



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 358 881**

51 Int. Cl.:
F03D 1/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08715580 .0**

96 Fecha de presentación : **13.03.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2129908**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.12.2009**

54 Título: **Palas de turbina eólica con generadores de vórtice.**

30 Prioridad: **20.03.2007 DK 2007 00431**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.05.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.05.2011

73 Titular/es: **VESTAS WIND SYSTEMS A/S**
Alsvej 21
8940 Randers - SV, DK

72 Inventor/es: **Godsk, Kristian Balschmidt**

74 Agente: **Curell Aguilá, Marcelino**

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

La presente invención se refiere a unas palas de una turbina eólica y a un rotor de turbina eólica en el que se utiliza la previsión de generadores de vórtice en las palas para obtener un nuevo diseño ventajoso de un rotor.

ANTECEDENTES

5 La utilización de generadores de vórtice para la reducción de la tendencia a la separación del flujo de aire en las alas de una aeronave hace mucho tiempo que es muy conocida en la técnica y se proporciona un ejemplo en la patente US nº 4.354.648 que da a conocer un ala de una aeronave provista de dos o tres filas de generadores de vórtice de perfil bajo que se extienden desde la superficie del lado de succión, por ejemplo, del 10 al 20% de espesor de la capa límite.

10 La aplicación de los generadores de vórtice en las palas de una turbina eólica es también muy conocida en la técnica. La utilización de generadores de vórtice en las palas de una turbina eólica para contrarrestar la separación y el desprendimiento del flujo se da a conocer en el documento WO 00/15961 (LM Glasfiber) que muestra la utilización de generadores de vórtice a lo largo de la extensión completa de la pala o en el extremo de la punta de la misma, los generadores de vórtice siendo de una forma globalmente triangular y extendiéndose desde el lado de succión de las palas hasta una altura de 0,01 a 10%, preferentemente de 0,25 a 6% de la longitud de la cuerda del perfil.

15 Asimismo, en el documento WO 01/164482 (Stichting) se dan a conocer unas palas de turbinas eólicas provistas de unos generadores de vórtice en el lado de succión o en el lado de presión. Se da a conocer la altura preferida de los generadores de vórtice que es aproximadamente el 1% de la longitud de la cuerda del perfil y el propósito de los generadores de vórtice es evitar que se produzca un desprendimiento repentino durante una ráfaga de viento que cause la pérdida de producción y vibraciones.

20 En el documento WO 2006/122547 (Vestas), el cual se considera como la técnica anterior más próxima al objeto de la reivindicación 1, se realiza todavía otra divulgación de palas de turbinas eólicas con generadores de vórtice, en este caso para una turbina eólica de paso controlado, con el propósito de reducir la emisión de ruido durante el desprendimiento. Se da a conocer que la altura de los generadores de vórtice que está comprendida entre el 0,01% y el 5% de la longitud de la cuerda del perfil.

25 Por lo tanto, la previsión de generadores de vórtice, incluyendo generadores de microvórtice en las palas las turbinas eólicas es muy conocida en la técnica con el propósito de reducir la emisión de ruido y evitar el desprendimiento así como hacer que la ocurrencia del desprendimiento sea más suave y previsible. El hecho de que los generadores de vórtice incrementen el coeficiente de retardo de la pala y de ese modo se reduzca la producción de energía de la turbina eólica delimita la utilización actual de los generadores de vórtice en las palas de turbinas eólicas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PRESENTE INVENCION

35 Con la presente invención, se ha observado que un nuevo diseño ventajoso de una pala y un rotor de una turbina eólica se puede obtener proporcionando dos o más filas paralelas de generadores de vórtice de capa micro o sublímite, por lo que se obtiene una pala la cual es resistente al desprendimiento y provee un coeficiente de sustentación alto máximo $C_{L,max}$ de las palas y un diseño de la pala más delgado, una denominada relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica del rotor.

40 El concepto de generadores de microvórtice ha sido comprobado previamente, por ejemplo, en alerones de aviones y ha mostrado que los generadores de vórtice muy pequeños con una altura de aproximadamente 0,2% de la longitud de la cuerda del perfil del plano aerodinámico puede incrementar el C_L máximo con sólo un pequeño incremento en el coeficiente de retardo del plano aerodinámico C_D que determina la resistencia aerodinámica del plano aerodinámico. Mediante la combinación de los generadores de microvórtice en filas en diferentes posiciones de la cuerda del perfil, por ejemplo, un 20% y un 50% y también posiblemente a un 70%, se ha encontrado que el coeficiente de sustentación máximo C_L se puede incrementar hasta valores extremadamente altos y el desprendimiento en gran medida se evitará y, cuando ocurra, empezará más suave comparado con únicamente una fila de generadores de vórtice mayores con un incremento mucho menor en el coeficiente de retardo del plano aerodinámico C_D comparado con únicamente una fila de generadores de vórtice mayores de una altura suficiente como para obtener resultados similares en el incremento del coeficiente de sustentación máximo $C_{L,max}$.

45 En la presente memoria, mediante el término altura, se entiende una altura máxima del generador de vórtice en una dirección perpendicular alejándose de la superficie de la pala en la posición en la que está colocado el generador de vórtice en cuestión.

50 La altura baja de los generadores de vórtice, en la que no se extienden a través de toda la capa límite completa, reduce el retardo inducido desde los generadores de vórtice, lo cual hace factible también la aplicación de los generadores de vórtice en la parte exterior de la pala, en donde la velocidad relativa del aire y por lo tanto el posible retardo inducido es más elevado. Mediante la previsión de dos o tres filas paralelas de generadores de vórtice, se obtiene el efecto positivo de los generadores de vórtice en las características aerodinámicas de la pala y se alcanza un nuevo diseño ventajoso de la pala de la turbina eólica.

La previsión de los generadores de vórtice en las palas según la invención produce un coeficiente de sustentación máximo incrementado $C_{L,máx}$ de la pala debido a la reducción en la tendencia a la separación del flujo sobre la pala, esto es la tendencia al desprendimiento, causada por el efecto de los generadores de vórtice, lo cual permite que una pala funcione con un ángulo de ataque mayor (AoA) sin que ocurra el desprendimiento. Los generadores de vórtice posibilitan también utilizar palas que tengan un perfil de sustentación alto como aquellos revelados en el documento WO 2007/010329 y obtener un coeficiente de sustentación máximo muy alto $C_{L,máx}$ de la pala cuando funciona la pala a ángulos grandes de ataque. La magnitud del coeficiente de sustentación máximo $C_{L,máx}$ de la pala generalmente dependerá del diseño de los generadores de vórtice, el número de filas consecutivas de generadores de vórtice así como del diseño del perfil de la pala. El funcionamiento de la turbina eólica con palas de alta sustentación y baja relación del área total de las palas al área del círculo barrido como se revela en el documento WO 2006/090215 también se puede mejorar mediante la aplicación de la presente invención.

La presente invención en todos sus aspectos tal como se presenta en la presente memoria se puede aplicar a todos los tamaños de palas y rotores de turbinas eólicas, pero es particularmente ventajoso aplicar la invención a palas del rotor de una longitud que supere los 30 metros y a rotores de turbinas eólicas que excedan un diámetro del rotor de aproximadamente 60-63 metros, ya que la velocidad relativa del aire experimentada por la parte exterior de las palas será más alta y por lo tanto más expuesta a problemas que impliquen la separación del flujo por encima de las palas, esto es al desprendimiento. Adicionalmente, las turbinas eólicas mayores, es decir, que tienen palas del rotor de una longitud que exceden los 30 metros y con rotores de la turbina eólica en las que el diámetro del rotor exceden de aproximadamente 60-63 metros son mucho más vulnerables a las cargas aerodinámicas y el efecto positivo de la aplicación de la presente invención es mucho más pronunciado que para las turbinas eólicas menores.

Por lo tanto, la presente invención se refiere en un primer aspecto a una pala de turbina eólica que comprende:

- una primera fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en un lado de succión de la misma, en el que la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala está dentro del intervalo comprendido entre 0,1% y 0,65%, preferentemente entre 0,15% y 0,5% de la longitud de la cuerda del perfil de la pala, y
- una segunda fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en un lado de succión de la misma, en el que la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala está en el intervalo comprendido entre 0,1% y 1%, preferentemente entre 0,15% y 0,35% de la longitud de la cuerda del perfil de la pala,

en el que la primera y segunda filas de generadores de vórtice están previstas a lo largo de por lo menos el 10% de la extensión longitudinal de la pala y la segunda fila de generadores de vórtice se extiende a una distancia respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 20% y el 50% de la longitud de la cuerda del perfil alejándose más del borde de ataque que la primera fila de generadores de vórtice.

La segunda fila de generadores de vórtice se puede extender alejándose más de la superficie de la pala que la primera fila porque el espesor de la capa límite generalmente es mayor en la posición de la segunda fila y el retardo inducido por la segunda fila de generadores de vórtice por lo tanto es suficientemente bajo incluso aunque sea más alto que el de la primera fila de generadores de vórtice.

Las filas de generadores de vórtice se pueden aplicar en cualquier posición de la pala, dependiendo del diseño de la pala y sus propiedades aerodinámicas. En una forma de realización preferida, las filas de generadores de vórtice están previstas a lo largo de la mitad exterior de la extensión longitudinal de la pala, esto es, a lo largo por lo menos el 20% en la mitad exterior, preferentemente por lo menos el 30% y más preferentemente a lo largo por lo menos del 50% de la mitad exterior de la pala.

La primera fila de generadores de vórtice se extiende preferentemente a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 10% y el 40%, más preferentemente en el intervalo comprendido entre el 15% y el 35% de la longitud de la cuerda del perfil.

La segunda fila de generadores de vórtice se extiende preferentemente a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 30% y el 70% y más preferentemente en el intervalo comprendido entre el 40% y el 60% de la longitud de la cuerda del perfil.

En una forma de realización particularmente preferida de la presente invención, la turbina eólica comprende asimismo

- una tercera fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en un lado de succión de la misma y provista a lo largo de dicho por lo menos el 10% de la extensión longitudinal de la pala, esto es, coincidiendo con la posición longitudinal de la primera y segunda filas de generadores de vórtice, en el que la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala está dentro del intervalo comprendido entre el 0,25% y el 2%, preferentemente entre el 0,4% y el 1,5% de la longitud de la cuerda del perfil de la pala, y

en el que la tercera fila de generadores de vórtice se extiende a una distancia respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 10% y el 3% de la longitud de la cuerda del perfil alejándose más del borde de ataque que la segunda fila de generadores de vórtice.

