento y ángulo de ataque. El plano en sección transversal es el plano que incluye tanto la cuerda local como la curvatura local.

5 Sin embargo, la velocidad de rotor local también puede deducirse a partir de la velocidad de rotación del rotor. Por tanto, no se necesitan dos componentes de velocidad separadas. En este caso, puede resultar más apropiado usar las dos medidas de velocidad del viento separadas para calcular el promedio entre las dos medidas a partir de las dos regiones de sondeo. En este caso, evidentemente las medidas de velocidad tienen que compensar el ángulo de sondeo mutuo.

10 Cuando se usan los dos haces de sondeo para derivar dos componentes de velocidad del viento separadas, puede resultar ventajoso usar un ángulo grande entre los dos haces de sondeo, de manera ideal de 90 grados. Sin embargo, debido a motivos de construcción el ángulo de sondeo puede ser ventajosamente inferior, por ejemplo de 45-60 grados. Cuando se usan dos haces de sondeo para derivar un promedio de velocidades del viento a partir de dos volúmenes de sondeo en proximidad uno de otro, resulta ventajoso usar un ángulo de sondeo bajo, por ejemplo
15 de 5-30 grados.

20 Cuando se necesita derivar dos componentes de velocidad del viento separadas, en principio también puede ser posible usar un único haz de sondeo y dos direcciones de observación, es decir mediante un único punto de emisión y dos puntos de recepción. El ángulo entre las dos direcciones de observación puede usarse por tanto para derivar las dos componentes de velocidad. Sin embargo, resulta difícil lograr un ángulo suficientemente grande entre las direcciones de observación, ya que el volumen de sondeo debe o bien estar ubicado muy cerca de la pala de turbina eólica o bien los dos puntos de recepción deben estar muy separados, en cuyo caso también la recogida de la luz reflejada puede ser problemática.

25 Según una realización, la primera pala de turbina eólica comprende un contorno con perfil, que está dividido en la dirección radial en una región de raíz con un perfil sustancialmente circular o elíptico más próxima al buje, una región de superficie aerodinámica con un perfil de generación de sustentación más alejada del buje, y preferiblemente una región de transición entre la región de raíz y la región de superficie aerodinámica, teniendo la región de transición un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial del perfil circular o elíptico de la región de raíz al perfil de generación de sustentación de la región de superficie aerodinámica. Por tanto, la pala de turbina eólica tiene un contorno con perfil convencional en sí mismo.

30 Según una realización ventajosa, el punto de emisión está ubicado en la región de superficie aerodinámica. Preferiblemente, el punto de recepción también está ubicado en la región de superficie aerodinámica. Además, los medios de alteración de flujo también pueden estar ubicados ventajosamente en la región de superficie aerodinámica. Según una realización ventajosa, el punto de emisión y/o el punto de recepción están ubicados dentro del 75% exterior de la región de superficie aerodinámica, es decir la parte más alejada del buje. Según otra
35 realización ventajosa, el punto de emisión y/o el punto de recepción están ubicados dentro del 50% exterior de la región de superficie aerodinámica. Los diversos puntos de emisión y puntos de recepción pueden estar ubicados únicamente dentro de dichas regiones exteriores.

40 Según una realización ventajosa, la primera pala comprende una pluralidad de conjuntos de puntos de emisión, estando dichos conjuntos de puntos de emisión ubicados a diferentes distancias radiales del eje central. Cada conjunto puede comprender ventajosamente uno, dos o tres puntos de emisión. Cada conjunto de puntos de emisión corresponde a dispositivos de alteración de flujo separados. Por tanto, se proporcionan varios medios locales para controlar las prestaciones aerodinámicas locales y aliviar las cargas.

45 Los sistemas ópticos pueden alimentarse mediante unidades de fuentes de alimentación locales. Las unidades de fuentes de alimentación pueden estar ubicadas por ejemplo dentro del buje o la góndola. En una realización, la fuente de alimentación local está ubicada dentro de la primera pala de turbina eólica. Una fuente de alimentación de este tipo puede extraer energía, por ejemplo, de variaciones de masa y gravedad debidas a la rotación del rotor.

50 Según otra realización ventajosa, se proporciona un sistema óptico adicional para sondear velocidades del viento a barlovento por delante del rotor. El sistema óptico adicional puede instalarse, por ejemplo, encima de la góndola de la turbina eólica o en el buje. Este sistema puede usarse para compensar errores de guiñada, cizalladura del viento o similares o para garantizar una velocidad de rotación del rotor sustancialmente constante. Esto puede obtenerse sometiendo a cabeceo las palas individuales, por ejemplo sometiendo a cabeceo cíclico las palas. Por tanto, la invención proporciona un sistema óptico para compensar fluctuaciones del viento globales y reaccionar frente a esas fluctuaciones sometiendo a cabeceo las palas y sistemas ópticos para sondear fluctuaciones del viento locales en la proximidad de las palas de turbina eólica, compensándose estas fluctuaciones locales mediante los medios de
55 alteración de flujo locales.

5 Según una realización ventajosa, que no forma parte de la invención reivindicada, la primera pala de turbina eólica tiene una longitud de pala (L), y el punto de emisión y el punto de recepción están ubicados dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,2L a 0,9L, o ventajosamente dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,22L a 0,85L, o más ventajosamente dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,25L a 0,8L, tal como se observa desde la raíz de la primera pala. En esta notación, la raíz de pala está ubicada en la posición 0 y la punta de pala en la posición L. De ese modo, el sistema puede adaptarse fácilmente para sondear velocidades del viento por delante de la pala en las posiciones radiales de la pala que contribuyen más a la producción de energía global de la turbina eólica.

10 Según otra realización ventajosa, que no forma parte de la invención reivindicada, la primera pala de turbina eólica tiene una longitud de pala (L), y la región de sondeo está ubicada en una a posición en la que el viento impacta contra la primera pala de turbina eólica o una segunda pala de turbina eólica dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,5L a 0,9L, o ventajosamente dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,55L a 0,80L, o más ventajosamente dentro de un intervalo de longitud de pala de 0,6L a 0,75L, tal como se observa desde la raíz de la primera pala. Según aún otra realización ventajosa, el punto de emisión está ubicado dentro del mismo intervalo de longitud de pala. De ese modo, el sistema de medición óptico puede adaptarse para sondear la región en la que la pala tiene sus mayores cargas y en la que la compensación tiene su mayor efecto sobre las fluctuaciones de cargas.

15 La primera pala de turbina eólica puede someterse a cabeceo, y el sistema de medición óptico comprende medios de compensación para compensar un ángulo de cabeceo de la primera pala. En una primera realización sencilla, los medios de compensación pueden ser simplemente medios computacionales, que compensan la medida de velocidad del viento dependiendo del ángulo de cabeceo de la primera pala de turbina eólica. También pueden usarse medios computacionales para compensar variaciones en la velocidad de rotación del rotor, influyendo por tanto sobre el ángulo de ataque local y la velocidad del viento percibida por una sección de pala radial.

20 Según otra realización ventajosa, la primera pala de turbina eólica puede someterse a cabeceo, y la dirección de sondeo es variable dependiendo de un ángulo de cabeceo de la primera pala. De ese modo es posible, por ejemplo, ajustar la dirección de sondeo de modo que la región de sondeo no cambia a pesar de que se cambia el cabeceo de pala y/o con el fin de maximizar la resolución de las velocidades del viento sondeadas. De manera similar, la dirección de sondeo puede ser variable dependiendo de una velocidad de rotación del rotor.

25 Se reconoce que la dirección de sondeo puede variarse de muchas maneras diferentes. La mayor parte de la parte de transmisión del sistema de medición óptico puede estar contenida, por ejemplo, en una única unidad, y en la que esta unidad es variable en cuanto al ángulo con respecto a la primera pala de turbina eólica. En otra realización, el sistema de medición óptico está adaptado para variar una posición de luz entrante en una lente de transmisión. La lente de transmisión puede ser, por ejemplo, una lente ubicada en el punto de emisión del sistema de medición óptico, y la posición de luz entrante puede variarse, por ejemplo, en cuanto al ángulo o la posición cambiando la posición de la fuente de luz. En una realización, esto se obtiene moviendo la propia fuente de luz, y en otra realización, esto se obtiene moviendo la posición del extremo de emisión de una fibra óptica. En una realización alternativa o complementaria, el sistema óptico está adaptado para variar una posición de una lente de transmisión. De ese modo, la lente puede moverse, por ejemplo, en una dirección sustancialmente transversal de la luz entrante.

30 Según un segundo aspecto, tal como se expone en la reivindicación 12, la invención proporciona un método, en el que el método comprende las etapas de: a) emitir luz en una dirección de sondeo desde un punto de emisión en la primera pala de turbina eólica, estando dicho punto de emisión ubicado a una primera distancia radial del eje central, b) recibir una parte reflejada de luz desde una región de sondeo a lo largo de la dirección de sondeo en un punto de recepción ubicado en la primera pala de turbina eólica en una ubicación a una segunda distancia radial del eje central, c) dirigir dicha parte reflejada de luz a un detector, d) generar una señal basándose en luz detectada en la etapa c), y e) calcular una primera componente de velocidad basándose en la señal de la etapa d). Tal como se mencionó anteriormente, la segunda distancia radial corresponde preferiblemente a la primera distancia radial.

35 45 En una realización ventajosa, el método comprende además la etapa de: f) ajustar medios de alteración de flujo ajustables en la primera pala de turbina eólica con el fin de ajustar unas características aerodinámicas de la primera pala de turbina eólica, estando los medios de alteración de flujo ajustables ubicados a una tercera distancia radial del eje central. Tal como se mencionó anteriormente, la tercera distancia radial corresponde preferiblemente a la primera distancia radial.

50 En otra realización ventajosa, el método comprende además la etapa de ajustar la dirección de sondeo dependiendo de un ángulo de cabeceo de la primera pala de turbina eólica y/o una velocidad de rotación del rotor.

Evidentemente, el método también puede aplicarse a cualquiera de las realizaciones anteriormente mencionadas de la turbina eólica.

