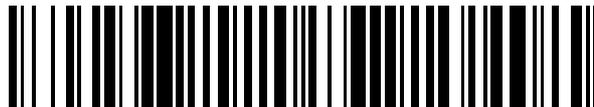


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 418 368**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.10.2005** **E 05792070 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2013** **EP 1952015**

54 Título: **Pala de turbina eólica con perfil aerodinámico variable**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.08.2013

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 44
8200 Aarhus N , DK

72 Inventor/es:

GODSK, KRISTIAN BALSCHMIDT y
NIELSEN, THOMAS S. BJERTRUP

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 418 368 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Pala de turbina eólica con perfil aerodinámico variable

Campo técnico de la invención

5 La invención se refiere a una pala de turbina eólica. Particularmente, la invención se refiere a una pala de turbina eólica que tiene un perfil aerodinámico, perfil que puede ajustarse mediante deformación de un elemento elástico activo dispuesto con acceso a la superficie de la pala de turbina eólica en el perfil.

Antecedentes de la invención

10 Se ha sugerido usar una pala de turbina eólica con una forma externa que pueda cambiarse durante el uso. Particularmente, en el documento WO 02/051730 se dio a conocer proporcionar una parte móvil o deformable de una pala de turbina eólica hacia la raíz, siendo la longitud de cuerda máxima. Por consiguiente, puede reducirse la longitud de cuerda de la parte más ancha de la pala en caso de viento intenso de modo que se reduzca la deformación.

15 También se ha sugerido deformar el borde de ataque y/o el borde de salida doblando el perfil hacia arriba o hacia abajo. Por ejemplo, en el documento WO 2004/088130 se sugirió doblar la zona del borde de ataque y/o un flap del borde de salida mediante un material inteligente o un conjunto de pistón hidráulico. Parte de la pared de pala está hecha de un caucho pasivo, flexible, y durante el uso del caucho pasivo, flexible se estira para ajustarse al material inteligente o el conjunto de pistón hidráulico. En una realización, el caucho comprende huecos aislados.

Objetos de la invención

20 El objeto de la presente invención es proporcionar una pala de turbina eólica mejorada con un perfil aerodinámico ajustable.

Otro objeto de la invención es proporcionar un método mejorado para operar una turbina eólica con un perfil aerodinámico ajustable.

Descripción de la invención

25 Uno o más de los objetos anteriores y otros se realizan mediante una pala de turbina eólica que tiene las características según la reivindicación 1.

30 Con elemento elástico activo se hace referencia en el presente documento a que el espesor de la pala cambia con la deformación del elemento elástico. Para realizar la variación deseada en el coeficiente de sustentación máximo, el espesor debe aumentarse normalmente en al menos el 10% para al menos una posición en el elemento elástico activo. Se prefiere que el al menos 10% sea además de un posible cambio en el espesor realizado por un doblado opcional de la región de punta y/o la región de borde de salida puesto que esto permite un ajuste muy preciso del coeficiente de sustentación máximo en el elemento elástico activo.

El elemento elástico activo puede fabricarse por ejemplo completa o parcialmente de un material a base de caucho o de otro material a base de polímero.

35 Con que el elemento elástico activo esté dispuesto con acceso a la superficie se hace referencia en el presente documento a que la superficie se deforma cuando se deforma el elemento elástico activo. Dicho de otro modo, la expresión dispuesto con acceso a la superficie incluye casos en los que el elemento elástico activo está parcial o completamente cubierto por una capa de superficie, tal como pintura, un recubrimiento termoplástico, unos medios de actuador, tales como un material inteligente, un colector de descargas eléctricas o un conductor de descargas eléctricas, etc.

40 El elemento elástico activo puede proporcionarse como lámina masiva o elemento voluminoso en una parte de pared de pala completa o sustancialmente completa rígida, por ejemplo cuando se mejora una pala tradicional disponiendo un elemento elástico activo sobre la misma. Los medios de actuador y/o un compartimento para recibir un fluido pueden disponerse en este caso entre la pared de pala original y el elemento elástico activo. El elemento elástico activo también puede proporcionarse como dos o más láminas o una lámina masiva o elementos voluminosos conectados para formar uno o más compartimentos o rebajes en su interior. Un elemento elástico activo de este tipo
45 también puede disponerse en una parte de pared de pala completa o sustancialmente completa rígida o en una estructura más abierta, tal como uno o más nervios rígidos u otra estructura de soporte rígida.

