

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 856 894**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.07.2010** **E 16192322 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.12.2020** **EP 3199802**

54 Título: **Pala de turbina eólica con hombro estrecho y perfiles aerodinámicos relativamente gruesos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
28.09.2021

73 Titular/es:

LM WIND POWER A/S (100.0%)
Jupitervej 6
6000 Kolding, DK

72 Inventor/es:

FUGLSANG, PETER;
ANDERSEN, CHRISTIAN, FRANK y
MADSEN, JESPER

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 856 894 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 con hombro estrecho y perfiles aerodinámicos relativamente gruesos

La presente invención se refiere a una pala para un rotor de una turbina eólica que tiene un eje de rotor sustancialmente horizontal, dicho rotor comprende un buje, desde el cual la pala se extiende sustancialmente en una dirección radial cuando se monta en el buje, teniendo la pala una dirección longitudinal con un extremo de punta y un extremo de raíz y una dirección transversal, comprendiendo la pala, además: un contorno perfilado que incluye un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde de salida con una cuerda que tiene una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, el contorno perfilado, al ser impactado por un flujo de aire incidente, genera una sustentación, en el que el contorno perfilado se divide en: una región de raíz que tiene un perfil sustancialmente circular o elíptico más cercano al buje, una región de perfil aerodinámico que tiene un perfil de generación de sustentación más alejado desde el buje, y una región de transición entre la región de raíz y la región de perfil aerodinámico, la región de transición que tiene un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial del perfil circular o elíptico de la región de la raíz al perfil de generación de sustentación de la región del perfil aerodinámico, y un hombro que tiene un ancho de hombro y está ubicado en el límite entre la región de transición y la región de perfil aerodinámico, en el que la pala tiene una longitud de pala, y el contorno perfilado comprende un espesor relativo local definido como la relación local entre un espesor de perfil máximo y la longitud de la cuerda.

Los fabricantes de aerogeneradores se esfuerzan constantemente por mejorar la eficiencia de sus aerogeneradores con el fin de maximizar la producción anual de energía. Además, los fabricantes de aerogeneradores están interesados en prolongar la vida útil de sus modelos de aerogeneradores, ya que se necesita mucho tiempo y muchos recursos para desarrollar un nuevo modelo de aerogenerador. Una forma obvia de mejorar la eficiencia del aerogenerador es mejorar la eficiencia de las palas de la turbina eólica, de modo que la turbina eólica pueda generar una mayor potencia de salida a una velocidad del viento determinada. Sin embargo, no se pueden reemplazar arbitrariamente las palas de un modelo de turbina eólica con otras palas más eficientes. Los modelos de turbinas eólicas están dimensionados para rangos de carga específicos desde el rotor y las palas. Por lo tanto, se debe garantizar que las nuevas palas de la turbina eólica cumplan con las especificaciones de diseño del modelo de turbina eólica y, además, se debe garantizar que la propia pala de la turbina eólica cumpla con los aspectos de garantía y esté construida para durar al menos un número de años sin averiarse.

Se dan ejemplos de palas con perfiles aerodinámicos relativamente gruesos en el artículo: "Predicción de la vida útil de las palas de las turbinas eólicas" por K. K. Jin y otros, Conferencia internacional sobre materiales compuestos (ICCM), vol. 17, 1 de julio de 2009, páginas 1-12 y en el documento de patente europea EP1152148.

Es un objeto de la invención obtener una nueva pala de turbina eólica, que esté diseñada para cumplir con dichas especificaciones de diseño previas o que proporcione una alternativa útil a las palas existentes.

Según un primer aspecto de la invención, el objeto se obtiene mediante una pala de turbina eólica según la reivindicación 1 en la que la relación entre el ancho del hombro y la longitud de la pala es menor que o igual a 0,075, y el espesor relativo en un intervalo de longitud de pala de 0-0,8L es al menos 22%.

Por tanto, se ve que la invención proporciona una pala de turbina eólica esbelta y relativamente gruesa. De este modo, es posible minimizar la carga de la pala, ya que se minimiza el área total de la pala, reduciendo así, por ejemplo, las cargas de tormenta. Además, la pala relativamente gruesa es más rígida, debido a que la estructura portadora de carga está más separada, lo que a su vez significa que la carcasa de la pala puede hacerse más delgada. Por tanto, la masa total puede mantenerse baja. Sin embargo, sorprendentemente se ha descubierto que la combinación de usar un ancho de hombro estrecho y un perfil de pala relativamente grueso aumenta significativamente la producción anual de energía (PAE) de dicha pala, en particular porque la pala puede hacerse más larga que las palas existentes imponiendo aproximadamente la misma carga en la turbina eólica provista de tales palas. Sin embargo, si se usara una de estas dos medidas por sí sola para reducir la carga, el PAE se habría reducido.

El hombro se define aquí como la posición en la que la pala de la turbina eólica tiene su mayor longitud de cuerda. El intervalo de longitud se define desde el extremo de raíz hasta el extremo de punta, por lo que el extremo de raíz se sitúa en $r = 0$ y el extremo de punta se sitúa en $r = L$.

Preferiblemente, la pala está precurvada o pretensada. En una realización de este tipo, la pala se curva hacia el lado de presión de la pala, es decir, se curva de modo que la pala cuando se instala en una turbina eólica contra el viento se curva alejándose de una torre de la turbina eólica, al menos a velocidades del viento relativamente bajas. En funcionamiento, por ejemplo, a la velocidad del viento de diseño, las palas se enderezan debido a la fuerza del viento entrante y la distribución de la presión en el lado de presión (o correspondientemente el lado a barlovento o contra el viento) de la pala y el lado de succión (o correspondientemente el lado a sotavento o en la dirección del viento) de la pala, respectivamente, maximizando así el área barrida por la pala en un plano de rotor. Una pala precurvada permite reducir la rigidez de la pala, reduciendo así el material necesario y, en consecuencia, también la carga de la pala.

Con todo, se ve que un hombro estrecho o una pala esbelta con un espesor relativamente alto y provista de un precurvado combinados proporcionan una pala con menor carga que las palas de la técnica anterior.

En una realización, la relación entre la anchura del hombro y la longitud de la pala es menor que o igual a 0,073, y ventajosamente menor que o igual a 0,0725, y más ventajosamente menor que o igual a 0,072. Todas estas realizaciones proporcionan palas, que son relativamente esbeltas, es decir, que tienen una longitud de cuerda máxima pequeña.

- 5 En otra realización, el espesor relativo en un intervalo de longitud de la pala de 0-0,8L es al menos 23%, ventajosamente al menos 23,5% y más ventajosamente al menos 24%. Tales perfiles tienen un espesor de pala relativo que es significativamente mayor que las palas convencionales, en particular en la región de 0,65 L-0,8L.

En otra realización ventajosa más, el espesor relativo de la pala en el intervalo de la pala de 0-0,8L es al menos el 25%, o al menos el 26%.

- 10 Ventajosamente, la longitud de la pala es de al menos 40 metros, más ventajosamente entre 40 metros y 50 metros. Se ha descubierto que la esbeltez y el espesor propuestos son particularmente adecuados para estas longitudes de pala.

