

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 624 666**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 7/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2005 PCT/IB2005/050639**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.08.2006 WO06090215**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2005 E 05708811 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.04.2017 EP 1856408**

54 Título: **Pala de turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.07.2017**

73 Titular/es:  
**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N , DK**

72 Inventor/es:  
**GODSK, KRISTIAN BALSCHMIDT y  
NIELSEN, THOMAS S. BJERTRUP**

74 Agente/Representante:  
**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 624 666 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

5 **Campo técnico de la invención**

La invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica con un perfil particular y un diseño de perfil aerodinámico. Más particularmente, la invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica con una solidez específica del radio relativamente bajo, que varía en función de la distancia desde la raíz de la pala de turbina.

La invención se dirige principalmente a turbinas eólicas de paso regulado, que se operan con velocidad de rotor variable, y tienen palas más largas de aproximadamente 30 metros.

15 **Antecedentes de la invención**

El documento US 5.474.425 explica una turbina eólica de pérdida regulada, que tiene palas de rotor con perfiles aerodinámicos NREL en la raíz, punta y sección media de las palas. Los perfiles aerodinámicos seleccionados tienen características que los hacen utilizables en rotores con radios de 7,62 a 15,24 metros aproximadamente (de 25 a 50 pies).

El documento US2004/0217595 explica una turbina eólica que tiene un convertidor de potencia que utiliza un rectificador pasivo en el lado de red con control de potencia escalable y control de paso dependiente.

Se hace referencia típicamente a una sección transversal de la pala de turbina eólica como un perfil de pala. La forma del perfil varía con la distancia desde la raíz de la pala. La pala se conecta al buje que se coloca en el centro del rotor. El perfil tiene una cuerda,  $c$ , y un grosor,  $t$ , tal como se muestra en la Figura 1. El tamaño de la cuerda y el grosor así como la relación de grosor a cuerda varían en función del radio,  $r$ , es decir de la distancia desde el centro del rotor a la sección transversal de la pala.

En principio, una pala de turbina eólica consiste en una pluralidad de perfiles de pala conectados. La pala y por ello los perfiles individuales se giran con relación al plano del rotor durante la operación. El viento incidente es aproximadamente ortogonal al plano del rotor, pero cuando la pala está en movimiento, el ángulo efectivo y la velocidad del viento incidente (es decir, correspondiente a una pala estacionaria) dependen de la velocidad de giro de la pala. El ángulo efectivo también se denomina ángulo de ataque,  $\alpha$ , tal como se muestra en la Figura 2. La velocidad de viento efectiva que ven los perfiles también se denomina velocidad del viento relativa,  $w$ , tal como se muestra en la Figura 2.

La respuesta del perfil aerodinámico de la pala al viento incidente puede separarse en un componente de empuje ortogonal al viento incidente efectivo y un componente de arrastre que está en paralelo al viento incidente efectivo. El tamaño de los componentes puede expresarse como el coeficiente de empuje,  $C_L$ , y el coeficiente de arrastre,  $C_D$ , respectivamente, tal como se indica en la Figura 2. En general, se desea tener un coeficiente de empuje alto y un coeficiente de arrastre bajo.

En las turbinas eólicas con paso regulado con velocidad del rotor variable, la variación del ángulo de ataque,  $\alpha$ , debido a la variación en la velocidad del viento se compensa mediante el giro de las palas individuales alrededor de un eje longitudinal, denominado cambio de paso, y mediante el control de la velocidad del rotor. De ese modo, el ángulo de ataque promedio puede mantenerse próximo a un valor deseado con relación a la velocidad del viento promedia.

50 *Trazado  $C_L - C_D$*

El coeficiente de empuje que corresponde al valor de la relación máxima de  $C_L / C_D$  se denomina coeficiente de empuje de diseño,  $C_{L,d}$ . El coeficiente de empuje de diseño se halla como el  $C_L$  correspondiente a la tangente a la curva  $C_L - C_D$  a través de (0,0) en un trazado  $C_L - C_D$ , tal como se muestra en la Figura 3. Típicamente, cada sección transversal de pala se retuerce ligeramente alrededor del eje de paso de modo que cada perfil está operando con un ángulo de ataque que corresponde al coeficiente de empuje de diseño,  $C_{L,d}$  para velocidades de viento incidente en el intervalo de 7 – 11 m/s.

60 *Trazado  $C_L - \alpha$*

En la Figura 4, el coeficiente de empuje  $C_L$  se traza en función del ángulo de ataque,  $\alpha$ . Se observa que  $C_L$  aumenta cuando se aumenta al ángulo de ataque hasta  $\alpha_{pérdida}$ , por encima del que la pala comienza a entrar en pérdida. El coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx}$ , corresponde al coeficiente de empuje a  $\alpha_{pérdida}$ . El coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx}$  varía en función del número de Reynolds. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{W \cdot c}{\nu}$$

5 Donde  $w$  es la velocidad de viento relativa y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del aire. El coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx}$ , también varía en función de la rugosidad de la superficie del perfil, particularmente en el borde de ataque. Los valores de los coeficientes de empuje mencionados en el presente documento se refieren a perfiles con una superficie lisa sometida a un flujo de aire bidimensional.

10 El ángulo de ataque que corresponde a  $C_{L,d}$  se denomina ángulo de ataque de diseño,  $\alpha_d$ , y puede identificarse a partir de un conjunto de un trazado  $C_L - C_D$  y un trazado  $C_L - \alpha$  correspondiente, tal como se indica en la Figura 3 y la Figura 4. Hay una percepción general en la técnica de que una turbina eólica debería operarse en o cerca del coeficiente de empuje de diseño,  $C_{L,d}$ , para reducir el arrastre y para impedir que la pala entre en pérdida accidentalmente. En otras palabras,  $C_{L,operación} \approx C_{L,d}$ , y  $\alpha_{operación} \approx \alpha_d$ , donde  $\alpha_{operación}$  y  $C_{L,operación}$  son, respectivamente, el ángulo medio de ataque y el coeficiente de empuje medio correspondiente durante la operación.