50 La forma aerodinámica de una pala de turbina eólica se forma normalmente mediante la interpolación entre un número de planos aerodinámicos, es decir secciones transversales de la pala ortogonales a la longitud de la pala, donde cada perfil aerodinámico se optimiza para una razón de espesor a cuerda particular, que de nuevo viene dictada por los requisitos estructurales de la pala. La presente invención se refiere a palas de turbina eólica que comprenden al menos un perfil aerodinámico, que puede cambiar la forma y las propiedades aerodinámicas durante el uso aumentando el espesor del perfil aerodinámico.

5 Cuando la velocidad del viento entrante está por encima de un nivel relativamente bajo, tal como por ejemplo de 11 m/s a 13 m/s, entonces la turbina eólica alcanza el rendimiento de potencia nominal y la operación de la turbina eólica es más cuestión de evitar o limitar el daño de la turbina eólica que de optimizar el rendimiento de energía. Esto se realiza normalmente reduciendo la eficiencia inclinando la pala de modo que se disminuya el ángulo de ataque del viento entrante y disminuyendo de este modo la fuerza de sustentación sobre la pala. Cuando la velocidad del viento entrante es muy alta, tal como por encima de 22 - 25 m/s, la turbina eólica se detiene. Sin embargo, si se reduce la sustentación de la pala cuando la velocidad del viento entrante está por encima del nivel bajo, entonces puede ampliarse el margen de operación. Cuando la reducción de la sustentación se concentra en la parte de la pala alejada de la raíz de pala, entonces una reducción de la sustentación corresponde a una reducción virtual del radio del rotor, lo que es altamente ventajoso con respecto a la inclinación tradicional o la pérdida activa, puesto que la carga sobre la pala es mucho más favorable y se reduce considerablemente la deformación de la pala. Además, si la sustentación de la pala se ajusta lo suficientemente rápido, entonces las palas o incluso la pala individual puede optimizarse según el viento entrante en ese instante que experimenta la pala por ejemplo durante una ráfaga de viento o, si la velocidad del viento entrante se mide delante de la turbina eólica, las palas pueden optimizarse incluso antes de que, por ejemplo, llegue una ráfaga de viento y por consiguiente se reduce enormemente la degradación por fatiga de las palas de manera considerable.

20 En una realización preferida, la pala de turbina eólica según la invención comprende además unos medios de tensión de pala dispuestos en la pala para establecer la tensión de la pala. Los medios de tensión de pala pueden ser ventajosamente un medidor de deformación dispuesto en una pared de pala o un larguero de la pala puesto que esto permite una medición muy exacta y muy local de la tensión dentro de la pala. En otra realización, los medios de tensión de pala comprenden una fibra óptica o conductora. Los medios de tensión de pala están conectados funcionalmente, tal como a través de medios mecánicos, a través de una conexión eléctrica o a través de una conexión inalámbrica, a una unidad de control. La unidad de control puede controlar la forma del elemento elástico activo y por ejemplo puede ser un procesador o un ordenador. La unidad de control puede conectarse a más de una pala de turbina eólica y se integra preferiblemente con la unidad de control principal de la turbina eólica. En una realización alternativa aunque todavía preferida, la unidad de control está dispuesta en la pala de modo que la pala individual actúa de manera autónoma.

30 En otra realización preferida, la pala de turbina eólica comprende además un anemómetro dispuesto cerca de la punta de la pala. El anemómetro puede ser una gama de medios para medir la velocidad del viento entrante, el viento efectivo en una o más de las superficies de la pala y/o el ángulo de entrada del flujo del viento sobre la pala. Ejemplos ventajosos son un anemómetro láser para medir la velocidad del viento delante de la pala o un tubo de Pitot para medir el ángulo de entrada del flujo o la velocidad del viento en la superficie de la pala. El anemómetro está conectado funcionalmente a una unidad de control. La unidad de control y las conexiones se comentaron anteriormente.