- 15 En una realización ventajosa, la región de raíz tiene un diámetro de raíz en el extremo de raíz de la pala, en el que la relación entre la anchura de hombro y el diámetro de raíz es 1,6 o menos. Al tener un radio bajo del ancho de hombro al diámetro de raíz, es posible tener una divergencia pequeña del borde de salida y el borde de ataque de la pala en la región de transición, lo que a su vez significa que la curvatura del borde de salida y el borde de ataque, respectivamente, puede mantenerse baja. Así, según una forma de realización especialmente ventajosa, el borde de salida presenta una forma suave sin discontinuidades en la dirección longitudinal de la pala. Esto en particular se aplica a la región de transición de la pala e incluye las transiciones desde la región de la raíz a la región de transición y desde la región de transición a la región del perfil aerodinámico de la pala. Desde el punto de vista de la fabricación, una realización de este tipo resulta atractiva, ya que facilita la realización del tendido de la capa de fibras en los moldes de fabricación. Además, las cargas que afectan al borde de salida durante el funcionamiento normal de tal pala se reducen significativamente.

- 25 En otra realización ventajosa, el borde de salida tiene una curvatura con un radio exterior externo al borde de salida, que en todas las posiciones es al menos 0,2L, ventajosamente al menos 0,22L y más ventajosamente al menos 0,24L. Según una realización, la posición del radio exterior mínimo se sitúa entre 0,04L y 0,06L, ventajosamente entre 0,045L y 0,055L.

- 30 En otra realización ventajosa más, el borde de salida tiene una curvatura con un radio interior (R_i) interno al borde de salida, que en todas las posiciones es al menos 0,2L, ventajosamente al menos 0,225L y más ventajosamente al menos 0,25L. Según una realización, la posición del radio exterior mínimo se sitúa entre 0,16L y 0,20L, ventajosamente entre 0,19L y 0,21L.

- 35 Un radio grande del borde de salida (interior y / o exterior) asegura una curvatura baja del borde de salida, lo que desde el punto de vista de la fabricación significa que el tendido de fibras puede realizarse sin que las capas de fibras se arruguen. Esto, a su vez, asegura que la carcasa de la pala acabada después de la inyección de resina y el curado no presente propiedades mecánicas perjudiciales.

Debido a la torsión y al diseño tridimensional de la pala, puede resultar difícil determinar la ubicación exacta del borde de salida. Por lo tanto, el radio interior y exterior se puede deducir, en una realización, proyectando la pala en un plano, cuando se observa la pala desde arriba con un ángulo de paso de 0 grados.

- 40 En una realización, el hombro se sitúa en un intervalo entre 0,18L y 0,25L, ventajosamente entre 0,19L y 0,24L. En una realización ventajosa, una pala de turbina eólica que tiene una longitud en el intervalo de 40 a 45 metros tiene el hombro situado entre 0,19L y 0,21L. En otra realización de una pala de turbina eólica que tiene una longitud en el intervalo de 45 a 50 metros, ventajosamente en el intervalo de 46,5 a 48,5 metros, el hombro se sitúa entre 0,22L y 0,24L.

- 45 En otra realización, el borde de ataque tiene una forma suave sin discontinuidades en la dirección longitudinal de la pala. Ventajosamente, la pala comprende un eje de ángulo de paso, y en el que la distancia entre el borde de ataque y el eje de ángulo de paso desde el extremo de raíz hasta el hombro no aumenta más del 20%, ventajosamente no más del 15%.

- 50 Como se mencionó anteriormente, la pala de turbina eólica está preferiblemente precurvada o curvada hacia el lado de presión de la pala. El precurvado en el extremo de punta de la pala es, en una realización, al menos 0,05L, ventajosamente al menos 0,06L, más ventajosamente al menos 0,65L e incluso más ventajosamente al menos 0,07L. Precurvado significa aquí que el centro del perfil o la cuerda de un perfil local está distanciado de un eje de ángulo de paso o eje longitudinal de la pala. Al aumentar el precurvado en comparación con las palas convencionales, la rigidez debe ser menor para que la pala se enderece y para maximizar el área barrida a la velocidad del viento de diseño. Por tanto, se necesita menos material en la carcasa de la pala o en la estructura de soporte de carga de la pala. Esto, a su vez, significa que la masa total de la pala puede reducirse aún más.

Ventajosamente, la pala está precurvada sobre al menos un 50% exterior de la pala, ventajosamente sobre al menos un 60% exterior de la pala, incluso más ventajosamente sobre al menos un 70% exterior, o incluso al menos un 75% exterior. Por tanto, la pala se curva sobre una gran parte de la pala en la parte más cercana a la punta.

5 En otra realización, la pala está provista de una torsión, y en la que la región de perfil aerodinámico comprende una parte interior en la que un ángulo de torsión disminuye hacia el extremo de punta de la pala y una parte exterior en la que el ángulo de torsión aumenta hacia el extremo de punta de la pala, estando dicha parte exterior y dicha parte interior separadas por una posición de tangente de inflexión de torsión. Disminuyendo el ángulo de torsión en una parte interior de la pala, se consigue una compensación de la velocidad radial local de la pala. El ruido de la punta de la pala se reduce permitiendo que la torsión de la parte exterior de la pala aumente hacia la punta.

10 La torsión generalmente se calcula a partir de un punto de origen definido. Para la presente pala, dicho origen puede definirse, por ejemplo, en la tangente de inflexión, definiéndose así la torsión local en esta posición como 0 grados. Por lo tanto, está claro que la torsión no debe considerarse sólo como un ángulo de torsión absoluto local, que puede variar debido al ángulo de paso establecido de la pala, sino que más bien debe verse como una variación de torsión, es decir, como la diferencia en ángulo de torsión entre un perfil de sección transversal en una primera posición radial de la pala, y un segundo perfil de sección transversal en una segunda posición radial de la pala para un ajuste del ángulo de paso dado de la pala.

En otra realización más, la posición de la tangente de inflexión de torsión se sitúa entre 0,8L y 0,9L, ventajosamente entre 0,82L y 0,88L, más ventajosamente entre 0,83L y 0,87L, e incluso más ventajosamente aproximadamente en 0,85L.

20 Ventajosamente, la torsión en la región exterior es de al menos 4 grados, ventajosamente de al menos 5 grados y más ventajosamente de al menos 5,5 grados. Por tanto, la diferencia de torsión en el punto de la tangente de inflexión y la punta es de al menos 4, 5 o 5,5 grados. La torsión en la parte interior puede ser ventajosamente entre 8 y 12 grados, ventajosamente entre 8,5 y 11,5 grados, y más ventajosamente entre 9 y 11 grados. Por tanto, la diferencia de torsión en el hombro y el punto de la tangente de inflexión está entre 8 y 12 grados.

25 En una realización, la pala está provista de una torsión, que en la región de raíz y la región de transición aumenta hacia el extremo de punta de la pala. El aumento de torsión puede, por ejemplo, en la región de raíz y la región de transición estar entre 1,5 y 2,5 grados. Por tanto, la variación de torsión en esta región está entre 1,5 y 2,5 grados.

Según un segundo aspecto, la invención proporciona varios perfiles de pala de turbina eólica, que son particularmente eficaces y que se apartan de los perfiles de palas estándar, como los perfiles NACA, que se utilizan típicamente para palas de turbinas eólicas. Los perfiles de pala no sólo son aplicables a la pala de turbina eólica según el primer aspecto de la invención.

30 Así, la invención proporciona una pala de turbina eólica, que en una sección transversal comprende al menos uno de los siguientes seis perfiles:

35 - un primer perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 35% y 37% y una posición de espesor máximo situada entre 0,24c y 0,30c desde el borde de ataque, situada ventajosamente entre 0,25c y 0,29c y más ventajosamente alrededor de 0,26c y 0,28c,

- un segundo perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 29% y 31% y una posición de espesor máximo situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,29c y 0,31c,

40 - un tercer perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 26,3% y 27,7% y una posición de espesor máximo situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,29c y 0,31c,

- un cuarto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 23,5% y 24,5%, ventajosamente entre 23,8% y 24,2%, y una posición de espesor máximo situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,36c y 0,38c desde el borde de ataque,

45 - un quinto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 20,6% y 21,4% y una posición de espesor máximo situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,36c y 0,38c, y

- un sexto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 17,7% y 18,3% y una posición de espesor máximo situada entre 0,37c y 0,41c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,38c y 0,40c.