Breve descripción de los dibujos

La invención se explica en detalle a continuación con referencia a una realización mostrada en los dibujos, en los que

la figura 1 muestra una turbina eólica,

la figura 2 muestra una vista esquemática de un perfil de superficie aerodinámica,

5 la figura 3 muestra una vista esquemática de velocidades de flujo y fuerzas aerodinámicas en un perfil de superficie aerodinámica,

la figura 4 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica dotada de sistemas de medición ópticos locales y medios de alteración de flujo locales correspondientes,

10 las figuras 5a-c muestran vistas en sección transversal de realizaciones con diferentes disposiciones de los sistemas de medición locales,

las figuras 6a-d muestran vistas esquemáticas de rotores con diferentes direcciones de sondeo,

la figura 7 muestra una vista esquemática de una turbina eólica en la que el sistema de medición óptico sondea velocidades del viento en una región de sondeo ubicada por delante del plano de rotor,

15 la figura 8 muestra una vista esquemática de un rotor de turbina eólica dotado de una fuente de láser ubicada de manera central,

las figuras 9a y 9b muestran vistas esquemáticas de una primera y una segunda realización de un sistema de anemometría por láser con efecto Doppler, respectivamente,

la figura 10 muestra una vista esquemática de un sistema de anemometría por láser con efecto Doppler que comprende dos haces de sondeo,

20 las figuras 11a-g muestran diversas realizaciones de dispositivos de alteración de flujo, y

la figura 12 muestra una primera realización, en la que la dirección de sondeo es variable,

la figura 13 muestra una primera realización, en la que la dirección de sondeo es variable, y

la figura 14 muestra una primera realización, en la que la dirección de sondeo es variable.

Descripción detallada de la invención

25 La figura 1 ilustra una turbina eólica de eje horizontal a barlovento moderna, convencional, según el denominado "diseño danés" con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un árbol de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un buje 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el buje 8, que tienen, cada una, una raíz 16 de pala más cerca del buje y una punta 14 de pala más alejada del buje 8.

30 La figura 2 muestra una vista esquemática de un perfil 50 de superficie aerodinámica de una pala típica de una turbina eólica representada con los diversos parámetros que se usan normalmente para definir la forma geométrica de una superficie aerodinámica. El perfil 50 de superficie aerodinámica tiene un lado 52 de presión y un lado 54 de succión, que, durante el uso (es decir, durante la rotación del rotor) se dirigen normalmente hacia el lado a barlovento y el lado a sotavento, respectivamente. La superficie 50 aerodinámica tiene una cuerda 60 con una longitud c de cuerda que se extiende entre un borde 56 de ataque y un borde 58 de salida de la pala. La superficie 35 50 aerodinámica tiene un grosor t , que se define como la distancia entre el lado 52 de presión y el lado 54 de succión. El grosor t de la superficie aerodinámica varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación con respecto a un perfil simétrico viene dada por una línea 62 de curvatura, que es una línea media a través del perfil 50 de superficie aerodinámica. La línea media puede encontrarse dibujando círculos inscritos desde el borde 56 de ataque hasta el borde 58 de salida. La línea media sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia desde la cuerda 60 se denomina curvatura f . La asimetría también puede definirse mediante el uso de parámetros denominados curvatura superior y curvatura inferior, que se definen como las distancias desde la cuerda 60 y el lado 40 54 de succión y el lado 52 de presión, respectivamente.

Los perfiles de superficie aerodinámica se caracterizan con frecuencia mediante los siguientes parámetros: la longitud c de cuerda, la curvatura f máxima, la posición d_f de la curvatura f máxima, el grosor t de superficie 45 aerodinámica máximo, que es el mayor diámetro de los círculos inscritos a lo largo de la línea 62 de curvatura

media, la posición d_t del grosor t máximo, y un radio de nariz (no mostrado). Estos parámetros se definen normalmente como razones con respecto a la longitud c de cuerda.

La figura 3 muestra una vista esquemática de velocidades de flujo y fuerzas aerodinámicas en el perfil 50 de superficie aerodinámica. El perfil de superficie aerodinámica está ubicado en la posición radial o radio r del rotor del que forma parte la pala, y el perfil se establece a un ángulo θ de torsión o de cabeceo dado. Una velocidad V_a de corriente libre axial, que según la teoría de manera óptima se proporciona como 2/3 de la velocidad v_w del viento, y una velocidad $r \cdot \omega$ tangencial, que está orientada en una dirección 64 de rotación para el rotor, combinadas forman una velocidad V_r resultante. Junto con la línea 60 de cuerda, la velocidad V_r resultante define un ángulo de flujo entrante, ϕ a partir del cual puede deducirse el ángulo α de ataque.

Cuando el perfil 50 de superficie aerodinámica recibe el impacto de un flujo de aire incidente, se genera una sustentación 66 perpendicular a la velocidad V_r resultante. Al mismo tiempo, la superficie aerodinámica se ve afectada por una resistencia 68 aerodinámica orientada en la dirección de la velocidad V_r resultante. Conociendo la sustentación y la resistencia aerodinámica para cada posición radial se vuelve posible calcular la distribución de fuerzas 70 aerodinámicas resultantes a lo largo de toda la longitud de la pala. Estas fuerzas 70 aerodinámicas están divididas normalmente en dos componentes, a saber una distribución de fuerza 74 tangencial (en el plano de rotación del rotor) y un empuje 72 orientado en un ángulo recto con respecto a la fuerza 74 tangencial. Además, la superficie aerodinámica se ve afectada por un coeficiente 75 de momento.

El par motor de accionamiento del rotor puede calcularse integrando la fuerza 74 tangencial a lo largo de toda la longitud radial de la pala. El par motor de accionamiento junto con la velocidad de rotación del rotor proporciona la potencia de rotor global para la turbina eólica. Integrar el empuje 72 local a lo largo de toda la longitud de la pala proporciona el empuje de rotor total, por ejemplo en relación con la torre.

Si la velocidad del viento cambia o se producen fluctuaciones en la velocidad del viento local, el triángulo de velocidades se ve influido y por tanto también se ve influida la sustentación y las fuerzas (o cargas) que influyen sobre el perfil de pala. Las fluctuaciones de cargas pueden aliviarse usando dispositivos de alteración de flujo activos, que, por ejemplo, pueden cambiar la curvatura global del perfil local o que pueden alterar el coeficiente de sustentación, reajustando de ese modo el triángulo de velocidades (v_r , v_a , $r \cdot \omega$) y el triángulo de fuerzas (70, 72, 74). Sin embargo, para hacer esto, se necesita conocer información sobre los cambios o fluctuaciones de la velocidad del viento antes de que el flujo impacte realmente sobre el perfil 50 de pala local con el fin de compensarlos con suficiente rapidez.

La figura 4 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala 10 de turbina eólica según la invención. La pala 10 de turbina eólica tiene la forma de una pala de turbina eólica convencional y comprende una región 30 de raíz más cerca del buje, una región 34 de superficie aerodinámica o con perfil más alejada del buje y una región 32 de transición entre la región 30 de raíz y la región 34 de superficie aerodinámica. La pala 10 comprende un borde 18 de ataque orientado en el sentido de rotación de la pala 10 cuando la pala está montada en el buje, y un borde 20 de salida orientado en el sentido opuesto al borde 18 de ataque.

La región 34 de superficie aerodinámica (también denominada región con perfil) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de sustentación, mientras que la región 30 de raíz, debido a consideraciones estructurales, tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, lo que, por ejemplo, hace más fácil y más seguro montar la pala 10 en el buje. El diámetro (o la cuerda) de la región 30 de raíz es normalmente constante a lo largo de todo el área 30 de raíz. La región 32 de transición tiene un perfil 42 de transición que cambia gradualmente de la forma 40 circular o elíptica de la región 30 de raíz al perfil 50 de superficie aerodinámica de la región 34 de superficie aerodinámica. La anchura de la región 32 de transición aumenta normalmente de manera sustancialmente lineal al aumentar la distancia r desde el buje.

La región 34 de superficie aerodinámica tiene un perfil 50 de superficie aerodinámica con una cuerda que se extiende entre el borde 18 de ataque y el borde 20 de salida de la pala 10. La anchura de la cuerda disminuye al aumentar la distancia r desde el buje.

Debe observarse que las cuerdas de diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, ya que la pala puede estar torcida y/o curvada (es decir, curvatura previa), proporcionando por tanto al plano de cuerda un recorrido correspondientemente torcido y/o curvado, siendo este el caso con la mayor frecuencia para compensar que la velocidad local de la pala depende del radio desde el buje.

La pala 10 de turbina eólica según la invención está dotada de un primer sistema de medición óptico o sistema 80 de anemómetro por láser con efecto Doppler (LDA), que cuando la pala 10 de turbina eólica está montada en el buje se encuentra ubicado a una primera distancia r_1 radial de un eje 15 central del rotor y por tanto también a una primera distancia del buje. La pala de turbina eólica está dotada además de un segundo sistema 81 de anemómetro por láser con efecto Doppler ubicado a una segunda distancia r_2 radial del eje central del rotor así como un tercer

sistema 82 de anemómetro por láser con efecto Doppler ubicado a una segunda distancia r_2 radial del eje central del rotor. Los tres sistemas 80, 81, 82 por láser con efecto Doppler están operativamente conectados a un primer dispositivo 90 de alteración de flujo, un segundo dispositivo 91 de alteración de flujo y un tercer dispositivo 92 de alteración de flujo, respectivamente. En la realización representada, los dispositivos 90, 91, 92 de alteración de flujo son alerones montados en la superficie, que pueden desplegarse según la medida de velocidad del viento obtenida por los sistemas 80, 81, 82 por láser con efecto Doppler con el fin de ajustar el triángulo de velocidades y el triángulo de cargas tal como se describió con relación a la figura 3. Cada sistema 80, 81, 82 de LDA puede comprender uno, dos o tres haces de sondeo para medir velocidades del viento en uno, dos o tres volúmenes de sondeo, respectivamente.

Las figuras 5a-c muestran diversas realizaciones de palas de turbina eólica dotadas de sistemas de LDA en diferentes configuraciones. Por motivos de claridad, los dispositivos de alteración de flujo no se representan en estas figuras.