35 La línea de cuerda es la línea recta entre el borde de ataque y el borde de salida. La curvatura es la curva formada por la conexión de los puntos en el centro entre la pared del lado de presión y la pared del lado de succión. Por consiguiente, para un perfil aerodinámico asimétrico la curvatura se desviará de la línea de cuerda.

40 Las palas de turbina eólica del estado de la técnica tienen normalmente planos aerodinámicos para los que la curvatura se desvía de la línea de cuerda puesto que esto permite un mayor coeficiente de sustentación y por consiguiente requiere una cuerda más corta para un rendimiento de energía constante. Los experimentos han mostrado que un cambio en la forma del perfil aerodinámico, que desplace la línea de curvatura con respecto a la línea de cuerda, es altamente deseable puesto que esto tiende a llevar a cambios relativamente grandes en la sustentación.

45 En una realización preferida, la deformación del elemento elástico activo desde la primera forma a la segunda forma da como resultado un desplazamiento en la curvatura de un perfil aerodinámico con el elemento elástico activo, el desplazamiento en la curvatura es una distancia de al menos el 0,25% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 10% de la línea de cuerda. Esto puede realizarse por ejemplo si la línea de curvatura se desplaza desde aproximadamente el 0,030% de cuerda al 70% de cuerda y el 0,025% de cuerda al 80% de cuerda hasta aproximadamente el 0,027% de cuerda al 70% de cuerda y el 0,021% de cuerda al 80% de cuerda, aunque el intervalo de al menos el 10% de la línea de cuerda también puede dividirse en varios intervalos.

55 En una realización preferida, la deformación del elemento elástico activo desde la primera forma a la segunda forma da como resultado un desplazamiento en la curvatura de un perfil aerodinámico con el elemento elástico activo, el desplazamiento en la curvatura es una distancia de al menos el 0,25% de cuerda, preferiblemente al menos el 0,30% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 15% de la línea de cuerda. En otra realización preferida, la deformación del elemento elástico activo desde la primera forma a la segunda forma da como resultado un desplazamiento en la curvatura de un perfil aerodinámico con el elemento elástico activo, el desplazamiento en la curvatura es una distancia de al menos el 0,30% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 10% de la línea de cuerda.

El trabajo experimental ha demostrado que la mayor sensibilidad del coeficiente de sustentación máximo con respecto al espesor del perfil aerodinámico y por consiguiente el área más eficiente para disponer un elemento elástico activo es con acceso al lado de presión de un perfil aerodinámico de la pala. Cuando el elemento elástico activo está dispuesto en una pala existente, esto significa que la posición ventajosa es en el lado de presión de un perfil aerodinámico de la pala. Más particularmente, se encontró que el posicionamiento del elemento elástico activo en el lado de presión en un área entre el borde de salida y aproximadamente el 40% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque era altamente ventajoso. En la realización más preferida, el elemento elástico activo está dispuesto en un área entre el borde de salida y aproximadamente el 50% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque. Por tanto, el elemento elástico activo está dispuesto normalmente en un área entre el espesor máximo del perfil aerodinámico de la pala y el borde de salida, y por consiguiente el espesor máximo de la pala no se ve influido por el elemento elástico activo, mientras que se ajusta la forma entre el espesor máximo y el borde de salida y puede modificarse adicionalmente durante el uso.

No es necesario que el elemento elástico activo se extienda por todo el borde de salida, sino que se encontró que esta disposición era estructuralmente favorable y que el aumento del espesor del borde de salida también influía considerablemente en el tamaño del coeficiente de sustentación máximo. Debe entenderse que por ejemplo la expresión "entre el borde de salida y aproximadamente el 50% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque" engloba no sólo un elemento elástico activo desde exactamente el 50% de la cuerda hasta el 100% de la cuerda sino también elementos elásticos activos dispuestos completa o sustancialmente dentro de esta parte del perfil aerodinámico. Además, se encontró que un elemento elástico activo entre aproximadamente el 50 - 90% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque era ventajoso, y particularmente un elemento elástico activo entre aproximadamente el 60 - 95% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque era muy ventajoso.

