

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 426 198**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2007 E 07846429 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2013 EP 2122163**

54 Título: **Turbina eólica con palas del rotor provistas de aletas**

30 Prioridad:

22.12.2006 DK 200601705

10.08.2007 DK 200701142

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

21.10.2013

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

HEDEAGER 44

8200 AARHUS, DK

72 Inventor/es:

GODSK, KRISTIAN BALSCHMIDT y

NIELSEN, THOMAS STEINICHE BJERTRUP

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 426 198 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

Turbina eólica con palas del rotor provistas de aletas

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a una turbina eólica que tiene un rotor con palas de turbina eólica provistas de aletas y que tiene un diseño aerodinámico particular para mejorar el rendimiento de la turbina eólica.

Antecedentes de la invención

10 Durante años ha sido una práctica común en el diseño de alas de aviones disponer distintos tipos de aletas u otros medios en la punta del ala para reducir o evitar el flujo de aire en envergadura desde el lado de presión (inferior) del perfil del ala hacia el lado de succión (superior) del perfil alrededor de la punta, lo que da como resultado la creación de vórtices en la punta y un coeficiente de sustentación menor en la sección de punta del ala, principalmente debido a la succión reducida en el lado de succión. Los rotores de turbina eólica con palas provistas de aletas son conocidos asimismo en la técnica, principalmente a los efectos de reducir la emisión de ruido de la turbina eólica debido a la presencia de vórtices en la punta, aunque igualmente para mejorar el rendimiento global de la turbina eólica.

15 El documento WO 2004/061298 A2 divulga tal pala para una turbina eólica, donde se divulga un diseño en particular de la propia aleta.

20 El documento EP 1 500 814 A1 muestra una pala de turbina eólica con una proyección terminal que tiene un perfil transversal aerodinámico, que descansa en un plano que se extiende con un ángulo con respecto al plano de la pala de rotor. La proyección terminal es asimétrica con respecto al eje longitudinal central de la pala del rotor, con una reducción progresiva o escalonada del grosor de la pala en la transición entre la proyección terminal y el resto de la pala de rotor.

El documento WO 2005/078277 A2 se refiere a una pala de rotor para una turbina eólica con una razón de resistencia, en particular en la región de tablero central o principal de dicho rotor, cuyo valor supera el 80 %, y preferentemente el 90 %, del valor máximo de dicha razón en el intervalo de +/- 2° del paso óptimo de dicho rotor.

25 Una de las consecuencias de producir sustentación en un ala finita es la generación de flujo en envergadura alrededor de la punta, lo que influye en el patrón de flujo en toda la región de la punta. En particular, los gradientes de presión provocados por las presiones menores en la superficie superior con relación a las presiones mayores en la superficie inferior conducen a un flujo en envergadura hacia dentro (hacia el buje) en la superficie superior y a un flujo en envergadura hacia fuera (hacia la punta) en la superficie inferior. En el borde de salida, la confluencia de estos dos flujos con direcciones diferentes genera la vorticidad que se desprende de un ala finita y es el origen de una resistencia inducida así como de ruido aerodinámico.

30 Una placa terminal en la punta de un ala finita puede reducir el flujo en envergadura y por lo tanto reducir la resistencia inducida. Desafortunadamente, para ser efectiva, la placa terminal debe ser tan grande que el aumento de resistencia por superficie mojada sobrepase con mucho cualquier reducción de resistencia. Una aleta, en lugar de ser una simple barrera que limita el flujo en envergadura, transporta una carga aerodinámica que produce un campo de flujo, esto es, una fuerza lateral hacia dentro que permite que su propio campo de velocidad inducida cancele parcialmente el del ala principal, reduciendo así la cantidad de flujo en envergadura. En esencia, la aleta difunde o dispersa la influencia del vórtice de punta de tal modo que la deflexión hacia abajo y, a su vez, la resistencia inducida se reducen. De este modo, la aleta actúa como una placa terminal para reducir el flujo en envergadura pero, al transportar la carga aerodinámica adecuada, consigue esto con mucha menos superficie mojada.

35 El desplazamiento de la punta del ala hacia fuera y alejándose de la forma en planta principal del ala reduce el efecto de la vorticidad desprendida en el ala desplazando la vorticidad concentrada lejos del ala. De este modo, la aleta emula el efecto de una extensión de envergadura plana y de un aumento de la longitud del perímetro de carga.

45 El proceso de difusión se manifiesta asimismo como una expansión de la estela en el campo lejano debido a velocidades inducidas por los componentes no planos de la aleta. El vórtice ligado fuera de plano sobre una aleta dirigida hacia arriba induce velocidades horizontales en la estela libre que provocan una dispersión en envergadura del campo de estela. Esto emula asimismo el efecto de un aumento de envergadura.

