

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 169**

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 20217409 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.08.2023** **EP 3835571**

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

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**18.04.2024**

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:

**DE ROOIJ, Mathieu Julien**

**ES 2 966 169 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 de perfil alar relativamente gruesos

5 **[0001]** La presente invención se refiere a una pala para un rotor de una turbina eólica que tiene un eje de rotor sustancialmente horizontal, comprendiendo dicho rotor un buje, desde el que se extiende la pala sustancialmente en una dirección radial cuando está montada en el buje, teniendo la pala una dirección longitudinal con un extremo de punta y un extremo de raíz y una dirección transversal, comprendiendo además la pala: 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, generando el contorno perfilado, cuando se ve impactado por un flujo de aire incidente, una sustentación, en la 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 alar que tiene un perfil generador de sustentación más alejado del buje, y una región de transición entre la región de raíz y la región de perfil alar, teniendo la región de transición 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 alar, y con un hombro que tiene un ancho de hombro y localizado en el límite entre la región de transición y la región de perfil alar, en la que la pala tiene una longitud de pala, y el contorno perfilado comprende un grosor relativo local definido como la proporción local entre un máximo grosor de perfil y la longitud de cuerda.

20 **[0002]** Los fabricantes de turbinas eólicas se esfuerzan constantemente por mejorar la eficacia de sus turbinas eólicas para maximizar la producción anual de energía. Además, los fabricantes de turbinas eólicas están interesados en prolongar la vida útil de sus modelos de turbinas eólicas, puesto que desarrollar un nuevo modelo de turbina eólica lleva mucho tiempo y abundantes recursos. Una manera obvia de mejorar la eficacia de la turbina eólica es mejorar la eficacia de las palas de turbina eólica, de modo que la turbina eólica pueda generar una mayor salida de potencia a una velocidad del viento dada. Sin embargo, no se pueden reemplazar arbitrariamente las palas de un modelo de turbina eólica por otras palas más eficaces. Los modelos de turbinas eólicas están dimensionados para intervalos de carga específicos del rotor y las palas. Por tanto, se debe garantizar que las nuevas palas de turbina eólica cumplan con las especificaciones de diseño del modelo de turbina eólica y, además, se debe garantizar que la propia pala de turbina eólica cumpla con los problemas de garantía y esté construida para durar al menos una serie de años sin averiarse.

30 **[0003]** 'K. K. Jin *et al.*: "Life Prediction of Wind Turbine Blades [Predicción de la vida útil de palas de turbina eólica]", CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE MATERIALES COMPUESTOS (ICCM), vol. 17, 1 de julio de 2009, páginas 1-12, documento XP055435697' divulga un modelo para un procedimiento de predicción de vida útil de palas de turbina eólica. El artículo usa un modelo de turbina eólica que tiene un rotor con un radio de 73,1 m.

40 **[0004]** El modelo usa los perfiles alares de la serie S NREL S816/S817/S818. El perfil S818 se distribuye en posición entre un 25 %-75 % de la amplitud de rotor, el S816 se distribuye en posición entre un 75 %-90 % de la amplitud de rotor y el S817 se distribuye en posición entre un 90 %-100 % de la amplitud de rotor. Un objetivo de la invención es obtener una nueva pala de turbina eólica, que esté diseñada para cumplir con la especificación de diseño previo o que proporcione una alternativa útil a las palas existentes.

45 **[0005]** De acuerdo con un primer aspecto de la invención, el objetivo se obtiene por una pala de turbina eólica del tipo mencionado anteriormente y de acuerdo con la reivindicación 1, en la que la proporción entre el ancho de hombro y la longitud de pala es menor o igual a 0,075, y el grosor relativo en un intervalo de longitud de pala de 0-0,8L es de al menos un 22 %.

50 **[0006]** Por tanto, se ve que la invención proporciona una pala de turbina eólica delgada y relativamente gruesa. De este modo, es posible minimizar la carga de la pala, puesto que se minimiza el área total de la pala, reduciendo por tanto, por ejemplo, las cargas de tormenta, mientras que una pala gruesa es más rígida, puesto que la estructura de soporte de carga puede estar más espaciada, lo que a su vez significa que la concha de pala se puede hacer más delgada. Por tanto, se puede mantener baja la masa global. Sin embargo, se ha descubierto de forma sorprendente que la combinación del uso de un ancho de hombro estrecho y un perfil de pala relativamente grueso incrementa significativamente la producción anual de energía (AEP) de una pala de este tipo, en particular puesto que la pala se puede hacer más larga que las palas existentes, imponiendo aproximadamente la misma carga sobre la turbina eólica provista de dichas palas. Sin embargo, si se usara una de estas dos medidas sola para reducir la carga, la AEP se reduciría.

60 **[0007]** Por hombro ("shoulder") se entiende la posición en la que la pala de turbina eólica tiene su mayor longitud de cuerda. El intervalo de longitud se define desde el extremo de raíz hasta el extremo de punta, situándose, por tanto, el extremo de raíz en  $r=0$  y situándose el extremo de punta en  $r=L$ .

65 **[0008]** Preferentemente, la pala está precurvada o pretensada. En un modo de realización de este tipo, la pala está curvada hacia el lado de presión de la pala, es decir, está curvada de modo que la pala, cuando se

instala en una turbina eólica a barlovento, se curvará 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 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 a favor del viento) de la pala, respectivamente, maximizando, por tanto, el área barrida por la pala en un plano de rotor. Una pala precurvada hace posible reducir aún más la rigidez de la pala, reduciendo, de este modo, el material necesario y, en consecuencia, también la carga de la pala.

5  
10 **[0009]** En definitiva, se ve que un hombro estrecho o una pala delgada con un grosor relativamente alto y provista de una flexión previa son todas medidas que combinadas proporcionan una pala con una carga menor que las palas de la técnica anterior.

15 **[0010]** En un modo de realización, la proporción entre el ancho de hombro y la longitud de pala es menor o igual a 0,073 y, de forma ventajosa, menor o igual a 0,0725 y, de forma más ventajosa, menor o igual a 0,072. Todos estos modos de realización proporcionan palas que son relativamente delgadas, es decir, que tienen una longitud de cuerda máxima pequeña.

20 **[0011]** En otro modo de realización, el grosor relativo en un intervalo de longitud de pala de 0-0,8L es de al menos un 23 %, de forma ventajosa, de al menos un 23,5 % y, de forma más ventajosa, de al menos un 24 %. Dichos perfiles tienen un grosor de pala relativo que es significativamente mayor que el de las palas convencionales, en particular en la región de 0,65L-0,8L.

25 **[0012]** Aún en otro modo de realización ventajosa, el grosor de pala relativo en el intervalo de pala de 0-0,8L es de al menos un 25 %, o de al menos un 26 %.