La figura 5a muestra una vista en sección transversal de una primera realización de una pala 110 de turbina eólica dotada de un sistema 180 de LDA. El sistema 180 de LDA está dispuesto con un punto 185 de emisión cerca del borde de ataque de la pala. El sistema 180 de LDA emite un haz 186 de sondeo a lo largo de una dirección de sondeo y sondea velocidades del viento en una región 187 de sondeo o un volumen de sondeo ubicado sustancialmente corriente arriba con respecto a la sección transversal de pala de turbina eólica. El haz 186 de sondeo se centra a una distancia f_L del punto 185 de emisión. La región 187 de sondeo se representa en este caso como que es sustancialmente esférica. Sin embargo, en la práctica la región de sondeo, que normalmente se define como la región de la anchura completa a la mitad de la intensidad máxima (FWHM), está alargada en la región de sondeo. La región de sondeo es normalmente más larga cuando aumenta la longitud f_L focal. En esta realización, la dirección de sondeo se establece en una dirección, en la que el haz de sondeo se emite en una dirección desde el borde de ataque y ligeramente hacia el lado de presión de la pala 110. Las partículas o aerosoles que pasan a través de la región 187 de sondeo retrodispersan o reflejan la luz. Esta luz reflejada se recoge por el sistema 180 de LDA en un punto 185 de recepción. Habitualmente, el punto de emisión y el punto de recepción son coincidentes, por ejemplo delimitados por una ventana o una lente, que se usa para enfocar el haz 186 de sondeo y recoger la luz reflejada.

La figura 5b muestra una vista en sección transversal de una segunda realización de una pala 210 de turbina eólica en la que números iguales se refieren a partes iguales de la primera realización mostrada en la figura 5a. En esta realización particular, la pala 210 de turbina eólica está dotada de dos sistemas 280, 280' de LDA en la misma sección transversal. Un primer sistema 280 de LDA está dispuesto con un punto 285 de emisión cerca del borde de ataque de la pala. El primer sistema 280 de LDA emite un haz 286 de sondeo a lo largo de una dirección de sondeo dirigida desde el borde de ataque y orientada sustancialmente en continuación de una cuerda 260 del perfil en sección transversal local y sondea velocidades del viento en una región 287 de sondeo o un volumen de sondeo ubicado por delante del borde de ataque del perfil. Un segundo sistema 280' de LDA está dispuesto con un punto 285' de emisión en el lado de presión del perfil. El segundo sistema 280' de LDA emite un haz 286' de sondeo a lo largo de una dirección de sondeo y sondea velocidades del viento en una región 287' de sondeo o un volumen de sondeo ubicado por delante del borde de ataque del perfil y en el lado de presión de la pala 210, es decir normalmente desde un plano corriente arriba con respecto al plano de rotor. El ángulo entre los dos haces 286, 286' de sondeo se designa como δ .

Se observa que ambos puntos 285, 285' de emisión están ubicados en una región entre el borde de ataque y la posición de grosor máximo en el lado de presión de la pala, véanse también las definiciones dadas con relación a la figura 2. En el sistema de coordinación, cuando la dirección de emisión desde el borde de ataque en continuación directa de la cuerda 260 se define como 0 grados y una normal 288 con respecto a la cuerda en el lado de presión de la pala se define como 90 grados, el punto de emisión y la dirección de sondeo se encuentran ventajosamente en el cuadrante entre 0 y 90 grados. Más ventajosamente, la dirección de sondeo se encuentra entre 0 y 60 grados, o incluso más ventajosamente de 0 a 45 grados.

Las realizaciones mostradas en las figuras 5a y 5b se usan para sondear velocidades del viento a barlovento del perfil en sección transversal local de la primera pala de turbina eólica. Basándose en estas mediciones, se controlan dispositivos de guiado de flujo local de la primera pala de turbina eólica (no mostrados). Los sistemas de LDA están ventajosamente adaptados para sondear la componente de velocidad en una región de sondeo ubicada en el intervalo de 0,5-10 m o 0,75-8 m o 1-5 m de los puntos de emisión. Por tanto, los sistemas sondean de hecho velocidades del viento locales y fluctuaciones del viento.

Sin embargo, también pueden usarse medidas de velocidad del viento para controlar dispositivos de guiado de flujo de una segunda pala de turbina eólica. En esta situación, puede desearse sondear, en vez de eso, velocidades del viento en regiones de sondeo ubicadas corriente arriba con respecto a la segunda pala de turbina eólica. Un ejemplo de una realización de este tipo se representa en la figura 5c que muestra el perfil de sección transversal de una pala 910 de turbina eólica. Un primer sistema 980 de LDA está dispuesto con un punto 985 de emisión cerca del borde de salida de la pala. El primer sistema 980 de LDA emite un haz 986 de sondeo a lo largo de una dirección de sondeo

dirigida desde el borde de salida y orientada sustancialmente en continuación de una cuerda 260 del perfil en sección transversal local y sondea velocidades del viento en una región 987 de sondeo o un volumen de sondeo ubicado por detrás del borde de ataque del perfil. Un segundo sistema 980' de LDA está dispuesto con un punto 985' de emisión en el lado de presión del perfil. El segundo sistema 980' de LDA emite un haz 986' de sondeo a lo largo de una dirección de sondeo y sondea velocidades del viento en una región 987' de sondeo o un volumen de sondeo ubicado por detrás del borde de salida del perfil y en el lado de presión de la pala 910, es decir normalmente desde un plano corriente arriba con respecto al plano de rotor. El ángulo entre los dos haces 986, 986' de sondeo se designa como δ . En esta realización, el intervalo f_L de sondeo puede ser ventajosamente mayor que el intervalo de sondeo de las realizaciones mostradas en las figuras 5a y 5b. Las regiones 987, 987' de sondeo pueden estar ventajosamente ubicadas dentro del intervalo de 0,5 m a 15 m de la segunda pala.

Las figuras 6a-d muestran diversas direcciones de sondeo posibles para un sistema de LDA ubicado en una pala de turbina eólica.

La figura 6a muestra una primera realización que ilustra una posible dirección de sondeo del sistema. Durante la rotación del rotor un sistema 380 de LDA ubicado dentro de una pala de turbina eólica del rotor sigue un movimiento a lo largo de un círculo 325 concéntrico que tiene un radio desde un eje 315 central del rotor. En esta realización, el sistema 380 de LDA emite un haz (o haces) de sondeo en el plano en sección transversal del perfil local en el sistema 380 de LDA. Por tanto, los haces de sondeo se dirigen de manera tangencial con respecto al círculo 325 concéntrico. La región de sondeo está ubicada a un segundo radio desde el eje central en un segundo círculo 325' concéntrico. Por tanto, la parte de la pala, que de hecho impacta contra las partículas de viento en la región de sondeo, puede estar ubicada a este segundo radio en la pala. Por tanto, los dispositivos de alteración de flujo pueden estar ubicados ventajosamente a este segundo radio o desplazarse hacia el segundo radio.

La figura 6b muestra una segunda realización que ilustra una posible dirección de sondeo del sistema. Durante la rotación del rotor un sistema 480 de LDA ubicado dentro de una pala de turbina eólica del rotor sigue un movimiento a lo largo de un círculo 425 concéntrico que tiene un radio desde un eje 415 central del rotor. En esta realización, el sistema 480 de LDA emite un haz (o haces) de sondeo en una dirección hacia dentro fuera del plano en sección transversal del perfil local en el sistema 480 de LDA. La región de sondeo está ubicada, en esta realización, a la misma distancia radial del eje 415 central que el punto de emisión. Por tanto, el sistema puede sondear de manera más precisa las velocidades del viento de partículas con las que impacta de hecho la sección de pala local.

La figura 6c muestra una tercera realización que ilustra una posible dirección de sondeo del sistema correspondiente a la realización mostrada en la figura 5c. Durante la rotación del rotor un sistema 1080 de LDA ubicado dentro de una primera pala 1010 de turbina eólica del rotor sigue un movimiento a lo largo de un círculo 1025 concéntrico que tiene un radio desde un eje 1015 central del rotor. En esta realización, el sistema 1080 de LDA emite un haz (o haces) de sondeo en una dirección hacia dentro fuera del plano en sección transversal del perfil local en el sistema 1080 de LDA. El/los haz/haces de sondeo se emite(n) desde una ubicación en la proximidad del borde de salida de la primera pala 1010 y la región de sondeo está ubicada por delante del borde de ataque de una segunda pala 1010' de turbina eólica. La región de sondeo está ubicada, en esta realización, a la misma distancia radial del eje 1015 central que el sistema 1080 de LDA. La dirección de sondeo también puede ser sustancialmente tangencial al círculo 1025 concéntrico.

La figura 6d muestra una cuarta realización que ilustra una posible dirección de sondeo del sistema. Durante la rotación del rotor un sistema de LDA ubicado dentro de una pala de turbina eólica del rotor sigue un movimiento a lo largo de un primer círculo concéntrico, mientras que la región de sondeo está ubicada en un segundo círculo concéntrico que tiene un radio más pequeño que el primer círculo concéntrico. En la realización ilustrada, la dirección de observación y la región de sondeo están ubicadas de modo que la dirección de observación está dirigida de manera sustancialmente tangencial al segundo círculo concéntrico. Sin embargo, se reconoce que el sistema de LDA puede estar ubicado más hacia dentro o más hacia fuera de la pala.

El sistema de LDA puede sondear ventajosamente velocidades del viento desde una región de sondeo ubicada corriente arriba con respecto al, es decir por delante del, plano de rotor. Esta situación se representa en la figura 7. Durante la rotación del rotor, un sistema de LDA ubicado dentro de una primera pala de turbina eólica del rotor sigue un movimiento a lo largo de un círculo concéntrico dentro de un plano 1125 de rotor. La región de sondeo está ubicada en un segundo plano 1127 ubicado corriente arriba con respecto al plano de rotor.

En las realizaciones anteriormente mostradas, los sistemas de LDA se representan como una única unidad dentro de la pala. Sin embargo, también se contemplan realizaciones en las que la fuente de luz, es decir la fuente de láser, está ubicada dentro del buje o dentro de la góndola de la turbina eólica. Una realización de este tipo se representa en la figura 8. Una o más fuentes 585 de láser están ubicadas dentro del buje de un rotor. La luz de láser de la fuente de láser se divide en varios haces separados, que se dirigen a puntos de emisión dentro de las palas de turbina eólica del rotor, por ejemplo a través de fibras ópticas. Un haz se divide en varios haces separados mediante un divisor 586 de haz o alternativamente una unidad de multiplexado. La luz dividida se guía a una primera unidad 580 de LDA a través de una primera fibra 587 óptica, a una segunda unidad 581 de LDA a través de una segunda

fibra 588 óptica, y una tercera unidad 582 de LDA a través de una tercera fibra 589 óptica. En esta realización, las unidades 580, 581, 582 de LDA emiten haces de sondeo (no mostrados) desde un punto de emisión en la proximidad del borde de ataque de la pala de turbina eólica. Las velocidades del viento medidas por la primera unidad 580 de LDA se usan para controlar un primer dispositivo 590 de alteración de flujo, las velocidades del viento medidas por la segunda unidad 581 de LDA se usan para controlar un segundo dispositivo 591 de alteración de flujo, y las velocidades del viento medidas por la tercera unidad 581 de LDA se usan para controlar un tercer dispositivo 592 de alteración de flujo con el fin de aliviar fluctuaciones de cargas locales.