5 La tercera fila de generadores de vórtice se puede extender alejándose más fuera de la superficie de la pala que la primera y segunda filas de generadores de vórtice porque el espesor de la capa límite generalmente es mayor en la posición de la tercera fila la más cercana al borde de salida del perfil de la pala y el retardo inducido por la tercera fila de generadores de vórtice por lo tanto es suficientemente bajo incluso aunque sea más alto que el de la primera y segunda filas de generadores de vórtice.

10 Se prefiere que la tercera fila de generadores de vórtice se extienda a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 50% y el 90%, más preferentemente en el intervalo comprendido entre el 60% y el 80% de la longitud de la cuerda del perfil.

15 Con un segundo aspecto de la presente invención, se ha comprobado además que se puede obtener un nuevo diseño ventajoso de un rotor de palas de turbina eólica mediante la combinación de la previsión de generadores de vórtice de capa micro o sublímite en las palas con un coeficiente de sustentación alto máximo $C_{L,máx}$ de las palas y un diseño de la pala más delgado, una denominada baja relación del área total de las palas al área del círculo barrido del rotor.

20 Los generadores de microvórtice incrementan el coeficiente de retardo de la pala comparado con un diseño corriente de la pala de turbina eólica, pero también permite un diseño de la pala con respecto al ángulo de ataque y los perfiles aerodinámicos el cual tiene un coeficiente de sustentación máximo significativamente más alto $C_{L,máx}$, ya que la tendencia al desprendimiento a ángulos grandes de ataque se reduce y el desprendimiento, cuando se produce, es menos abrupto y más suave. El coeficiente de sustentación más alto hace posible reducir la longitud de la cuerda del perfil de la pala y por lo tanto la relación del área total de las palas al área de círculo barrido del rotor y todavía obtener una producción aceptable de energía a partir de la turbina eólica. Sin embargo, el diseño de la pala más delgada resulta en una reducción del coeficiente de retardo de la pala, lo cual contrarresta el incremento del coeficiente de retardo
25 causado por los generadores de vórtice. Con la presente combinación de características, los inconvenientes de proveer las palas con generadores de vórtice se reducen o se eliminan y se obtiene un diseño ventajoso de la pala más delgada.

30 Un rotor con una relación del área total de las palas al área de círculo barrido ultra baja que funciona con coeficientes de sustentación ultra altos provee la posibilidad de una reducción de la carga o un rotor más productivo con iguales cargas. Un aspecto importante en el diseño de las palas de las turbinas eólicas es la resistencia al daño por fatiga. En general, la fatiga está producida por el tamaño de la cuerda del perfil, esto es cuanto más grande es la cuerda del perfil más altas son las cargas de fatiga en la pala. Además, las vibraciones que aparecen en la pala en el caso de desprendimiento también incrementan los daños por fatiga. Por lo tanto, una ventaja considerable de la presente invención es que a pesar de que la pala funciona con un ángulo de ataque AoA de diseño mayor las características de fatiga de la pala se mejoran, principalmente debido a la reducción en la longitud de la cuerda del perfil.

35 Ráfagas de aire extremas con velocidades del aire de hasta 70 m/s generan cargas extremas en la turbina eólica. Durante las velocidades extremas del aire el rotor de la turbina eólica funciona a bajas revoluciones, es decir que gira lentamente o está detenido con las palas en posición de paro y sin producción de energía. La magnitud de las cargas extremas en las situaciones de este tipo depende de la longitud de la cuerda del perfil de las palas del rotor, esto es cuanto más grande es la cuerda del perfil, mayores son las cargas extremas. Por lo tanto, también es una ventaja
40 considerable de la presente invención que las cargas extremas se reduzcan por el diseño de una pala más delgada.

45 El principio de este aspecto de la presente invención es la utilización de una o preferentemente de múltiples filas de generadores de micro (o capa sublímite) vórtice unidas por lo menos a una parte de la envergadura completa de la pala, en una forma de realización preferida a lo largo de una mitad exterior de la pala y en una forma de realización preferida de la invención en combinación con alerones tipo Gurney que generan un coeficiente de sustentación muy alto C_L con un desprendimiento relativamente suave a un ángulo de ataque muy grande. El coeficiente de sustentación muy alto C_L puede reducir el área de la pala necesaria y las cargas o incrementar la longitud de la pala y mantener las cargas originales con una producción más alta.

50 Cuando esto además se combina con la utilización de alerones Gurney en la parte interior de la pala (tal como por ejemplo el 10-50% interior del radio de la pala medido desde el centro del cubo) para fabricar una pala de turbina eólica de una delgadez extrema.

55 Por lo tanto, la presente invención se refiere también a un rotor de turbina eólica que presenta por lo menos dos palas, comprendiendo cada pala una primera fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en el lado de la succión (también denominado lado de sotavento) de la misma y provista a lo largo de por lo menos el 10% de la extensión longitudinal de la pala y preferentemente sustancialmente a lo largo de toda la mitad exterior de la pala, estando situada la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala sobre la cual están provistos en el intervalo comprendido entre el 0,1% y el 1% de la longitud de la cuerda del perfil, preferentemente en el intervalo comprendido entre el 0,15% y el 0,35% de la longitud de la cuerda del perfil medida en la posición longitudinal, en la que están previstos los generadores de vórtice.

La relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada (Sol_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,025 a una distancia r desde el cubo siendo el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,017 a una distancia r desde el cubo siendo el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,011 a una distancia r desde el cubo siendo el 90% del radio R del rotor,

5

La relación del área total de las palas al área de círculo barrido de una pala de turbina eólica es la relación entre el área de las palas proyectada en el plano del rotor y el área total cubierta por las palas giratorias, A_{pala} . La relación del área total de las palas al área de círculo barrido combinada, esto es la suma de las relaciones del área total de las palas al área del círculo barrido de las palas, es por lo tanto:

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

10

siendo n es el número de palas de la turbina eólica como por ejemplo 2, 3 ó 4. La relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada (Sol_r) del rotor está definida como:

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

15

siendo n el número de palas en el rotor, c_r la longitud de la cuerda del perfil a la distancia r desde el cubo y R del radio del rotor, esto es las distancias medidas desde el centro del cubo, lo cual se comprenderá a continuación en la presente memoria. La relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada (Sol_r) del rotor preferentemente se desarrolla suavemente a lo largo de la dirección longitudinal de la pala y la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada se espera que esté por debajo de la interpolación lineal entre los valores indicados.

20

También, el coeficiente de sustentación máximo $C_{L,máx}$ de cada una de las palas, válido para flujos bidimensionales que pasan por el perfil de la pala, cumple que:

- $C_{L,máx} > 1,75$ para $Re = 3,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,máx} > 1,80$ para $Re = 4,5 \cdot 10^6$
- $C_{L,máx} > 1,85$ para $Re = 6,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,máx} > 1,90$ para $Re = 7,5 \cdot 10^6$

25

por lo menos para la parte de la extensión longitudinal de las palas que comprende los generadores de vórtice.

30

La primera fila de generadores de vórtice se puede aplicar en cualquier posición en la pala, dependiendo del diseño de la pala y sus propiedades aerodinámicas. En una forma de realización preferida, la primera fila de generadores de vórtice está prevista a lo largo de la mitad exterior de la extensión longitudinal de la pala, es decir a lo largo de por lo menos el 20% de la mitad exterior, preferentemente por lo menos el 30% y más preferentemente a lo largo por lo menos del 50% de la mitad exterior de la pala.

Se prefiere que el coeficiente de sustentación máximo $C_{L,máx}$ de cada de las palas, válido para flujos bidimensionales que pasan por el perfil de la pala, además cumpla las condiciones de que:

- $C_{L,máx} > 1,65$ para $Re = 1,5 \cdot 10^6$ y
- $C_{L,máx} > 1,95$ para $Re = 9,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,máx} > 2,00$ para $Re = 10,0 \cdot 10^6$

35

por lo menos para la parte de la extensión longitudinal de las palas que comprende los generadores de vórtice.

40

Para mejorar adicionalmente la protección contra la aparición de la separación del flujo, se prefiere que una segunda fila de generadores de vórtice esté colocada en la dirección longitudinal de la pala en el lado de succión de la misma y prevista a lo largo de dicha por lo menos el 10% de la extensión longitudinal de la pala, es decir, coincidiendo con la posición longitudinal de la primera fila de generadores de vórtice, estando comprendida la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección lejos de la superficie de la pala en el intervalo comprendido entre el 0,1% y el 2% de la longitud de la cuerda del perfil y extendiéndose la segunda fila de generadores de vórtice a una distancia respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 20% y el 50% de la longitud de la cuerda del perfil alejándose más del borde de ataque que la primera fila de generadores de vórtice, preferentemente en el intervalo comprendido entre el 30% y el 70% y más preferentemente en el intervalo comprendido

45

entre el 40% y el 60% de la longitud de la cuerda del perfil. Mediante la previsión de una segunda fila de generadores de vórtice en esta posición respecto a la cuerda del perfil, la capa límite del flujo que pasa por la pala se refuerza más y se reduce el riesgo de separación del flujo que empieza en la proximidad del borde de salida de la pala y que se desplaza contra el viento hacia el borde de ataque de la pala.

5 Con el rotor provisto de unas palas que comprenden la segunda fila de generadores de vórtice, se prefiere que el coeficiente de sustentación máximo $C_{L,m\acute{a}x}$ de cada una de las palas, válido para un flujo bidimensional que pasa por el perfil de la pala, cumpla que:

- $C_{L,m\acute{a}x} > 1,90$ para $Re = 3,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 1,95$ para $Re = 4,5 \cdot 10^6$
- 10 ▪ $C_{L,m\acute{a}x} > 2,0$ para $Re = 6,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,10$ para $Re = 7,5 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,15$ para $Re = 10 \cdot 10^6$

por lo menos para la parte de la extensión longitudinal de las palas que comprende los generadores de vórtice.

15 Un resultado incluso más satisfactorio en la reducción de la tendencia a la separación del flujo y, por lo tanto, el desprendimiento de las palas se obtiene mediante la previsión de una tercera fila de generadores de vórtice colocada en la dirección longitudinal de la pala en el lado de succión de la misma y provista a lo largo de por lo menos el 10%, es decir, coincidiendo con la posición longitudinal de la primera y segunda filas de generadores de vórtice, estando comprendida la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala entre el 0,1 y el 2% de la longitud de la cuerda del perfil y extendiéndose la tercera fila de generadores de vórtice una distancia
20 respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 10% y el 30% de la longitud de la cuerda del perfil alejándose más del borde de ataque que la segunda fila de generadores de vórtice, preferentemente en el intervalo comprendido entre el 50% y el 90% y más preferentemente entre el 60% y el 80% de la longitud de la cuerda del perfil. Mediante la previsión de una tercera fila de generadores de vórtice en esta posición
25 respecto a la cuerda del perfil, la capa límite del flujo que pasa por la pala se refuerza todavía más y se reduce el riesgo de una separación del flujo que empieza en la proximidad del borde de salida de la pala y que se desplaza contra el viento hacia el borde de ataque de la pala lo cual provee la utilización de un diseño de la pala con coeficientes de sustentación máximos muy altos y relaciones del área total de las palas al área del círculo barrido específicas muy bajas del rotor.