**[0013]** De forma ventajosa, la longitud de pala es de al menos 40 metros, de forma más ventajosa, entre 40 metros y 50 metros. Se ha descubierto que la delgadez y el grosor propuestos son en particular adecuados para estas longitudes de pala.

30 **[0014]** En un modo de realización ventajoso, la región de raíz tiene un diámetro de raíz en el extremo de raíz de la pala, en la que la proporción entre el ancho de hombro y el diámetro de raíz es de 1,6 o menos. Al tener un radio de ancho de hombro con respecto al diámetro de raíz bajo, es posible tener una pequeña divergencia del borde de salida y del 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 del borde de ataque, respectivamente, se puede mantener baja. Por tanto, de acuerdo con un modo de realización en particular ventajoso, el borde de salida presenta una conformación lisa sin ninguna discontinuidad en la dirección longitudinal de la pala. Esto se aplica en particular a la región de transición de la pala e incluye las transiciones desde la región de raíz hasta la región de transición y desde la región de transición hasta la región de perfil alar de la pala. Desde el punto de vista de fabricación, un modo de realización de este tipo es atractivo, puesto que facilita llevar a cabo el laminado de las capas de fibra en los moldes para la fabricación. Además, se reducirán significativamente las cargas que afectan al borde de salida durante el funcionamiento normal de una pala de este tipo.

45 **[0015]** El borde de salida tiene una curvatura con un radio exterior externo al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,2L, de forma ventajosa, de al menos 0,22L y, de forma más ventajosa, de al menos 0,24L. De acuerdo con un modo de realización, la posición del radio exterior mínimo está localizada entre 0,04L y 0,06L, de forma ventajosa, entre 0,045L y 0,055L.

50 **[0016]** El borde de salida tiene una curvatura con un radio interior (Ri) interno al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,2L, de forma ventajosa, de al menos 0,225L y, de forma más ventajosa, de al menos 0,25L. De acuerdo con un modo de realización, la posición del radio exterior mínimo está localizada entre 0,16L y 0,20L, de forma ventajosa, entre 0,19L y 0,21L.

55 **[0017]** Un gran radio de borde de salida (interior y/o exterior) garantiza una baja curvatura de borde de salida, lo que desde el punto de vista de fabricación significa que el laminado de las fibras se puede llevar a cabo sin que las capas de fibra se arruguen. Esto, a su vez, garantiza que la concha de pala terminada después de la inyección de resina y el curado no comprenda propiedades mecánicas perjudiciales.

60 **[0018]** Debido a la torsión ("twist") y al diseño tridimensional de la pala, puede ser difícil determinar la localización exacta del borde de salida. Por lo tanto, en un modo de realización, el radio interior y exterior se puede deducir proyectando la pala en un plano, cuando se observa la pala desde arriba en un *pitch* de 0 grados.

65 **[0019]** En un modo de realización, el hombro está localizado en un intervalo entre 0,18L y 0,25L, de forma ventajosa, entre 0,19L y 0,24L. En un modo de realización ventajoso, una pala de turbina eólica que tiene una longitud en el intervalo de 40-45 metros tiene el hombro localizado entre 0,19L y 0,21L. En otro modo de

realización de pala de turbina eólica que tiene una longitud en el intervalo de 45-50 metros, de forma ventajosa, en el intervalo de 46,5-48,5 metros, el hombro está localizado entre 0,22L y 0,24L.

5 [0020] En otro modo de realización, el borde de ataque tiene una conformación lisa sin ninguna discontinuidad en la dirección longitudinal de la pala. De forma ventajosa, la pala comprende un eje de *pitch*, y en la que la distancia entre el borde de ataque con respecto al eje de *pitch* desde el extremo de raíz hasta el hombro se incrementa no más de un 20 %, de forma ventajosa, no más de un 15 %.

10 [0021] Como se menciona previamente, la pala de turbina eólica está preferentemente precurvada o curvada hacia el lado de presión de la pala. La flexión previa en el extremo de punta de la pala es en un modo de realización de al menos 0,05L, de forma ventajosa, de al menos 0,06L, de forma más ventajosa, de al menos 0,65L e, incluso de forma más ventajosa, de al menos 0,07L. Por precurvado se entiende que el centro de perfil o cuerda de un perfil local está distanciado de un eje de *pitch* o eje longitudinal de la pala. Al incrementar la flexión previa en comparación con las palas convencionales, la rigidez debe ser menor para que la pala se enderece y se maximice el área barrida a la velocidad del viento de diseño. Por tanto, se necesita menos material en la concha de pala o en la estructura de soporte de carga de la pala. Esto a su vez significa que la masa total de la pala se puede reducir aún más.

15 [0022] De forma ventajosa, la pala está precurvada sobre al menos un 50 % exterior de la pala, de forma ventajosa, sobre al menos un 60 % exterior de la pala, incluso de forma más ventajosa, sobre al menos un 70 % exterior o incluso al menos un 75 % exterior. Por tanto, la pala está curvada sobre una gran parte de la pala en la parte más cercana a la punta.

20 [0023] En otro modo de realización, la pala está provista de una torsión, y en la que la región de perfil alar comprende una parte interior en la que el ángulo de torsión disminuye hacia el extremo de punta de la pala y una parte exterior en la que el ángulo de torsión se incrementa hacia el extremo de punta de la pala, estando separadas dicha parte exterior y parte interior por una posición de una tangente de inflexión de torsión. Al disminuir el ángulo de torsión en una parte interior de la pala, se logra una compensación de la velocidad radial local de la pala. El ruido de punta de la pala se reduce dejando que la torsión de la parte exterior de la pala se incremente hacia la punta.

25 [0024] La torsión normalmente se calcula a partir de un punto de origen definido. Para la presente pala, dicho origen se puede definir, por ejemplo, en la tangente de inflexión, definiéndose, por tanto, la torsión local en esta posición como 0 grados. Por tanto, está claro que la torsión no se debe considerar solo como un ángulo de torsión absoluto local, que puede variar debido al ángulo de *pitch* establecido de la pala, sino que se debe ver más bien 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 establecimiento de *pitch* dado de la pala.

30 [0025] Aún en otro modo de realización, la posición de la tangente de inflexión de torsión está localizada entre 0,8L y 0,9L, de forma ventajosa, entre 0,82L y 0,88L, de forma más ventajosa, entre 0,83L y 0,87L e, incluso de forma más ventajosa, aproximadamente en 0,85L.

35 [0026] De forma ventajosa, la torsión en la región exterior es de al menos 4 grados, de forma ventajosa, de al menos 5 grados y, de forma más ventajosa, 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 estar, de forma ventajosa, entre 8 y 12 grados, de forma ventajosa, entre 8,5 y 11,5 grados y, de forma más ventajosa, 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.