50 Las aspas aerodinámicas se definen en relación con el espesor relativo del perfil, la posición de la cuerda relativa del espesor máximo y la posición de la cuerda relativa de la curvatura de presión máxima. El espesor se define en una dirección perpendicular a la cuerda, y la curvatura del lado del lado de presión se define como la distancia entre el lado de presión de la pala y la cuerda en una dirección perpendicular o normal a la cuerda. Estos parámetros también se representan en la Figura 3 y se explican en la descripción adjunta.

Preferiblemente, la pala comprende una región de raíz, una región de transición y una región de perfil aerodinámico de acuerdo con la turbina eólica según el primer aspecto de la invención. En tal realización, los perfiles están ubicados en la región de perfil aerodinámico (fuera del hombro) de la pala.

- 5 En una realización, la pala comprende al menos dos de los seis perfiles aerodinámicos. En otra realización, la pala comprende al menos tres de los seis perfiles aerodinámicos. En otra realización más, la pala comprende al menos cuatro de los seis perfiles aerodinámicos. La pala también puede comprender al menos cinco de los seis perfiles aerodinámicos, e incluso puede comprender los seis perfiles aerodinámicos.

Las realizaciones mencionadas anteriormente y las siguientes realizaciones pueden referirse todas a una pala de turbina eólica según el primer aspecto, así como a una pala de turbina eólica según el segundo aspecto.

- 10 El primer perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,24c y 0,30c desde el borde de ataque, situada ventajosamente entre 0,25c y 0,29c y más ventajosamente alrededor de 0,26c y 0,28c. El primer perfil aerodinámico puede estar situado ventajosamente entre 0,23L y 0,30L.

- 15 El segundo perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,29c y 0,31c. El segundo perfil aerodinámico puede estar situado ventajosamente entre 0,30L y 0,36L.

El tercer perfil de perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,255c y 0,295c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,265c y 0,285c. El tercer perfil aerodinámico puede situarse ventajosamente entre 0,36L y 0,45L.

- 20 El cuarto perfil de perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,36c y 0,38c. El cuarto perfil aerodinámico puede situarse entre 0,5L y 0,85L, ventajosamente a lo largo de todo el intervalo de 0,67L a 0,8L.

El quinto perfil de perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,31c y 0,35c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,32c y 0,34c. El quinto perfil aerodinámico puede situarse ventajosamente entre 0,85L y 0,95L.

- 25 El sexto perfil aerodinámico puede comprender una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,37c y 0,41c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,38c y 0,40c. El sexto perfil aerodinámico puede situarse ventajosamente en la punta, entre 0,95L y L.

- 30 Los perfiles aerodinámicos novedosos y, en particular, el cuarto, el quinto y el sexto perfiles aerodinámicos son todos relativamente gruesos y la posición de espesor máximo se sitúa relativamente lejos del borde de ataque. Además, la posición de la curvatura del lado de presión máxima es casi coincidente con la posición de máximo espesor relativo. Sorprendentemente, se ha descubierto que estas características tienen una alta relación de sustentación a resistencia en el punto de diseño a pesar de los grandes espesores relativos de los perfiles. Además, los perfiles aerodinámicos son geoméricamente compatibles.

- 35 Según una realización, una región entre perfiles aerodinámicos adyacentes comprende una transición suave entre dichos perfiles adyacentes mediante la interpolación entre dichos perfiles adyacentes, por ejemplo, a través de curvas de distribución gaussianas. Así, la región entre el primer perfil aerodinámico y el segundo perfil aerodinámico comprende perfiles interpolados entre el primer perfil aerodinámico y, correspondientemente, entre el segundo y el tercer perfil aerodinámico, entre el tercer y el cuarto perfil aerodinámico, entre el cuarto y el quinto perfil aerodinámico y / o entre el quinto y el sexto perfil aerodinámico. Por supuesto, las transiciones también deberían tener en cuenta la torsión variable en la dirección longitudinal de la pala.

- 40 Ventajosamente, la pala puede estar provista de dispositivos de alteración del flujo, tales como generadores de vórtice, en los que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un espesor relativo de al menos el 30%. En una realización, la pala está provista de dispositivos de alteración del flujo, tales como generadores de vórtice, en los que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un espesor relativo de un máximo del 70%.

En una realización particularmente ventajosa, los dispositivos de alteración del flujo son dispositivos de aumento de sustentación.

- 50 Así, los dispositivos están dispuestos en una región longitudinal donde el espesor relativo del perfil está entre el 30% y el 70%. Según otra realización ventajosa, dichos dispositivos se disponen en un rango entre 0,1L y 0,4L, ventajosamente entre 0,11L y 0,37L. Los dispositivos pueden disponerse sólo en esta región.

En una realización, el espesor relativo de la pala en el hombro está entre el 40% y el 50%, ventajosamente entre el 42% y el 48%.

Preferiblemente, la pala comprende un cuerpo de carcasa. El cuerpo de la carcasa puede, por ejemplo, ensamblarse a partir de una carcasa del lado de presión y una carcasa del lado de succión, que están adheridas o unidas entre sí

cerca del borde de ataque y cerca del borde de salida. En otra realización, la carcasa se fabrica mediante un proceso de una sola operación, por ejemplo, mediante un método de moldeo hueco cerrado.

El cuerpo de la carcasa puede comprender una estructura portadora de carga que se extiende longitudinalmente, tal como un laminado principal. Tal estructura portadora de carga o laminado principal se forma típicamente como una inserción de fibra que comprende una pluralidad de capas de refuerzo de fibra, por ejemplo, entre 20 y 50 capas. A cada lado de la estructura portadora de carga, la pala comprende típicamente una estructura tipo sándwich con un material de núcleo, como madera de balsa o polímero espumado, y con una piel interior y exterior hecha de polímero reforzado con fibra.

La carcasa de la pala está hecha típicamente de un material polimérico reforzado con fibra. Las fibras de refuerzo pueden ser, por ejemplo, fibras de vidrio, fibras de carbono, fibras de aramida, fibras metálicas, tales como fibras de acero, o fibras vegetales, mientras que el polímero, por ejemplo, puede ser epóxido, poliéster o éster vinílico.

Según un tercer aspecto, la invención proporciona una turbina eólica que comprende un cierto número, preferiblemente dos o tres, de palas de acuerdo con cualquiera de las realizaciones antes mencionadas, extendiéndose las palas sustancialmente de forma radial desde un buje en un eje 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 ser puesto en rotación por el viento.

En una realización, la turbina eólica está controlada por ángulo de paso. La turbina eólica puede tener regulación de potencia. Según una realización, una potencia máxima de salida de la turbina eólica está entre 1,3 MW y 1,7 MW, ventajosamente alrededor de 1,5 MW. Es decir, las palas son especialmente adecuadas para turbinas eólicas de clase 1,5 MW.

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 una pala de turbina eólica según la invención,

la Figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil aerodinámico,

la Figura 4 muestra una vista esquemática de la pala de turbina eólica según la invención, vista desde arriba y de lado,

la Figura 5 muestra una distribución de la longitud de la cuerda de la pala de turbina eólica según la invención,

la Figura 6 muestra una distribución del espesor relativo de la pala de turbina eólica según la invención,

la Figura 7 muestra una distribución de torsión de la pala de turbina eólica según la invención,

la Figura 8 muestra una distribución de precurvado de la pala de turbina eólica según la invención, y

la Figura 9 muestra una curva de potencia de una turbina eólica según la invención en función de la velocidad del viento.