30 Con el rotor provisto de unas palas que comprenden una tercera fila de generadores de vórtice, se prefiere que el coeficiente de sustentación máximo $C_{L,m\acute{a}x}$ de cada una de las palas, válido para un flujo bidimensional que pasa por el perfil de la pala, cumpla que:

- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,00$ para $Re = 3,0 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,05$ para $Re = 4,5 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,1$ para $Re = 6,0 \cdot 10^6$
- 35 ▪ $C_{L,m\acute{a}x} > 2,2$ para $Re = 7,5 \cdot 10^6$
- $C_{L,m\acute{a}x} > 2,25$ para $Re = 10 \cdot 10^6$

para dicha parte de la extensión longitudinal de las palas que comprende los generadores de vórtice.

40 Los generadores de vórtice deben ser diseñados para que se extiendan únicamente a través de una parte de la capa límite, suficiente para generar vórtices de un tamaño que puedan transportar el aire de una velocidad relativa más alta más cerca de la superficie de la pala y de ese modo reforzar la capa límite contra la tendencia a la separación del flujo. Por otra parte, los generadores de vórtice no se tienen que extender fuera de la superficie de la pala más de lo necesario a fin de evitar la generación de un retardo excesivo. Por lo tanto, la altura de por lo menos el 80% de dichos generadores de vórtice de la primera fila está preferentemente comprendida entre el 0,15% y el 0,35% de la longitud de la cuerda del perfil, la altura de por lo menos el 80% de dichos generadores de vórtice de la segunda fila está
45 comprendida preferentemente entre el 0,25% y el 1% de la longitud de la cuerda del perfil y la altura de por lo menos el 80% de dichos generadores de vórtice de la tercera fila está preferentemente comprendida entre el 0,25% y el 1% de la longitud de la cuerda del perfil, siendo el espesor de la capa límite mayor en la posición de la segunda y posiblemente la tercera fila de generadores de vórtice.

50 La relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (Sol_r) del rotor en una forma de realización preferida está:

- por debajo de un valor de 0,022 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,

- por debajo de un valor de 0,015 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,009 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

En una forma de realización más preferida, la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada (So/r) del rotor está:

- 5
- por debajo de un valor de 0,020 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
 - por debajo de un valor de 0,014 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
 - por debajo de un valor de 0,0085 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

En una forma de realización todavía más preferida, la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (So/r) del rotor está:

- 10
- por debajo de un valor de 0,017 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
 - por debajo de un valor de 0,012 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
 - por debajo de un valor de 0,0075 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

- 15
- La relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (So/r) del rotor preferentemente se desarrolla suavemente a lo largo de la dirección longitudinal de la pala y la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada del rotor se espera que esté por debajo de una interpolación lineal entre los conjuntos indicados de valores.

Los valores definidos para el coeficiente de sustentación máximo de $C_{L,max}$ de las palas preferentemente se cumplen por lo menos en el 75% exterior de la extensión longitudinal de las palas.

- 20
- La expresión generadores de vórtice en la presente memoria generalmente significa unos medios para generar vórtices en la capa límite del flujo de aire sobre el lado de succión de las palas. Sin embargo, un tipo preferido de generadores de vórtice es de un diseño tal que durante el funcionamiento del rotor produzcan vórtices con una línea central de la vorticidad que se extiende sustancialmente en la dirección transversal de la pala, es decir, sustancialmente en la dirección principal del flujo de aire relativo con respecto a la pala. Los generadores de vórtice preferentemente están previstos preferentemente en forma de salientes conformados en delta, los cuales están inclinados con respecto a la dirección transversal de las palas. También son posibles otros diseños de los generadores de vórtice y la literatura sobre el tema presenta un gran número de diseños de generadores de vórtice adecuados. La distancia en la dirección longitudinal de la pala entre los generadores de vórtice individuales que forman una fila como se comprende en el presente contexto generalmente está comprendida entre 1 y 8 veces la altura de los generadores de vórtice, preferentemente entre 2 y 6 veces la altura de los generadores de vórtice y la longitud del generador de vórtice individual también está generalmente en el intervalo comprendido entre 1 y 8 veces la altura de los generadores de vórtice, preferentemente entre 2 y 6 veces la altura de los generadores de vórtice. El espesor de los salientes que en una forma de realización preferida de la invención constituyen los generadores de vórtice generalmente está en el intervalo comprendido entre 0,05 y 1 vez la altura de los generadores de vórtice, preferentemente en entre 0,2 y 0,6 veces la altura de los generadores de vórtice.

- 35
- En una forma de realización preferida, están previstos unos generadores de vórtice vecinos que se inclinan en direcciones opuestas con relación a la dirección transversal de la pala, de modo que los vórtices vecinos generados obtendrán sentidos opuestos de giro, de tal modo que los generadores de vórtice comprenden unos lados inclinados alternativamente en un ángulo con relación a la dirección transversal de la pala de entre 50° y 2° , preferentemente entre 30° y 5° y más preferentemente entre 20° y 10° , y -50° y -2° , preferentemente entre -30° y -5° y más preferentemente entre -20° y -10° . Formas de realización de generadores de vórtice de este tipo se dan a conocer, por ejemplo, en la solicitud de patente internacional WO 2006/122547 (Vestas).

- 40
- Los generadores de vórtice pueden estar fijados a las palas de la turbina eólica individualmente o como pares por medio de unos medios de fijación tales como tornillos, espárragos, remaches, soldadura o preferentemente adhesivo. Alternativamente, los generadores de vórtice están fijados a la pala de la turbina eólica como parte de una correa de engranaje, un rollo o una banda por medio de medios de fijación tales como tornillos, espárragos, remaches, soldadura o preferentemente adhesivo. En otra forma de realización alternativa, los generadores de vórtice están formados íntegramente con las palas de la turbina eólica.

- 45
- Los generadores de vórtice en una forma de realización particularmente preferida pueden estar provistos como placas que se extienden en un ángulo comprendido entre 60° y 120° , por ejemplo, ortogonalmente, desde dicho lado de la superficie de succión de las palas la turbina eólica.

- 50
- La relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (So/r) del rotor en una forma de realización preferida está:

- por debajo de un valor de 0,022 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,015 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,009 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

5 En una forma de realización más preferida, la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,020 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,014 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,0085 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

10 En una forma de realización todavía más preferida, la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,017 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,012 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,0075 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

15 La relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor preferentemente se desarrolla suavemente a lo largo de la dirección longitudinal de la pala y la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada del rotor se espera que esté por debajo de una interpolación lineal entre los conjuntos indicados de valores.

Los valores definidos para el coeficiente de sustentación máximo de $C_{L,máx}$ de las palas preferentemente se cumplen por lo menos en el 75% exterior de la extensión longitudinal de las palas.

20 Asimismo, la parte interior del rotor preferentemente está diseñada con palas más delgadas y la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor preferentemente está:

- por debajo de un valor de 0,043 a una distancia r desde el cubo que es el 20% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,036 a una distancia r desde el cubo que es el 30% del radio R del rotor.

25 En una forma de realización más preferida, la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,038 a una distancia r desde el cubo que es el 20% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,031 a una distancia r desde el cubo que es el 30% del radio R del rotor.

En una forma de realización todavía más preferida, la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:

- 30
- por debajo de un valor de 0,033 a una distancia r desde el cubo que es el 20% del radio R del rotor, y
 - por debajo de un valor de 0,025 a una distancia r desde el cubo que es el 30% del radio R del rotor.

35 La relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor preferentemente se desarrolla suavemente a lo largo de la dirección longitudinal de la pala y la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada del rotor se espera que esté por debajo de una interpolación lineal entre los conjuntos indicados de valores para la parte exterior, así como para la parte interior de la pala.

En todavía una forma de realización preferida de la presente invención, las palas están provistas de unos alerones Gurney a lo largo de la dirección longitudinal que se extienden por lo menos a una distancia r del cubo que es desde el 20% del radio R del rotor hasta el 40% del radio R del rotor, preferentemente desde el 10% del radio R del rotor hasta el 50% del radio R del rotor.

40 La altura de los alerones Gurney está comprendida preferentemente entre el 0,35% y el 2% de la longitud de la cuerda del perfil, más preferentemente entre el 0,5% y el 1,5% de la longitud de la cuerda del perfil.

45 Asimismo, se prefiere que dicha fila o filas de generadores de vórtice estén provistas no sólo en la parte exterior de las palas sino también a lo largo por lo menos del 10% de la mitad interior de la extensión longitudinal de la pala, preferentemente a lo largo de por lo menos el 25%, y más preferentemente a lo largo del 50% de la mitad interior de la extensión longitudinal de la pala.

La parte interior de la pala y, en particular, la sección de la raíz es muy sensible al desprendimiento, puesto que el espesor de la pala es mayor y la torsión de la pala en muchas situaciones de funcionamiento está lejos de ser óptima para esta parte de la pala, conduciendo a un ángulo demasiado grande de ataque del flujo de entrada experimentado. El posible desprendimiento del flujo sobre la parte interior de la pala influye en las secciones vecinas de la pala y puede reducir el comportamiento aerodinámico de la pala significativamente. Por lo tanto, es muy importante para el funcionamiento global de la pala y por lo tanto, de la turbina eólica que el desprendimiento en la parte inferior de la pala y en particular de la sección de la raíz se evite incluso a grandes ángulos de ataque y en secciones del perfil gruesas, para lo cual ha demostrado ser adecuada la previsión de los generadores de vórtice, en particular de múltiples filas de generadores de vórtice.

En particular, la combinación de los generadores de vórtice y los alerones Gurney en la sección interior de la pala ha demostrado ser favorable para el comportamiento global de la pala y por lo tanto del rotor.

La previsión de generadores de vórtice y, en particular, combinada con la previsión de alerones Gurney en la sección interior de la pala hace posible proveer la sección inferior cerca del cubo de la pala con un perfil aerodinámico efectivo en lugar de un perfil en forma de cilindro.