50 Otro beneficio de las aletas, que no se consigue mediante una mera extensión de envergadura, es el efecto en la distribución de sustentación en envergadura, en particular en la región de la punta del ala. La influencia de la aleta carga efectivamente la forma en planta en la región de punta, aumentando los coeficientes locales de sustentación y rellenando la distribución de sustentación en envergadura. Son posibles eficiencias de forma en planta superiores a las de un ala elíptica. Esto ocurre porque, como se evidencia por la extensión de los coeficientes de sustentación aproximadamente constantes más allá de la ubicación real de la punta, la distribución de sustentación en envergadura cargada en la punta se comporta, de hecho, como la de una forma en planta cargada casi elípticamente de una mayor envergadura. Cuando se referencia a la envergadura real, la eficiencia resultante es

superior a la de una carga elíptica.

En resumen, los beneficios globales de una aleta frente a una extensión de punta son:

1. Se encuentra que la instalación de aletas provoca un mayor aumento en el coeficiente de potencia y un menor aumento en el momento de flexión de flap que en palas de rotor extendidas radialmente.
2. El menor diámetro de la turbina para la misma velocidad de punta da como resultado una relación de desmultiplicación menor.
3. En algunos emplazamientos, la normativa local impone una altura de turbina eólica máxima (torre más punta de la pala en la posición más elevada).
4. Disminución de ruido de vórtices de punta.

Breve descripción de la invención

Las ventajas analizadas anteriormente de aplicar aletas en palas de turbina eólica han conducido a una tendencia de diseño donde la parte de la pala que se extiende desde el buje y hacia el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta, esto es, en la raíz de la aleta, está diseñada como la parte interna de una pala de turbina eólica más larga, ya que la presencia de la aleta reduce los efectos de punta adversos en el coeficiente de sustentación en la parte externa de la pala próxima a la punta, y se puede conseguir un mayor rendimiento de esa parte de la pala, lo que es particularmente interesante ya que esta parte barre una sección grande del área total barrida por el rotor. Este diseño conduce a longitudes de cuerda relativamente grandes en la parte externa de la pala, esto es, aproximadamente el 5 % externo del radio completo del rotor.

Es un objetivo de la presente invención proporcionar un diseño mejorado de una pala de turbina eólica con una aleta que da como resultado un rendimiento mejorado de la turbina eólica con respecto a la producción anual y, preferentemente, también una reducción en la emisión de ruido.

Se ha encontrado mediante la presente invención que una optimización del rendimiento de la turbina eólica se puede conseguir diseñando la parte externa de la pala para que sea mucho más fina, esto es, con una longitud de cuerda más corta diseñada dentro de una banda estrecha de valores definidos con respecto a la longitud de la aleta, esto es, la extensión en la dirección transversal a la dirección longitudinal de la pala. Se ha demostrado que la reducción de la longitud de cuerda reduce la resistencia real más que la reducción en sustentación y da como resultado un rendimiento mejorado. Así pues, la presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende un rotor con palas de turbina eólica, cada una de las cuales tiene un extremo de raíz conectado a un buje de la turbina eólica y un extremo de punta, el extremo de punta de cada una de las cuales está provisto de una aleta que se extiende una distancia en una dirección perpendicular a una dirección longitudinal de la pala, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta es 0,085 veces la extensión de la aleta dividida entre el radio del rotor, más un valor dentro del intervalo de 0,0012 a 0,0048. Sin embargo, para un efecto óptimo de la aleta, los estudios del inventor indican que dicho valor se encuentra preferentemente en el intervalo de 0,0016 a 0,0042 y lo más preferentemente en el intervalo de 0,0024 a 0,0040. La extensión de la aleta y el radio del rotor se toman en valor absoluto, de modo que su razón, esto es, la extensión de la aleta dividida entre el radio del rotor, será una fracción, típicamente del orden de 0,01 a 0,04. Así pues, un ejemplo de un cálculo típico de la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta es para una pala donde la razón de la extensión de aleta y el radio del rotor es de 0,025 y dicho valor se selecciona como un valor medio del último intervalo mencionado: $(0,085 \times 0,025) + 0,0032 = 0,0053$.

La solidez de un rotor de turbina eólica es la razón entre el área de las palas proyectada en el plano del rotor y el área total cubierta por las palas en giro, A_{pala} . La solidez combinada, esto es, la suma de solideces de las palas, es por lo tanto:

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

donde n es el número de palas de turbina eólica, por ejemplo, 2, 3 o 4.