La Figura 1 ilustra una turbina eólica convencional moderna contra el viento según el denominado "concepto danés" con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un eje de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un buje 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el buje 8, cada una con una raíz de pala 16 más cercana al buje y una punta de pala 14 más alejada del buje 8. El rotor tiene un radio indicado como R.

La Figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala de turbina eólica 10 según la invención. La pala de turbina eólica 10 tiene la forma de una pala de turbina eólica convencional y comprende una región de raíz 30 más cercana al buje, una región perfilada o de perfil aerodinámico 34 más alejada del buje y una región de transición 32 entre la región de raíz 30 y la región de perfil aerodinámico 34. La pala 10 comprende un borde de ataque 18 que mira en la dirección de rotación de la pala 10, cuando la pala está montada en el buje, y un borde de salida 20 que mira en la dirección opuesta del borde de ataque 18.

La región de perfil aerodinámico 34 (también llamada región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de sustentación, mientras que la región de la raíz 30, 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 de raíz 30 puede ser constante a lo largo de toda el área de la raíz 30. La región de transición 32 tiene un perfil de transición que cambia gradualmente de la forma circular o elíptica de la región de raíz 30 al perfil aerodinámico de la región de perfil aerodinámico 34. La longitud de la cuerda de la región de transición 32 aumenta típicamente al aumentar la distancia r desde el buje. La región de perfil aerodinámico 34 tiene un perfil aerodinámico con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque 18 y el borde de salida 20 de la pala 10. La anchura de la cuerda disminuye al aumentar la distancia r desde el buje.

Un hombro 40 de la pala 10 se define como la posición en la que la pala 10 tiene su mayor longitud de cuerda. El hombro 40 se proporciona típicamente en el límite entre la región de transición 32 y la región de perfil aerodinámico 34.

5 Cabe señalar que las cuerdas de las diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, ya que la pala puede estar alabeada y / o curvada (es decir, precurvada), proporcionando así al plano de la cuerda una trayectoria alabeada y / o curvada, siendo, lo más a menudo, éste el caso para compensar la velocidad local de la pala que es dependiente del radio desde el buje.

Las Figuras 3 y 4 representan parámetros, que se utilizan para explicar la geometría de la pala de turbina eólica según la invención.

10 La Figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil aerodinámico 50 de una pala típica de una turbina eólica representada con los diversos parámetros, que se utilizan típicamente para definir la forma geométrica de un perfil aerodinámico. El perfil aerodinámico 50 tiene un lado de presión 52 y un lado de succión 54, que durante el uso, es decir, durante la rotación del rotor, normalmente miran hacia el lado de barlovento (o contra el viento) y el lado de sotavento (o en la dirección del viento), respectivamente. El perfil aerodinámico 50 tiene una cuerda 60 con una longitud de cuerda c que se extiende entre un borde de ataque 56 y un borde de salida 58 de la pala. El perfil aerodinámico 50 tiene un espesor t , que se define como la distancia entre el lado de presión 52 y el lado de succión 54. El espesor t del perfil aerodinámico varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación de un perfil simétrico está dada por una línea de curvatura 62, que es una línea media a través del perfil aerodinámico 50. La línea media se puede encontrar dibujando círculos inscritos desde el borde de ataque 56 al borde de salida 58. La línea media sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia desde la cuerda 60 se llama curvatura f . La asimetría también se puede definir mediante el uso de parámetros denominados extradós (o curvatura del lado de succión) e intradós (o curvatura del lado de presión), que se definen como las distancias desde la cuerda 60 y el lado de succión 54 y el lado de presión 52, respectivamente.

25 Los perfiles aerodinámicos se caracterizan a menudo por los siguientes parámetros: la longitud de la cuerda c , la curvatura máxima f , la posición d_f de la curvatura máxima f , el espesor máximo del perfil aerodinámico t , que es el diámetro más grande de los círculos inscritos a lo largo de la línea de curvatura media 62, la posición d_t del espesor máximo t , y un radio de punta (no mostrado). Estos parámetros se definen típicamente como relaciones a la longitud de la cuerda c . Por tanto, un espesor de pala relativo local t/c se da como la relación entre el espesor máximo local t y la longitud de la cuerda local c . Además, la posición d_p de la curvatura del lado de presión máxima se puede utilizar como parámetro de diseño y, por supuesto, también la posición de la curvatura del lado de succión máxima.

30 La Figura 4 muestra otros parámetros geométricos de la pala. La pala tiene una longitud total de pala L . Como se muestra en la Figura 3, el extremo de raíz se encuentra en la posición $r = 0$, y el extremo de punta se encuentra en $r = L$. El hombro 40 de la pala se encuentra en una posición $r = L_w$, y tiene un ancho de hombro W , que es igual a la longitud de la cuerda en el hombro 40. El diámetro de raíz se define como D . La curvatura del borde de salida de la pala en la región de transición puede definirse mediante dos parámetros, a saber, un radio de curvatura exterior mínimo r_o y un radio de curvatura interior mínimo r_i , que se definen como el radio de curvatura mínimo del borde de salida, visto desde el exterior (o detrás del borde de salida), y el radio de curvatura mínimo, visto desde el interior (o delante del borde de salida), respectivamente. Además, la pala está provista de un precurvado, que se define como Δy , que corresponde a la desviación fuera del plano desde un eje de ángulo de paso 22 de la pala.

40 Ejemplo:

A continuación se da un ejemplo de una pala de turbina eólica según la invención.

La pala de la turbina eólica cuenta con los siguientes parámetros de longitud, ancho de hombro, radios de curvatura mínimos para el borde de salida y diámetro del cilindro de la raíz:

Tabla 1

Parámetro	Tamaño
L	42,13 m
L_w	8,5 m
W	2,975 m
r_o	10,3 m
r_i	11,3 m
D	1,893 m

La distribución de la longitud de la cuerda c , espesor relativo t/c y precurvado Δy se enumera en la Tabla 2:

Tabla 2

$r[m]$	$c[cm]$	$t/c[\%]$	$\Delta y [cm]$
0	189,3	100	0
1	189,3	100	0
2	192,5	98,2	0
4	223,8	80,2	0
6	267,8	60,2	0
8	295,8	46,6	0,1
10	292,7	39,2	1,6
12	277,3	34,4	5,2
14	256,9	30,8	10,5
16	233,7	28,1	17,8
18	210,7	26,2	26,8
20	190,6	25,0	37,6
22	173,1	24,3	50,2
24	157,8	24,1	64,5
26	144,3	24,1	80,6
28	132,0	24,0	98,5
30	120,6	24,0	118,0
32	109,7	24,0	139,3
34	99,1	24,0	162,2
36	89,3	23,4	187,3
38,355	79,3	21,7	222,3
40,861	63,4	18,8	270,1
42,13	4,0	18,0	300,0

5 La pala de la turbina eólica comprende seis perfiles de pala 41-46 novedosos, que se encuentran en diferentes posiciones longitudinales a lo largo de la pala y como se muestra en la Figura 2. La Tabla 3 enumera el espesor relativo t/c , la posición de espesor máximo d_t/c , la posición de la curvatura del lado de presión máxima d_p/c y la posición radial aproximada r de los perfiles:

Tabla 3

Perfil aerodinámico	Número de ref.	t/c	d_t/c	d_p/c	r
Primero	41	36%	27,1%	26,6%	11,0 m
Segundo	42	30%	29,6%	29,7%	14,5 m
Tercero	43	27%	29,8%	27,2%	17,0 m
Cuarto	44	24%	37,1%	36,8%	26,0 m - 34,0 m

Perfil aerodinámico	Número de ref.	t/c	d_t/c	d_p/c	r
Quinto	45	21%	37,0%	33,0%	39,0 m
Sexto	46	18%	39,2%	39,4%	41,8 m- 42,13 m

Sorprendentemente, se ha descubierto que los perfiles aerodinámicos proporcionan mayores relaciones de sustentación a resistencia que los perfiles aerodinámicos de turbinas eólicas convencionales y, en particular, en comparación con los perfiles NACA. Los seis perfiles son aerodinámicamente compatibles, y las regiones entre perfiles aerodinámicos adyacentes comprenden una transición suave entre dichos perfiles adyacentes mediante la interpolación entre dichos perfiles adyacentes, por ejemplo, a través de curvas de distribución gaussianas. Las transiciones también dan cuenta de la torsión variable en la dirección longitudinal de la pala y, por lo tanto, se ve que la transición es tridimensional.