40 [0027] En un modo de realización, la pala está provista de una torsión que en la región de raíz y en la región de transición se incrementa hacia el extremo de punta de la pala. El incremento de la torsión puede estar, por ejemplo, en la región de raíz y en la región de transición entre 1,5 y 2,5 grados. Por tanto, la variación de torsión en esta región está entre 1,5 y 2,5 grados.

45 [0028] De acuerdo con un segundo aspecto, la invención proporciona una serie de perfiles de pala de turbina eólica, que son en particular eficaces y que se apartan de los perfiles de pala estándar, tales como los perfiles NACA, que se utilizan típicamente para palas de turbinas eólicas. Los perfiles de pala no solo son aplicables a la pala de turbina eólica de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

50 [0029] Por tanto, la invención proporciona una pala de turbina eólica, que en sección transversal comprende al menos uno de los seis perfiles siguientes:

55 - un primer perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 35 % y un 37 % y una posición de máximo grosor localizada entre 0,24c y 0,30c del borde de ataque, de forma ventajosa, localizada entre 0,25c y 0,29c y, de forma más ventajosa, alrededor de 0,26c y 0,28c,

- un segundo perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 29 % y un 31 % y una posición de máximo grosor localizada entre 0,28c y 0,32c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,29c y 0,31c,
- 5 - un tercer perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 26,3 % y un 27,7 % y una posición de máximo grosor localizada entre 0,28c y 0,32c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,29c y 0,31c,
- un cuarto perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 23,5 % y un 24,5 %, de forma ventajosa, entre un 23,8 % y un 24,2 %, y una posición de máximo grosor localizada entre 0,35c y 0,39c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,36c y 0,38c del borde de ataque,
- 10 - un quinto perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 20,6 % y un 21,4 % y una posición de máximo grosor localizada entre 0,35c y 0,39c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,36c y 0,38c, y
- 15 - un sexto perfil alar que tiene un grosor relativo de entre un 17,7 % y un 18,3 % y una posición de máximo grosor localizada entre 0,37c y 0,41c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,38c y 0,40c.

[0030] Los perfiles alares se definen en relación con el grosor relativo del perfil, la posición de cuerda relativa del máximo grosor y la posición de cuerda relativa de la máxima curvatura de lado de presión. El grosor se define en una dirección perpendicular a la cuerda, y la curvatura de 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 fig. 3 y se exponen en la descripción adjunta.

[0031] Preferentemente, la pala comprende una región de raíz, una región de transición y una región de perfil alar de acuerdo con la turbina eólica de acuerdo con el primer aspecto de la invención. En un modo de realización de este tipo, los perfiles están localizados en la región de perfil alar (exterior al hombro) de la pala.

[0032] En un modo de realización, la pala comprende al menos dos de los seis perfiles de perfil alar. En otro modo de realización, la pala comprende al menos tres de los seis perfiles de perfil alar. Aún en otro modo de realización, la pala comprende al menos cuatro de los seis perfiles de perfil alar. La pala también puede comprender al menos cinco de los seis perfiles de perfil alar, e incluso puede comprender los seis perfiles de perfil alar.

[0033] Los modos de realización mencionados anteriormente y los siguientes modos de realización se pueden referir todos a una pala de turbina eólica de acuerdo con el primer aspecto, así como a una pala de turbina eólica de acuerdo con el segundo aspecto.

[0034] El primer perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,24c y 0,30c del borde de ataque, de forma ventajosa, localizada entre 0,25c y 0,29c y, de forma más ventajosa, alrededor de 0,26c y 0,28c. El primer perfil alar puede estar localizado de forma ventajosa entre 0,23L y 0,30L.

[0035] El segundo perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,28c y 0,32c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,29c y 0,31c. El segundo perfil alar puede estar localizado de forma ventajosa entre 0,30L y 0,36L.

[0036] El tercer perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,255c y 0,295c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,265c y 0,285c. El tercer perfil alar puede estar localizado de forma ventajosa entre 0,36L y 0,45L.

[0037] El cuarto perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,35c y 0,39c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,36c y 0,38c. El cuarto perfil alar puede estar localizado entre 0,5L y 0,85L, de forma ventajosa, a lo largo de todo el intervalo de 0,67L a 0,8L.

[0038] El quinto perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,31c y 0,35c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,32c y 0,34c. El quinto perfil alar puede estar localizado de forma ventajosa entre 0,85L y 0,95L.

[0039] El sexto perfil alar puede comprender una posición de máxima curvatura de lado de presión localizada entre 0,37c y 0,41c del borde de ataque, de forma ventajosa, entre 0,38c y 0,40c. El sexto perfil alar puede estar localizado de forma ventajosa en la punta, entre 0,95L y L.

[0040] Lo común para los perfiles de perfil alar novedosos y, en particular, para los cuarto, quinto y sexto perfiles de perfil alar es que son relativamente gruesos y que la posición de máximo grosor se sitúa relativamente lejos del borde de ataque. Además, se ve que la posición de máxima curvatura de lado de presión

casi coincide con la posición de máximo grosor relativo. De forma sorprendente, estos rasgos característicos se han encontrado en una alta proporción de sustentación con respecto a arrastre en el punto de diseño a pesar de los grandes grosores relativos de los perfiles. Además, los perfiles alares son geoméricamente compatibles.

5

**[0041]** De acuerdo con un modo de realización, una región entre perfiles de perfil alar contiguos comprende una transición suave entre dichos perfiles contiguos por medio de interpolación entre dichos perfiles contiguos, por ejemplo, por medio de curvas de distribución gaussianas. Por tanto, la región entre el primer perfil alar y el segundo perfil alar comprende perfiles interpolados entre el primer perfil alar, y correspondientemente entre el segundo y el tercer perfil alar, entre el tercer y el cuarto perfil alar, entre el cuarto y el quinto perfil alar, y/o entre el quinto y el sexto perfil alar. Naturalmente, las transiciones también deberían tener en cuenta la variación de la torsión en la dirección longitudinal de la pala.

10

**[0042]** De forma ventajosa, la pala puede estar provista de dispositivos de modificación de flujo, tales como generadores de vórtices, en los que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un grosor relativo de al menos un 30 %. En un modo de realización, la pala está provista de dispositivos de modificación de flujo, tales como generadores de vórtices, en los que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un grosor relativo de máximo un 70 %.

15

**[0043]** En un modo de realización en particular ventajoso, los dispositivos de modificación de flujo son dispositivos de aumento de sustentación.

20

**[0044]** Por tanto, los dispositivos están dispuestos en una región longitudinal donde el grosor de perfil relativo está entre un 30 % y un 70 %. De acuerdo con otro modo de realización ventajoso, dichos dispositivos están dispuestos en un intervalo comprendido entre  $0,1L$  y  $0,4L$ , de forma ventajosa, entre  $0,11L$  y  $0,37L$ . Los dispositivos solo se pueden disponer en esta región.