La solidez se puede establecer asimismo para un radio específico, r , desde el centro del plano del rotor. La solidez específica del radio de la pala de la turbina eólica disminuye como función del radio específico, r , y la solidez específica del radio combinado Sol_r . La solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor se define como

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

donde n es el número de palas en el rotor, normalmente 2 o 3, c_r es la longitud de cuerda a la distancia r desde el buje y R es el radio de rotor.

5 En un modo de realización preferente de la presente invención, el extremo externo de las palas se diseña de modo que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor aumenta continuamente desde el extremo de punta de la pala y hasta un valor en el intervalo de 0,0065 a 0,013 en una posición a un 5 % del radio del rotor R desde la punta en la dirección del buje, preferentemente en el intervalo de 0,008 a 0,011 y lo más preferentemente en un intervalo de 0,0085 a 0,01. Se prefiere particularmente que la solidez específica del radio combinado del rotor aumente de modo sustancialmente lineal, esto es, dentro de una desviación de +/- 5-8 % de un aumento lineal como función de la distancia desde la punta.

10 De acuerdo con otro modo de realización preferente de la presente invención, la totalidad de la parte externa de las palas del rotor se diseña de un modo particular para mejorar el rendimiento global del rotor. Se ha encontrado que el diseño óptimo depende fuertemente de la altura de la aleta, y la invención se refiere además a una turbina eólica que comprende un rotor con unas palas de turbina eólica cada una de las cuales tiene un extremo de raíz conectado a un buje de la turbina eólica y un extremo de punta, el extremo de punta de cada una de las cuales está provista de una aleta que se extiende una distancia X_{altura} en una dirección perpendicular a una dirección longitudinal de la pala, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en la parte de extremo de punta de las palas se diseña sustancialmente de acuerdo con la fórmula

$$Sol_r = -0,34087 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0,6004 \cdot \left(\frac{r}{R}\right) - 1,236 \cdot \left(\frac{X_{altura}}{R}\right)^2 + 0,12548 \cdot \left(\frac{X_{altura}}{R}\right) - 0,25276 + C$$

20 siendo r la distancia al buje y R el radio del rotor, en el que C se define como una constante para el diseño global del rotor y se elige dentro del intervalo de -0,006 a 0,006, definiéndose la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor como

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

siendo n el número de palas del rotor, c_r la longitud de cuerda a la distancia r del buje.

25 El amplio intervalo del diseño refleja el hecho de que los rotores de turbinas eólicas se diseñan para el tipo de viento al que estará sometida la turbina individual, esto es, la distribución de velocidades del viento esperada.

Este diseño de la punta de la pala puede ser combinado ventajosamente con el diseño anteriormente mencionado de acuerdo con la presente invención.

Se prefiere que C se elija en el intervalo de -0,004 a 0,004, preferentemente en el intervalo de -0,003 a 0,003.

30 En un modo de realización preferente de la presente invención, dicha parte de punta que está diseñada de acuerdo con dicha fórmula constituye al menos el 5 % externo de la longitud de la pala de cada una de las palas del rotor, preferentemente al menos el 8 % externo de la longitud de la pala de cada una de las palas del rotor y lo más preferentemente al menos el 10 % externo de la longitud de la pala.

35 La solidez específica del radio combinado (Sol_r) de dicha parte de punta se diseña sustancialmente de acuerdo con la fórmula, lo que en un modo de realización preferente significa que se desvía menos del 12 % respecto a la solidez específica del radio combinado (Sol_r) definida por dicha fórmula, preferentemente menos del 8 % y lo más preferentemente menos del 6 %.

La extensión de la aleta puede superar con la presente invención el 1,2 % al 1,5 % del radio del rotor que se aplica comúnmente, con un rendimiento mejorado de la turbina eólica. Así pues, la aleta se extiende preferentemente en el intervalo de 0,5 % al 5 % del radio R del rotor y lo más preferentemente en el intervalo del 2 % al 4 % del radio.

40 Se prefiere que el coeficiente de sustentación máximo $C_{l,máx}$ de las palas, donde $C_{l,máx}$ es válido para un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil lisa, en el 10 % externo del radio R del rotor esté en el intervalo de 0,9 a 2,0, y se prefiere además que el coeficiente de sustentación máximo $C_{l,R}$ en el extremo de punta de las palas esté en el intervalo de 0,2 a 1,4. Para un análisis adicional del coeficiente de sustentación máximo, por favor consúltese el documento WO 2006/090215.