La figura 9a muestra una primera realización de una unidad 680 de LDA que puede usarse para la invención. La unidad 680 de LDA comprende unos medios 674 de fuente de luz que incluyen, por ejemplo, un diodo de láser y una lente condensadora. La luz emitida desde los medios 674 de fuente de luz se dirige a un divisor 675 de haz, que divide la luz en un haz de referencia, que se guía a un espejo 676 de referencia, y un haz de sondeo, que se envía a través de un sistema 677 de lente y opcionalmente una ventana 678, que por tanto constituye el punto de emisión de la unidad 680 de LDA. En una realización alternativa, una lente del sistema 677 de lente puede constituir el punto de emisión. La luz reflejada por partículas o aerosoles que pasan a través del volumen de sondeo se refleja o se retrodispersa y se recoge a través de la ventana 678, que entonces pasa a través del sistema 677 de lente y al divisor 675 de haz, en el que la luz reflejada se mezcla con el haz de referencia. La luz mezclada se detecta mediante un fotodetector 679. Se observa que el sistema corresponde a un sistema de anemometría por láser con efecto Doppler basado en Michelson, en el que el desplazamiento por efecto Doppler detectado depende de la velocidad de las partículas que pasan a través del volumen de sondeo. La señal procedente del fotodetector 679 se envía a un amplificador 693, y desde el amplificador 693 hacia un procesador 694 de señales, por ejemplo que comprende un bucle de enganche de fase o un bucle de enganche de frecuencia. La señal del procesador 694 de señales se envía a una salida 695 eléctrica, que puede usarse para controlar los dispositivos de alteración de flujo correspondientes.

La figura 9b muestra una segunda realización de una unidad 780 de LDA que puede usarse para la invención y en la que números iguales corresponden a partes iguales de la unidad de LDA mostrada en la figura 9a. La unidad 780 de LDA comprende unos medios 774 de fuente de luz que incluyen un acoplamiento de entrada para luz procedente de un láser central, por ejemplo tal como se muestra en la figura 8, y una lente condensadora. La luz emitida desde los medios 774 de fuente de luz se dirige a un divisor 775 de haz, que divide la luz en un haz de referencia, que se guía a un espejo 776 de referencia, y un haz de sondeo, que se envía a través de un sistema 777 de lente y opcionalmente una ventana 778, que por tanto constituye el punto de emisión de la unidad 780 de LDA. En una realización alternativa, una lente del sistema 777 de lente puede constituir el punto de emisión. La luz reflejada por partículas o aerosoles que pasan a través del volumen de sondeo se refleja o retrodispersa y se recoge a través de la ventana 778, que entonces pasa a través del sistema 777 de lente y al divisor 775 de haz, en el que la luz reflejada se mezcla con el haz de referencia. La luz mezclada se detecta por un fotodetector 779. Se observa que el sistema corresponde a un sistema de anemometría por láser con efecto Doppler basado en Michelson, en el que el desplazamiento por efecto Doppler detectado depende de la velocidad de las partículas que pasan a través del volumen de sondeo. La señal procedente del fotodetector 779 se envía a un amplificador 793, y desde el amplificador 793 a un procesador 794 de señales, por ejemplo que comprende un bucle de enganche de fase o un bucle de enganche de frecuencia. La señal del procesador 794 de señales se envía a una salida 795 eléctrica, que puede usarse para controlar los dispositivos de alteración de flujo correspondientes.

Tal como se mencionó anteriormente, las figuras 5a y 5b muestran realizaciones que usan dos haces de sondeo en el mismo perfil con sección transversal de la pala de turbina eólica, y en las que los haces de sondeo se generan mediante unidades de LDA separadas. Sin embargo, también es posible generar dos o más haces de sondeo a partir de una única unidad de LDA. Una realización de este tipo se muestra en la figura 10. En esta realización, un haz entrante se divide en dos haces separados, por ejemplo usando un prisma 896 de Wollaston, generando por tanto un primer haz y un segundo haz. El primer y el segundo haz pueden enviarse ventajosamente cada uno a un segundo divisor 875 de haz, que divide el haz en un haz de referencia, que se envía a un espejo 876 de referencia, y un haz de sondeo, que puede enviarse a través de un sistema de lente y al punto de emisión (ahora mostrado). En una realización alternativa, el haz entrante se divide en haces separados mediante una red. Si se necesitan dos haces de sondeo, puede ser posible, por ejemplo, usar el haz de orden cero y uno de los haces de primer orden y suprimir los otros órdenes, o alternativamente usar un haz de primer orden y un haz de segundo orden y suprimir el resto. Si se necesitan tres haces de sondeo, puede ser posible usar el haz de orden cero y ambos haces de primer orden.

Las figuras 11a-g muestran diversas realizaciones de dispositivos de alteración de flujo adecuados para la invención. Los alerones son un tipo de medios de alteración de flujo, que son muy adecuados para ajustes rápidos de las propiedades aerodinámicas del perfil local. Los alerones pueden implementarse de diversas maneras. Tal como se muestra en la figura 11a, los alerones pueden implementarse como alerones montados en la superficie, que, cuando se despliegan, sobresalen desde la superficie del perfil de pala. Un alerón también puede proporcionarse como un elemento separado tal como se muestra en la figura 11b, que puede moverse por rotación y/o traslación con respecto a la propia pala. Por tanto, el perfil de pala es un perfil de múltiples elementos. Alternativamente, el alerón puede implementarse como un alerón con curvatura tal como se muestra en la figura 11c, que puede usarse para

cambiar la línea de curvatura del perfil de pala. También es posible usar microaletas tal como se muestra en la figura 11d colocadas en las superficies superior y/o inferior del perfil local. Tales dispositivos de alteración de flujo pueden desplegarse muy rápidamente de modo que sobresalen desde la superficie de la pala.

5 Los medios de alteración de flujo también pueden comprender varios orificios de ventilación para el soplado o la succión entre un interior de la pala y un exterior de la pala. Los orificios de ventilación se aplican ventajosamente al lado de succión de la pala tal como se muestra en las figuras 11e y 11f. Los orificios de ventilación pueden usarse para crear una banda de flujo adherido. El aire que penetra desde los orificios de ventilación puede usarse para energizar y volver a energizar la capa de límite con el fin de mantener el flujo adherido a la superficie exterior de la pala tal como se muestra en la figura 11f. Alternativamente, los orificios de ventilación pueden usarse para la succión tal como se muestra en la figura 11e, mediante lo cual el flujo de bajo momento en la capa de límite se retira y el flujo restante vuelve a energizarse de ese modo y se atrae hacia la superficie de la pala.

También es posible usar una aleta de borde de ataque tal como se muestra en la figura 11 g. La aleta de borde de ataque puede estar conectada a la pala de tal manera que puede moverse por rotación y/o traslación con relación al perfil de pala local.

15 La figura 12 muestra una vista en sección transversal de una primera realización de una pala 1210 de turbina eólica dotada de un sistema 1280 de LDA que tiene una dirección de sondeo variable. En esta realización, el sistema 1280 de LDA es variable con respecto a la sección de pala local. De ese modo, también puede variarse una posición de un volumen 1287 de sondeo con respecto a la sección de pala local. De ese modo, es posible compensar un cambio en el ángulo de cabeceo de pala y/o la velocidad de rotación del rotor. Si se varía, por ejemplo, el cabeceo de pala con un ángulo θ , la dirección de sondeo puede variarse de igual manera con un ángulo correspondiente con el fin de compensar el cambio de cabeceo.

25 Se reconoce que el ángulo de sondeo puede variarse de diversas maneras. Tal como se muestra en la figura 13, es posible, por ejemplo, variar la posición (o ángulo) de luz entrante en una lente de transmisión ubicada en el punto de emisión del sistema de medición óptico. Esto puede obtenerse, por ejemplo, moviendo una fuente de luz, por ejemplo un diodo de láser o el extremo de transmisión de una fibra óptica, en una dirección sustancialmente transversal con respecto a la luz entrante (o la lente de transmisión). Alternativamente, o además de ello, es posible variar la posición de la lente de transmisión con respecto a la luz entrante tal como se muestra en la figura 14, por ejemplo moviendo la lente de transmisión en una dirección sustancialmente transversal con respecto a la luz entrante.

30 La invención se ha descrito con referencia a una realización preferida. Sin embargo, el alcance de la invención no se limita a las realizaciones ilustradas, y pueden llevarse a cabo alteraciones y modificaciones sin desviarse del alcance de la invención, que se define por las reivindicaciones.