En una realización particularmente ventajosa, el elemento elástico activo está dispuesto de modo que para un perfil aerodinámico particular, el elemento elástico activo se proporciona en el lado de presión del perfil aerodinámico y el elemento elástico activo comienza en aproximadamente el 50 - 70% de la cuerda, preferiblemente el elemento elástico activo comienza en aproximadamente el 55 - 65% de la cuerda, tal como aproximadamente el 60% de la cuerda, y el elemento elástico activo termina en aproximadamente el 80 - 90% de la cuerda, preferiblemente el elemento elástico activo termina en aproximadamente el 90 - 98% de la cuerda, tal como aproximadamente el 95% de la cuerda. Estas disposiciones del elemento elástico activo son particularmente ventajosas, puesto que la curvatura puede cambiarse en el área en la que cambia la sustentación del perfil aerodinámico en gran medida.

Puede indicarse que la ventaja de estas disposiciones se basa en el hecho de que esta parte de la pala tiene normalmente la curvatura considerablemente desplazada hacia el lado de succión con respecto a la línea de cuerda y que una expansión del elemento elástico activo será muy eficiente en el desplazamiento de la curvatura hacia el lado de presión del perfil aerodinámico y por consiguiente reducirá normalmente la asimetría del perfil aerodinámico. En un caso extremo, sin embargo, la curvatura puede desplazarse incluso al lado de presión de la línea de cuerda.

La energía convertida en una turbina eólica aumenta con el radio de la pala y por consiguiente la mayor parte de la energía se origina desde las partes externas de la pala. Por tanto, se obtendría una mayor influencia sobre la producción de energía para un cambio en la sustentación de una parte de la pala lejos de la raíz de pala. En una realización preferida, un elemento elástico activo está dispuesto en el 50% más externo del radio de la pala, tal como en al menos una parte del intervalo entre el 50-90% del radio de la pala o al menos una parte del intervalo entre el 60-95% del radio de la pala, y la disposición de un elemento elástico activo en el 25% más externo del radio de la pala es incluso más ventajosa. Un cambio en el coeficiente de sustentación máximo en la parte externa de la pala tendrá un efecto similar con respecto a la reducción de la carga por fatiga y la producción de energía como una reducción física del radio del rotor. Por tanto, puede considerarse que la presente invención de una turbina eólica con pala de turbina eólica que tiene un elemento elástico activo tiene un diámetro de rotor aerodinámico efectivo variable y por tanto puede considerarse una alternativa para palas estructuralmente mucho más complicadas. Éste es particularmente el caso cuando el perfil aerodinámico tiene un coeficiente de sustentación máximo muy bajo tal como un perfil aerodinámico simétrico o un perfil de sustentación sustancialmente de cero, cuando el elemento elástico activo tiene una forma con un coeficiente de sustentación máximo bajo.

En una realización muy preferida, una pala de turbina eólica según la invención comprende una pluralidad de elementos elásticos activos. Por ejemplo la pala puede comprender 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 o más elementos elásticos activos. Tener una pluralidad de elementos elásticos activos mejora la flexibilidad con respecto a una optimización del perfil de la pala. Esto es particularmente importante cuando la pala individual se optimiza de manera continua con respecto al viento entrante o la tensión de la pala. Preferiblemente, más de uno de la pluralidad de elementos elásticos están dispuestos con acceso al lado de presión de la pala. Se prefiere que una mayoría de los elementos elásticos activos estén dispuestos en un área entre el espesor máximo de los planos aerodinámicos de la pala y el borde de salida, puesto que ésta es el área en la que se obtiene el mayor efecto de los elementos elásticos activos como se comentó en otro lugar.

Un número de anemómetros pueden estar ventajosamente distribuidos longitudinalmente a lo largo de la pala, de modo que cada uno de los anemómetros esté dispuesto cerca de uno diferente de la pluralidad de elementos elásticos activos. Los anemómetros están conectados funcionalmente a una unidad de control que puede controlar

la forma de la pluralidad de elementos elásticos activos individualmente. La unidad de control, las conexiones y los tipos relevantes de anemómetros se comentaron anteriormente.

5 Al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos de manera preferible sustancialmente extremo con extremo de modo que un primer elemento elástico activo se extiende desde un segundo elemento elástico activo en la longitud de la pala. Esto permite que el elemento elástico activo adyacente colabore mejor y facilita el control de los elementos y la formación de una transición suave de un elemento elástico activo a otro.