45 Con respecto al diseño de la aleta, se prefiere que la solidez específica del radio combinado de la cuerda de punta de la aleta esté en el intervalo de 0,0 a 0,02 para un radio de pala r tomado como el radio del rotor R , y el coeficiente de sustentación máximo ($C_{l,máx}$) para la cuerda de punta de la aleta esté en el intervalo de 0,0 a 0,4. Se prefiere además que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta sea sustancialmente igual a la solidez específica del radio combinado en la cuerda de raíz de la aleta, y que la solidez específica del radio combinado disminuya de modo sustancialmente

continuo, más preferentemente de modo lineal, con la distancia a la punta, desde la cuerda de raíz de la aleta a la cuerda de punta de la aleta.

5 La aleta se puede extender hasta el lado de presión, que es lo más común con el fin de evitar interferencias con la torre de turbina eólica, o la aleta se puede extender hasta el lado de presión así como hasta el lado de succión de la pala. Sin embargo, se prefiere que las aletas se extiendan dicha distancia (X_{altura}) hasta el lado de succión de las palas del rotor, ya que se ha demostrado que esto, en combinación con la presente invención, proporciona un rendimiento mejorado de la turbina eólica.

Se prefiere además que el ángulo de ataque α_{AoA} del flujo de entrada de la aleta esté en el intervalo de -5 a 10° , preferentemente en el intervalo de -2 a 8° y lo más preferentemente en el intervalo de 0 a 5° .

10 También es un modo de realización preferente de la presente invención que el ángulo de ataque de inclinación de la aleta a la pala esté en el intervalo de 70 a 150° , preferentemente en el intervalo de 80 a 120° y lo más preferentemente en el intervalo de 90 a 100° .

15 Es un modo de realización preferente adicional de la presente invención que el desplazamiento del borde de ataque de la aleta X_{LED} sea menor que la cuerda de raíz de la aleta, preferentemente en el intervalo del 5% al 75% de la misma, y lo más preferentemente en el intervalo del 10% al 50% de la misma.

20 Es otro modo de realización preferente adicional de la presente invención que el desplazamiento del borde de salida de la aleta X_{TED} sea menor que $\pm 30\%$ de la cuerda de raíz de la aleta, esto es, que el borde de salida de la aleta en la misma punta de la aleta pueda ser desplazado delante o detrás del borde de salida del ala principal, preferentemente en el intervalo de $\pm 2\%$ a $\pm 20\%$ del mismo y lo más preferentemente en el intervalo de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$ del mismo.

Breve descripción de las figuras

Las figuras adjuntas ilustran términos y efectos relativos a la presente invención:

- la fig. 1 ilustra la inclinación de la aleta con respecto a la pala,
- 25 la fig. 2 ilustra la altura de la aleta, la cuerda de raíz de la aleta, la cuerda de punta de la aleta, el desplazamiento del borde del anero y el desplazamiento del borde de salida,
- la fig. 3 ilustra el ángulo de ataque de la aleta,
- la fig. 5 muestra una solidez específica del radio combinado preferente del 10% externo de un rotor de turbina eólica que tiene una altura de aleta del 1% ,
- 30 la fig. 4 muestra una solidez específica del radio combinado preferente del 10% externo de un rotor de turbina eólica que tiene una altura de aleta del 2% , y
- la fig. 6 muestra una solidez específica del radio combinado preferente del 10% externo de un rotor de turbina eólica que tiene una altura de aleta del 4% .

Descripción detallada de términos y modos de realización

35 En la fig. 1 se muestra el extremo de punta de una pala vista en perspectiva con la aleta apuntando hacia arriba, y la inclinación de la aleta con respecto a la pala se muestra como el ángulo de inclinación de la aleta con respecto a la pala, $\alpha_{\text{inclinación}}$, definido como el ángulo entre la línea central del ala principal y la línea central de la aleta.

40 En la fig. 2 se muestra el extremo de punta de una pala visto desde el extremo de la misma, esto es, la propia pala se extiende alejándose del observador de la fig. 3. La altura de la aleta, X_{altura} , se define como la distancia desde la línea de cuerda del ala principal en la propia punta a la línea de cuerda de la propia punta de la aleta. La cuerda de raíz de la aleta, $X_{\text{cuerda de raíz}}$, se define como la distancia desde el borde de ataque al borde de salida del ala principal en la propia punta en donde se une la aleta. La cuerda de punta de la aleta, $X_{\text{cuerda de punta}}$, se define como la distancia desde el borde de ataque al borde de salida de la aleta en la propia punta de la aleta. El desplazamiento del borde de ataque de la aleta, X_{LED} , se define como la distancia desde el borde de ataque del ala principal en la propia punta al borde de ataque de la aleta en la propia punta de la aleta. El desplazamiento del borde de salida de la aleta, X_{TED} , se define como la distancia desde el borde de salida del ala principal en la propia punta al borde de salida de la aleta en la propia punta de la aleta.