Lista de números de referencia

	2	turbina eólica
35	4	torre
	6	góndola
	8	buje
	10, 110, 210, 1010, 1010', 1210	pala
	14	punta de pala
40	16	raíz de pala
	18	borde de ataque
	20	borde de salida
	30	región de raíz
	32	región de transición
45	34	región de superficie aerodinámica

ES 2 626 910 T3

50		perfil de superficie aerodinámica
52		lado de presión
54		lado de succión
56		borde de ataque
5	58	borde de salida
	60, 260	cuerda
	62	línea de curvatura / línea media
	64	sentido de rotación
	66	sustentación
10	68	resistencia aerodinámica
	70	fuerza aerodinámica resultante
	72	fuerza axial (empuje)
	74	fuerza tangencial
	80, 180, 280, 280', 380, 480, 580, 680, 780, 880, 980, 980', 1080, 1280	anemómetro por láser
15	81, 581	anemómetro por láser
	82, 582	anemómetro por láser
	90, 590	medios de alteración de flujo / alerón
	91, 591	medios de alteración de flujo / alerón
	92, 592	medios de alteración de flujo / alerón
20	185, 285, 285'	punto de emisión
	186, 286, 286'	haz de sondeo
	187, 287, 287', 1287	región de sondeo / volumen de sondeo
	288	normal
	315, 415, 1015	eje central
25	325, 425, 1025, 1125	círculo
	585	fuente de láser
	586	unidad de divisor / multiplexor
	587, 588, 589	guía de luz / fibras ópticas
	674, 774	fuente de luz
30	675, 775, 875	divisor de haz
	676, 776, 876	espejo de referencia

ES 2 626 910 T3

	677, 777	sistema de lente
	678, 778	ventana
	679, 779, 879	fotodetector
	693, 793	amplificador
5	694, 794	procesador de señales
	695, 795	salida eléctrica
	896	divisor de haz / prisma de Wollaston
	1127	plano a barlovento
	C	longitud de cuerda
10	d_t	posición de grosor máximo
	d_f	posición de curvatura máxima
	F	curvatura
	f_L	longitud de sondeo
	$r \cdot \omega$	velocidad de rotación
15	T	grosor
	v_a	velocidad axial
	v_r	velocidad resultante / velocidad de flujo entrante
	v_w	velocidad del viento
20	α	ángulo de ataque
	δ	ángulo de sondeo
	θ	ángulo de cabeceo
	φ	ángulo de flujo entrante

REIVINDICACIONES

1. Turbina (2) eólica que comprende varias palas (10) que incluyen al menos una primera pala de turbina eólica que se extiende de manera sustancialmente radial desde un buje (8) en un árbol principal que tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo las palas junto con el buje un rotor con un plano de rotor, y que puede ponerse en rotación por el viento, y teniendo cada pala una parte más interior que comprende una sección (16) de raíz de la pala y una parte más exterior que comprende una sección (14) de punta de la pala, en la que la turbina eólica comprende un sistema (80) de medición óptico que comprende una fuente (674) de luz tal como un láser, una parte (675, 676, 677) de transmisor óptico, una parte (679) de receptor óptico y un procesador (694) de señales, en la que
- 5
- 10 - la fuente de luz está ópticamente acoplada a la parte de transmisor óptico,
- la parte de transmisor óptico comprende un punto de emisión y está adaptada para emitir luz en una dirección de sondeo desde dicho punto de emisión,
- la parte de receptor óptico comprende un punto de recepción y un detector, en la que la parte de receptor óptico está adaptada para recibir una parte reflejada de luz desde una región de sondeo a lo largo de la dirección de sondeo en el punto de recepción y dirigir dicha parte reflejada de luz al detector para generar una señal a partir del detector basándose en la luz reflejada recibida, y
- 15
- el procesador de señales está adaptado para determinar al menos una primera componente de velocidad del flujo entrante a partir de la señal generada por la parte de receptor óptico,
- el punto de emisión de la parte de transmisor óptico está ubicado en la primera pala a una primera distancia radial del eje central, y
- 20
- el punto de recepción de la parte de transmisor óptico está ubicado en la primera pala a una segunda distancia radial del eje central, en la que la primera pala de turbina eólica puede someterse a cabeceo, y caracterizada porque el sistema de medición óptico comprende medios de compensación para compensar un ángulo de cabeceo de la primera pala.
- 25
2. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que la primera pala comprende además medios de alteración de flujo ajustables, tales como accionadores, alerones o microaletas distribuidos, para ajustar un parámetro aerodinámico de la pala y ubicados a una tercera distancia radial del buje, controlándose los medios de alteración de flujo ajustables mediante unos medios de control, y en la que los medios de control están adaptados para recibir una señal del procesador de señales, basándose la señal al menos en la primera componente de velocidad,
- 30
- opcionalmente siendo la tercera posición radial sustancialmente idéntica a la primera posición radial.
3. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la turbina eólica comprende una segunda pala de turbina eólica, y en la que la segunda pala de turbina eólica está dotada de medios de alteración de flujo ajustables, tales como accionadores, alerones o microaletas distribuidos, para ajustar un parámetro aerodinámico de la segunda pala, controlándose los medios de alteración de flujo ajustables mediante unos medios de control, y en la que los medios de control están adaptados para recibir una señal del procesador de señales, basándose la señal al menos en la primera componente de velocidad.
- 35
4. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el sistema de medición óptico está adaptado para sondear la componente de velocidad en un intervalo de 0,5-10 m o 0,75-8 m o 1-5 m del punto de emisión.
- 40
5. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el punto de emisión y/o el punto de recepción de la primera pala de turbina eólica están ubicados entre un borde de ataque de la primera pala y un punto de grosor máximo en un lado de presión de la pala, preferiblemente encontrándose la dirección de sondeo en un cuadrante entre una dirección de cuerda, observada desde el borde de ataque de la pala, y una normal perpendicular a dicha dirección de cuerda y que se extiende desde el lado de presión de la pala.
- 45
6. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el punto de emisión durante la rotación del rotor sigue un círculo concéntrico que tiene un radio correspondiente a la primera distancia radial del eje central, y en la que la dirección de sondeo está dispuesta sustancialmente de manera tangencial a dicho círculo concéntrico, alternativamente estando el sistema óptico adaptado para sondear velocidades del viento en un volumen de sondeo ubicado sustancialmente a la primera distancia radial del eje central.
- 50
7. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el sistema de medición óptico está adaptado para sondear velocidades del viento en un volumen de sondeo ubicado en un plano a barlovento corriente

arriba con respecto al plano de rotor.

- 5 8. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la fuente de luz está separada del punto de emisión, estando la fuente de luz ópticamente conectada al punto de emisión mediante unos medios de guiado de luz, tales como una fibra óptica, estando la fuente de luz ubicada, por ejemplo, en el buje o en una góndola de la turbina eólica.
9. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que al menos la parte de transmisor, la parte de receptor y el detector están dispuestos en una primera unidad individual en la primera pala de turbina eólica, por ejemplo en la que la primera unidad está dispuesta en un cojinete, tal como un tubo de manguito, en la primera pala de turbina eólica.
- 10 10. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el sistema de medición óptico está adaptado para emitir al menos un primer haz de sondeo y un segundo haz de sondeo, en la que el primer haz de sondeo y el segundo haces de sondeo forman un ángulo de sondeo que se encuentra en un intervalo de 5-90 grados, o ventajosamente de 7-75 grados, o ventajosamente de 10-60 grados, ventajosamente estando el primer haz de sondeo y el segundo haz de sondeo orientados sustancialmente en un plano en sección transversal de una sección transversal local de la pala.
- 15 11. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la dirección de sondeo es variable dependiendo de un ángulo de cabeceo de la primera pala, alternativa o adicionalmente la dirección de sondeo es variable dependiendo de una velocidad de rotación del rotor.
- 20 12. Método de hacer funcionar una turbina eólica que comprende varias palas que incluyen al menos una primera pala de turbina eólica que se extiende de manera sustancialmente radial desde un buje en un árbol principal que tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo las palas junto con el buje un rotor con un plano de rotor, y que puede ponerse en rotación por el viento, y teniendo cada pala una parte más interior que comprende una sección de raíz de la pala y una parte más exterior que comprende una sección de punta de la pala, en el que el método comprende las etapas de
- 25 a) emitir luz en una dirección de sondeo desde un punto de emisión en la primera pala de turbina eólica, estando dicho punto de emisión ubicado a una primera distancia radial del eje central,
- b) recibir una parte reflejada de luz desde una región de sondeo a lo largo de la dirección de sondeo en un punto de recepción ubicado en la primera pala de turbina eólica en una ubicación a una segunda distancia radial del eje central,
- 30 c) dirigir dicha parte reflejada de luz a un detector,
- d) generar una señal basándose en luz detectada en la etapa c), y
- e) calcular una primera componente de velocidad basándose en la señal de la etapa d), en el que
- el método comprende además la etapa de compensar un ángulo de cabeceo de la primera pala de turbina eólica.
13. Método según la reivindicación 12, en el que el método comprende además la etapa de:
- 35 f) ajustar medios de alteración de flujo ajustables en la primera pala de turbina eólica con el fin de ajustar un parámetro aerodinámico de la primera pala de turbina eólica, estando los medios de alteración de flujo ajustables ubicados a una tercera distancia radial del eje central.
- 40 14. Método según la reivindicación 12 ó 13, en el que el método comprende además la etapa de ajustar la dirección de sondeo dependiendo de un ángulo de cabeceo de la primera pala de turbina eólica y/o una velocidad de rotación del rotor.