10 En otra realización, al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos uno al lado del otro de modo que un primer elemento elástico activo se extiende desde el segundo elemento elástico activo sustancialmente ortogonal a la longitud de la pala. Esto es particularmente relevante para palas de turbina eólica muy grandes en las que un único elemento elástico activo o una pluralidad de elementos elásticos activos dispuestos extremo con extremo serían demasiado lentos en el accionamiento.

15 En una realización ventajosa, al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos solapándose al menos parcialmente en la longitud de la pala y/o sustancialmente ortogonales a la longitud de la pala. Un elemento elástico activo solapado permite un medio de control particularmente sencillo para un control de múltiples etapas de las palas de turbina eólica, puesto que la pluralidad de etapas puede realizarse mediante una combinación de etapas de control de activación/desactivación de los elementos elásticos activos individuales. Particularmente, se prefiere que el elemento elástico activo solapado no tenga un tamaño idéntico. Por ejemplo, un tamaño de $1/3 - 2/3$ permitiría 4 fases, mientras que uno de $1/2 - 1/2$ sólo permitiría 3 fases.

20 El tamaño del elemento elástico activo deberá elegirse como un equilibrio entre el tamaño de la pala de turbina eólica, el tamaño del elemento elástico activo individual y el número de elementos elásticos activos. Los elementos no deberán ser demasiado pequeños puesto que esto lleva a un gran número de elementos elásticos activos o sólo un efecto limitado sobre el coeficiente de sustentación máximo. En una realización preferida, al menos uno de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiende de 2 a 30 metros en la longitud de la pala, preferiblemente el elemento elástico activo se extiende de 5 a 20 metros. Se prefiere que al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiendan de 8 a 15 metros en la longitud de la pala.

30 Para palas de turbina eólica muy grandes, la velocidad de rotación es normalmente más lenta y por tanto son aceptables elementos elásticos activos más grandes con patrones de reacción más lentos. Se encontró que al menos uno de la pluralidad de elementos elásticos activos puede extenderse ventajosamente del 3% al 50% de la longitud de la pala de turbina eólica. Preferiblemente, al menos uno de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiende del 5% al 40% de la longitud de la pala de turbina eólica. Finalmente, se prefiere además que al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiendan del 10% al 25% de la longitud de la pala de turbina eólica. Normalmente, esto mantendrá el número de elementos elásticos activos en una medida razonable.

35 En una realización preferida, la pala de turbina eólica según la invención comprende además unos medios para controlar la forma del elemento elástico activo individualmente. Esto permite un alto grado de libertad con respecto a una optimización de la configuración del elemento elástico activo, es decir qué elemento elástico activo no va a deformarse, qué elemento elástico activo va a deformarse parcialmente y qué elemento elástico activo va a deformarse completamente. Además, el control individual permite una variación dependiente del radio del coeficiente de sustentación máximo de modo que el coeficiente de sustentación puede optimizarse con respecto a una variación local en el viento entrante, como por ejemplo ráfagas y/o una variación debida a la variación cíclica de la altura por encima del suelo. Los medios para el control de la forma de los elementos elásticos activos pueden comprender individualmente, por ejemplo, uno o más de una pluralidad de sistemas de distribución de fluido, un único sistema de distribución de fluido en combinación con válvulas individualmente controlables para el control de la entrada y/o salida del fluido al elemento elástico activo, manómetros para cada elemento elástico activo, dispositivos de medición de flujo para establecer el transporte del fluido al interior/exterior del elemento elástico activo.

En otra realización preferida, la pala de turbina eólica según la invención comprende además unos medios para controlar la forma de al menos dos de los elementos elásticos activos en combinación. Esto permite un diseño más sencillo con menos sensores y/o sistemas de distribución.