### 15 *Ráfagas de viento*

La regulación del paso no es suficientemente rápida para responder a ráfagas de viento individuales. Por lo tanto, el ángulo de ataque instantáneo,  $\alpha_{ráfaga}$ , durante una ráfaga de viento se desplaza a un ángulo de ataque mayor que el  $\alpha_{operación}$  pretendido. Los perfiles de pala de turbina eólica se diseñan por lo tanto tradicionalmente de modo que el ángulo de ataque de diseño,  $\alpha_d$ , tal como se deduce de  $C_{L,d}$ , es sustancialmente más bajo que  $\alpha_{pérdida}$ , dado que esto impide que la pala entre en pérdida accidentalmente y por ello incrementa la tolerancia hacia ráfagas de viento.

25 A la vista de lo anterior, los presentes inventores han apreciado que sería deseable proporcionar una pala de turbina eólica mejorada.

### Sumario de la invención

La invención se define en las reivindicaciones independientes a las que se debería hacer referencia ahora. Las características ventajosas se exponen en las reivindicaciones dependientes.

### 30 Breve descripción de los dibujos

La invención se explicará más completamente a continuación con referencia a realizaciones de ejemplo así como a los dibujos, en los que

35 la Figura 1 muestra un perfil de una pala de turbina eólica,  
 la Figura 2 muestra un perfil con viento incidente,  
 la Figura 3 muestra un trazado  $C_L - C_D$ ,  
 la Figura 4 muestra un trazado  $C_L - \alpha$ ,  
 40 la Figura 5 muestra una turbina eólica con palas de alta solidez,  
 la Figura 6 muestra una turbina eólica con palas de baja solidez, y  
 la Figura 7 muestra un trazado de una solidez específica del radio combinada para una realización preferida.

45 Todas las figuras son altamente esquemáticas y no necesariamente a escala, y muestran solamente partes que son necesarias para clarificar la invención, siendo omitidas o meramente sugeridas otras partes.

### Explicación

#### 50 *Solidez*

La solidez de una pala de turbina eólica es la relación entre el área de la pala de turbina eólica  $A_{pala}$  proyectada dentro del plano del rotor y el área total cubierta por las palas giratorias,  $\pi R^2$ . La solidez combinada, es decir la suma de las solideces de las palas, es por ello:

$$55 \quad Sol = \frac{n \cdot A_{pala}}{\pi R^2}$$

60 donde  $n$  es el número de palas de la turbina eólica, por ejemplo, 1, 2, 3 o 4 y  $R$  es el radio del rotor. En la Figura 5 y en la Figura 6,  $n$  es 3. La solidez es por lo tanto una medición de la delgadez de la pala dado que cuanto más baja es la solidez, más delgadas son las palas. Cuando se comparan las turbinas eólicas de la Figura 5 y la Figura 6, es evidente que las palas de la Figura 5 tienen una solidez mayor que las palas de la Figura 6.

La solidez puede establecerse también para un radio específico,  $r$ , desde el centro del rotor. La solidez específica del radio de la pala de turbina eólica viene dada por:

$$Sol_r = \frac{n \cdot c_r}{2\pi R}$$

5 donde  $c_r$  es la cuerda en el radio específico. Debería observarse que la solidez específica del radio es en general independiente o un escalado puramente lineal de la pala excepto cerca de la punta y cerca de la raíz de la pala donde las consideraciones estructurales determinan la solidez.

10 La mejora de acuerdo con el objeto anterior de la invención se realiza mediante una turbina eólica operable mediante una regulación de paso y velocidad de rotor variable, que tiene al menos una pala de turbina eólica más larga de 30 metros. La solidez específica del radio combinada de las palas es relativamente baja y el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx}$ , es relativamente alto. Preferentemente  $Sol_r < 0,018$  para radio de pala  $r = 70\%$  del radio del rotor  $R$ , y  $C_{L,máx} > 1,5$  para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala.  $C_{L,máx}$  debería considerarse para un número de Reynolds,  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y para un flujo bidimensional y una superficie de perfil liso.

15 La mejora puede por ejemplo dar como resultado una o más de entre cargas extremas y/o de fatiga reducidas para sustancialmente la misma producción de potencia, duración mejorada de las palas y/u otros componentes estructurales o eléctricos de la turbina eólica, peso de la pala y/o consumo de materiales reducido para la fabricación de la pala y/o peso y/o consumo de materiales reducido para la fabricación de otros componentes estructurales o eléctricos de la turbina eólica. Sin embargo, los expertos en la materia deberían darse cuenta de otras ventajas cuando se enfrenten con uno o más de los aspectos de la invención.

20 Por % del radio se quiere indicar en este caso una fracción de la pala que corresponde al mismo porcentaje de la dimensión longitudinal de la pala. La fracción no necesita ser una parte continua sino componerse de varias partes del perfil. Por ejemplo, un radio del 50 % corresponde a 25 m de la pala cuando el diámetro del rotor es de 50 m, y el radio del 50 % puede componerse por ejemplo de hasta 5 metros de la raíz de la pala en combinación con los 5 metros más exteriores de la punta de la pala y 15 metros alrededor de la parte media de la pala.

### 30 *Condiciones cerca de la raíz de la pala*

El perfil aerodinámico en la sección de raíz de la pala viene dictado principalmente por consideraciones estructurales. Esto es aceptable dado que esta sección solo cubre una parte menor de la producción de potencia global. La presente invención se dirige por lo tanto principalmente hacia el 30 % - 95 % más exterior de la pala, mientras que las consideraciones pueden aplicarse en algunos casos de modo similar a la sección de raíz.

### *Condiciones cerca de la punta de la pala*

40 El perfil aerodinámico en la sección de punta, que es la parte del 95 % - 100 % más exterior de la pala, viene dictado principalmente al obtener que la pala sea suavemente detenida mientras aún mantiene la combinación de bajo ruido de la sección y tan alto rendimiento como sea posible. La forma de la sección de punta es importante dado que los vórtices en la punta generan ruido que puede ser dominante si la problemática de ruido no se tiene apropiadamente en cuenta durante el diseño de la sección de punta.