25

**[0045]** En un modo de realización, el grosor relativo de la pala en el hombro está entre un 40 % y un 50 %, de forma ventajosa, entre un 42 % y un 48 %.

30

**[0046]** Preferentemente, la pala comprende un cuerpo de concha. El cuerpo de concha se puede ensamblar, por ejemplo, a partir de una concha de lado de presión y una concha de lado de succión, que están adheridas o unidas entre sí cerca del borde de ataque y cerca del borde de salida. En otro modo de realización, la concha se fabrica por medio de un proceso de una sola vez, por ejemplo, por medio de un procedimiento de moldeado hueco, cerrado.

35

**[0047]** El cuerpo de concha puede comprender estructuras portadoras de carga que se extienden longitudinalmente, tales como un laminado principal. Una estructura portadora de carga o laminado principal de este tipo 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 intercalada con un material central, tal como madera de balsa o polímero espumado, y con un revestimiento interior y exterior hecho de polímero reforzado con fibra.

40

**[0048]** La concha de 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 puede ser, por ejemplo, epoxi, poliéster o éster vinílico.

45

**[0049]** De acuerdo con un tercer aspecto, la invención proporciona una turbina eólica que comprende un número, preferentemente dos o tres, de palas de acuerdo con cualquiera de los modos de realización mencionados anteriormente, extendiéndose las palas sustancialmente de forma radial desde un buje en un eje principal que tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo la palas conjuntamente con el buje un rotor con un plano de rotor, y que se puede poner en rotación por el viento.

50

**[0050]** En un modo de realización, la turbina eólica está controlada por *pitch*. La turbina eólica puede estar regulada por potencia. De acuerdo con un modo de realización, una salida de potencia máxima de la turbina eólica está entre 1,3 MW y 1,7 MW, de forma ventajosa, alrededor de 1,5 MW. Es decir, las palas son en particular adecuadas para turbinas eólicas de clase 1,5 MW.

55

**[0051]** La invención se expone en detalle a continuación con referencia a un modo de realización mostrado en los dibujos, en el que

60

la fig. 1 muestra una turbina eólica,

65

la fig. 2 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención,

la fig. 3 muestra una vista esquemática de un perfil alar,

la fig. 4 muestra una vista esquemática de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención, vista desde arriba y desde el lado

la fig. 5 muestra una distribución de longitud de cuerda de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención,

la fig. 6 muestra una distribución de grosor relativo de cuerda de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención,

la fig. 7 muestra una distribución de torsión de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención,

la fig. 8 muestra una distribución de flexión previa de cuerda de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención, y

la fig. 9 muestra una curva de potencia de una turbina eólica de acuerdo con la invención en función de la velocidad del viento.

**[0052]** La fig. 1 ilustra una turbina eólica a barlovento moderna convencional de acuerdo con 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, teniendo cada una 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.

**[0053]** La fig. 2 muestra una vista esquemática de un primer modo de realización de una pala de turbina eólica 10 de acuerdo con la invención. La pala de turbina eólica 10 tiene la conformación de una pala de turbina eólica convencional y comprende una región de raíz 30 más cercana al buje, una región perfilada o una de perfil alar 34. La pala 10 comprende un borde de ataque 18 orientado en la dirección de rotación de la pala 10, cuando la pala está montada en el buje, y un borde de salida 20 orientado en la dirección opuesta del borde de ataque 18.

**[0054]** La región de perfil alar 34 (también llamada región perfilada) tiene una conformación de pala ideal o casi ideal con respecto a generar sustentación, mientras que la región de 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 raíz 30. La región de transición 32 tiene un perfil de transición que cambia gradualmente desde la conformación circular o elíptica de la región de raíz 30 al perfil alar de la región de perfil alar 34. La longitud de cuerda de la región de transición 32 típicamente se incrementa con el incremento de la distancia  $r$  desde el buje. La región de perfil alar 34 tiene un perfil alar con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque 18 y el borde de salida 20 de la pala 10. El ancho de la cuerda disminuye con el incremento de la distancia  $r$  desde el buje.

**[0055]** Un hombro 40 de la pala 10 se define como la posición donde 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 alar 34.

**[0056]** Cabe destacar que las cuerdas de diferentes secciones de la pala habitualmente no se encuentran en un plano común, puesto que la pala puede estar torcida y/o curvada (es decir, precurvada), proporcionando, por tanto, el plano de cuerda con un curso correspondientemente torcido y/o curvado, siendo este el caso más frecuente para compensar que la velocidad local de la pala dependa del radio del buje.

**[0057]** Las figs. 3 y 4 representan parámetros que se usan para exponer la geometría de la pala de turbina eólica de acuerdo con la invención.

**[0058]** La fig. 3 muestra una vista esquemática de un perfil alar 50 de una pala típica de una turbina eólica representada con los diversos parámetros, que se usan típicamente para definir la conformación geométrica de un perfil alar. El perfil alar 50 tiene un lado de presión 52 y un lado de succión 54, que durante el uso, es decir, durante la rotación del rotor, habitualmente se orientan hacia el lado contra el viento (o a barlovento) y el lado a favor del viento (o a sotavento), respectivamente. El perfil alar 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 alar 50 tiene un grosor  $t$ , que se define como la distancia entre el lado de presión 52 y el lado de succión 54. El grosor  $t$  del perfil alar varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación de un perfil simétrico viene dada por una línea de curvatura 62, que es una línea mediana a través del perfil alar 50. La línea mediana se puede encontrar dibujando círculos inscritos desde el borde de ataque 56 al borde de salida 58. La línea mediana 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 por el uso de parámetros llamados curvatura superior (o curvatura de lado de succión) y curvatura inferior (o curvatura de 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.

**[0059]** Los perfiles alares a menudo se caracterizan por los siguientes parámetros: la longitud de cuerda  $c$ , la máxima curvatura  $f$ , la posición  $d_t$  de la máxima curvatura  $f$ , el máximo grosor de perfil alar  $t$ , que es el diámetro más grande de los círculos inscritos a lo largo de la línea de curvatura mediana 62, la posición  $d_t$  del máximo grosor  $t$  y un radio de nariz (no mostrado). Estos parámetros se definen típicamente como proporciones con respecto a la longitud de cuerda  $c$ . Por tanto, un grosor de pala relativo local  $t/c$  viene dado como la proporción entre el máximo grosor local  $t$  y la longitud de cuerda local  $c$ . Además, la posición  $d_b$  de la máxima curvatura de lado de presión se puede usar como parámetro de diseño y, naturalmente, también la posición de la máxima curvatura de lado de succión.