50 En una configuración ventajosa adicional de la pala de turbina eólica según la invención, la segunda forma del elemento elástico activo es un estado relajado del elemento elástico activo. El estado relajado corresponde al estado de equilibrio en el que por ejemplo la presión de un fluido de control corresponde a la presión externa. Dicho de otro modo, el estado de equilibrio del elemento elástico activo deberá ser en esta realización la situación en la que el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico es menor que el valor máximo posible. Los resultados de esto es que si los medios para controlar la forma de uno o más del elemento elástico activo se desactivan, por ejemplo por un rayo no desviado completamente por el sistema de protección contra descargas eléctricas, por un fallo mecánico del sistema o por un fallo del sensor, entonces el sistema pasará a un estado en el que la sustentación es relativamente baja y por consiguiente se disminuirá la probabilidad de que el sistema presente un exceso de velocidad o pierda el control. De hecho, esto actúa como precaución de seguridad adicional y lleva a una turbina eólica más segura frente a los fallos. Esto puede realizarse teniendo los medios de desviación adicionales en

o conectados funcionalmente al elemento elástico activo, mediante el uso de vacío como un fluido de control o mediante el uso del efecto de proyección para vaciar o llenar un compartimento del elemento elástico activo.

La diferencia entre el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 1}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma y el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma deberá ser sustancial para realizar un amplio intervalo de operación del viento entrante. En una realización preferida, el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 1}$, es al menos el 10% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma. En otra realización preferida, el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 1}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma es al menos el 15% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma. Sin embargo, se considera incluso más preferido que el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 1}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma sea al menos el 20% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $C_{L,max 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma. Es sorprendente que sólo estos valores relativamente pequeños de diferencias sean suficientes para ajustar las propiedades de la pala aunque se encontró que esto permite un ajuste muy preciso de las propiedades aerodinámicas de la pala, particularmente cuando están presentes una pluralidad de elementos elásticos activos.

Una turbina eólica se opera normalmente en un intervalo de ángulo de ataque, α , por debajo de $\alpha_{m\acute{a}x}$, donde $\alpha_{m\acute{a}x}$ es el ángulo de ataque correspondiente al coeficiente de sustentación máximo. Por tanto, también es importante la diferencia de sustentación para un intervalo de ángulo de ataque alrededor de $\alpha_{m\acute{a}x}$. Se encontró que la diferencia en el coeficiente de sustentación para el perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma y la segunda forma, ΔC_L , debe ser mayor que el 10% del mayor de los coeficientes de sustentación al ángulo de ataque para todos los ángulos de ataque entre $\alpha = \alpha_{m\acute{a}x} - 5^\circ$ y $\alpha_{m\acute{a}x}$. Preferiblemente, $\Delta C_L > 20\%$ del mayor de los coeficientes de sustentación al ángulo de ataque para todos los ángulos de ataque entre $\alpha = \alpha_{m\acute{a}x} - 5^\circ$ y $\alpha_{m\acute{a}x}$, tal como $\Delta C_L > 25\%$ o incluso $\Delta C_L > 50\%$. En una realización particularmente ventajosa, el intervalo de α , para el que ΔC_L debe estar por encima del valor definido, es $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha_{m\acute{a}x} + 2^\circ$, y más preferiblemente el intervalo de α , para el que ΔC_L debe estar por encima del valor definido, es $\alpha = -2^\circ$ a $\alpha_{m\acute{a}x} + 3^\circ$. Los valores bajos de α corresponden a vientos entrantes muy fuertes y los valores altos de α corresponden a la operación con vientos bajos próximos a $\alpha_{m\acute{a}x}$.

El coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico puede variar considerablemente dentro de la idea inventiva de la invención. Sin embargo, en una realización preferida, el coeficiente de sustentación máximo con el elemento elástico activo en la primera forma, $C_{L,max,1}$, es mayor que 1,2 y/o el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma, $C_{L,max,2}$, está por debajo de 1,0, donde el coeficiente de sustentación máximo corresponde a Re en el intervalo de 1 - 10 millones y un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso. Particularmente, se encontró que es ventajoso que $C_{L,max,1}$ sea mayor que 1,25 y/o $C_{L,max,2}$ esté por debajo de 0,9, donde los coeficientes de sustentación máximos corresponden a Re en el intervalo de 1 - 10 millones y un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso. Debe observarse que las condiciones actualmente en uso normalmente se alejan de estos valores y que estos valores sólo deben entenderse como lo que se considera favorable en el modelado o los experimentos de túnel aerodinámico.