Por lo tanto, la previsión de generadores de vórtice y posiblemente los alerones Gurney posibilita el funcionamiento de una turbina eólica que tenga una pala de una relación del espesor t/c_r , es decir, una relación del espesor máximo (t) con relación a la longitud de la cuerda del perfil (c_r) de los perfiles de las palas definida como:

- dentro del intervalo comprendido entre 0,35 y 0,70 a una distancia r del cubo que es del 10% del radio R del rotor,
- dentro del intervalo comprendido entre 0,20 y 0,38 a una distancia r del cubo que es del 20% del radio R del rotor,
- dentro del intervalo comprendido entre 0,18 y 0,33 a una distancia r del cubo que es del 30% del radio R del rotor,
- dentro del intervalo comprendido entre 0,17 y 0,30 a una distancia r del cubo que es del 50% del radio R del rotor,
- dentro del intervalo comprendido entre 0,15 y 0,24 a una distancia r del cubo que es del 70% del radio R del rotor, y
- dentro del intervalo comprendido entre 0,15 y 0,18 a una distancia r del cubo que es del 90% del radio R del rotor.

La presente invención se refiere asimismo a una turbina eólica provista de un rotor tal como ha sido definido anteriormente en la presente memoria, la cual preferentemente es del tipo que además comprende unos medios para controlar el ángulo de paso de las palas del rotor.

El alcance de protección está definido por el conjunto de reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La divulgación detallada de la presente invención se ilustra mediante las figuras adjuntas de las cuales,

la figura 1 es una vista en sección transversal de una pala con un generador de vórtice,

la figura 2 muestra unos generadores de vórtice esquemático y un flujo que lo rodea,

la figura 3 muestra el coeficiente de sustentación C_L como una función del ángulo de ataque (AoA) para un plano aerodinámico sin generador de vórtice comparado con un plano aerodinámico que presenta un generador de vórtice,

la figura 4 muestra el coeficiente de retardo C_D como una función del ángulo de ataque (AoA) para el plano aerodinámico de la figura 3 sin un generador de vórtice comparado con un plano aerodinámico que presenta un generador de vórtice,

la figura 5 muestra el coeficiente de sustentación C_L como una función del ángulo de ataque (AoA) para una pala de turbina eólica sin generadores de vórtice y con una, dos y tres filas de generadores de vórtice,

la figura 6 es una vista en perspectiva de una pala ultra delgada provista de dos filas de generadores de microvórtice,

la figura 7 muestra una comparación de la producción anual de una turbina eólica original provista de un rotor de tres palas comparado con un rotor de un diámetro agrandado el 5% y diseñado según la invención,

la figura 8 muestra una comparación de las fuerzas en un rotor de una turbina eólica original provista de un rotor de tres palas comparado con un rotor de un diámetro agrandado el 5% y diseñado según la invención,

la figura 9 es una vista en sección transversal de la parte de salida de la pala provista de un alerón Gurney,

la figura 10 muestra el coeficiente de sustentación C_L como una función del ángulo de ataque (AoA) para una pala de turbina eólica con y sin alerón Gurney, y

la figura 11 ilustra la generación de ruido a partir del borde de salida provisto de un alerón Gurney.

Las figuras están proporcionadas únicamente a título ilustrativo y no se deben considerar a título limitativo del alcance de protección del conjunto de reivindicaciones adjuntas

DIVULGACIÓN DETALLADA

El principio de los generadores de vórtice preferidos es una placa en forma de delta fijada sustancialmente ortogonal a la superficie de la pala en el lado de succión (lado de sotavento) de la pala de la turbina eólica como se representa en la figura 1 que describe una sección transversal de una pala 1 con un generador de vórtice 2 colocado en el lado de succión 3 de la pala 1 en la posición del 30% de la longitud de la cuerda del perfil c , aguas abajo del borde de ataque 4 de la pala 1. El espesor t del perfil también está indicado. También se pueden aplicar otros tipos de generadores de vórtice distintos de los que se han dado a conocer en esta descripción, véase la lista adjunta de referencias con respecto a los generadores de vórtice.

Los generadores de vórtice 2 incluyen unos vórtices en la capa límite sustancialmente paralelos a la dirección del flujo sobre la pala y los vórtices incrementan la energía cinética del flujo de aire más próxima a la superficie de la pala transportando aire de una velocidad más elevada desde el exterior de la capa límite hacia abajo en la proximidad la zona de la superficie, reforzando de ese modo la capa límite y retrasando la separación de la capa límite, esto es la ocurrencia de desprendimiento en un ángulo de ataque mucho mayor. En la figura 2, se ilustra el principio mediante un generador de vórtice esquemático 2 con el flujo de entrada sustancialmente laminar hacia la izquierda del generador de vórtice y el flujo con vórtices hacia la derecha después de haber pasado el generador de vórtice 2.

El concepto de la utilización de los generadores de vórtice para retrasar la separación de la capa límite ha sido aplicado hasta el momento en el campo técnico de las turbinas eólicas principalmente en la parte interior de las palas con el único propósito de incrementar el coeficiente de sustentación máximo. La razón por la cual es un inconveniente la utilización de generadores de vórtice es el gran incremento del retardo durante el funcionamiento normal de la turbina eólica y también el ruido inducido a partir de los generadores de vórtice. Otro inconveniente es que la sustentación tiende a caer en gran medida después de que se haya alcanzado el punto de desprendimiento con una enorme variación en la sustentación sobre una extensión muy pequeña en el ángulo de ataque, lo cual conduce a una inestabilidad aerodinámica tal como se ilustra en la figura 3 que muestra el coeficiente de sustentación C_L como una función del ángulo de ataque (AoA) para un plano aerodinámico sin generador de vórtice comparado con un plano aerodinámico provisto de un generador de vórtice (VG). Asimismo, el coeficiente de retardo C_D como una función del ángulo de ataque (AoA) para un plano aerodinámico sin generadores de vórtice comparado con un plano aerodinámico provisto de un generador de vórtice (VG) se representan en la figura 4.

Es importante observar que una pala de turbina eólica provista de unos generadores de vórtice y que funciona a un ángulo grande de ataque (AoA), por ejemplo de 14° y un coeficiente de sustentación elevado C_L , el coeficiente de retardo C_D es mucho menor comparado con una pala sin generadores de vórtice tal como se ilustra en las figuras 3 y 4. Sin embargo, la turbina eólica todavía funciona más óptimamente a un bajo ángulo AoA cuando funciona con velocidades en la punta óptimas frente a la relación de la velocidad del viento. En este caso, el valor mayor de la relación C_L/C_D la cual corresponde al rendimiento aerodinámico de la pala se encuentra a un ángulo AoA bajo de 4 a 7° y por lo tanto, el incremento del retardo desde los generadores de vórtice debe ser tan bajo como sea posible. Únicamente cuando la turbina funciona a unas condiciones de alta velocidad del viento cuando no es posible funcionar más rápido debido a las limitaciones del generador y a las restricciones de ruido es cuando se explota completamente el efecto de los generadores de vórtice incrementando el ángulo AoA.

Investigaciones recientes por parte del inventor han mostrado que, diseñando con cuidado los generadores de vórtice optimizando la forma y el tamaño de los generadores de vórtice y la posición con respecto a la envergadura y con respecto a la cuerda del perfil de los generadores de vórtice en la pala de la turbina eólica, el coeficiente de sustentación C_L se puede aumentar significativamente sin las desventajas de un incremento grande en el retardo, el ruido autoinducido y una caída muy pronunciada en la sustentación después del punto de desprendimiento. Un resultado de una simulación del efecto de los generadores de vórtice colocados en 1 a 3 filas se representa en la figura 5 que ilustra el coeficiente de sustentación C_L como una función del ángulo de ataque AoA para una pala de turbina eólica sin generadores de vórtice y con una, dos y tres filas de generadores de vórtice colocados en las posiciones respecto a la envergadura óptima de la pala del 20%, el 50% y el 70% de la distancia de la longitud de la cuerda del perfil desde el borde de ataque de la pala. El efecto positivo de los generadores de vórtice aumenta con el número de filas. Para el cálculo del efecto de únicamente una fila de generadores de vórtice, se han aplicado generadores de vórtice grandes de una altura por encima del 1% de la longitud de la cuerda del perfil.

Un cálculo casi constante en una turbina eólica original que presenta un rotor de tres palas comparada con una turbina eólica que tiene un rotor de un 5% de aumento del diámetro y palas ultra delgadas con coeficientes de sustentación ultra elevados con dos filas de generadores de microvórtice tal como se representan en perspectiva en la figura 6, se ilustran en las figuras 7 y 8 y demuestra el efecto altamente positivo de la aplicación de un rotor según la presente invención como se define en las reivindicaciones adjuntas. El rotor agrandado según la presente invención tiene hasta un 8% de producción más alta y menos cargas para ambos, el momento de la raíz de la pala respecto al alerón y respecto al borde así como el momento en la parte inferior de la torre.

El alerón Gurney es un triángulo o una placa montada en el mismo borde de salida en el lado de presión del perfil tal como se representa en la figura 9, que ilustra una sección transversal de la parte de salida de una pala 1 provista de un alerón Gurney 5 en forma de una placa que se extiende hacia abajo en el lado de presión 6 de la pala 1 en el borde de salida 7 de la misma sustancialmente perpendicular al lado de presión 6. Una burbuja de separación aguas arriba 8 se forma entre el lado de presión y el alerón Gurney 5 y una burbuja de separación aguas abajo que presenta dos vórtices que giran en sentidos contrarios 9 se forman en el lado de salida del alerón Gurney 5. La burbuja de separación aguas abajo tiene el efecto de que la superficie del lado de succión 3 se extiende con una continuación 10 dentro de la zona de estela 11 y el efecto es aumentar la curvatura de la sección transversal local del borde de salida.

El efecto en el coeficiente de sustentación C_L añadiendo un alerón Gurney de una altura del 1% de la longitud de la cuerda del perfil se ilustra en la figura 10.

La altura óptima del alerón Gurney 5 es crucial para un uso eficaz en una pala de turbina eólica. Diversas investigaciones han mostrado que un alerón Gurney con una altura del 1% de la longitud de la cuerda incrementa el coeficiente de sustentación C_L sin ningún incremento del retardo. Un alerón Gurney mayor significa producir y aumentar el retardo y por lo tanto se disminuyen los beneficios del alerón Gurney. Un alerón Gurney más pequeño del 0,5% produce únicamente un pequeño aumento en el coeficiente de sustentación C_L .