### 45 *Fatiga y cargas extremas*

Un problema importante en el diseño de las palas de turbina eólica es la resistencia a los daños por fatiga. En general, la fatiga viene controlada por el tamaño de cuerda, es decir, cuanto mayor es la cuerda, mayores son las cargas de fatiga sobre la pala. Adicionalmente, las vibraciones que surgen si la pala entra en pérdida también incrementan los daños por fatiga. Es por lo tanto una ventaja considerable de la presente invención que a pesar de que la pala se opere con un ángulo de ataque de diseño más alto,  $\alpha_d$ , se mejora la característica de fatiga de la pala.

55 Las ráfagas de viento extremas con velocidades de viento de hasta 70 m/s generan cargas extremas sobre la turbina eólica. Durante velocidades de viento extremas, el rotor de la turbina eólica está en vacío, es decir, girando lentamente o detenido con las palas en posición de parada y sin ninguna producción de potencia. Las cargas extremas vienen controladas por el tamaño de cuerda, es decir, cuanto mayor es la cuerda, mayores son las cargas extremas. Es por lo tanto también una ventaja considerable de la presente invención que se reduzcan las cargas extremas.

### 60 *Palas de turbina eólica con baja solidez y alto $C_{L,máx}$*

Cuando las turbinas eólicas y las palas de turbina eólica incrementan su tamaño, son necesarios materiales ligeros y resistentes en las palas para reducir el peso de la pala mientras aún se mantiene una rigidez que sea suficiente para impedir que las palas incidan contra la torre durante un viento en ráfagas. Adicionalmente, el uso de palas delgadas

5 incrementa la necesidad de materiales con alta resistencia dado que tanto la cuerda como el grosor de la pala en las diferentes secciones transversales deben mantenerse por debajo de ciertos valores. Se ha demostrado que las fibras de carbono favorecen estas propiedades. La cantidad de fibra de carbono necesaria en las palas se incrementa con la longitud de la pala. Para palas más delgadas mayores de 30 m, comienza a existir la necesidad de fibras de carbono. Por ello, hay una estrecha conexión entre el uso de palas delgadas mayores de 30 m y el uso de fibras de carbono.

10 La inducción,  $a$ , es una medida de la reducción de velocidad del viento tras el paso por la turbina eólica. Típicamente, la inducción debería ser de aproximadamente 0,33 para una operación óptima. La inducción de un perfil aerodinámico se incrementa con el tamaño de cuerda,  $c$ , y el coeficiente de empuje,  $C_L$ , del perfil aerodinámico. Un incremento en  $C_{L,d}$  permite por lo tanto una disminución correspondiente en el tamaño de la cuerda y por ello una solidez más baja de la pala. Se ha descubierto que una combinación adecuada de un incremento en  $C_{L,d}$  con una disminución en la solidez conduce a unas cargas de fatiga y extremas reducidas para sustancialmente la misma producción de potencia. Las cargas reducidas dan como resultado componentes más baratos en la turbina eólica y por lo tanto una economía global mejorada para la turbina eólica.

15 Las cargas extremas pero especialmente las cargas de fatiga pueden reducirse mediante el uso de una estrategia de regulación que cambia el paso de cada pala individualmente durante un giro del rotor. La finalidad principal del control de paso individual es reducir las fluctuaciones y/o variaciones cíclicas en los ángulos de ataque durante un giro del rotor y reducir debido a ello las variaciones de carga. Las fluctuaciones y/o variaciones cíclicas en los ángulos de ataque pueden tener lugar a partir de un cizallamiento del viento positivo y/o negativo, errores de guiñada, turbinas eólicas en la estela o semi-estela de otras, burbujas de turbulencia local en el plano del rotor, etc. Como un ejemplo, una situación con cizallamiento de viento positivo y un ángulo de paso constante da como resultado ángulos de ataque mayores cuando la pala está apuntando hacia arriba en comparación con cuando está apuntando hacia abajo. Esto es debido a que la velocidad del viento en esta situación es más alta en la parte superior del plano del rotor en comparación con la parte baja. Al introducir una variación cíclica del ángulo de paso durante un giro del rotor, pueden eliminarse las variaciones de carga debido al cizallamiento de viento positivo. El control de paso individual solo es efectivo si la pala se mantiene alejada del área de pérdida, es decir, operando en la parte lineal de la curva  $C_L(\alpha)$  de la Figura 4. El inventor se dio cuenta de que la combinación de perfiles de empuje alto, operación alejada de la pérdida, y el uso de control de paso individual conducía a reducciones en la carga sorprendentemente grandes, particularmente en relación con las cargas de fatiga. La reducción de carga da como resultado una libertad mejorada en el diseño de la pala así como una economía de la turbina eólica global mejorada.

20 Las turbinas eólicas y las palas de acuerdo con la presente invención son particularmente duraderas con relación a cargas de fatiga y extremas, y sorprendentemente se ha descubierto que para palas que combinan baja solidez y alto empuje la durabilidad mejorada contra cargas de fatiga y extremas puede conseguirse sin disminución significativa en la producción anular de la turbina eólica.

40 *Ruido*

Es importante que el ruido de las turbinas eólicas se reduzca en general tanto como sea posible en las vecindades próximas a turbinas eólicas que pueden perturbarse por el ruido. En muchos emplazamientos de turbinas eólicas hay demandas específicas sobre el nivel de ruido máximo que crean las turbinas eólicas. A veces hay diferentes demandas sobre el nivel de ruido máximo a diferentes horas durante el día y la noche. El nivel de ruido procedente de una turbina eólica que regula el paso con velocidad de rotor variable puede reducirse reduciendo la velocidad del rotor y/o cambiando los ángulos de paso. Cuando la velocidad del rotor se disminuye, el ángulo de ataque debe incrementarse para conseguir una producción de energía constante. Esto da como resultado una operación mucho más cercana a la pérdida, lo que en general no se desea. Sorprendentemente se ha descubierto que mediante el uso de perfiles con alto  $C_{L,máx}$ , es posible reducir sustancialmente el ruido de la turbina eólica con solamente una pequeña reducción relativa en la producción de potencia. Adicionalmente, esto puede conseguirse sin acercarse a la pérdida tanto como con palas convencionales.