Las Figuras 5-8 representan gráficas de la distribución de la cuerda c , el espesor relativo t/c , la torsión θ y el precurvado Δy de la pala de la turbina eólica según el ejemplo (denominado LM42.1p) en función de la posición radial relativa r/L . Los gráficos se comparan con los de la pala de la técnica anterior LM40.3p, que tiene una longitud de pala de 40,0 m y, por tanto, es comparable a la presente pala.

En la Figura 5, puede verse que la anchura de hombro de la presente pala es aproximadamente un 8% más pequeña que la de la pala de la técnica anterior. Además, cabe señalar que el eje x representa la posición radial relativa de la pala. Por tanto, la anchura relativa de hombro de la presente pala se ha reducido incluso más del 8%.

La Figura 6 representa un gráfico del espesor relativo de la pala en función de la posición radial relativa de la pala. Se ve que el espesor relativo de la presente pala es mucho mayor que el espesor relativo de la pala de la técnica anterior, en particular en el intervalo de 0,5L a 0,9L. En el intervalo de 0,6L a 0,8L, el espesor relativo es aproximadamente un 33% mayor que el de la pala de la técnica anterior.

La Figura 7 muestra la distribución de torsión de la presente pala en comparación con la pala de la técnica anterior. Puede verse que la torsión es creciente en la región de raíz y la región de transición en oposición a la pala de la técnica anterior, donde la torsión es sustancialmente constante o está disminuyendo ligeramente en esta región. La torsión está disminuyendo en una parte interior de la región de perfil aerodinámico y está aumentando en una parte exterior de la región de perfil aerodinámico. La parte interior y la parte exterior están separadas por una posición de tangente de inflexión de torsión. La torsión en la tangente de inflexión se define como una torsión de 0 grados. La tangente de inflexión se encuentra en $r = 0,855L$, que es mucho más hacia adentro que la pala de la técnica anterior, donde la tangente de inflexión se encuentra en $r = 0,943L$. La torsión máxima de la presente pala es de 10,28 grados, que es menor que la torsión máxima de 11 grados de la pala de la técnica anterior.

La Figura 8 representa el precurvado de la pala y se puede ver que el precurvado absoluto total de la presente pala es un 50% mayor que el de la pala de la técnica anterior.

Todas estas diferencias, y en particular un hombro más estrecho, una pala relativamente más gruesa y un precurvado más grande combinados, hacen posible obtener una pala más ligera, que mecánicamente es igual de fuerte, pero tiene un rendimiento aerodinámico más eficiente. De hecho, la presente pala tiene una masa menor que la pala de la técnica anterior a pesar de ser más larga. Las cargas que las dos palas impondrían en una turbina eólica son comparables, lo que significa que la presente pala puede reemplazar fácilmente a la pala de la técnica anterior sin tener que redimensionar la propia turbina eólica.

La Figura 9 ilustra esquemáticamente una primera curva de potencia 80 que muestra la potencia de salida de una turbina eólica provista con palas de la técnica anterior y una segunda curva de potencia 81 que muestra la potencia de salida de una turbina eólica provista de palas según la presente invención, ambos gráficos ilustrados como una función de la velocidad del viento V_w . Se ve que la potencia de salida aumenta más rápidamente en función de la velocidad del viento hasta el nivel de regulación de potencia de la turbina eólica. El aumento en la producción anual de energía (PAE) se relaciona con la diferencia entre las dos curvas y, por lo tanto, el área sombreada 82 del gráfico. Se prevé que el aumento de la PAE sea del 4%.

Lista de números de referencia

- 2 turbina eólica
- 4 torre
- 6 góndola
- 8 buje

	10	pala
	14	punta de pala
	16	raíz de pala
	18	borde de ataque
5	20	borde de salida
	22	eje de ángulo de paso
	30	región de raíz
	32	región de transición
	34	región de perfil aerodinámico
10	41	primer perfil aerodinámico
	42	segundo perfil aerodinámico
	43	tercer perfil aerodinámico
	44	cuarto perfil aerodinámico
	45	quinto perfil aerodinámico
15	46	sexto perfil aerodinámico
	50	perfil aerodinámico
	52	lado de presión
	54	lado de succión
	56	borde de ataque
20	58	borde de salida
	60	cuerda
	62	línea de curvatura / línea media
	80	curva de potencia de la turbina eólica con palas de la técnica anterior
	81	curva de potencia de la turbina eólica con palas novedosas
25	82	aumento de la potencia de salida
	c	longitud de la cuerda
	d_t	posición de máximo espesor
	d_f	posición de curvatura máxima
	d_p	posición de la curvatura del lado de presión máxima
30	f	curvatura L longitud de la pala
	P	salida de potencia
	r	radio local, distancia radial desde la raíz de pala
	t	espesor
	v_w	velocidad del viento
35	θ	torsión, ángulo de paso
	Δy	precurvado