45 En la fig. 3 se muestra en extremo de punta de una pala visto desde el lado al cual apunta la punta de la aleta, esto es, la punta de la aleta de la fig. 3 apunta hacia el observador. El ángulo de ataque de la aleta, α_{AoA} , se define como el ángulo entre la línea paralela al plano de la cuerda del ala principal en la punta y el plano de la cuerda de raíz de la aleta.

Se ha demostrado que modificar la pala con distintas aletas aumenta la eficiencia del rotor, esto es, la cantidad de

energía que extrae el rotor del viento.

El incremento anual de producción para una turbina con una velocidad del viento promedio de 8,5 m/s para un rotor de turbina eólica estándar se ha calculado teóricamente para distintas extensiones de la aleta:

	original	aleta 1 %	aleta 2 %	aleta 4 %
Aumento porcentual en la producción anual para una velocidad promedio del viento de 8,5 m/s	0,0	0,9	1,5	2,4

5 Se observa que el efecto principal del diseño de la pala de acuerdo con la invención surge para velocidades del viento entre 5 y 11 m/s. Esto es enormemente ventajoso, ya que para velocidades del viento mayores ya se ha alcanzado la máxima producción, y para velocidades del viento menores, el movimiento radial del ala tiene un efecto limitado. Parece que el aumento tiende a ser mayor para alturas mayores de las aletas, pero un límite práctico con relación a la construcción mecánica y a fuerzas en la parte de punta de las palas debido a la presencia de la aleta se encuentra alrededor del 5 % del radio de la turbina eólica.

La solidez específica del radio combinado del 10 % externo de las palas de la turbina eólica se ha calculado para tres ejemplos diferentes de diseños de pala de acuerdo con la presente invención y se muestra en las figs. 4-6.

15 En la fig. 4 se muestra un diseño con una altura de aleta del 1 % del radio del rotor. La solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta se elige para que sea 0,00435, lo que da como resultado una constante $C = -0,00355$ para la fórmula anterior. Para una turbina eólica de tres palas con un diámetro de rotor de 90 m esto es igual a una altura de aleta de 45 cm, una longitud de cuerda de punta de, aproximadamente, 41 cm, y una longitud de cuerda en un radio $r = 90$ % del radio del rotor de 45 m de, aproximadamente, 92 cm.

20 En la fig. 5 se muestra un diseño con una altura de aleta del 2 % del radio del rotor. La solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta se elige para que sea 0,0057, lo que da como resultado una constante $C = -0,003085$ para la fórmula anterior. Para una turbina eólica de tres palas con un diámetro de rotor de 90 m esto es igual a una altura de aleta de 90 cm, una longitud de cuerda de punta de, aproximadamente, 54 cm, y una longitud de cuerda en un radio $r = 90$ % del radio del rotor de 45 m de, aproximadamente, 98 cm.

25 En la fig. 6 se muestra un diseño con una altura de aleta del 4 % del radio del rotor. La solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta se elige para que sea 0,0057, lo que da como resultado una constante $C = -0,003212$ para la fórmula anterior. Para una turbina eólica de tres palas con un diámetro de rotor de 90 m, esto es igual a una altura de aleta de 180 cm, una longitud de cuerda de punta de, aproximadamente, 62 cm, y una longitud de cuerda en un radio $r = 90$ % del radio del rotor de 45 m de, aproximadamente, 107 cm.

REIVINDICACIONES

1. Una turbina eólica que comprende un rotor con palas de turbina eólica, cada una de las cuales tiene un extremo de raíz conectado a un buje de la turbina eólica y un extremo de punta, estando provisto el extremo de punta de cada una de las cuales de una aleta que se extiende una distancia (X_{altura}) en una dirección perpendicular a una dirección longitudinal de la pala, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) de rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta es 0,085 veces la extensión de la aleta (X_{altura}) dividida entre el radio (R) del rotor, más un valor dentro de un intervalo de 0,0012 a 0,0048, más 0,085 veces la extensión de la aleta (X_{altura}) dividida entre el radio (R) del rotor, estando definida la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor como

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

siendo n el número de palas del rotor, c_r la longitud de cuerda a la distancia r del buje y R el radio del rotor,

dicha solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de la pala está preferentemente en el intervalo de 0,0016 a 0,0042, lo más preferentemente en el intervalo de 0,0024 a 0,0040, más 0,085 veces la extensión de la aleta (X_{altura}) dividida entre el radio (R) del rotor.

2. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor aumenta continuamente desde el extremo de punta de la pala y hasta un valor en el intervalo de 0,0065 a 0,013 en una posición en el 5 % del radio del rotor R desde la punta en la dirección del buje, preferentemente en el intervalo de 0,008 a 0,011 y lo más preferentemente en el intervalo de 0,0085 a 0,01.

3. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 2, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor aumenta de modo sustancialmente lineal desde el extremo de punta de la pala y hasta una posición en el 5 % del radio del rotor (R) desde la punta en la dirección del buje.

4. Una turbina eólica que comprende un rotor con palas de turbina eólica, cada una de las cuales tiene un extremo de raíz conectado a un buje de la turbina eólica y un extremo de punta, estando provisto el extremo de punta de cada una de las cuales de una aleta que se extiende una distancia (X_{altura}) en una dirección perpendicular a una dirección longitudinal de la pala, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en la parte de extremo de punta de las palas se diseña sustancialmente de acuerdo con la fórmula

$$Sol_r = -0,34087 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0,6004 \cdot \left(\frac{r}{R}\right) - 1,236 \cdot \left(\frac{X_{altura}}{R}\right)^2 + 0,12548 \cdot \left(\frac{X_{altura}}{R}\right) - 0,25276 + C$$

siendo r la distancia al buje y R el radio de rotor, en el que C se define como una constante para la totalidad del diseño del rotor y se elige dentro del intervalo de -0,006 a 0,006, estando definida la solidez específica del radio combinado (Sol_r) como

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

siendo n el número de palas del rotor, c_r la longitud de cuerda a la distancia r del buje, y

preferentemente en el intervalo de -0,004 a 0,004, preferentemente en el intervalo de -0,003 a 0,003.

5. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 4, en la que dicha parte de punta que está diseñada de acuerdo con dicha fórmula constituye al menos el 5 % externo de la longitud de la pala de cada una de las palas del rotor.

6. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 4 o 5, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) de dicha parte de punta se desvía menos del 12 % respecto a la solidez específica del radio combinado (Sol_r) definida por dicha fórmula, preferentemente menos del 8 % y lo más preferentemente menos del 6 %.

7. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la extensión de la aleta (X_{altura}) se constituye en el intervalo del 0,5 % al 5 % del radio (R) del rotor, preferentemente en el intervalo del 2 % al 4 % del radio (R).

8. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la solidez específica del radio combinado de la cuerda de punta de la aleta (Sol_r) está en el intervalo de 0,0 a 0,02 para un radio de pala r tomado como el radio del rotor R, y el coeficiente de sustentación máximo ($C_{l,máx}$) para la cuerda de punta de la aleta está en el intervalo de 0,0 a 0,4.

- 5 9. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 8, en la que la solidez específica del radio combinado (Sol_r) del rotor en el extremo de punta de las palas inmediatamente contiguo a la aleta es sustancialmente igual a la solidez específica del radio combinado en la cuerda de raíz de la aleta, y la solidez específica del radio combinado disminuye de modo sustancialmente continuo desde la cuerda de raíz de la aleta hacia la cuerda de punta de la aleta.
10. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 9, en la que la solidez específica del radio combinado disminuye de modo sustancialmente lineal entre la cuerda de raíz de la aleta y la cuerda de punta de la aleta.
11. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que las aletas se extienden dicha distancia (X_{altura}) hacia el lado de succión de las palas del rotor.
- 10 12. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el ángulo de ataque α_{AOA} de flujo de entrada de la aleta está en el intervalo de -5 a 10° , preferentemente en el intervalo de -2 a 8° y lo más preferentemente en el intervalo de 0 a 5° .
- 15 13. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el ángulo de ataque de inclinación de la aleta respecto a la pala está en el intervalo de 70 a 150° , preferentemente en el intervalo de 80 a 120° y lo más preferentemente en el intervalo de 90 a 100° .
14. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el desplazamiento del borde de ataque de la aleta X_{LED} es menor que la cuerda de raíz de la aleta, preferentemente en el intervalo del 5% al 75% de la misma y lo más preferentemente en el intervalo del 10% al 50% de la misma.
- 20 15. Una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el desplazamiento del borde de salida de la aleta X_{TED} es menor que $\pm 30\%$ de la cuerda de raíz de la aleta, preferentemente en el intervalo de $\pm 2\%$ a $\pm 20\%$ del mismo y lo más preferentemente en el intervalo de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$ del mismo.