55 La Tabla 1 muestra la diferencia en porcentaje en producción anual con una velocidad de viento media de 8 m/s para diferentes niveles de potencia sonora máxima, válida para una turbina eólica con palas de perfil de empuje alto y palas de perfil estándar, respectivamente. El modo 0 corresponde a una operación basada en una producción de potencia máxima. El modo 3 y el modo 5 corresponden a la operación con velocidad de rotor reducida correspondiente a niveles de ruido reducidos. Se ve que el modo 0 da como resultado un nivel de potencia sonora máxima de 105 dB(A), mientras que el modo 3 y el modo 5 corresponden a niveles de potencia sonora máxima de 103 dB(A) y 100 dB(A), respectivamente.

60 Tabla 1. Diferencia en la producción anual con diferentes niveles de potencia sonora.

Modos de operación y máximos niveles de ruido	Diferencia en producción anual [%]	
	Perfil de alto empuje	Perfil estándar
Modo 0, 105 dB(A)	100	100
Modo 3, 103 dB(A)	95	92

Modos de operación y máximos niveles de ruido	Diferencia en producción anual [%]	
	Perfil de alto empuje	Perfil estándar
Modo 5, 100 dB(A)	86	77

Comparando los resultados de la tabla 1, es evidente que una pala de turbina eólica con perfil de empuje alto genera más potencia para el mismo nivel de potencia sonora en los modos operación de ruido reducido. Por el ejemplo de la tabla 1, la reducción en la producción anual es de aproximadamente el 50 % mayor para la pala de perfil estándar en comparación con la pala con perfiles de empuje alto. El modelado por ordenador ha demostrado que típicamente la reducción de producciones anuales para los perfiles estándar es de aproximadamente el 25 % al 75 % mayor que para perfiles de empuje alto de acuerdo con la presente invención. Los perfiles de empuje alto con baja solidez tal como se han explicado anteriormente son particularmente ventajosos dado que combinan la opción de una operación de ruido bajo con un comportamiento a la fatiga superior y por ello permiten un diseño y operación mucho más flexibles.

La operación con ruido reducido implica la reducción de la velocidad de giro del rotor y el ajuste del ángulo de paso de modo que se minimice la disminución de la producción anual. Esto puede realizarse mucho más eficientemente para perfiles de alto empuje que para perfiles estándar.

Debería observarse que las palas de acuerdo con la presente invención pueden aplicarse también para turbinas eólicas de pérdida regulada. Una turbina eólica de pérdida regulada con palas de acuerdo con la presente invención puede presentar también una durabilidad superior con relación a cargas de fatiga y extremas.

**Ejemplos**

*Ejemplo A1*

Las palas de turbina eólica cubiertas por la invención pueden fabricarse por medios convencionales bien conocidos en el campo. Sin embargo, es ventajoso que las palas incluyan un refuerzo basado en fibra de carbono, y preferentemente se introducen las fibras de carbono en la pala como elementos curados realizados mediante pultrusión o prensado de cintas, dado que esto soporta la libertad de diseño incrementada de las palas de turbina eólica realizadas mediante la presente invención para realizar incluso mejores palas.

*Ejemplo A2*

En una realización preferida de la invención, una turbina eólica, que puede operarse mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable, tiene al menos una pala de turbina eólica más larga de 30 metros, tal como tres palas de aproximadamente 50 metros. La solidez específica del radio combinada de las palas está por debajo de una interpolación lineal entre

- $Sol_r = 0,035$  en un radio de pala  $r = 30$  % del radio del rotor R
- $Sol_r = 0,025$  en un radio de pala  $r = 50$  % del radio del rotor R
- $Sol_r = 0,018$  en un radio de pala  $r = 70$  % del radio del rotor R
- $Sol_r = 0,011$  en un radio de pala  $r = 90$  % del radio del rotor R

para al menos el 50 % del radio de la(s) pala(s) entre un radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio del rotor R. En la Figura 7, la línea en relación con la pieza superior lineal corresponde a dicha interpolación lineal. En otras palabras, si la solidez específica del radio combinada de las palas para la turbina eólica de acuerdo con la presente realización se dibuja sobre el trazado de la Figura 7, entonces el trazado correspondiente a la turbina eólica de acuerdo con la presente realización está por debajo de la curva inferior en al menos la mitad del intervalo entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio del rotor R. La parte del trazado correspondiente a la turbina eólica de acuerdo con la presente realización, parte que está bajo la línea de la Figura 7, puede componerse de varias piezas las cuales están conectadas por piezas, que están por encima de la línea de la Figura 7.

Dado que es ventajoso tener una fracción mayor de la pala por debajo de la línea de la Figura 7, una variante preferida de la presente realización es cuando al menos el 75 % del radio de la(s) pala(s) está entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio del rotor R, e incluso más preferentemente en al menos el 95 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio del rotor R.

*Ejemplo B1*

De acuerdo con la invención, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina eólica tiene una, dos, tres o cuatro palas, que son más largas de 30 metros. Las palas tienen una solidez específica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,018$  para un radio de pala  $r = 70$  % del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,45$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B2*

5 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B1, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina tiene dos o tres palas, que son más largas de 30 metros. Las palas tienen una solidez específica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,018$  para un radio de pala  $r = 70\%$  del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B3*

10 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B1, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina tiene dos o tres palas, que son más largas de 30 metros. Las palas tienen una solidez específica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,018$  para un radio de pala  $r = 70\%$  del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,6$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B4*

20 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B1, al menos el 80 % del radio de la pala tiene un coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,65$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B5*

25 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B1, al menos el 80 % del radio de la pala tiene un coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B6*

30 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B1, al menos el 80 % del radio de la pala tiene un coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,7$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B7*

Una variante de la turbina eólica descrita en los Ejemplos B1 a B6 incluye uno o más de los requisitos de coeficiente de empuje máximo de los Ejemplos B1 a B6 de modo que al menos el 80 % del radio de la pala tiene

- 40
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,45$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,6$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,65$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o
  - 45 - el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,7$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$ ,

donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B8*

50 En una variante de la turbina eólica descrita en el Ejemplo B7, al menos el 90 % del radio de la pala tiene un empuje máximo de acuerdo con el ejemplo B7. El tener una fracción muy alta de la pala con un perfil de alto empuje, incrementa la ventaja de los perfiles de alto empuje, es decir, propiedades de reducción de ruido mejoradas.