Los números de Reynolds que experimenta el perfil aerodinámico durante el uso pueden variar considerablemente en función de la posición radial en la pala y la longitud de la pala. Los valores típicos del número de Reynolds varían entre 1 - 10 millones.

En una realización muy preferida según la invención, el elemento elástico activo comprende un compartimento para recibir un fluido, o el elemento elástico activo forma un compartimento para recibir fluido en combinación con una parte rígida de la pala de turbina eólica, tal como una parte de una pared de pala. El compartimento está dispuesto de modo que el llenado o vaciado del compartimento lleva a un cambio en la forma del elemento elástico activo; particularmente, el compartimento debe estar dispuesto de modo que el espesor de la pala en el elemento elástico activo cambie al llenar o vaciar el compartimento. El uso de un compartimento de este tipo para provocar la deformación del elemento elástico activo es muy ventajoso puesto que permite un control muy delicado, rápido y reproducible de la forma del elemento elástico activo.

Se encontró que un compartimento de este tipo puede usarse para una deformación gradual, por ejemplo llenándose totalmente o vaciándose completamente el compartimento, y/o para una deformación continua, por ejemplo llenándose el compartimento hasta un porcentaje continuo del contenido máximo. Se prefiere que la pala de turbina eólica comprenda además una válvula de recepción para controlar el transporte de fluido al compartimento. La válvula de recepción está dispuesta ventajosamente cerca del compartimento que va a controlarse, puesto que esto reduce el volumen muerto entre la válvula y el compartimento. Además, la válvula de recepción está conectada funcionalmente al compartimento que va a controlarse. La válvula puede ser por ejemplo una electroválvula u otra válvula que puede operarse en modo de activación/desactivación o de manera continua mediante la automatización de unos medios de control. El fluido puede recibirse desde un sistema de distribución de fluido o, si el fluido es aire, opcionalmente pero no necesariamente desde la superficie de la pala. La válvula de recepción puede estar dispuesta ventajosamente cerca de un extremo del compartimento hacia la raíz de la pala puesto que esto permite que el fluido se mueva más rápido al interior del compartimento debido a la fuerza centrípeta que actúa sobre el

fluido durante la operación de la turbina eólica. Además, medios, tales como bombas, para mover el fluido a través del sistema de distribución de fluido, ocuparán normalmente un poco de espacio y hay disponible más espacio en la sección de raíz de la pala.

5 Se prefiere que la pala de turbina eólica comprenda además una válvula de descarga para controlar el transporte de fluido desde el compartimento. La válvula de descarga está dispuesta ventajosamente cerca del compartimento que va a controlarse puesto que esto reduce el volumen muerto entre la válvula y el compartimento. Además, la válvula de descarga está conectada funcionalmente al compartimento que va a controlarse. La válvula puede ser por ejemplo una electroválvula u otra válvula que puede operarse en modo de activación/desactivación o de manera continua mediante la automatización de unos medios de control. El fluido puede descargarse a un sistema de distribución de fluido o, si el fluido es aire, opcionalmente pero no necesariamente a la superficie de la pala. La válvula de descarga puede estar dispuesta ventajosamente cerca de un extremo del compartimento hacia la punta de la pala puesto que esto permite que el fluido se mueva más rápido desde el compartimento debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el fluido durante la operación de la turbina eólica.

15 En una realización preferida, la pala comprende además unos medios de detección para controlar además el llenado y vaciado del compartimento estableciendo la presencia/ausencia de fluido en el compartimento y/o la cantidad, por ejemplo el volumen o presión del fluido presente en el compartimento. Medios de detección preferidos son un manómetro y un caudalímetro aunque también pueden ser adecuados otros medios de detección. Los medios de detección están conectados funcionalmente al compartimento y dichos medios de detección pueden establecer un volumen de fluido en el compartimento por ejemplo a través de la presión del fluido en el compartimento o el flujo de fluido a y/o desde el compartimento.

20 Se encontró que el fluido que va a introducirse en el compartimento se distribuye ventajosamente dentro de la pala mediante un sistema de distribución de fluido. El sistema de distribución de fluido está en comunicación con el compartimento preferiblemente a través de la válvula de recepción y/o la válvula de descarga para controlar el transporte de fluido a y/o desde el compartimento. El sistema de distribución de fluido puede ser un sistema de una secuencia o un sistema de dos secuencias dependiendo del número y la operación del/de los compartimento(s).