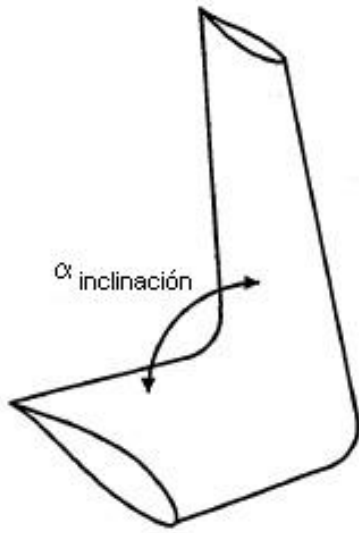


Fig. 1

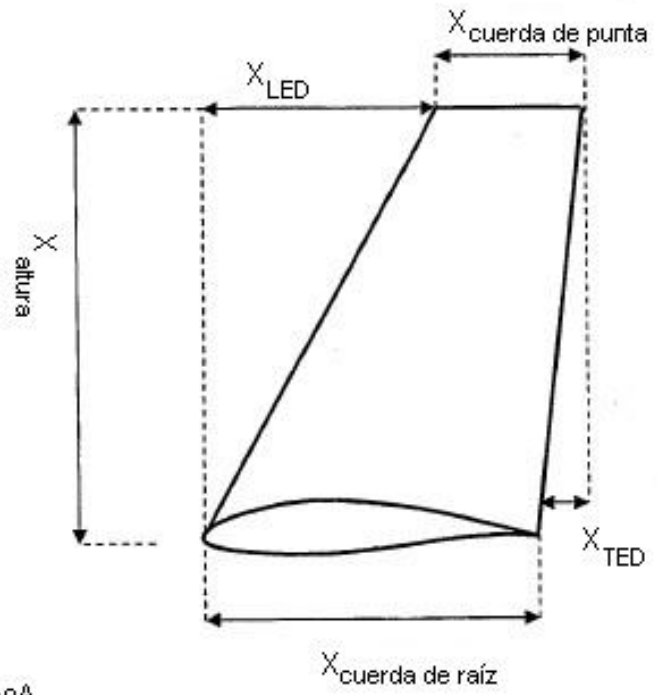


Fig. 2

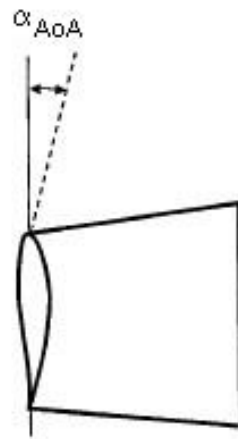


Fig. 3