**[0060]** La fig. 4 muestra otros parámetros geométricos de la pala. La pala tiene una longitud de pala total  $L$ . Como se muestra en la fig. 3, el extremo de raíz está localizado en la posición  $r = 0$ , y el extremo de punta está localizado en  $r = L$ . El hombro 40 de la pala está localizado en una posición  $r = L_w$ , y tiene un ancho de hombro  $W$ , que es igual a la longitud de cuerda en el hombro 40. El diámetro de la raíz se define como  $D$ . La curvatura del borde de salida de la pala en la región de transición se puede definir por 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 una flexión previa, que se define como  $\Delta y$ , que corresponde a la deflexión fuera del plano desde un eje de  $pitch$  22 de la pala.

**Ejemplo:**

**[0061]** En lo que sigue se da un ejemplo de una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención.

**[0062]** La pala de turbina eólica está provista de los siguientes parámetros de longitud, ancho de hombro, radios de curvatura mínimos para el borde de salida y diámetro de cilindro de 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

**[0063]** La distribución de la longitud de cuerda  $c$ , el grosor relativo  $t/c$  y la flexión previa  $\Delta y$  se enumeran 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

$r$ [m]	$c$ [cm]	$t/c$ [%]	$\Delta y$ [cm]
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 [0064] La pala de turbina eólica comprende seis perfiles de pala novedosos 41-46, que están localizados en diferentes posiciones longitudinales a lo largo de la pala y como se muestra en la fig. 2. La tabla 3 enumera el grosor relativo  $t/c$ , la posición de máximo grosor  $d/c$ , la posición de la máxima curvatura de lado de presión  $d_p/c$  y la posición radial aproximada  $r$  de los perfiles:

Tabla 3

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

10 [0065] De forma sorprendente, se ha descubierto que los perfiles de perfil alar proporcionan proporciones de sustentación con respecto a arrastre mayores que los perfiles alares de turbinas eólicas convencionales y, en particular, en comparación con los perfiles NACA. Los seis perfiles son compatibles aerodinámicamente, y las regiones entre perfiles de perfil alar contiguos comprenden una transición suave entre dichos perfiles contiguos por medio de interpolación entre dichos perfiles contiguos, por ejemplo, por medio de curvas de distribución gaussianas. Las transiciones también tienen en cuenta la torsión variable en la dirección longitudinal de la pala y se ve, por tanto, que la transición es tridimensional.

20 [0066] Las figs. 5-8 representan gráficos de la distribución de cuerda  $c$ , el grosor relativo  $t/c$ , la torsión  $\theta$  y la flexión previa  $\Delta y$  de la pala de turbina eólica de acuerdo con el ejemplo (indicado como LM42.1p) en función de la posición radial relativa  $r/L$ . Los gráficos se comparan con los de la pala LM40.3p de la técnica anterior, que tiene una longitud de pala de 40,0 m y, por tanto, es comparable a la presente pala.

25 [0067] En la fig. 5 se puede ver que el ancho de hombro de la presente pala es aproximadamente un 8 % más pequeño que el de la pala de la técnica anterior. Además, cabe destacar que el eje  $x$  representa la posición radial relativa de la pala. Por tanto, el ancho de hombro relativo de la presente pala se ha reducido incluso más de un 8 %.

30 [0068] La fig. 6 representa un gráfico del grosor de pala relativo en función de la posición de pala radial relativa. Se ve que el grosor relativo de la presente pala es mucho mayor que el grosor 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 grosor relativo es aproximadamente un 33 % mayor que el de la pala de la técnica anterior.

35 [0069] La fig. 7 muestra la distribución de torsión de la presente pala en comparación con la pala de la técnica anterior. Se puede ver que la torsión se incrementa en la región de raíz y la región de transición a diferencia de la pala de la técnica anterior, donde la torsión es sustancialmente constante o disminuye ligeramente en esta

región. La torsión disminuye en una parte interior de la región de perfil alar y se incrementa en una parte exterior de la región de perfil alar. La parte interior y la parte exterior están separadas por una posición de una tangente de inflexión de torsión. La torsión en la tangente de inflexión se define como torsión de 0 grados. La tangente de inflexión está localizada en  $r = 0,855L$ , que está mucho más hacia el interior que la pala de la técnica anterior, donde la tangente de inflexión está localizada en  $r = 0,943L$ . La torsión máxima de la presente pala es de 10,28 grados, que es más pequeña que la torsión máxima de 11 grados de la pala de la técnica anterior.

[0070] La fig. 8 representa la flexión previa de la pala, y se puede ver que la flexión previa absoluta total de la presente pala es un 50 % mayor que la de la pala de la técnica anterior.

[0071] Todas estas diferencias, y en particular un hombro más estrecho, una pala relativamente más gruesa y una flexión previa más grande, hacen posible obtener una pala más ligera, que mecánicamente es igual de fuerte, pero que tiene un rendimiento aerodinámico más eficaz. 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 a 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.

[0072] La fig. 9 ilustra esquemáticamente una primera curva de potencia 80 que muestra la salida de potencia de una turbina eólica provista de palas de la técnica anterior y una segunda curva de potencia 81 que muestra la salida de potencia de una turbina eólica provista de palas de acuerdo con la presente invención, ambos gráficos ilustrados en función de la velocidad del viento  $v_w$ . Se ve que la salida de potencia se incrementa más rápidamente en función de la velocidad del viento hasta el nivel de regulación de potencia de la turbina eólica. El incremento de la producción anual de energía (AEP) se relaciona con la diferencia entre las dos curvas y, por tanto, con el área sombreada 82 del gráfico. Se prevé que el incremento de la AEP sea de un 4 %.

#### Lista de números de referencia

##### [0073]

- 2 turbina eólica
- 4 torre
- 6 góndola
- 8 buje
- 10 pala
- 14 punta de pala
- 16 raíz de pala
- 18 borde de ataque
- 20 borde de salida
- 22 eje de *pitch*
- 30 región de raíz
- 32 región de transición
- 34 región de perfil alar
- 41 primer perfil alar
- 42 segundo perfil alar
- 43 tercer perfil alar
- 44 cuarto perfil alar
- 45 quinto perfil alar
- 46 sexto perfil alar