La posición radial del alerón Gurney a lo largo de la extensión longitudinal de la pala de la turbina eólica es también importante. El aumento en el espesor del borde de salida por el alerón Gurney introducirá un incremento del nivel de ruido desde el borde de salida como, como se ilustra en la figura 11, que muestra una sección transversal de una pala de turbina eólica 1 con la capa límite 12 indicada y el vértice que se desprende del borde de salida causando la generación de ruido audible que es irradiado desde el borde de salida.

La intensidad del nivel de ruido es proporcional a la velocidad de la pala en la posición radial local hasta la potencia de 5 doblando de ese modo la velocidad lo que significa 32 veces mayor ruido.

El alerón Gurney, por lo tanto, se puede utilizar únicamente en la parte interior de la pala en donde la velocidad local es inferior. La envergadura radial relevante es desde 0-50% del radio total medido desde el centro del cubo del rotor.

El alerón Gurney puede ser combinado o sustituido por un alerón del borde de salida adaptativo, tal como el que se da a conocer, por ejemplo, en el documento WO 2004/088130.

Las palas en una forma de realización preferida adicional pueden estar equipadas con extremos de las palas como se revela por ejemplo en el documento WO 2004/061298 y EP 1 500 814.

LISTADO DE REFERENCIAS EN LOS GENERADORES DE VÓRTICE

- J. C. Lin "Control of low-speed turbulent separated flow over a backward-facing ramp", Ph.D. thesis from Old Dominion University, mayo 1992
- J. C. Lin "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation", Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) páginas 389-420.
- J.C. Lin, F.G. Howard y G.V. Selby, "Small submerged vortex generators for turbulent flow separation control", Journal of Spacecraft and Rockets, 27 (1990) pp. 503-507
- J.C. Lin, G.V. Selby y F.G. Howard, "Exploratory Study of Vortex-Generating Devices for Turbulent Flow Separation Control", AIAA-91-0042, 1991

- J.C. Lin, "Control of turbulent boundary-layer separation using micro-vortex generators", AIAA 99-3404, 30th AIAA Fluid Dynamics Conference, 28 junio-1 julio 1999 Norfolk, VA
- 5 • J.C. Lin "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation", Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) páginas 389-420
- J.C. Lin, S.K. Robinson, R.J. McGhee, W.O. Valarezo, "Separation control on high-lift airfoils via microvortex generators", Journal of Aircraft 1994 0021-8669 vol. 31 nº 6 (1317-1323)
- 10 • J. Johansen et al "KNOW-BLADE Task-3.3 report; Rotor Computations with Aerodynamic Accessories", Risø-R-1486(EN), enero 2005.
- J. Johansen, N.N. Sørensen, M.O.L. Hansen, "CFD vortex generator model". European Wind Energy Conference 2001, 2-6 julio, 2001, Copenhagen, Dinamarca
- 15 • R. Barrett, S. Farokhi, "On the aerodynamics and performance of active vortex generators", AIAA-93-3447, 1993
- R. D. Corrigan y J.M. Savino, "Vortex generators as a means for increasing rotor performance", in: "Intersociety Energy Conversion Engineering, Conference, 20th, Miami Beach, Florida, August 18-23, 1985. Proceedings Vol 3 (A86-24776 10-44) principal 3.663-3.668.
- 20 • G.E. Miller, "Comparative performance test on the Mod-2, 2.5-mW wind turbine with and without vortex generators", N95-27978, Presented at the DOE/NASA Workshop on Horizontal Axis Wind Turbine Technology, Cleveland Ohio mayo 8-10, 1984.
- 25 • R.E. Breidenthal, JR y D.A. Russell, "Aerodynamics of Vortex Generators - Final Report", enero 1984 - diciembre 1987, NASA-CR-18251 1, 1988.
- J.D. Nickerson Jr., "A study of vortex generators at low Reynolds numbers", AIAA-86-0155, 1985.
- 30 • T.L. Sullivan, "Effect of Vortex Generators on the Power Conversion Performance and Structural Dynamic Loads of the Mod-2 Wind Turbine", NASATM-83680, junio 1984
- Bragg, M. B.; Gregorek, G. M "Experimental study of airfoil performance with vortex generators Journal of Aircraft 1987 0021-8669 vol. 24 nº 5 (305-309)
- 35 • Adam Jirasek "Vortex-Generator Model and Its Application to Flow Control", Journal of Aircraft 2005 0021-8669 vol. 42 nº 6 (1486-1491)
- 40 • Wendt, B. J., Hingst, W. R. "Flow structure in the wake of a wishbone vortex generator AIAA Journal 1994, 0001-1452 vol. 32 nº 11 (2234-2240)

- Bruce J. Wendt "Parametric Study of Vortices Shed from Airfoil Vortex Generators", AIAA Journal 2004, 0001-1452 vol. 42 nº 11 (2185-2195)
- 5 • Julianne C. Dudek, "Empirical Model for Vane-Type Vortex Generators in a Navier-Stokes Code", AIAA Journal 2006, 0001-1452 vol. 44 nº 8 (1779-1789)
- Storms, Bruce L., Jang, Cory S. "Lift enhancement of an airfoil using a Gurney flap and vortex generators" Journal of Aircraft 1994, 0021-8669 vol. 31 nº 3 (542-547)
- 10 • K.P. Angele y F. Grewe, "Investigation of the development of streamwise vortices from vortex generators in APG separation control using PIV ", 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 8-11 julio 2002 Lisbon, Portugal
- 15 • K.P. Angele y B. Muahmmad-Klingmann, "The effect of streamwise vortices on the turbulence structure of the boundary layer", European Journal of Mechanics B/Fluids 24 (2005) pp. 539-554
- K.P. Angele, "Experimental studies of turbulent boundary layer separation and control", Ph.D. Thesis, KTH Mechanics, Stockolm 2003
- 20 • J.G. Betterton et al., "Laser doppler anemometry Investigation on sub boundary layer vortex generators for flow control", 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 10-13 julio 2000 Lisbon, Portugal
- 25 • P.A. Brandner, G.J. Walker, "Hydrodynamic performance of a vortex generator", Experimental Thermal and Fluid Science 27 (2003) pp. 573-582
- Chi-Chuan Wang et al., "Flow visualization of annular and delta winlet vortex generators in fin-and-tube heat exchanger application", International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) pp. 3803-3815
- 30 • Chi-Chuan Wang et al., "Flow visualization of wavetype vortex generators having inline fin-tube arrangement", International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) pp. 1933-1944
- G. Godard y M. Stanislas, "Control of decelerating boundary layer. Part 1: Optimization of passive vortex generators", Aerospace Science and Technology 10 (2002) pp.181-191
- 35 • L. Jenkins, S. Althoff Gorton, y S. Anders, "Flow control device evaluation for an internal flow with an adverse pressure gradient", AIAA 2002-0266, 40th AIAA Aerospace Science Meeting & Exhibit 14-17 enero 2002/ Reno, NV
- 40 • M. Reck, "CFD with detached eddy simulation and immersed boundary technique applied to oscillating airfoils and vortex generators", Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, diciembre 2004
- C.S. Yao y J.C. Lin, "Flow-field measurement of device-induced embedded streamwise vortex on a flat plate", AIAA 2002-3162, 1st AIAA Flow Control Conference 24-27 junio 2002 St. Louis, MO

REIVINDICACIONES

1. Pala de turbina eólica que comprende:

- una primera fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en un lado de succión de la misma, en la que la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala está dentro del intervalo comprendido entre 0,1% y 0,65% de la longitud de la cuerda del perfil de la pala, y;
- una segunda fila de generadores de vórtice colocados en la dirección longitudinal de la pala en un lado de succión de la misma, en el que la altura de dichos generadores de vórtice en una dirección alejándose de la superficie de la pala está dentro del intervalo comprendido entre 0,1% y 1%, de la longitud de la cuerda del perfil,

en la que la primera y segunda filas de generadores de vórtice están previstas a lo largo de por lo menos el 10% de la extensión longitudinal de la pala y la segunda fila de generadores de vórtice se extiende a una distancia respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 20% y el 50% de la longitud de la cuerda del perfil alejándose más del borde de ataque que la primera fila de generadores de vórtice.

2. Pala de turbina eólica según la reivindicación 1, en la que la primera y segunda filas de generadores de vórtice están previstas a lo largo de la mitad exterior de la extensión longitudinal de la pala, preferentemente a lo largo de por lo menos el 30% de la mitad exterior de la extensión longitudinal de la pala, preferentemente a lo largo de por lo menos el 50% de la mitad exterior de la extensión longitudinal de la pala.

3. Pala de turbina eólica según la reivindicación 1 ó 2, en la que la primera fila de generadores de vórtice se extiende a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 10% y el 40% de la longitud de la cuerda del perfil, preferentemente a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 15% y el 35% de la longitud de la cuerda del perfil.

4. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la segunda fila de generadores de vórtice se extiende a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 30% y el 70% de la longitud de la cuerda del perfil, preferentemente a una distancia con respecto a la cuerda del perfil desde el borde de ataque en el intervalo comprendido entre el 40% y el 60% de la longitud de la cuerda del perfil.

5. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la altura de dichos generadores de vórtice de la primera fila está dentro del intervalo comprendido entre el 0,15% y el 0,35% de la longitud de la cuerda del perfil.

6. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la altura de dichos generadores de vórtice de la segunda fila está dentro del intervalo comprendido entre el 0,15% y el 0,5% de la longitud de la cuerda del perfil.