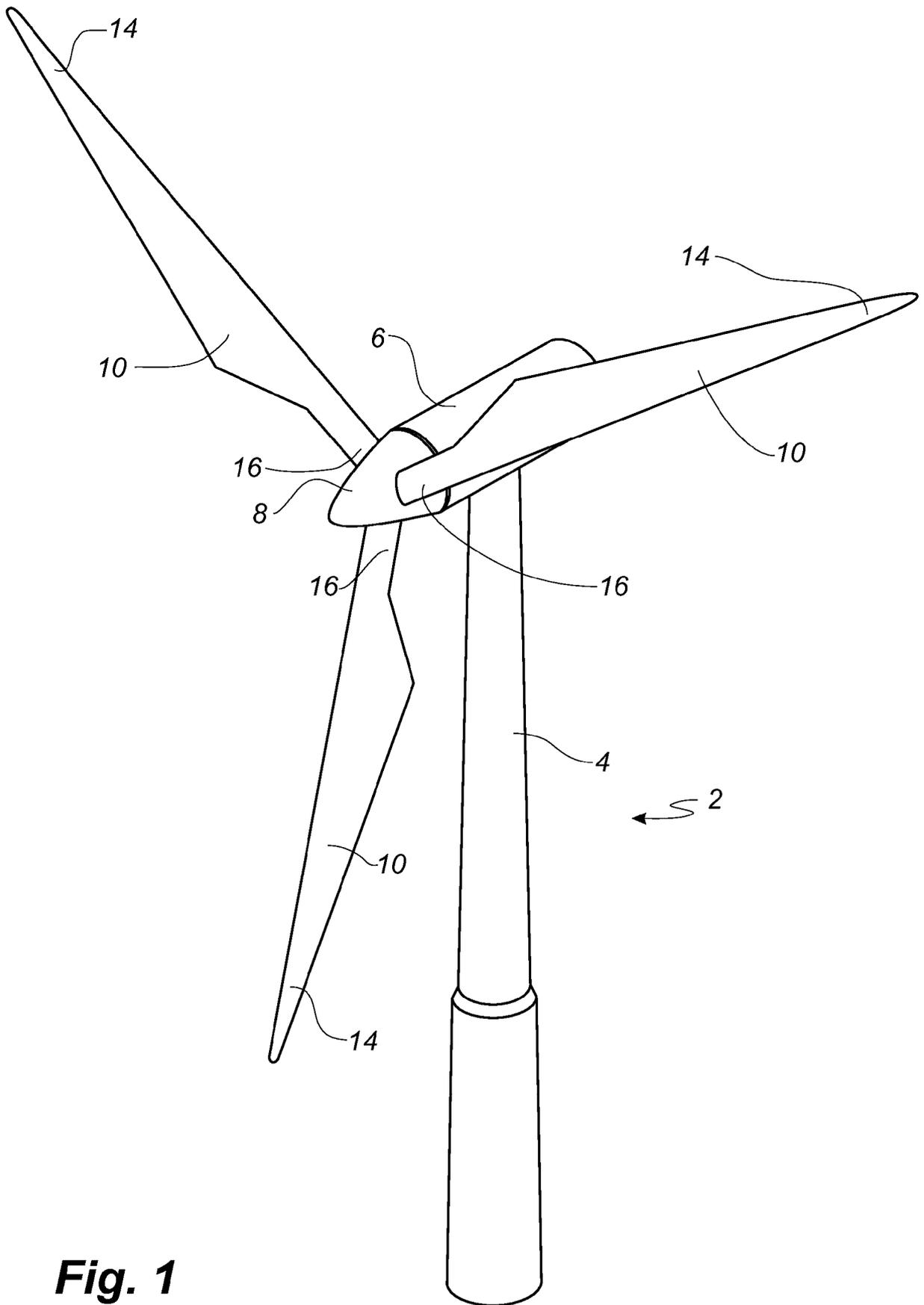


Fig. 1

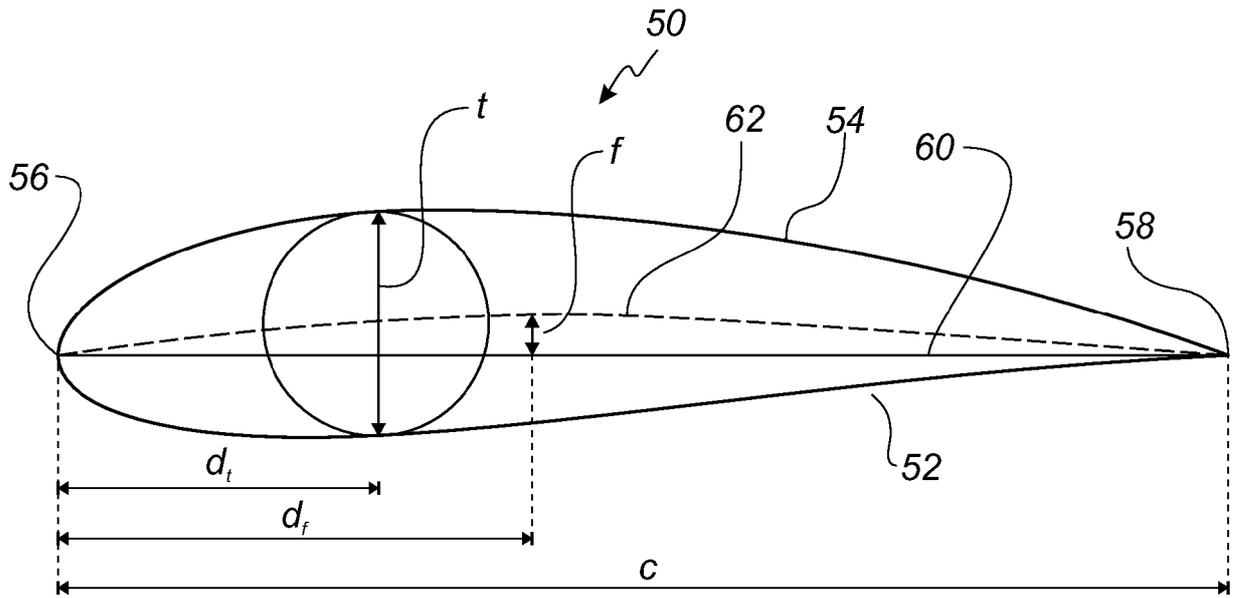


Fig. 2

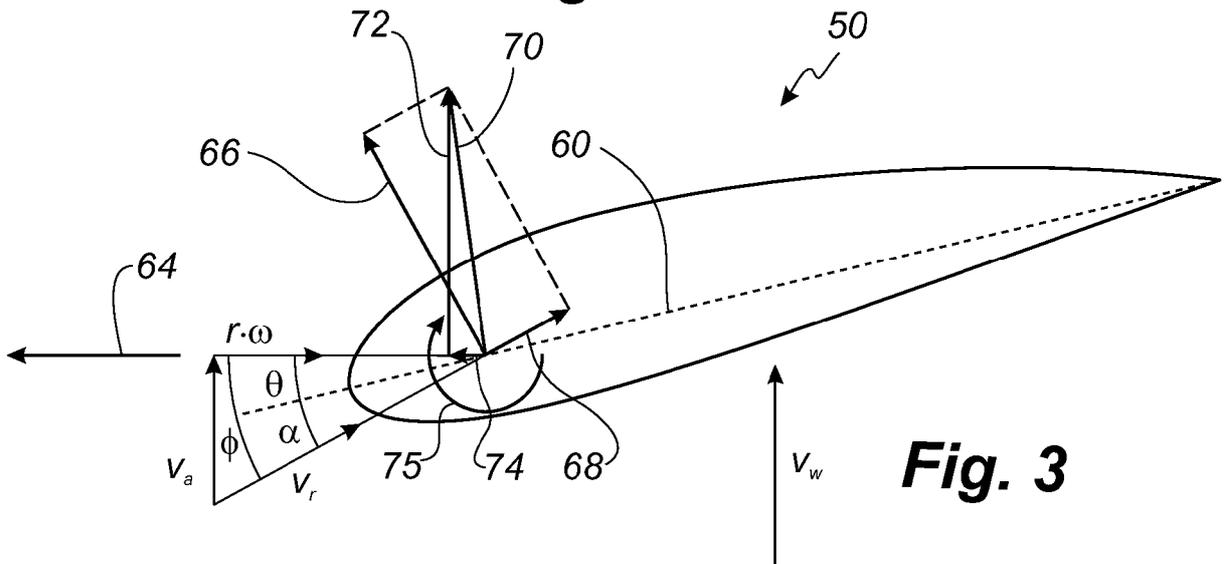


Fig. 3

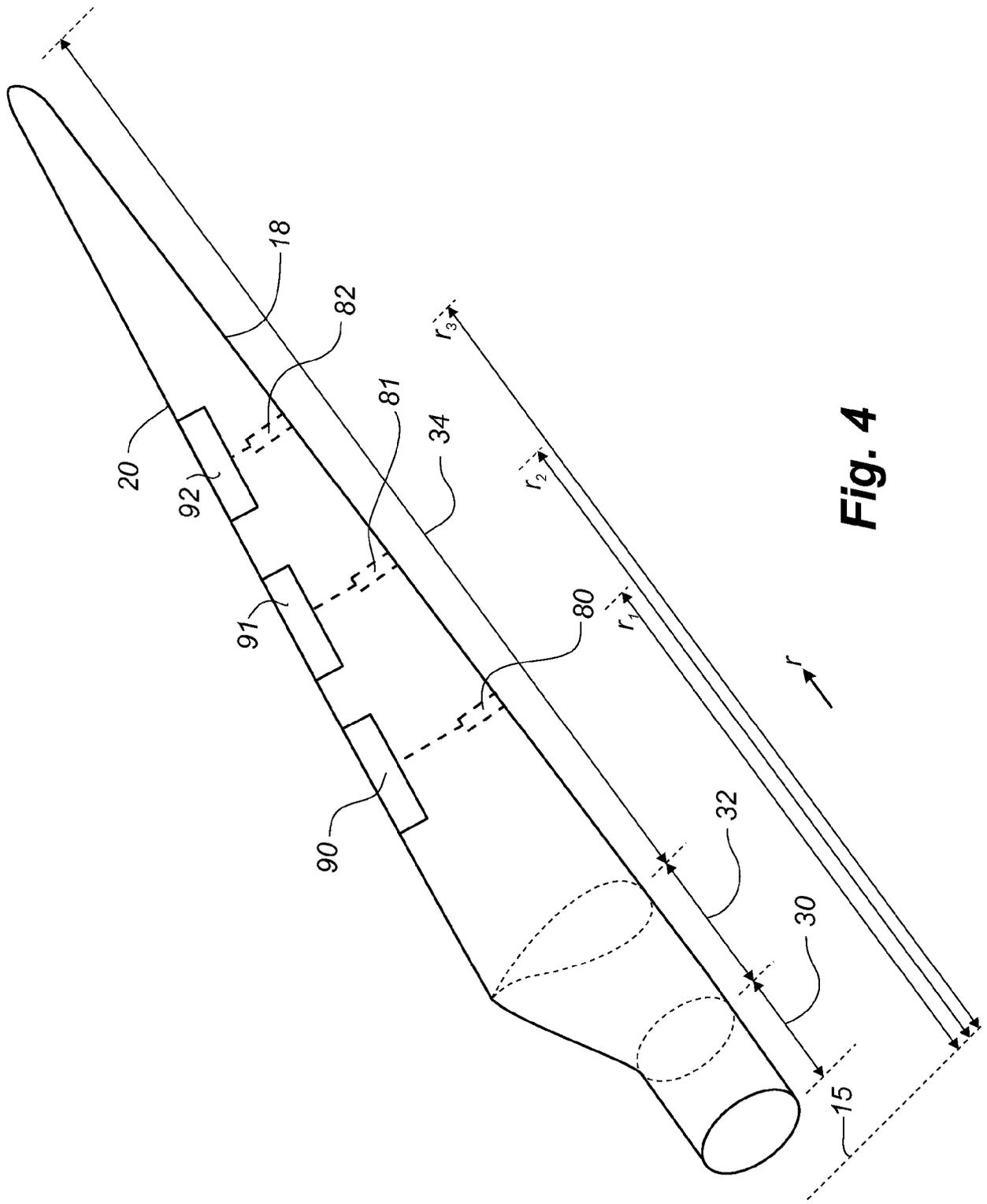


Fig. 4

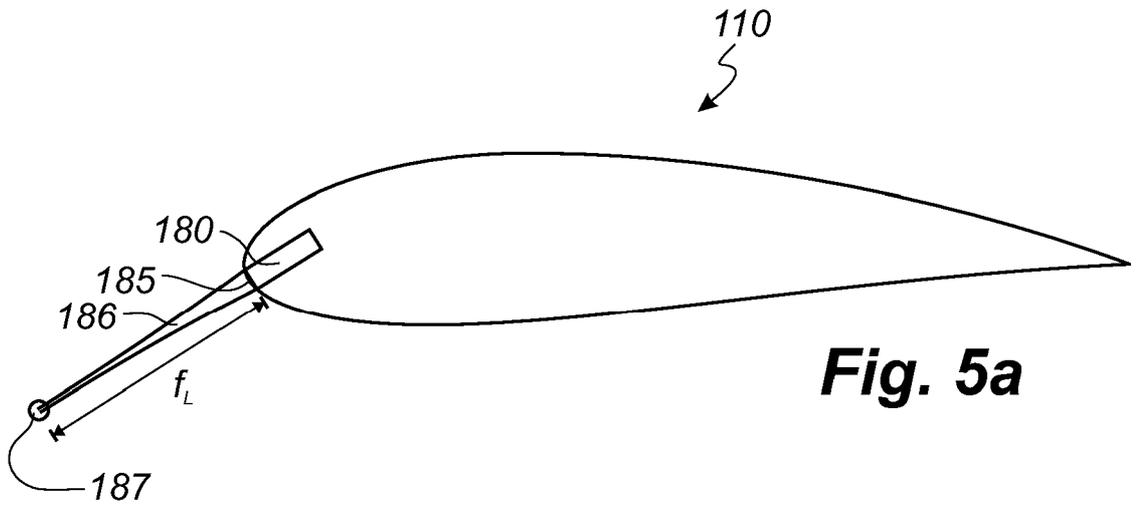


Fig. 5a

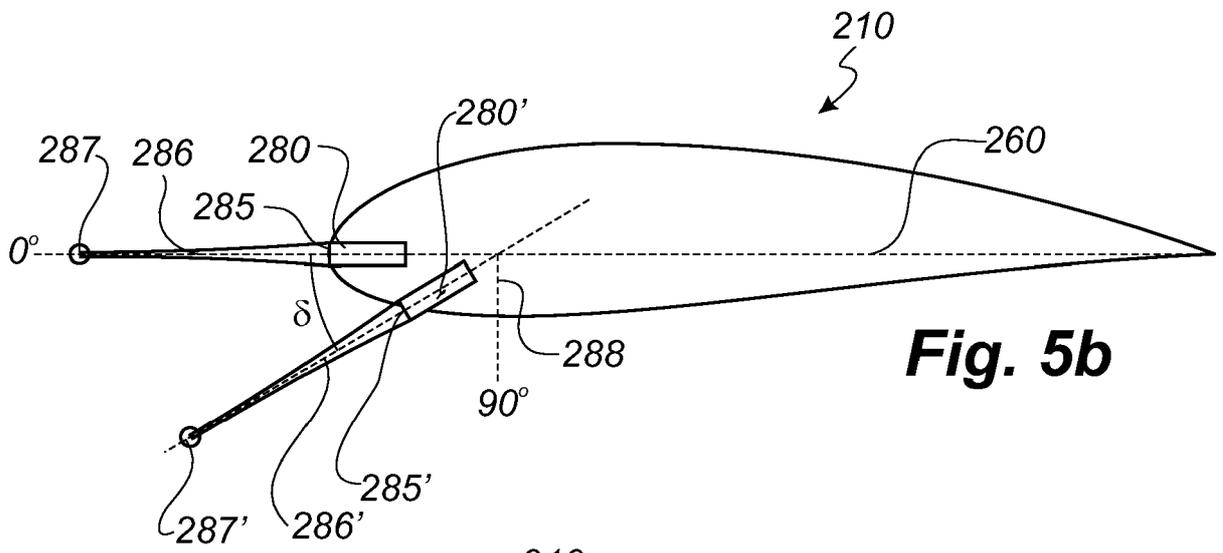


Fig. 5b

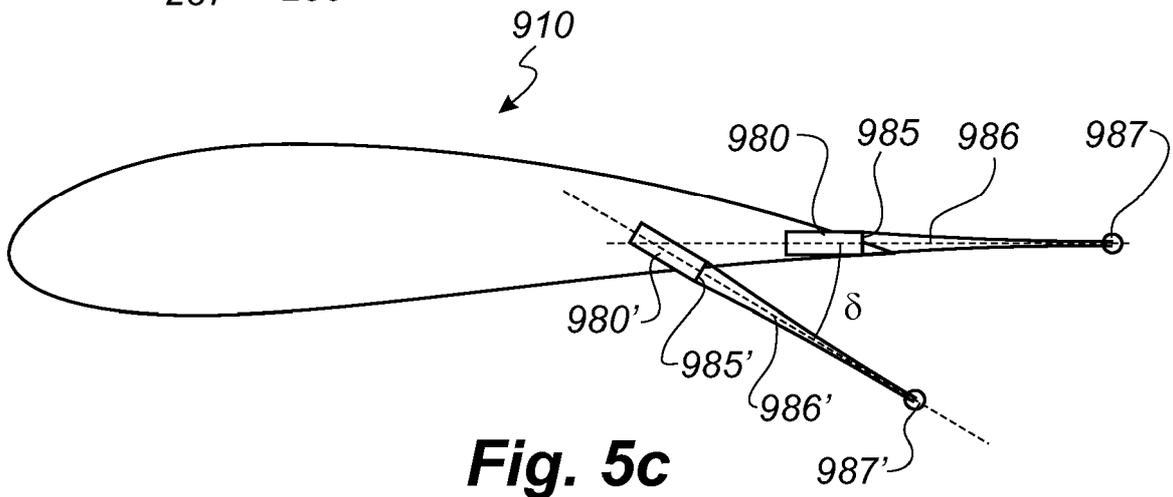