REIVINDICACIONES

1. Una pala (10) para un rotor de una turbina eólica (2) que tiene un eje de rotor sustancialmente horizontal, comprendiendo dicho rotor un buje (8), desde el cual la pala (10) se extiende sustancialmente en una dirección radial cuando se monta en el buje (8), teniendo la pala una dirección longitudinal (r) con un extremo de punta (16) y un extremo de raíz (14) y una dirección transversal, la pala comprende además:
 - 5 - un contorno perfilado que incluye un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque (18) y un borde de salida (20) con una cuerda que tiene una longitud de cuerda (c) que se extiende entre ellos, generando el contorno perfilado, cuando es impactado por un flujo de aire incidente, una sustentación, donde el contorno perfilado se divide en:
 - 10 - una región de raíz (30) que tiene un perfil sustancialmente circular o elíptico más cercana al buje,
 - una región de perfil aerodinámico (34) que tiene un perfil generador de sustentación más alejado del buje, y
 - una región de transición (32) entre la región de raíz (30) y la región de perfil aerodinámico (34), teniendo la región de transición (32) un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial desde el perfil circular o elíptico de la región de raíz hasta el perfil generador de sustentación de la región de perfil aerodinámico, y con
 - 15 - un hombro (40) que tiene un ancho de hombro (W) y está ubicado en el límite entre la región de transición (32) y la región de perfil aerodinámico (34), donde
 - la pala (10) tiene una longitud de pala (L), en la que la longitud de pala (L) es de al menos 40 metros, y
 - el contorno perfilado comprende un espesor relativo local definido como la relación local entre un espesor máximo de perfil (t) y la longitud de la cuerda (c),
 - 20 - la relación entre la anchura de hombro (W) y la longitud de la pala (L) es menor que o igual a 0,075, caracterizado porque
 - el espesor relativo (t/c) en un intervalo de longitudes de pala de 0-0,8L es al menos del 22%,
 - donde la pala comprende un segundo perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 29% y 31% y una posición de espesor máximo situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, en donde el segundo perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, y el segundo perfil aerodinámico está situado entre 0,30L y 0,36L,
 - 25 - donde la pala comprende un tercer perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 26,3% y 27,7% y una posición de espesor máximo situada entre 0,28c y 0,32c desde el borde de ataque, donde el tercer perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,255c y 0,295c desde el borde de ataque y el tercer perfil aerodinámico está situado entre 0,36L y 0,45L, y
 - 30 - donde la pala comprende un cuarto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 23,5% y 24,5% y una posición de espesor máximo situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque, donde el cuarto perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque y el cuarto perfil aerodinámico está situado entre 0,5L y 0,85L.
- 35 2. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la región de raíz tiene un diámetro de raíz (D) en el extremo de raíz de la pala, en la que la relación entre el ancho de hombro (W) y el diámetro de raíz es 1,6 o menos.
- 40 3. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el borde de salida tiene una forma suave sin discontinuidades en la dirección longitudinal de la pala, por ejemplo, donde el borde de salida tiene una curvatura con un radio exterior (r_o) externo al borde de salida, que en todas las posiciones es al menos 0,2L, ventajosamente al menos 0,22L, y más ventajosamente al menos 0,24L, y / o donde el borde de salida tiene una curvatura con un radio interno (r) interno al borde de salida, que en todas las posiciones es al menos 0,2L, ventajosamente al menos 0,225L y más ventajosamente al menos 0,25L.
- 45 4. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el hombro está situado en un intervalo entre 0,18L y 0,25L, ventajosamente entre 0,19L y 0,24L, y / o el espesor relativo de la pala en el hombro está entre 40% y 50%, ventajosamente entre 42% y 48%.
- 50 5. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala de turbina eólica está precurvada hacia el lado de presión de la pala, y un precurvado (Δy) en el extremo de punta de la pala es de al menos 0,05L, ventajosamente de al menos 0,06L, más ventajosamente al menos 0,65L, e incluso más ventajosamente al menos 0,07L, por ejemplo, en el que la pala se curva previamente sobre al menos un 50% exterior de la pala, ventajosamente sobre al menos un 60% exterior de la pala, incluso más ventajosamente sobre al menos un 70% exterior, o incluso al menos un 75% exterior.

6. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala está provista de una torsión, y en la que la región de perfil aerodinámico comprende una parte interior en la que el ángulo de torsión disminuye hacia el extremo de la punta de la pala y una parte exterior en la que el ángulo de torsión aumenta hacia el extremo de la punta de la pala, estando dicha parte exterior y dicha parte interior separadas por una posición de una tangente de inflexión de torsión, por ejemplo, donde la posición de la tangente de inflexión de torsión se sitúa entre 0,8L y 0,9L, ventajosamente entre 0,82L y 0,88L, más ventajosamente entre 0,83L y 0,87L, e incluso más ventajosamente aproximadamente en 0,85L.
7. Pala de turbina eólica según la reivindicación 6, en la que la torsión en la zona exterior varía al menos 4 grados, ventajosamente al menos 5 grados y más ventajosamente al menos 5,5 grados, y / o la torsión en la parte interior varía entre 8 y 12 grados, ventajosamente entre 8,5 y 11,5 grados, y más ventajosamente entre 9 y 11 grados.
8. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala comprende un primer perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 35% y 37% y una posición de espesor máximo situada entre 0,24c y 0,30c desde el borde de ataque, ventajosamente situada entre 0,25c y 0,29c y más ventajosamente alrededor de 0,26c y 0,28c, por ejemplo, donde el primer perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,24c y 0,30c desde el borde de ataque, situada ventajosamente entre 0,25c y 0,29c y más ventajosamente alrededor de 0,26c y 0,28c, y / o el primer perfil aerodinámico se encuentra entre 0,23L y 0,30L.
9. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el segundo perfil de perfil aerodinámico tiene una posición de espesor máximo situada entre 0,29c y 0,31c desde el borde de ataque, y en la que el segundo perfil de perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,29c y 0,31c desde el borde de ataque.
10. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el tercer perfil de perfil aerodinámico tiene una posición de espesor máximo situada entre 0,29c y 0,31c desde el borde de ataque y en la que el tercer perfil de perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,265c y 0,285c desde el borde de ataque.
11. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el cuarto perfil aerodinámico tiene una posición de espesor máximo situada entre 0,36c y 0,38c desde el borde de ataque, y en la que el cuarto perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,36c y 0,38c desde el borde de ataque.
12. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala comprende un quinto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 20,6% y 21,4% y una posición de espesor máximo situada entre 0,35c y 0,39c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,36c y 0,38c, por ejemplo, donde el quinto perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,31c y 0,35c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,32c y 0,34c, y / o el quinto perfil aerodinámico está situado entre 0,85L y 0,95L.
13. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala comprende un sexto perfil aerodinámico que tiene un espesor relativo de entre 17,7% y 18,3% y una posición de espesor máximo situada entre 0,37c y 0,41c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,38c y 0,40c, por ejemplo, donde el sexto perfil de perfil aerodinámico comprende una posición de curvatura del lado de presión máxima situada entre 0,37c y 0,41c desde el borde de ataque, ventajosamente entre 0,38c y 0,40c, y / o el sexto perfil de aerodinámico está situado en la punta, entre 0,95L y L.
14. Una pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la pala está provista de dispositivos de alteración del flujo, tales como generadores de vórtice, en la que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un espesor relativo de al menos 30%, y / o dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un espesor relativo del 70% como máximo.
15. Una turbina eólica que comprende un cierto número, preferiblemente dos o tres, de palas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, las palas se extienden sustancialmente radialmente desde un buje en un eje principal que tiene un eje central sustancialmente horizontal, las palas junto con el buje constituyen un rotor con un plano de rotor, y que se puede poner en rotación por el viento, en el que la turbina eólica puede opcionalmente ser controlada por ángulo de paso y / o regulada por potencia, por ejemplo, con una potencia máxima de salida de la turbina eólica comprendida entre 1,3 MW y 1,7 MW, ventajosamente alrededor de 1,5 MW.