7. Rotor de turbina eólica provisto de por lo menos dos palas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (So_l_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,022 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,015 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,009 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

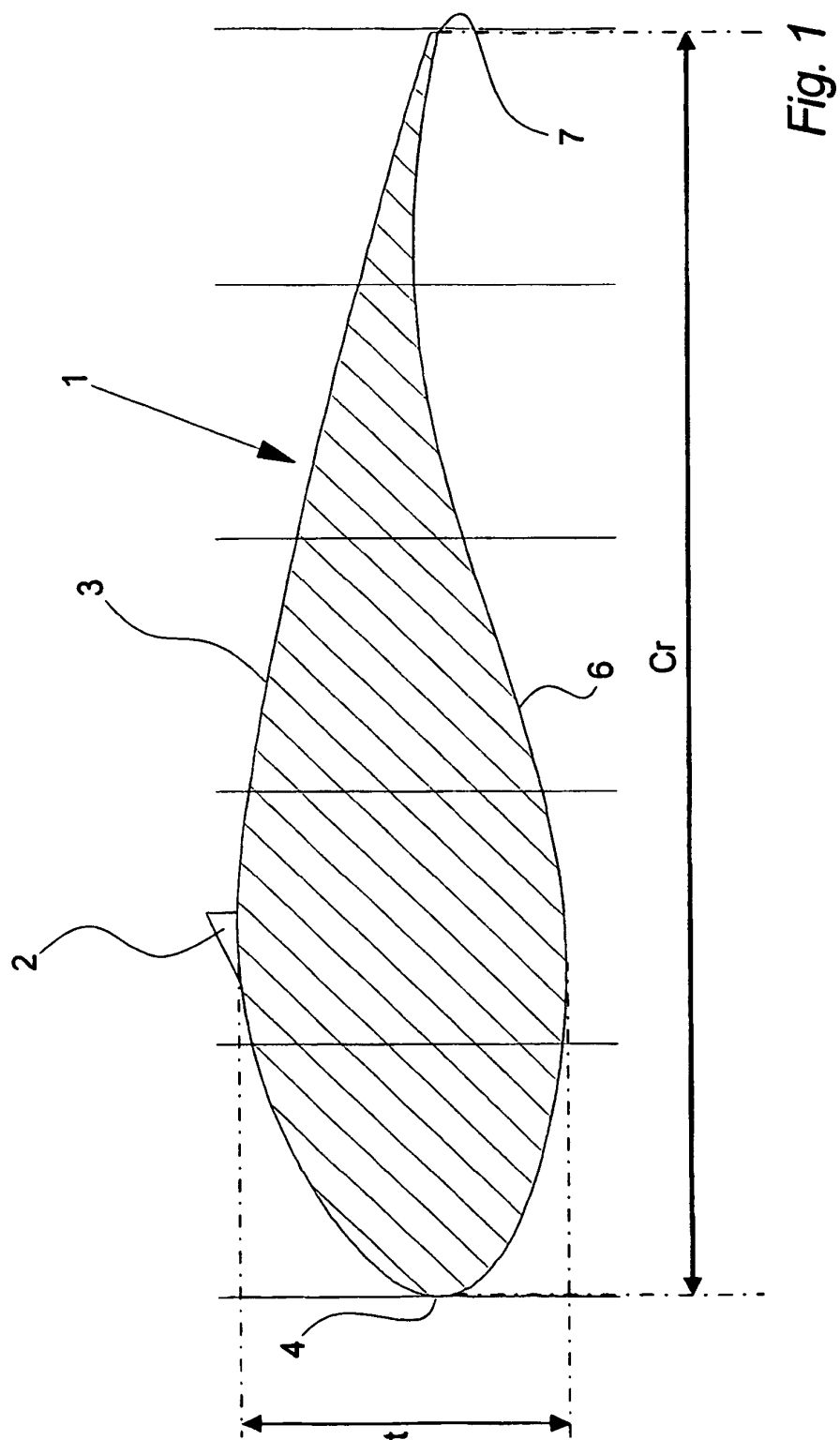
8. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 7, en el que la relación del área total de las palas al área de círculo barrido específica combinada (So_l_r) del rotor está:

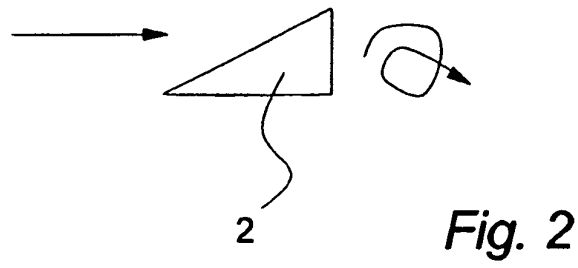
- por debajo de un valor de 0,020 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,014 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y
- por debajo de un valor de 0,0085 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.

9. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 8, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (So_l_r) del rotor está:

- por debajo de un valor de 0,017 a una distancia r desde el cubo que es el 50% del radio R del rotor,
- por debajo de un valor de 0,012 a una distancia r desde el cubo que es el 70% del radio R del rotor, y

- por debajo de un valor de 0,0075 a una distancia r desde el cubo que es el 90% del radio R del rotor.
- 5 10. Rotor de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que los generadores de vórtice están previstos en forma de salientes conformados en delta los cuales están inclinados con respecto a la dirección transversal de las palas, de modo que durante el funcionamiento del rotor producen vórtices con una línea central de vorticidad que se extiende sustancialmente en la dirección transversal de la pala.
11. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 10, en el que los generadores de vórtice vecinos están inclinados en direcciones opuestas con respecto a la dirección transversal de la pala, de modo que los vórtices vecinos generados obtendrán sentidos opuestos de giro.
- 10 12. Rotor de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:
- por debajo de un valor de 0,043 a una distancia r desde el cubo que es el 20% del radio R del rotor, y
 - por debajo de un valor de 0,036 a una distancia r desde el cubo que es el 30% del radio R del rotor.
13. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 12, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:
- 15 14. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 13, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:
- por debajo de un valor de 0,038 a una distancia r desde el cubo que es el 20% del radio R del rotor, y
 - por debajo de un valor de 0,031 a una distancia r desde el cubo que es el 30% del radio R del rotor.
14. Rotor de turbina eólica según la reivindicación 13, en el que la relación del área total de las palas al área del círculo barrido específica combinada (SoI_r) del rotor está:
- 20 15. Rotor de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, en el que la relación del espesor máximo (t) y la longitud de la cuerda del perfil (c_r) de los perfiles de las palas está:
- dentro del intervalo comprendido entre 0,35 y 0,70 a una distancia r del cubo que es del 10% del radio R del rotor,
- 25 16. Rotor de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, en el que la relación del espesor máximo (t) y la longitud de la cuerda del perfil (c_r) de los perfiles de las palas está:
- dentro del intervalo comprendido entre 0,20 y 0,38 a una distancia r del cubo que es del 20% del radio R del rotor,
 - dentro del intervalo comprendido entre 0,18 y 0,33 a una distancia r del cubo que es del 30% del radio R del rotor,
- 30 17. Rotor de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, en el que la relación del espesor máximo (t) y la longitud de la cuerda del perfil (c_r) de los perfiles de las palas está:
- dentro del intervalo comprendido entre 0,17 y 0,30 a una distancia r del cubo que es del 50% del radio R del rotor,
 - dentro del intervalo comprendido entre 0,15 y 0,24 a una distancia r del cubo que es del 70% del radio R del rotor, y
 - dentro del intervalo comprendido entre 0,15 y 0,18 a una distancia r del cubo que es del 90% del radio R del rotor.