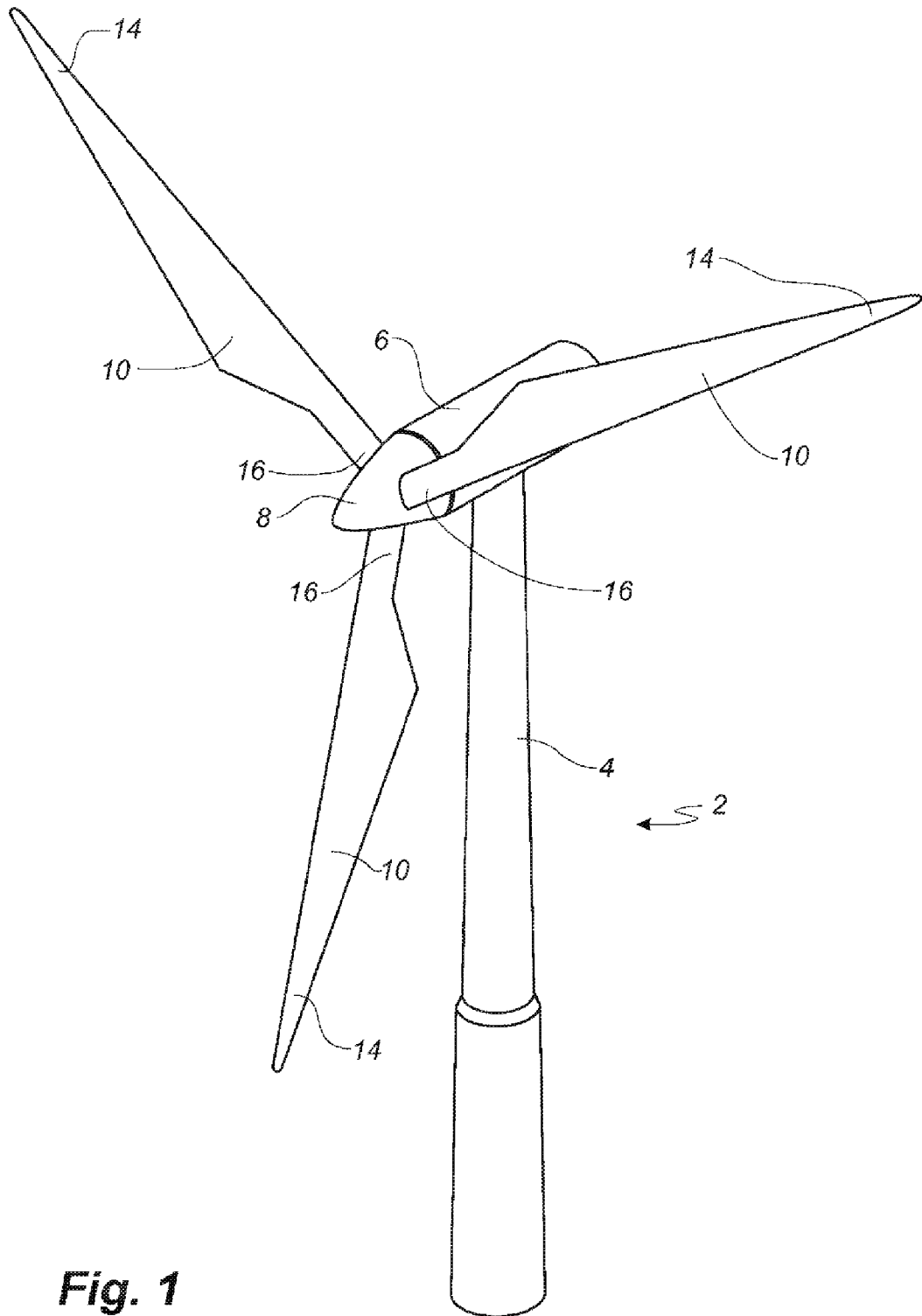
50	perfil alar
52	lado de presión
54	lado de succión
56	borde de ataque
58	borde de salida
60	cuerda
62	línea de curvatura/línea mediana
80	curva de potencia de una turbina eólica con palas de la técnica anterior
81	curva de potencia de una turbina eólica con palas novedosas
82	incremento en la salida de potencia
$c$	longitud de cuerda
$d_t$	posición de máximo grosor
$d_f$	posición de máxima curvatura
$d_p$	posición de máxima curvatura de lado de presión
$f$	curvatura
$L$	longitud de pala
$P$	salida de potencia
$r$	radio local, distancia radial desde la raíz de pala
$t$	grosor
$v_w$	velocidad del viento
$\theta$	torsión, <i>pitch</i>
$\Delta y$	flexión previa

**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 que se extiende la pala (10) sustancialmente en una dirección radial cuando está montada 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, comprendiendo además la pala:
- 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 se ve impactado por un flujo de aire incidente, una sustentación, en la que el contorno perfilado se divide en:
    - una región de raíz (30) que tiene un perfil sustancialmente circular o elíptico más cercano al buje,
    - una región de perfil alar (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 alar (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 alar, y con
    - un hombro (40) que tiene un ancho de hombro ( $W$ ) y está localizado en el límite entre la región de transición (32) y la región de perfil alar (34), en la que
    - la pala (10) tiene una longitud de pala ( $L$ ), y
    - el contorno perfilado comprende un grosor relativo local definido como la proporción local entre un máximo grosor de perfil ( $t$ ) y la longitud de cuerda ( $c$ ), en la que
    - la proporción entre el ancho de hombro ( $W$ ) y la longitud de pala ( $L$ ) es menor o igual a 0,075, y
 en la que el borde de salida tiene una conformación lisa sin discontinuidades en la dirección longitudinal de la pala, y **caracterizándose por que**
    - el grosor relativo ( $t/c$ ) en un intervalo de longitud de pala de 0-0,8L es de al menos un 22 %, y en la que el borde de salida en la región de transición tiene una curvatura con un radio exterior ( $r_o$ ) externo al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,2L, y el borde de salida en la región de transición tiene una curvatura con un radio interior ( $r_i$ ) interno al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,2L.
2. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de la reivindicación 1, en la que el borde de salida en la región de transición tiene una curvatura con un radio exterior ( $r_o$ ) externo al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,22L y, de forma ventajosa, de al menos 0,24L.
3. Una pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en la que el borde de salida en la región de transición tiene una curvatura con un radio interior ( $r_i$ ) interno al borde de salida, que en todas las posiciones es de al menos 0,225L y, de forma ventajosa, de al menos 0,25L.
4. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en la que la posición del radio exterior mínimo está localizada entre 0,16L y 0,20L, de forma ventajosa, entre 0,19L y 0,21L.
5. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que el hombro está localizado en un intervalo entre 0,18L y 0,25L, de forma ventajosa, entre 0,19L y 0,24L.
6. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que el borde de ataque tiene una conformación lisa sin discontinuidades en la dirección longitudinal de la pala.
7. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pala comprende un eje de *pitch*, y en la que una distancia entre el borde de ataque y el eje de *pitch* desde el extremo de raíz hasta el hombro se incrementa no más de un 20 %, de forma ventajosa no más de un 15 %.
8. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pala está provista de una torsión, y en la que la región de perfil alar 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 se incrementa hacia el extremo de punta de la pala, estando separadas dicha parte exterior y parte interior por una posición de una tangente de inflexión de torsión.