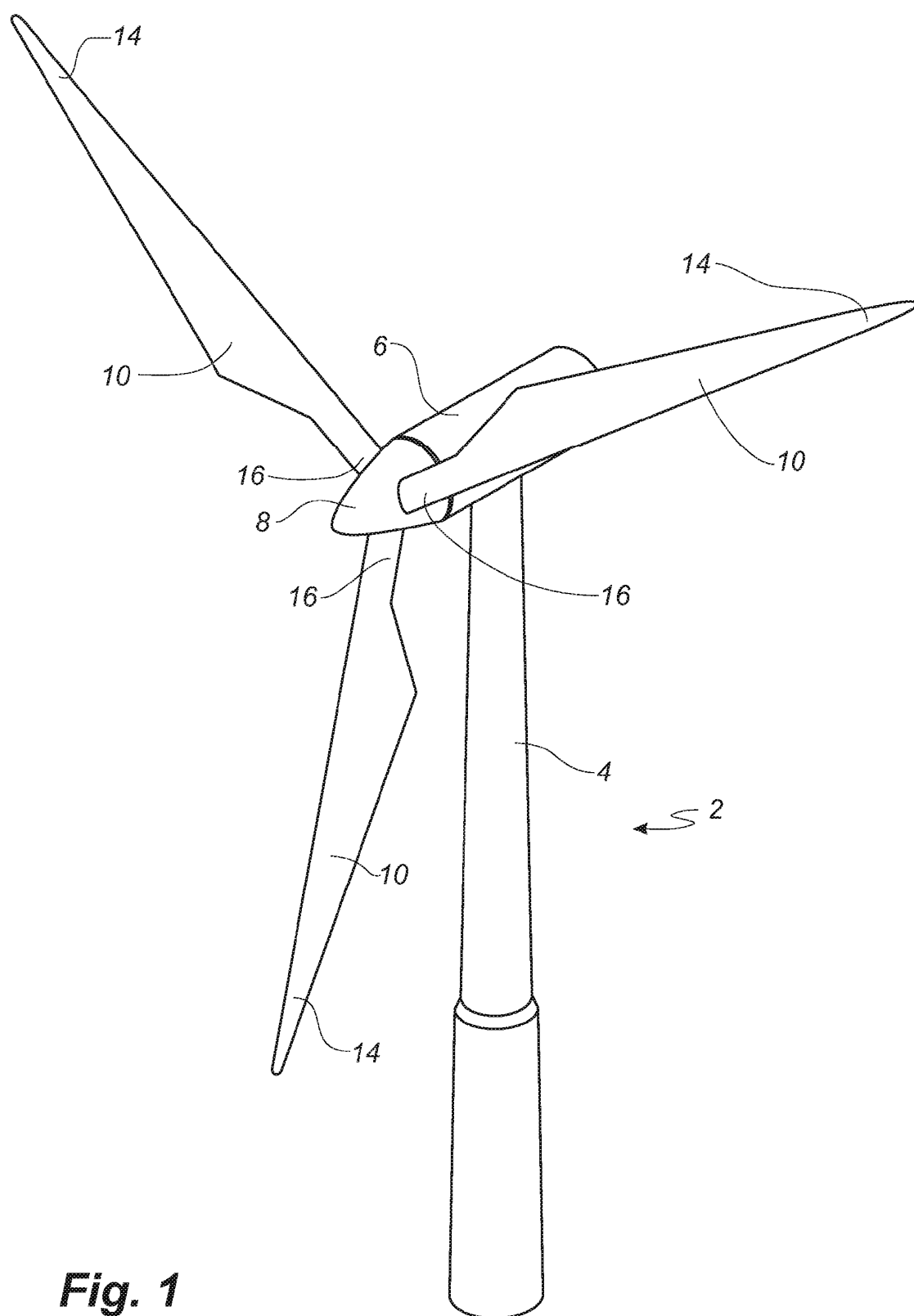
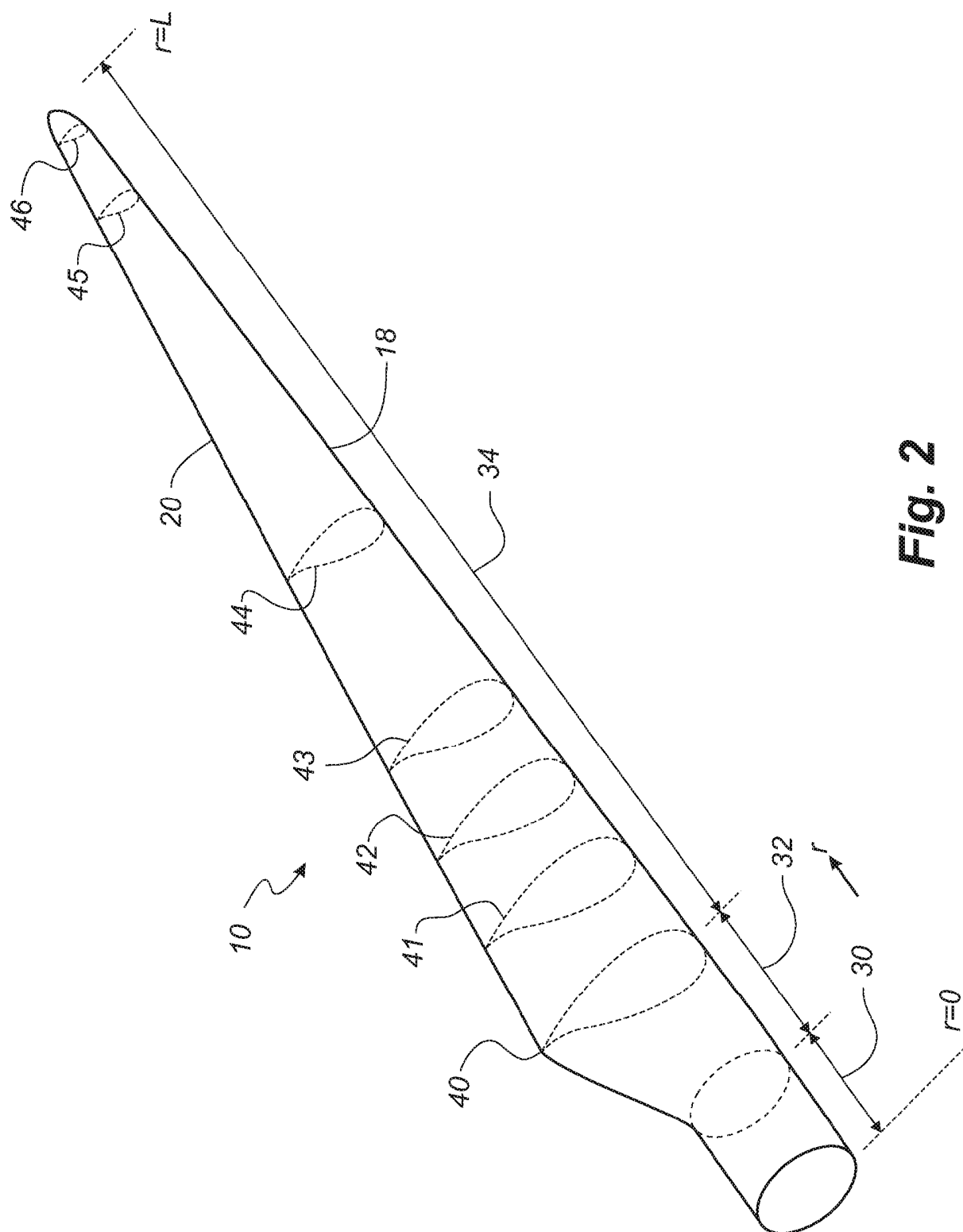