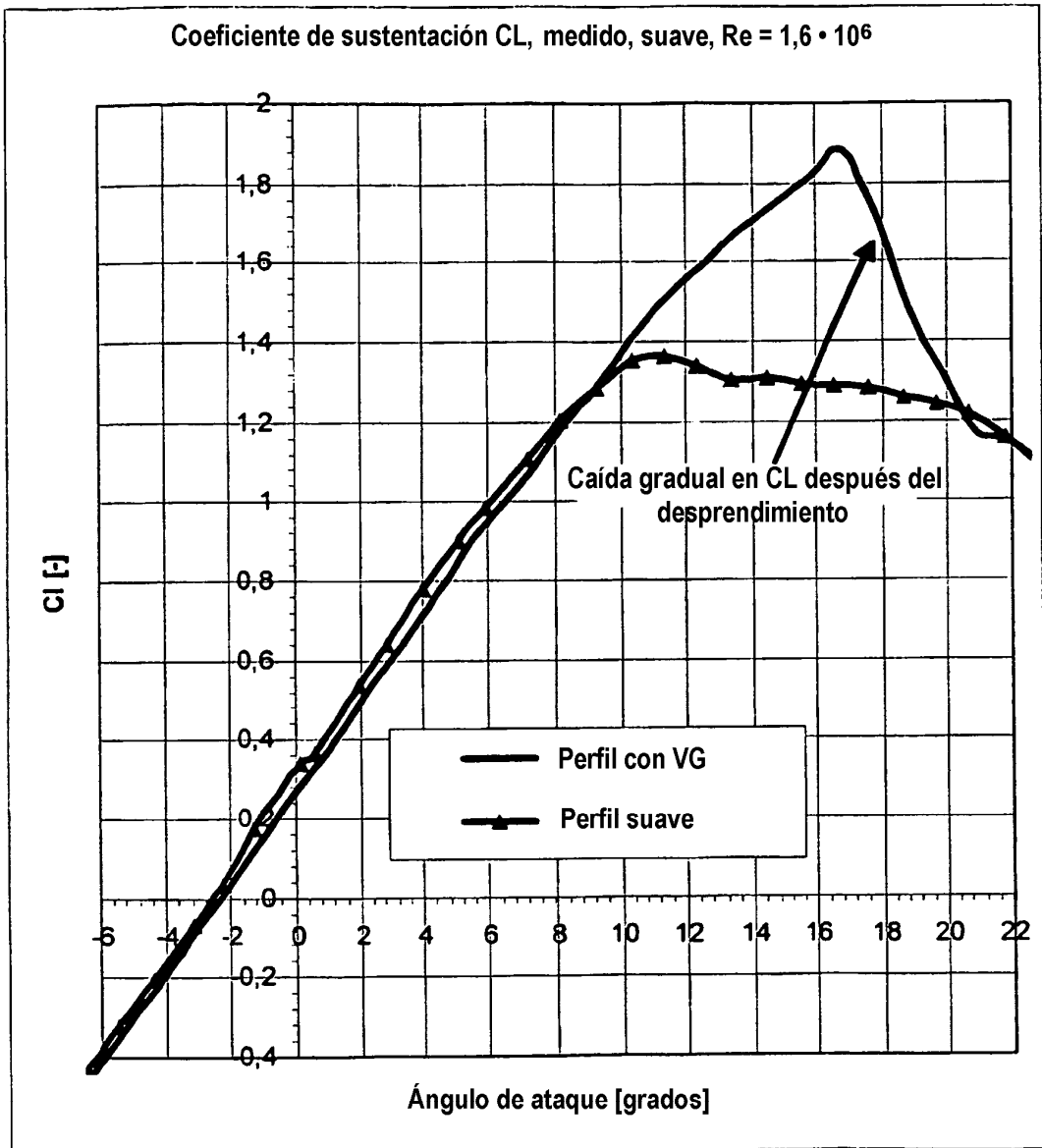


Fig. 3

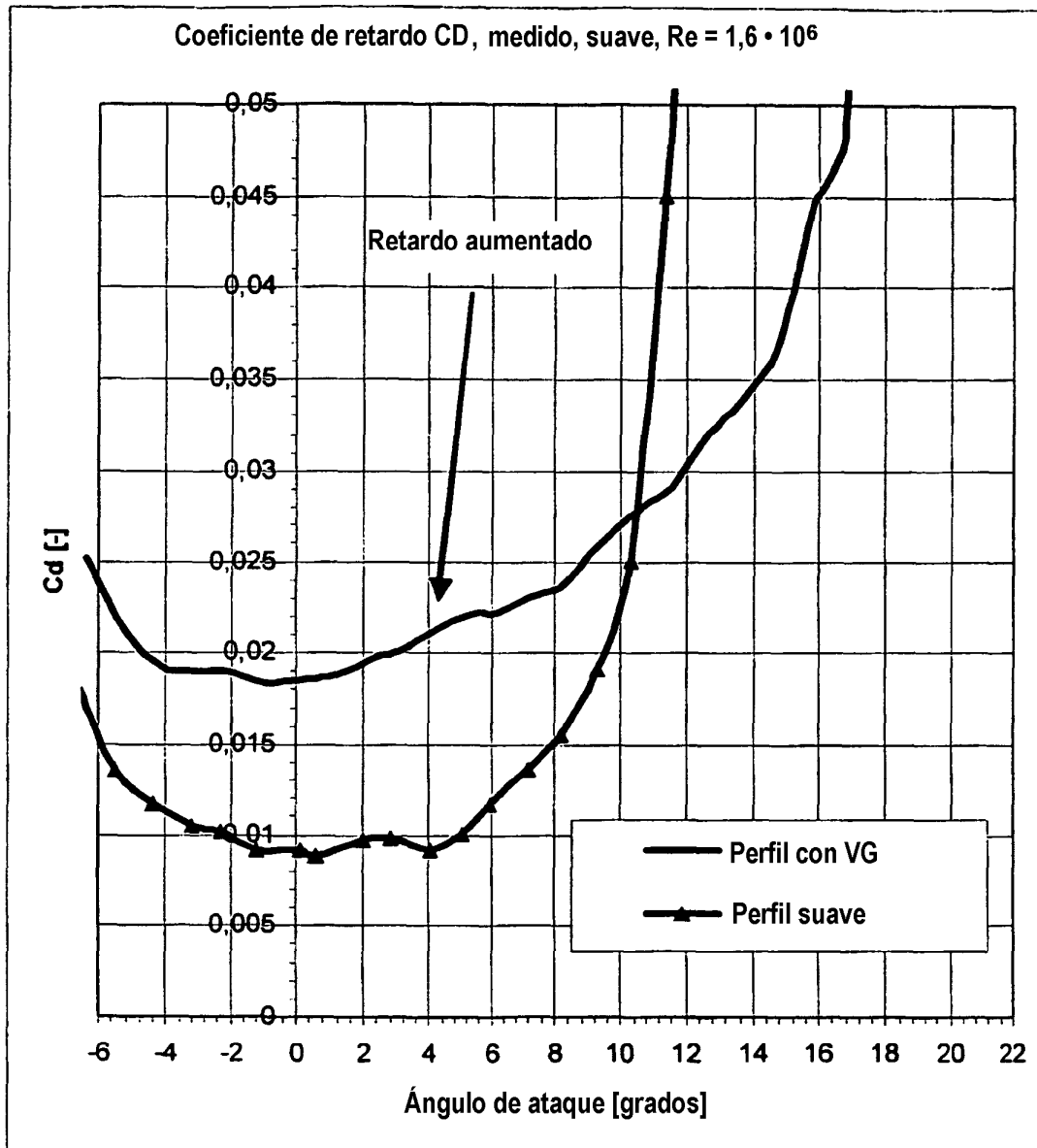


Fig. 4

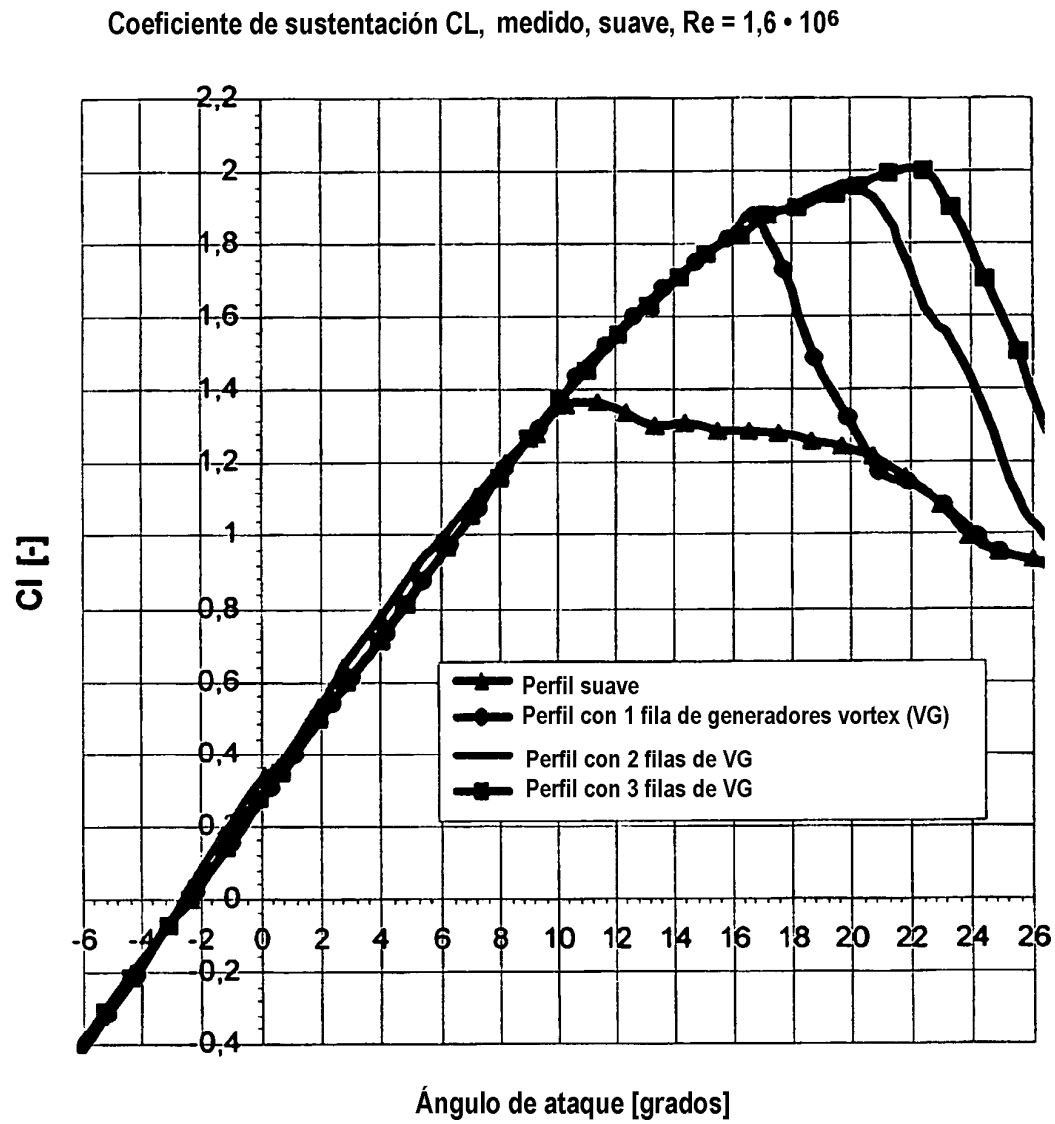


Fig. 5

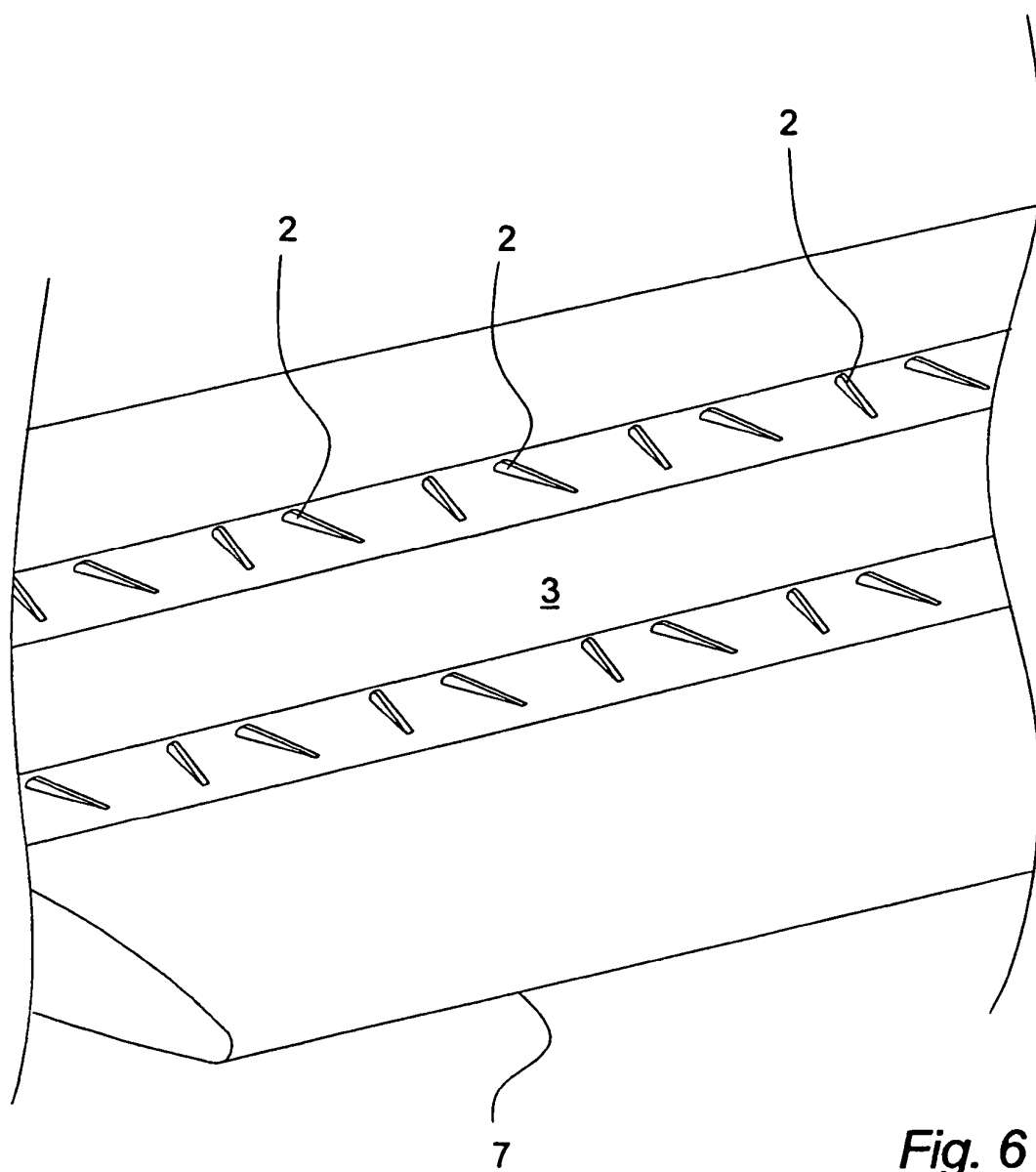