Fig. 5c

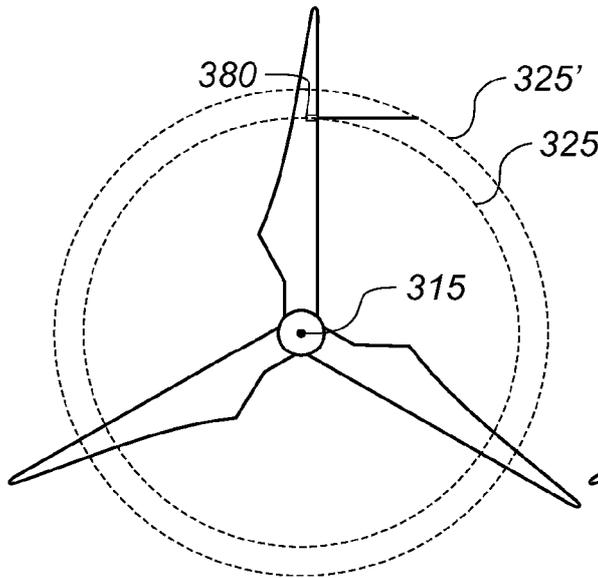


Fig. 6a

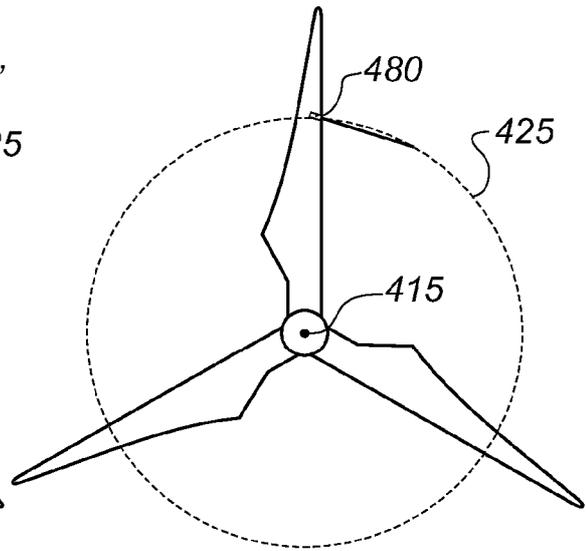


Fig. 6b

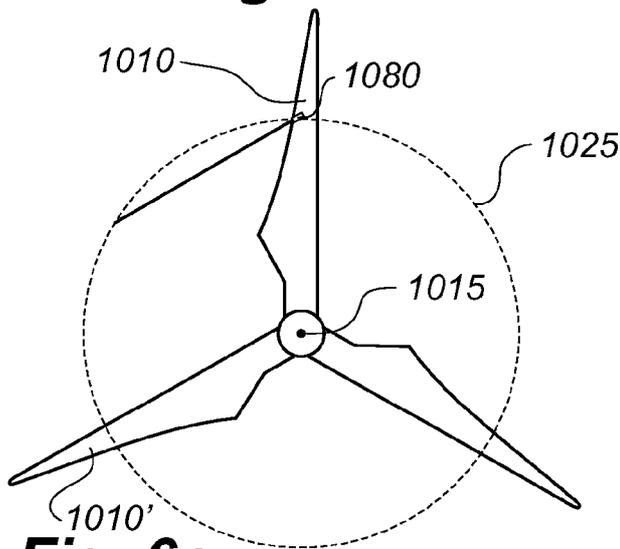


Fig. 6c

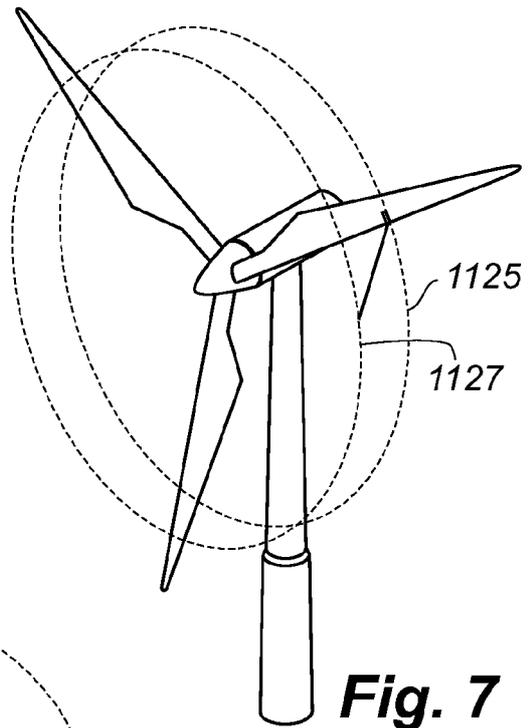


Fig. 7

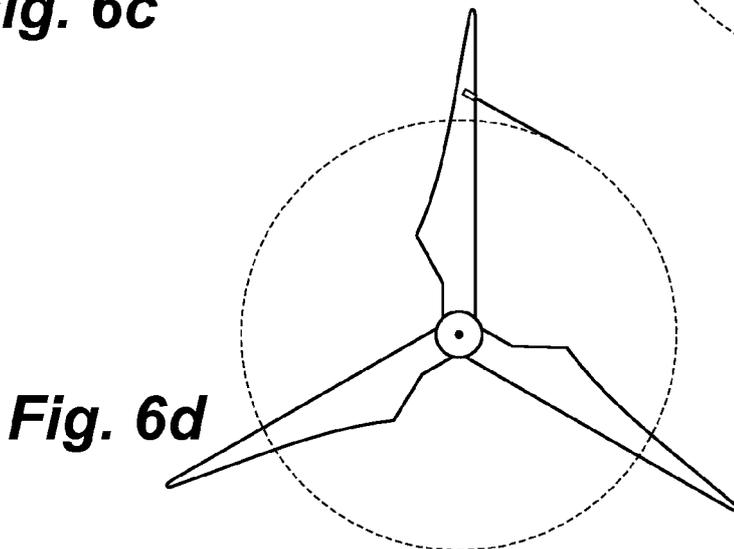


Fig. 6d

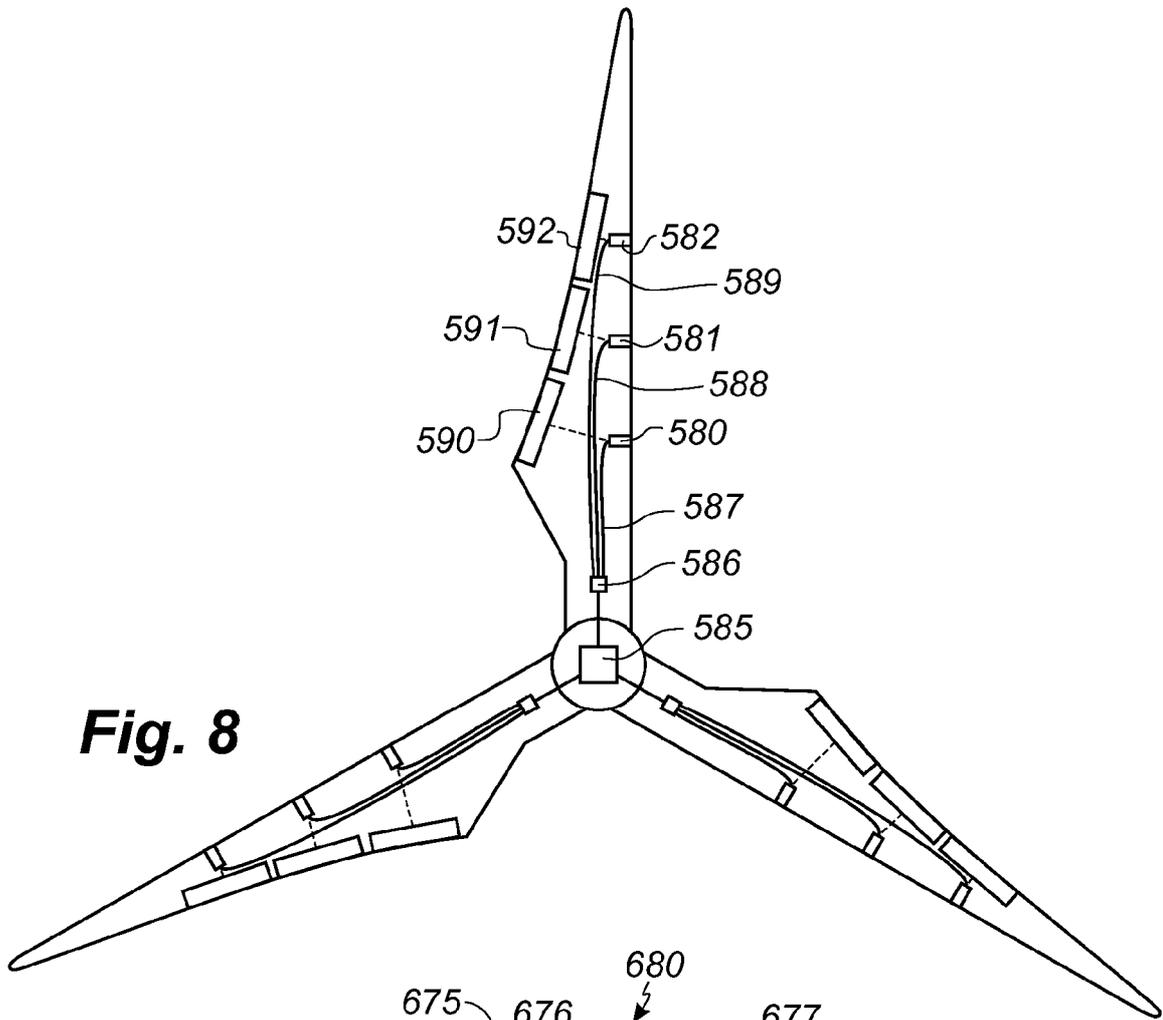


Fig. 8