*Ejemplo B9*

Una variante de la turbina eólica descrita en los Ejemplos B1 a B8 incluye uno o más de los requisitos de coeficiente de empuje máximo de los Ejemplos B1 a B6 de modo que al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente el 90 % de la pala, tiene

- 60
- el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,5$ , para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,58$ , para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,64$ , para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,68$ , para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o
  - 65 - el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,71$ , para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o
  - el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,73$ , para  $Re = 11,0 \times 10^6$ ,

donde  $C_{L,m\acute{a}x}$  es v\alıdo para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo B10*

5 En una variante de las turbinas e\alıcas descritas en los Ejemplos B1 a B9, las palas tienen una solidez espec\ıfica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,016$  para radio de pala  $r = 70 \%$  del radio del rotor R. La solidez disminuida conduce a una tolerancia a la fatiga aumentada.

*Ejemplo C*

10 En una variante de las turbinas e\alıcas de los Ejemplos B, el intervalo de radios, en el que se proporciona el requisito de empuje m\aximo, corresponde a unas relaciones de grosor a cuerda de  $t/c < 24 \%$  a  $t/c > 15 \%$  excepto para la punta de la pala correspondiente al radio de pala  $r > 96 \%$  del radio del rotor R. En una variante de esta turbina e\alıca, el intervalo de radios corresponde a  $t/c < 27 \%$  a  $t/c > 15 \%$  con la condici\on  $r < 96 \%$  de R.

*Ejemplo D1*

20 De acuerdo con la invenci\on, se proporciona una turbina e\alıca operable mediante regulaci\on de paso y velocidad de rotor variable. La turbina e\alıca tiene al menos una pala de turbina e\alıca, que es mayor de 30 metros. Las palas tienen una solidez espec\ıfica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,025$  para radio de pala  $r = 50 \%$  del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala el empuje m\aximo satisface uno o m\as de los siguientes requisitos:

- 25 - el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,5$ , para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,58$ , para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,64$ , para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,68$ , para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,71$ , para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o
- 30 - el coeficiente de empuje m\aximo  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,73$ , para  $Re = 11,0 \times 10^6$ ,

donde  $C_{L,m\acute{a}x}$  es v\alıdo para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo D2*

35 En una realizaci\on preferida de la turbina e\alıca del Ejemplo D1, el  $Sol_r < 0,023$  para radio de pala  $r = 50 \%$ ; y m\as preferentemente  $Sol_r < 0,022$  para radio de pala  $r = 50 \%$ .

En una realizaci\on, la solidez espec\ıfica del radio combinada de las palas es 0,0225 a  $r = 50 \%$  de R y  $C_{L,m\acute{a}x} = 1,51 - 1,60$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$  para el 85 % de la pala.

40

*Ejemplo D3*

45 De acuerdo con la invenci\on, se proporciona una turbina e\alıca operable mediante regulaci\on de paso y velocidad de rotor variable. La turbina e\alıca tiene al menos una pala de turbina e\alıca, que es mayor de 30 metros. Las palas tienen una solidez espec\ıfica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,011$  para radio de pala  $r = 90 \%$  del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala, el empuje m\aximo satisface uno o m\as de los siguientes requisitos:

- 50 - el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,45$ , para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,5$ , para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,6$ , para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,65$ , para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,68$ , para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o
- 55 - el coeficiente de empuje m\aximo,  $C_{L,m\acute{a}x} > 1,7$ , para  $Re = 11,0 \times 10^6$ ,

donde  $C_{L,m\acute{a}x}$  es v\alıdo para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

*Ejemplo D4*

60 En una realizaci\on preferida de la turbina e\alıca del Ejemplo D1, el  $Sol_r < 0,010$  para radio de pala  $r = 90 \%$ .

En una realizaci\on, la solidez espec\ıfica del radio combinada de las palas es 0,009 a  $r = 90 \%$  de R y  $C_{L,m\acute{a}x} = 1,45 - 1,50$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$  para el 85 % de la pala.

65

*Ejemplo D5*

De acuerdo con la invención, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina eólica tiene al menos una pala de turbina eólica, que es mayor de 30 metros. Las palas tienen una solidez específica del radio combinada de las palas,  $Sol_r < 0,035$  para radio de pala  $r = 30\%$  del radio del rotor R. Para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala, el empuje máximo satisface uno o más de los siguientes requisitos:

- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,45$ , para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,5$ , para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,6$ , para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,65$ , para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,68$ , para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o
- el coeficiente de empuje máximo,  $C_{L,máx} > 1,7$ , para  $Re = 11,0 \times 10^6$ ,

donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

En una realización, la solidez específica del radio combinada de las palas es 0,034 a  $r = 30\%$  de R y  $C_{L,máx} = 1,45 - 1,50$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$  para el 80 % de la pala.

*Ejemplo D6*

En una realización preferida de la turbina eólica del Ejemplo D1, el  $Sol_r < 0,034$  para radio de pala  $r = 30\%$ .

*Ejemplo D7*

En una realización preferida de las turbinas eólicas de los Ejemplos D1 a D6, la pala de turbina eólica también satisface los requisitos que corresponden a uno o más de los Ejemplos B, C y los otros D.