- 5 9. Una pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 8,  
 en la que la posición de la tangente de inflexión de torsión está localizada entre 0,8L y 0,9L, de forma ventajosa, entre 0,82L y 0,88L, de forma más ventajosa, entre 0,83L y 0,87L e, incluso de forma más ventajosa, aproximadamente en 0,85L, y/o
- 10 en la que la torsión en la región exterior varía al menos 4 grados, de forma ventajosa, al menos 5 grados y, de forma más ventajosa, al menos 5,5 grados, y/o
- 15 en el que la torsión en la parte interior varía entre 8 y 12 grados, de forma ventajosa, entre 8,5 y 11,5 grados y, de forma más ventajosa, entre 9 y 11 grados.
- 20 10. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pala está provista de una torsión, que en la región de raíz y en la región de transición se incrementa hacia el extremo de punta, por ejemplo, en la que el incremento en la torsión en la región de raíz y la región de transición está entre 1,5 y 2,5 grados.
- 25 11. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pala está provista de dispositivos de modificación de flujo, tales como generadores de vórtice, en la que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un grosor relativo de al menos un 30 %.
- 30 12. Una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la pala está provista de dispositivos de modificación de flujo, tales como generadores de vórtice, en la que dichos dispositivos están dispuestos en secciones de perfil que tienen un grosor relativo de máximo un 70 %.
- 35 13. Una pala de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que el grosor relativo de la pala en el hombro está entre un 40 % y un 50 %, de forma ventajosa, entre un 42 % y un 48 %.
- 40 14. Una turbina eólica que comprende un número, preferentemente dos o tres, de palas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, extendiéndose las palas sustancialmente de forma radial desde un buje en un eje principal que tiene un eje central sustancialmente horizontal, constituyendo las palas conjuntamente con el buje un rotor con un plano de rotor, y que se puede poner en rotación por el viento.
- 45 15. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 14,  
 en la que la turbina eólica está controlada por *pitch*, y/o  
 en la que la turbina eólica está regulada por potencia.