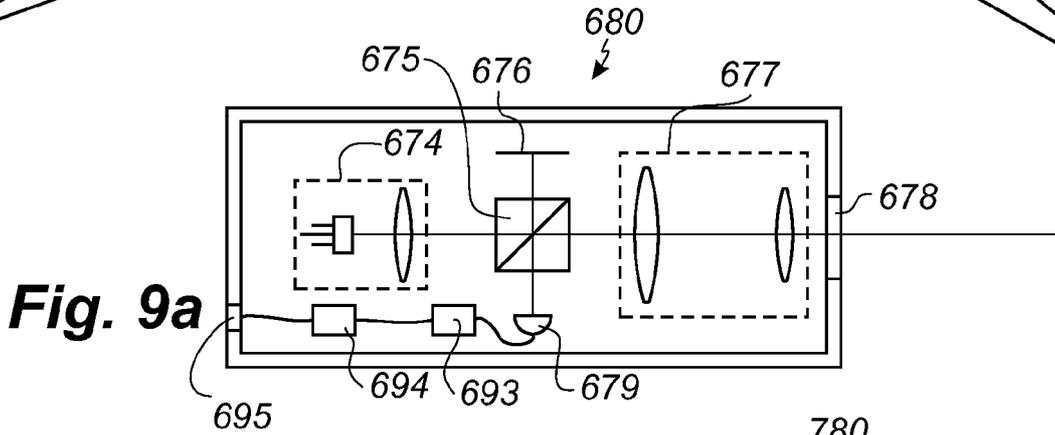


Fig. 9a

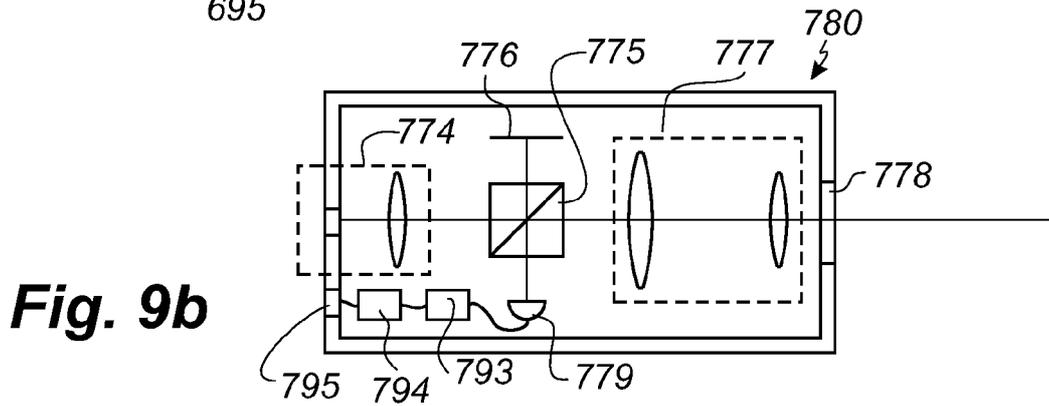


Fig. 9b

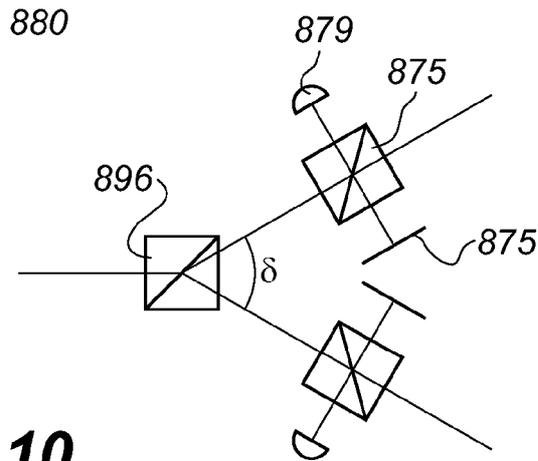


Fig. 10

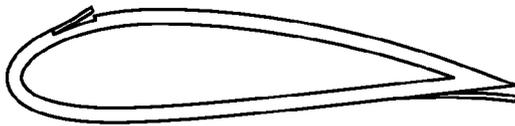


Fig. 11a



Fig. 11b



Fig. 11c



Fig. 11d

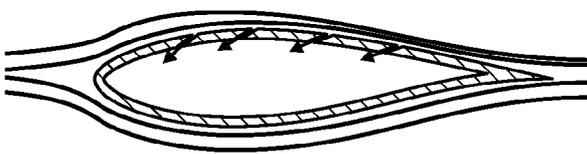


Fig. 11e

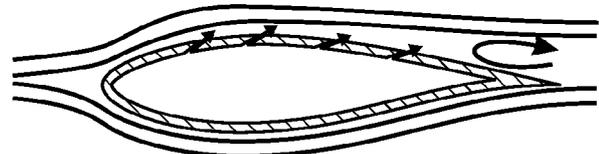


Fig. 11f



Fig. 11g