*Ejemplo E*

En un aspecto de la invención, la solidez específica del radio combinada para una turbina eólica que corresponde a uno cualquiera de los ejemplos anteriores disminuye sustancialmente de forma lineal sobre una parte longitudinal sustancial de la pala. Mediante sustancialmente de forma lineal se quiere indicar que la solidez específica del radio combinada se desvía de la linealidad en menos del 2 % de la solidez específica del radio, preferentemente menos del 1 % de la solidez específica del radio. En una realización, la solidez específica del radio combinada disminuye sustancialmente de modo lineal entre el radio  $r = 60\%$  del radio del rotor R a  $r = 80\%$  de R. En una realización preferida, la disminución sustancialmente lineal es desde aproximadamente  $r = 50\%$  de R a aproximadamente  $r = 90\%$  de R. En una realización particularmente preferida, la disminución sustancialmente lineal es desde aproximadamente  $r = 40\%$  de R a aproximadamente  $r = 90\%$  de R. La disminución sustancialmente lineal es ventajosa por que permite un diseño simple y una disposición de refuerzo dado que el momento de dicha pala varía también típicamente de modo lineal.

*Ejemplo F*

De acuerdo con la invención, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina eólica tiene al menos una pala de turbina eólica más larga de 30 metros. Para la parte exterior de la pala que corresponde a un intervalo de radio para la relación de grosor a cuerda  $t/c < 21\%$  excepto para la parte de punta donde  $r > 96\%$  de R, las palas tienen unos valores de empuje de diseño de  $C_{L,d} > 1,3$ , preferentemente  $C_{L,d} > 1,4$ , para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  que corresponde a un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

En una variedad preferida de dicha pala de turbina eólica, los valores de empuje de diseño anteriores se extienden a una parte mayor de la pala, concretamente para  $t/c < 24\%$  excepto para la parte de punta que corresponde a  $r > 96\%$  de R.

*Ejemplo G*

De acuerdo con la invención, se proporciona una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable. La turbina eólica tiene al menos una pala de turbina eólica más larga de 30 m. Para al menos el 90 % de la pala en el intervalo entre radio de pala  $r = 50\%$  de R a  $r = 80\%$  de R, el valor de empuje de diseño es  $C_{L,d} > 1,3$ , preferentemente  $C_{L,d} > 1,4$  para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  que corresponde a un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso.

En una variedad preferida de dicha pala de turbina eólica, los valores de empuje de diseño anteriores se extienden a una parte mayor de la pala, concretamente para al menos el 90 % de la pala en el intervalo entre radio de pala  $r = 30$

% de R a r = 90 % de R.

**REIVINDICACIONES**

1. Una turbina eólica operable mediante regulación de paso y velocidad de rotor variable, que tiene tres palas de turbina eólica de al menos 30 metros de longitud, en la que la solidez específica del radio combinada  $Sol_r$  de las palas del rotor está por debajo de una interpolación lineal entre:
- 5
- $Sol_r = 0,035$  en un radio de pala  $r = 30$  % del radio del rotor R  
 $Sol_r = 0,025$  en un radio de pala  $r = 50$  % del radio del rotor R  
 $Sol_r = 0,018$  en un radio de pala  $r = 70$  % del radio del rotor R  
10  $Sol_r = 0,011$  en un radio de pala  $r = 90$  % del radio del rotor R  
para al menos el 50 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R;  
preferentemente para al menos el 75 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R; y  
15 más preferentemente para al menos el 95 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R;  
y donde el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,45$  para un número de Reynolds  $Re = 1,5 \times 10^6$ , donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso, para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala.
- 20 2. La turbina eólica de la reivindicación 1, donde la solidez específica del radio combinada está por debajo de una interpolación lineal entre:
- $Sol_r = 0,034$  en un radio de pala  $r = 30$  % del radio del rotor R  
 $Sol_r = 0,022$  en un radio de pala  $r = 50$  % del radio del rotor R  
25  $Sol_r = 0,016$  en un radio de pala  $r = 70$  % del radio del rotor R  
 $Sol_r = 0,010$  en un radio de pala  $r = 90$  % del radio del rotor R  
para al menos el 50 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R;  
preferentemente para al menos el 75 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R; y  
30 más preferentemente para al menos el 95 % del radio de la(s) pala(s) entre el radio de pala  $r = 30 - 90$  % del radio de rotor R.
3. La turbina eólica de la reivindicación 1 o 2, en la que
- 35 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,45$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,6$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,65$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o  
40 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,7$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$   
donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso, para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala.
- 45 4. La turbina eólica de la reivindicación 1 o 2, en la que
- el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,58$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,64$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o  
50 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,71$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,73$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$   
donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso, para al menos el 80 % del radio de la pala, preferentemente para al menos el 90 % del radio de la pala.
- 55 5. La turbina eólica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que
- el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,45$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o  
60 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,6$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,65$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o  
el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,7$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$   
65 donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso, para perfiles en el intervalo de radio correspondiente a  $t/c < 24$  % a  $t/c > 15$  % con la condición de que  $r < 96$  % de R; preferentemente para perfiles en el intervalo de radio correspondiente a  $t/c < 27$  % a  $t/c > 15$  % con la condición de que  $r < 96$  % de R, en donde  $t/c$  es la relación de grosor a cuerda.