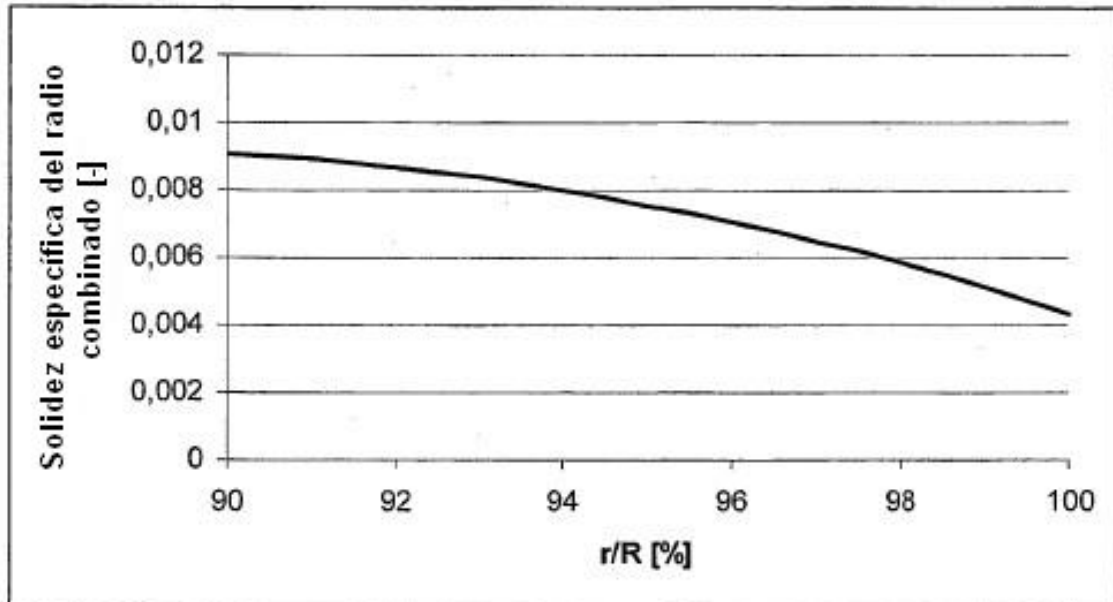


Fig. 4

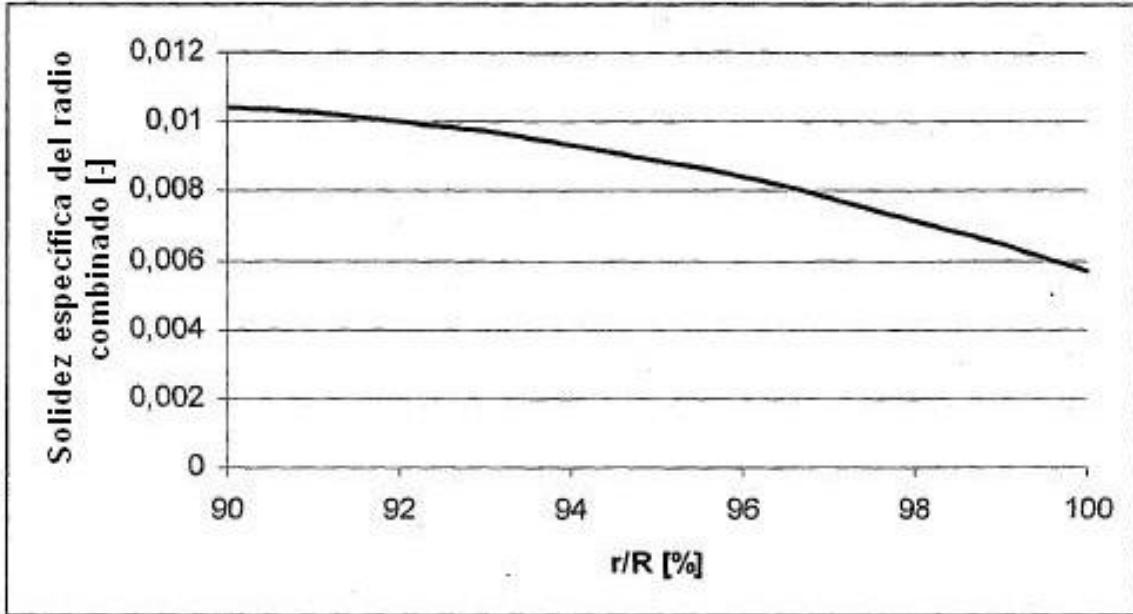


Fig. 5

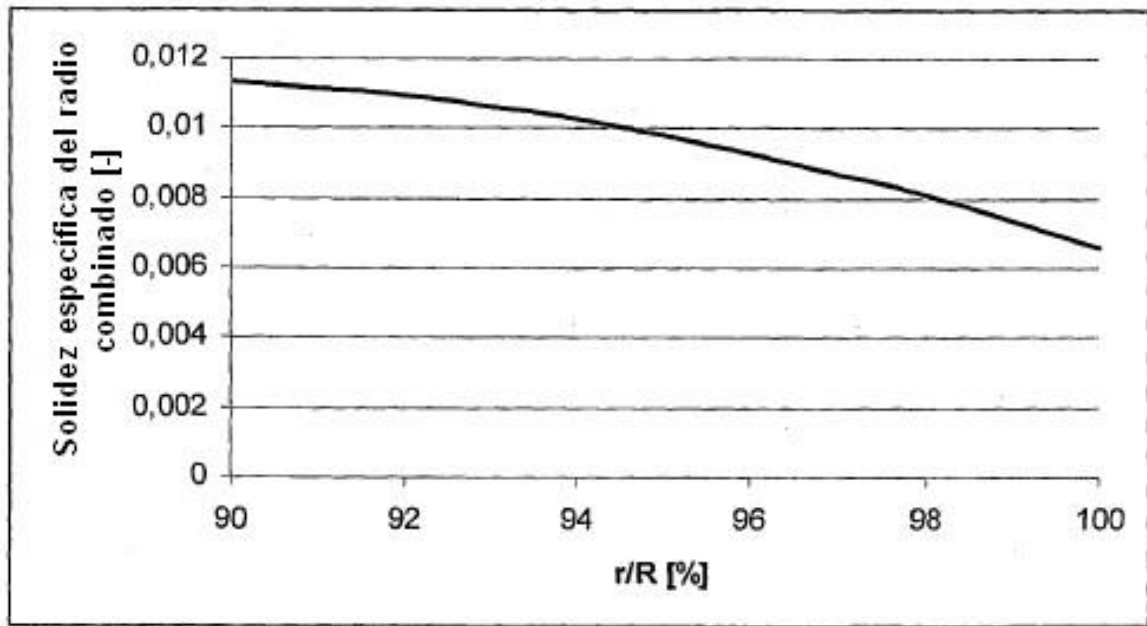


Fig. 6