**Fig. 1**

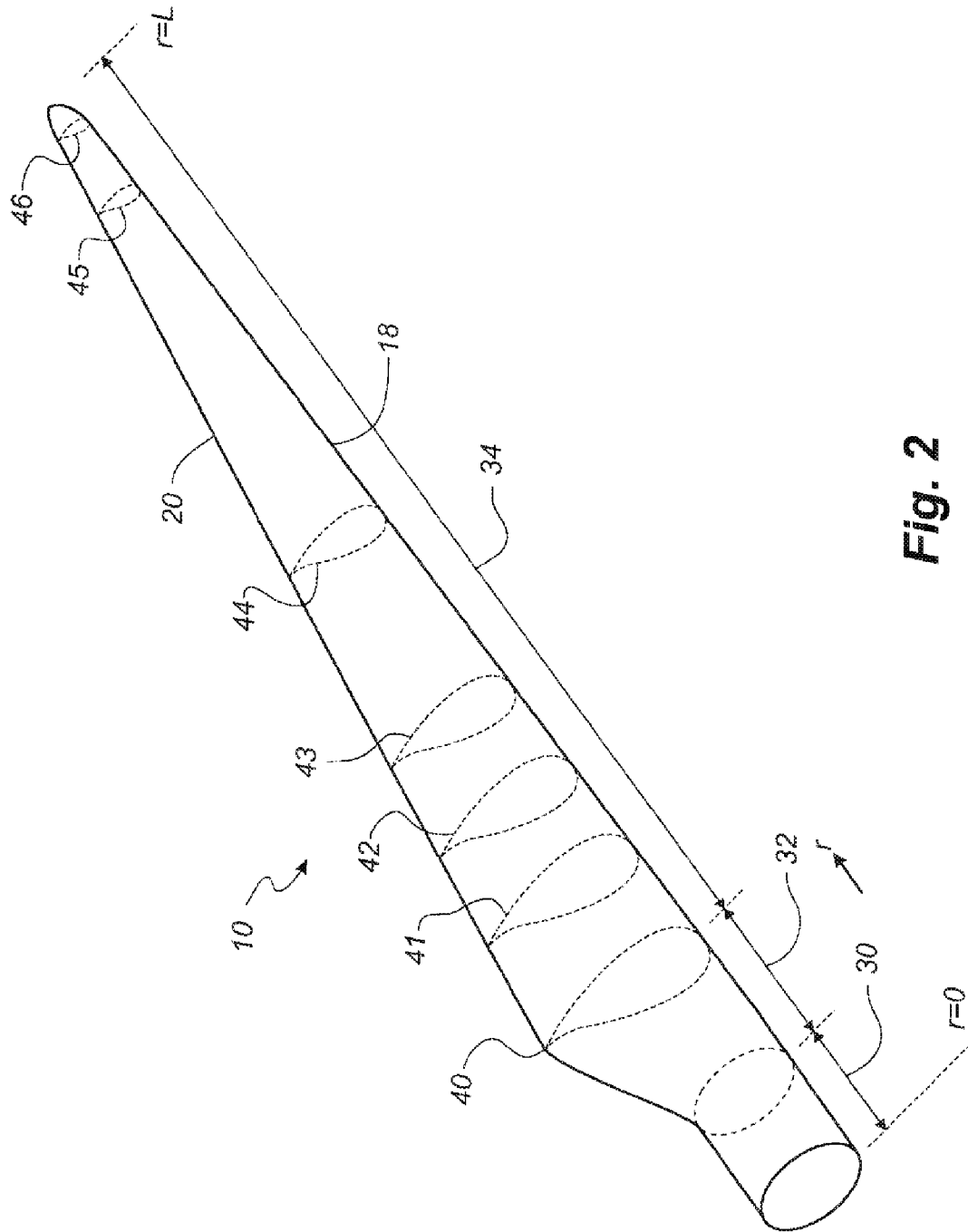


Fig. 2

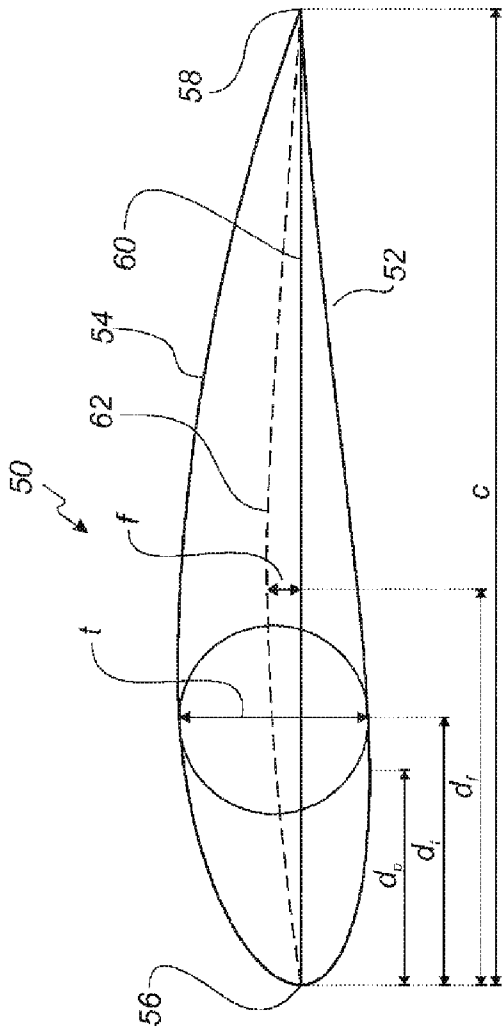


Fig. 3

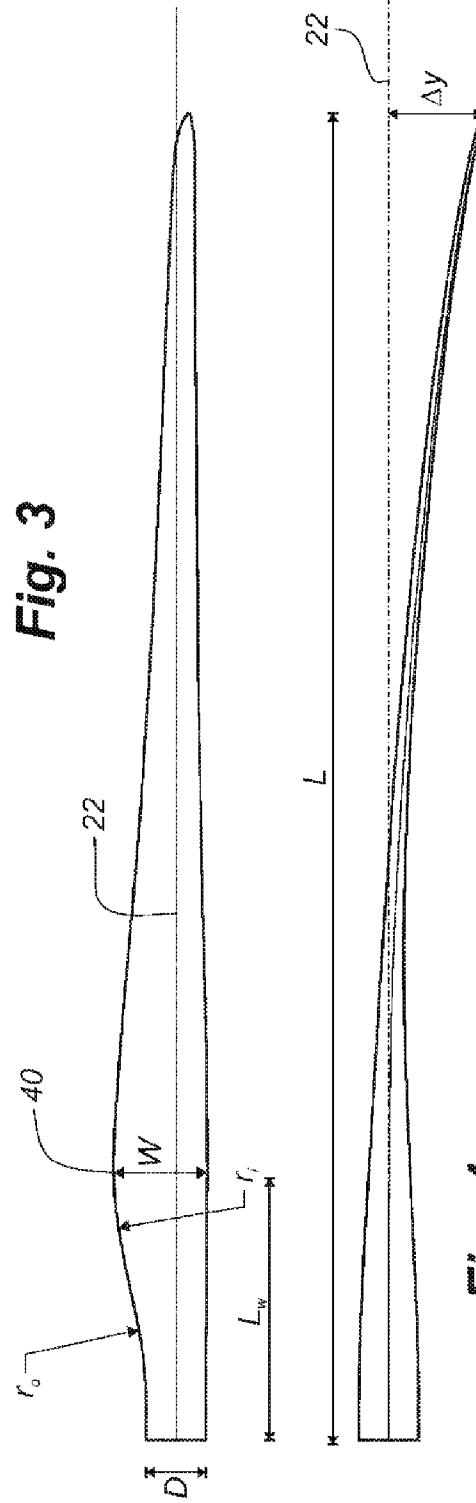
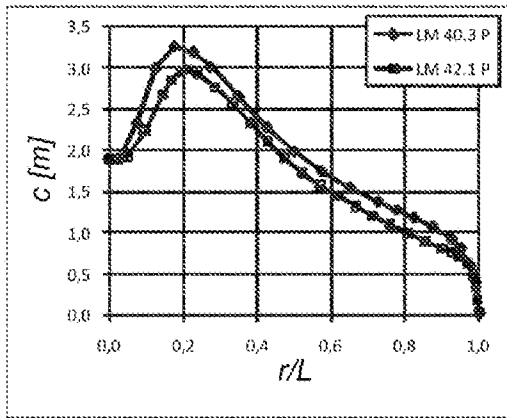
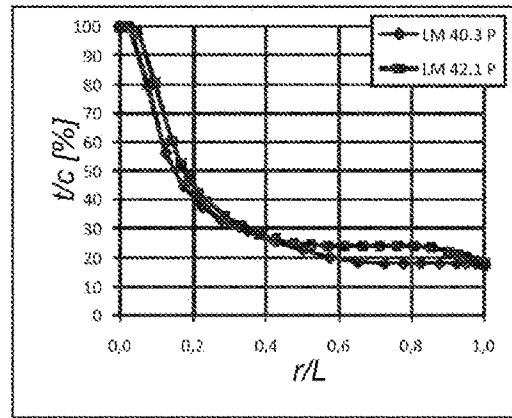


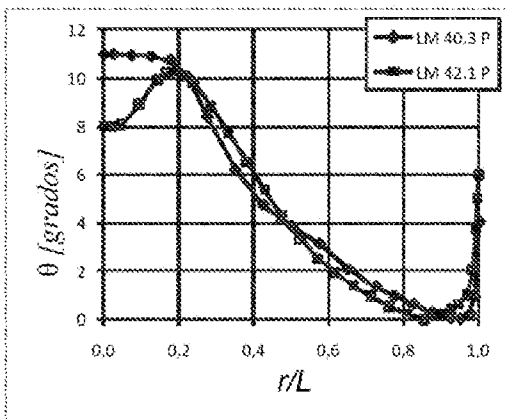
Fig. 4



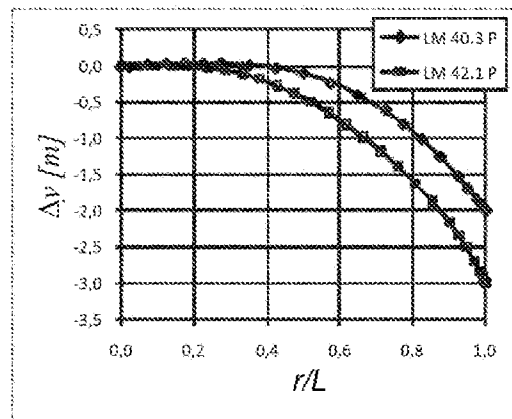
**Fig. 5**



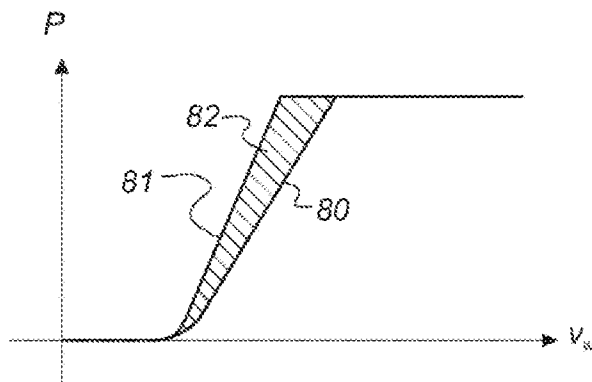
**Fig. 6**



**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**