6. La turbina eólica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que
- 5 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,5$  para  $Re = 1,5 \times 10^6$ , y/o  
 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,58$  para  $Re = 3,0 \times 10^6$ , y/o  
 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,64$  para  $Re = 5,0 \times 10^6$ , y/o  
 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,68$  para  $Re = 7,0 \times 10^6$ , y/o  
 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,71$  para  $Re = 9,0 \times 10^6$ , y/o  
 el coeficiente de empuje máximo  $C_{L,máx} > 1,73$  para  $Re = 11,0 \times 10^6$   
 10 donde  $C_{L,máx}$  es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso, para perfiles en el  
 intervalo de radio correspondiente a  $t/c < 24\%$  a  $t/c > 15\%$  con la condición de que  $r < 96\%$  de  $R$ ;  
 preferentemente para perfiles en el intervalo de radio correspondiente a  $t/c < 27\%$  a  $t/c > 15\%$  con la condición  
 de que  $r < 96\%$  de  $R$ .
7. La turbina eólica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6,
- 15 en la que la solidez específica del radio combinada disminuye sustancialmente de modo lineal entre el radio de  
 pala  $r = 60\%$  del radio del rotor  $R$  a  $r = 80\%$  de  $R$ ;  
 preferentemente desde  $r = 50\%$  de  $R$  a  $r = 90\%$  de  $R$ ;  
 20 más preferentemente desde  $r = 40\%$  de  $R$  a  $r = 90\%$  de  $R$ .
8. La turbina eólica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7,
- 25 en la que el  $C_{L,d} > 1,3$  para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  correspondiente a un flujo bidimensional que pasa por una  
 superficie de perfil liso y para  $t/c < 21\%$ , preferentemente para  $t/c < 24\%$ , con la condición de que  $r > 96\%$  de  
 $R$ , donde  $C_{L,d}$  es el coeficiente de empuje de diseño.
9. La turbina eólica de la reivindicación 8, en la que el  $C_{L,d} > 1,4$  para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  correspondiente a un flujo  
 bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso y para  $t/c < 21\%$ , preferentemente para  $t/c < 24\%$ , con la  
 30 condición de que  $r > 96\%$  de  $R$ .
10. La turbina eólica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9,
- 35 en la que el  $C_{L,d} > 1,3$  para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  correspondiente a un flujo bidimensional que pasa por una  
 superficie de perfil liso y para al menos el 90% de la pala en el intervalo entre el radio de pala  $r = 50\%$  de  $R$  a  
 $r = 80\%$  de  $R$ ;  
 preferentemente para al menos el 90% de la pala en el intervalo entre el radio de pala  $r = 30\%$  de  $R$  a  $r = 90\%$   
 de  $R$ .
11. La turbina eólica de la reivindicación 10, en la que
- 40 el  $C_{L,d} > 1,4$  para  $Re = 3,0 - 11 \times 10^6$  correspondiente a un flujo bidimensional que pasa por una superficie de  
 perfil liso y para al menos el 90% de la pala en el intervalo entre el radio de pala  $r = 50\%$  de  $R$  a  $r = 80\%$  de  $R$ ;  
 preferentemente para al menos el 90% de la pala en el intervalo entre el radio de pala  $r = 30\%$  de  $R$  a  $r = 90\%$   
 de  $R$ .
- 45 12. Una pala de turbina eólica de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
13. La pala de turbina eólica de la reivindicación 12, comprendiendo dicha pala de turbina eólica fibras de carbono.
- 50 14. La pala de turbina eólica de la reivindicación 13, en la que las fibras de carbono son las fibras de refuerzo  
 principales en al menos una sección de la pala de turbina eólica.
15. La pala de turbina eólica de la reivindicación 13, en la que las fibras de carbono se proporcionaron como  
 elementos curados realizados mediante pultrusión o prensado de cintas.
- 55 16. Uso de una pala de turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 12 a 15 para una turbina  
 eólica operable mediante control de paso individual.
17. Uso de una pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 15 para una  
 60 turbina eólica operable mediante control de paso individual fuera de las condiciones de pérdida.
18. Uso de acuerdo con la reivindicación 16 o 17 donde el control de paso individual incluye una variación cíclica del  
 ángulo de paso, preferentemente con un periodo que corresponde a un giro del rotor.
- 65 19. Uso de una pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 15 para una  
 turbina eólica operable mediante regulación de pérdida.

20. Uso de una turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11 para una operación de ruido reducido, en el que la velocidad de giro se reduce y el ángulo de paso se ajusta para minimizar la disminución en la producción anual.

5 21. Un método de operación de una turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11 bajo una condición de reducción de ruido que comprende las etapas de:

ajustar la velocidad de giro por debajo de la velocidad de giro nominal, y  
ajustar el ángulo de paso para minimizar la disminución en la producción anual.