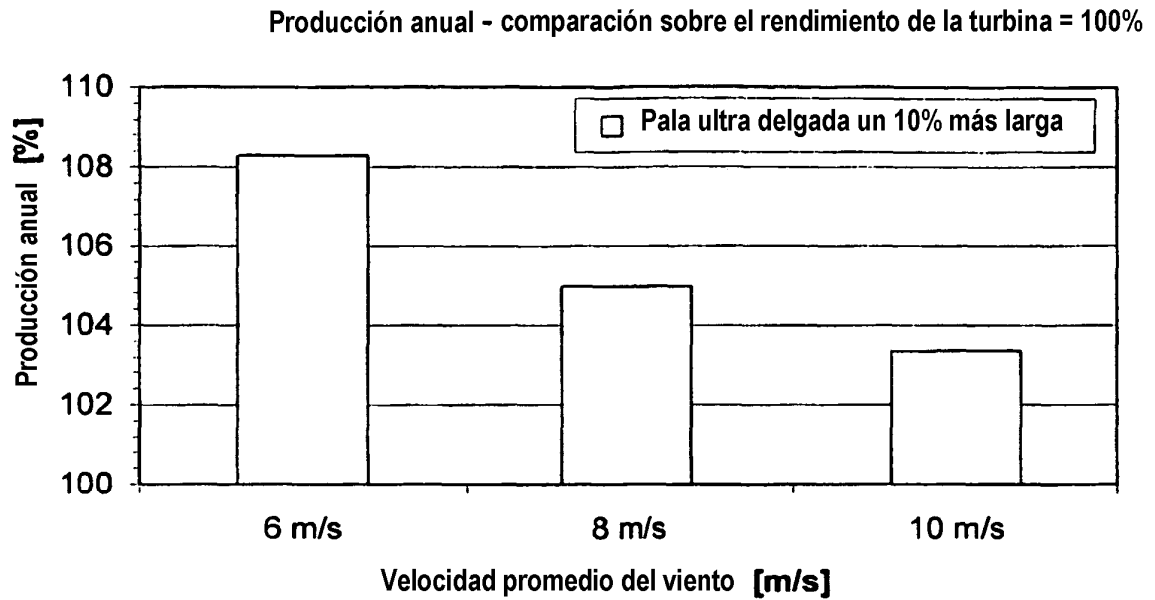
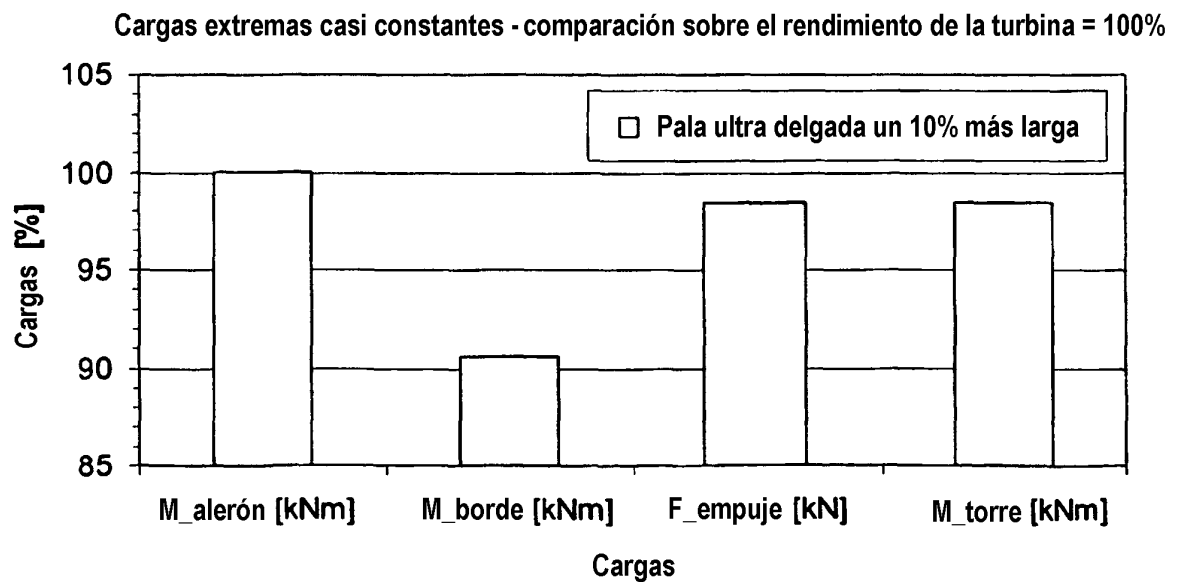


Fig. 6

*Fig. 7**Fig. 8*

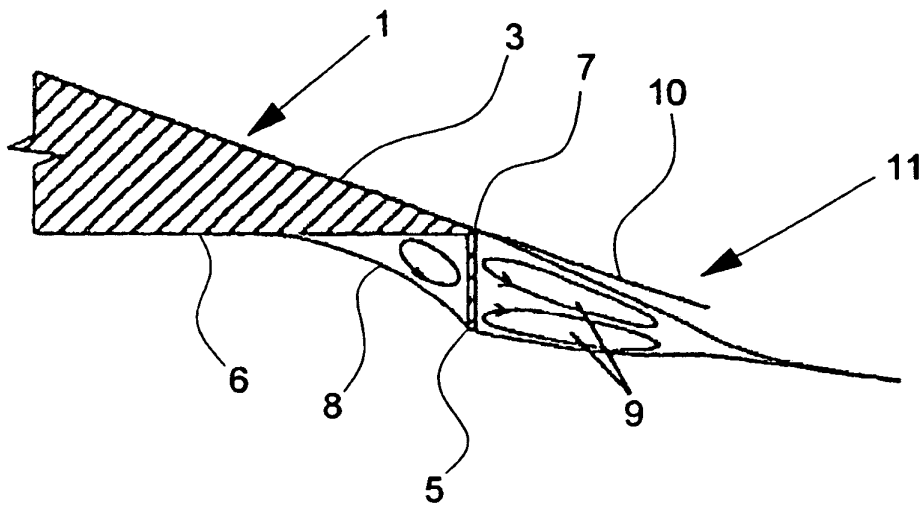


Fig. 9

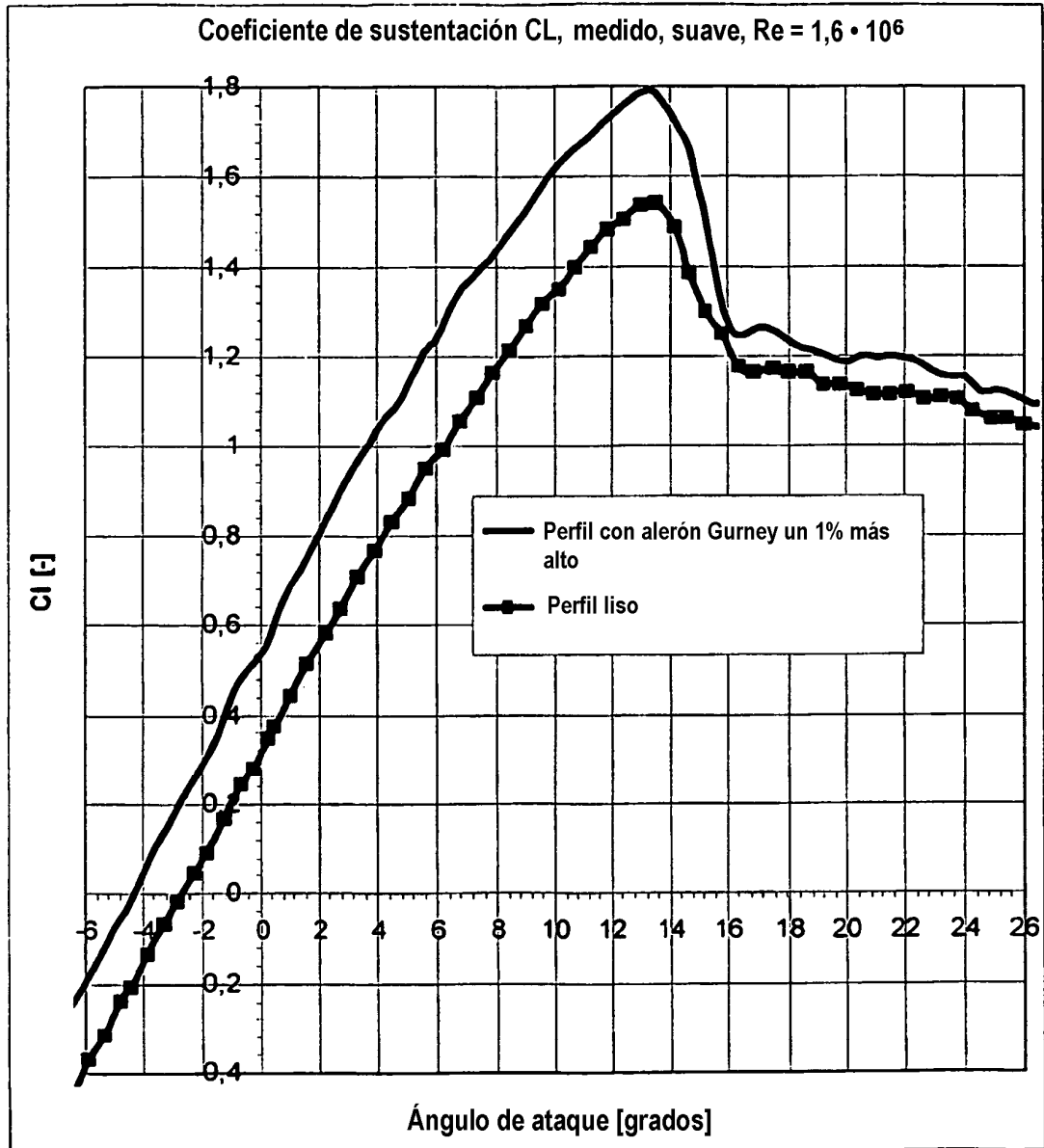


Fig. 10