Fig. 1



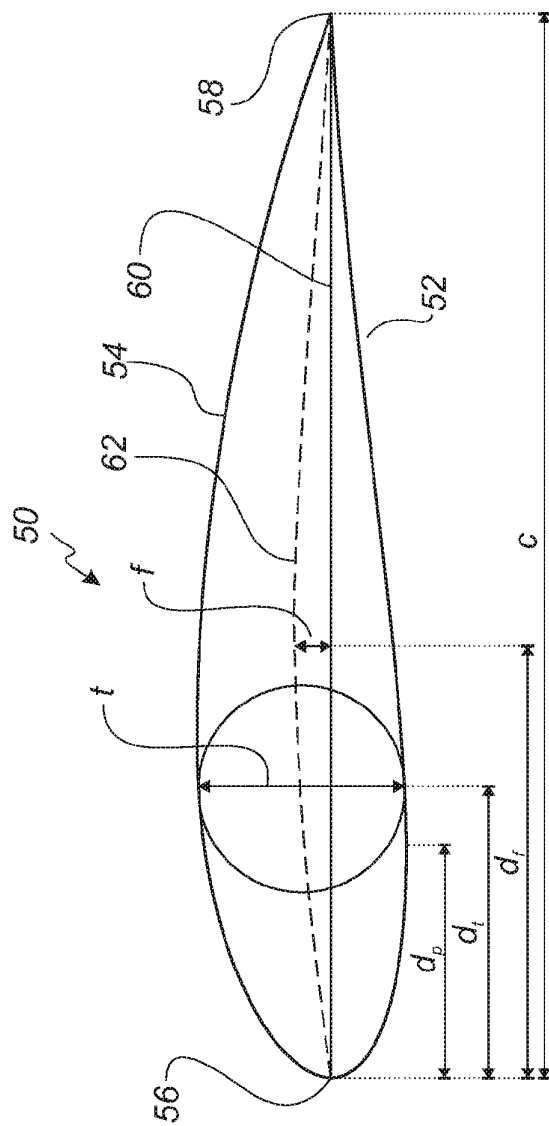


Fig. 3

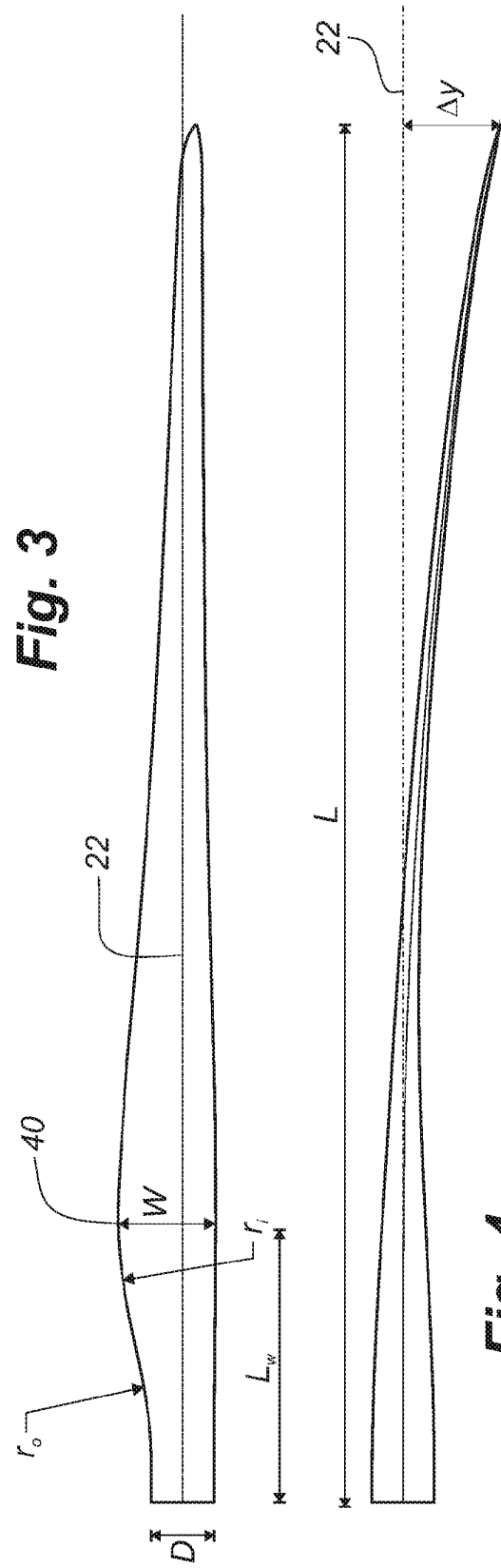


Fig. 4

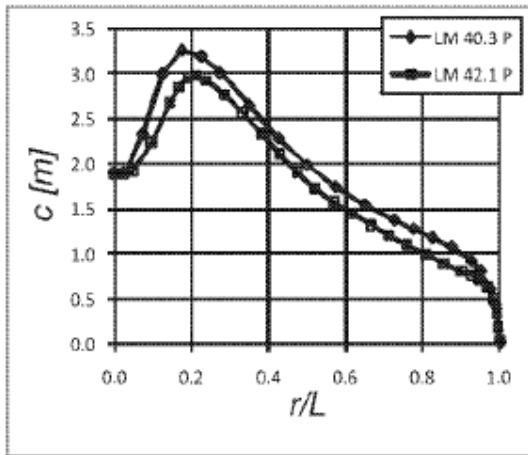


Fig. 5

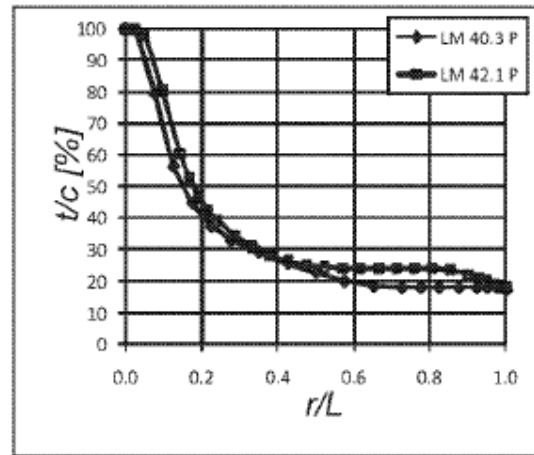


Fig. 6

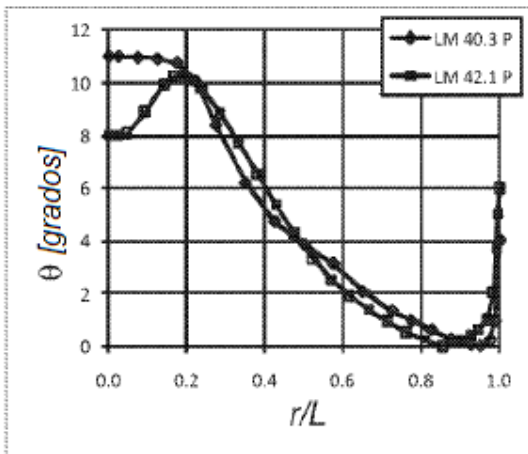


Fig. 7

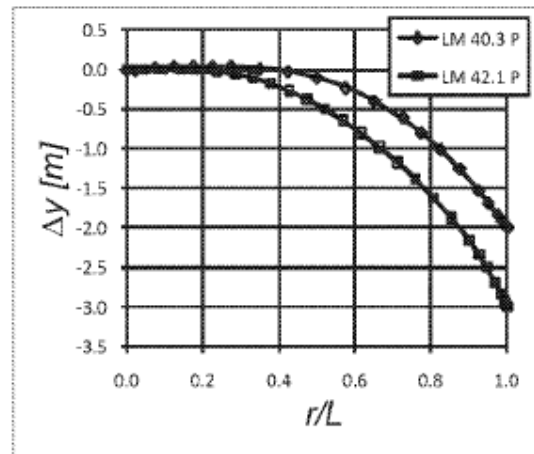


Fig. 8

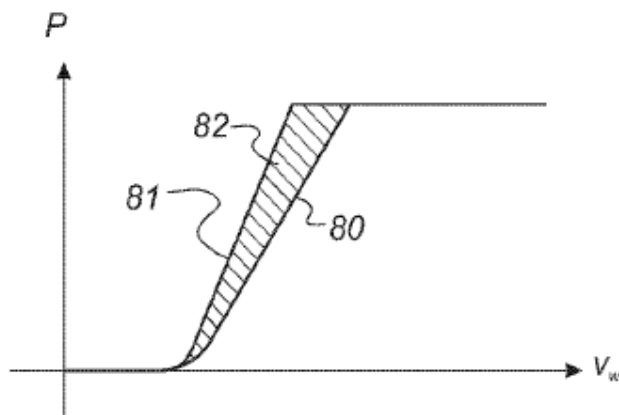


Fig. 9