10

Fig. 1

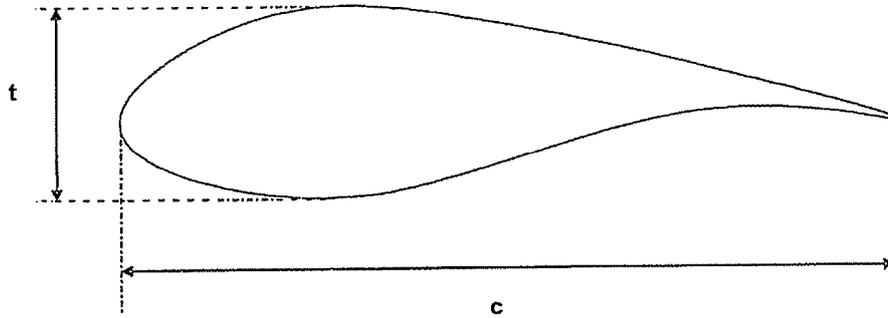


Fig. 2

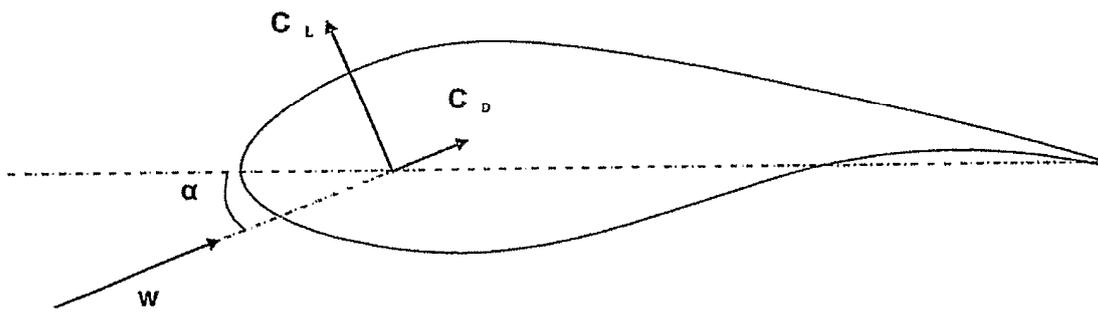


Fig. 3

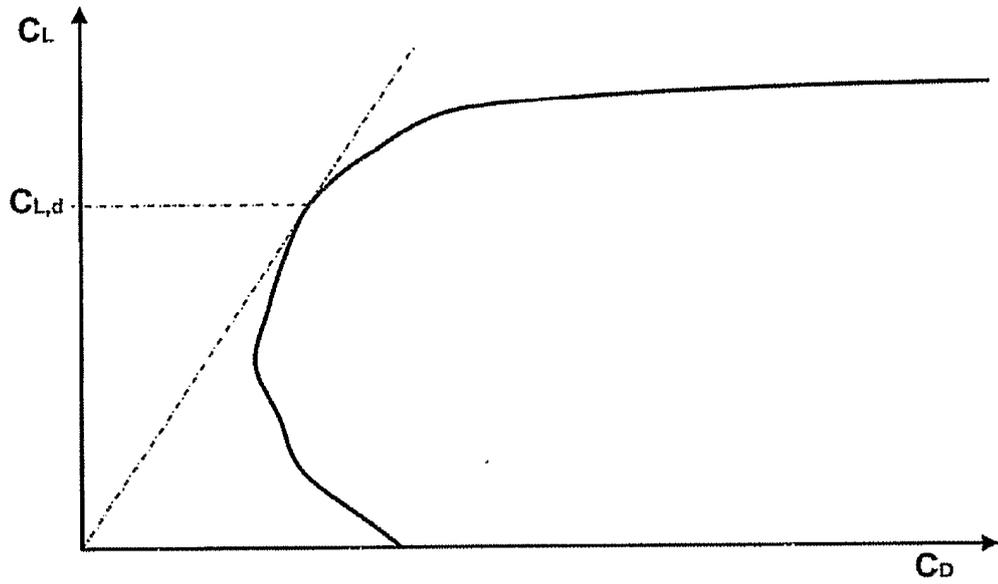


Fig. 4

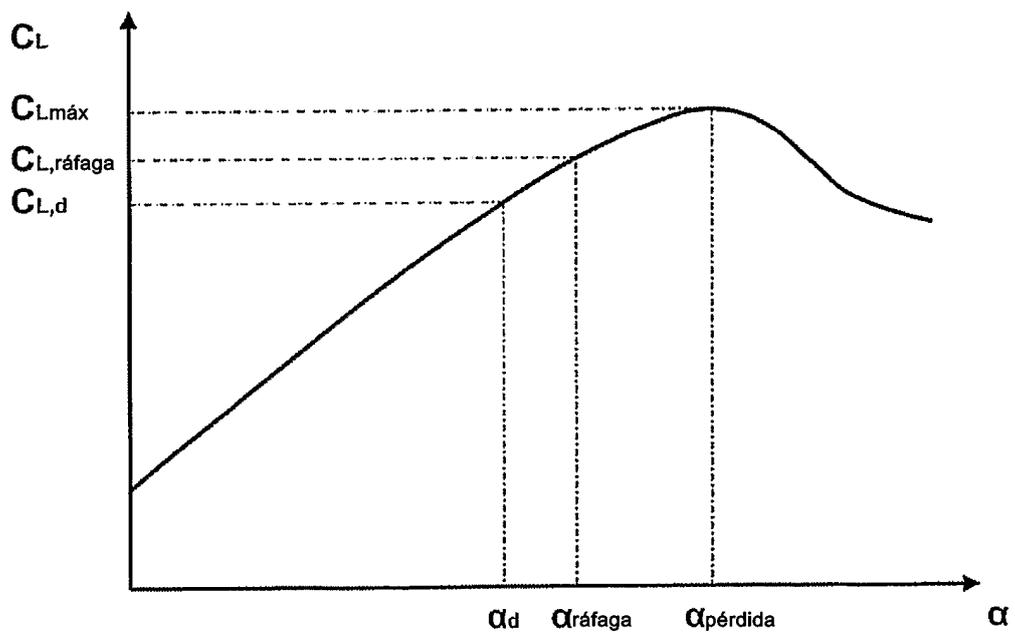


Fig. 5

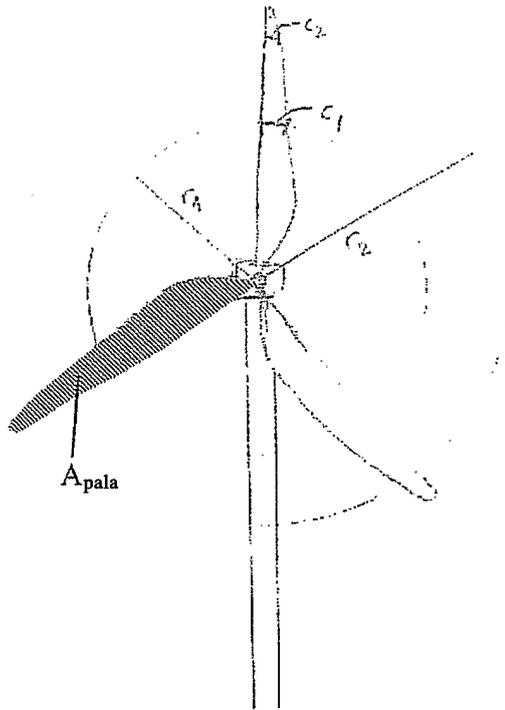


Fig. 6

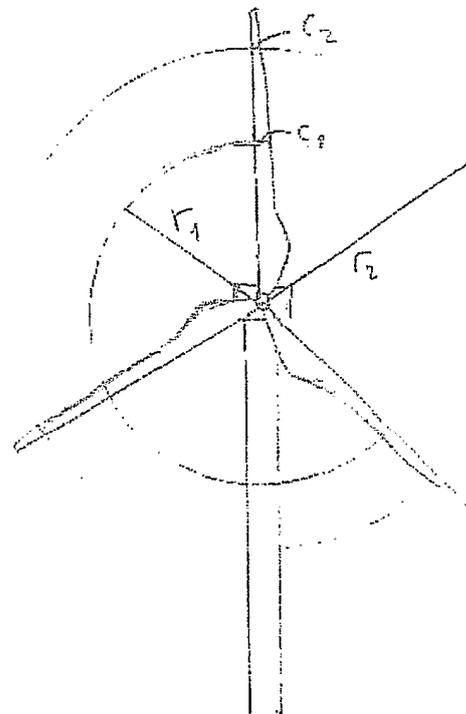


Fig. 7