25 Es muy preferido que el sistema de distribución de fluido esté en comunicación con unos medios para transportar el fluido. Los medios para transportar el fluido también los comprende la pala de turbina eólica y normalmente están dispuestos cerca de la raíz de la pala. Ejemplos preferidos de medios para transportar el fluido son una bomba de vacío (para el fluido que es un gas) y una bomba de alta presión (para el fluido que es un gas o un líquido).

30 El fluido puede ser un gas o un líquido. Se prefiere el gas puesto que la compresibilidad del gas es normalmente mayor que un líquido y por consiguiente puede conseguirse un tiempo de respuesta corto mediante medios sencillos tales como un depósito de presión. Además, el gas es relativamente ligero y por consiguiente no aumentará el peso de la pala tanto como un fluido. El gas puede ser de cualquier composición, tal como por ejemplo nitrógeno, argón o aire. Se prefiere aire debido a la disponibilidad inmediata y el bajo precio. Cuando se utiliza aire ambiente, se prefiere deshumedecer el aire antes de su uso para impedir una condensación de agua dentro del sistema. Además, el aire es ventajoso porque puede descargarse desde la superficie de la pala sin ningún problema medioambiental. Líquidos preferidos son agua con aditivos adecuados y otros fluidos hidráulicos adecuados.

35 Alternativamente, la forma de un elemento elástico activo dispuesto en el lado de presión entre el perfil aerodinámico entre el espesor máximo del perfil aerodinámico y el borde de salida puede accionarse mediante otros medios de actuador que el fluido en un compartimento. Otros medios de actuador de este tipo pueden comprender por ejemplo materiales inteligentes, actuadores lineales, dispositivos mecánicos, pistones extensibles por gas o fluido, materiales piezoeléctricos, etc. Los medios de actuador alternativos se conectan normalmente tanto a una parte relativamente rígida del perfil aerodinámico como al elemento elástico activo. Varios medios de actuador alternativos (por ejemplo material inteligente y material piezoeléctrico y algunos dispositivos mecánicos) son ventajosos porque sólo requieren una entrada eléctrica para el accionamiento y ninguna transferencia de por ejemplo un fluido. Esto puede ser ventajoso desde el punto de vista de la instalación.

40 En otro aspecto, la invención se refiere a una pala de turbina eólica que tiene una combinación de un elemento elástico activo y un flap, flap que está dispuesto cerca del borde de salida del perfil aerodinámico. El flap está activo en el sentido de que puede accionarse mediante unos medios de actuador entre una primera posición y una segunda posición, y el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el flap en la primera posición es mayor que el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el flap en la segunda posición. Se encontró que la combinación de un elemento elástico activo y un flap es muy ventajosa puesto que el flap puede usarse para favorecer la reducción del coeficiente de sustentación máximo en situaciones en las que la reducción más delicada realizada por el/los elemento(s) elástico(s) activo(s) no es suficiente. Ésta puede ser por ejemplo la situación en vientos extremos o para palas de turbina eólica muy largas en las que la diferencia en el viento entrante varía sustancialmente entre la posición más alta de la pala y la posición más baja de la pala. El accionamiento del flap puede ser simultáneo al accionamiento del elemento elástico activo pero el accionamiento del flap debe al menos coordinarse con el accionamiento del elemento elástico activo.

Es posible que el flap pueda accionarse en una o más etapas, correspondiendo una de las etapas a maximizar el coeficiente de sustentación máximo, o que el flap pueda accionarse de manera continua entre una posición en la que se maximiza el coeficiente de sustentación máximo y una posición en la que el flap se dobla hacia el lado de succión para producir un coeficiente de sustentación máximo menor.

5 En una realización preferida, el flap se extiende desde entre el 80 y el 90% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque hasta el borde de salida puesto que esto permite que la parte principal de la pala sea rígida estructuralmente. Se encontró que cuando el flap se extiende desde entre aproximadamente el 85% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque hasta el borde de salida, el coeficiente de sustentación máximo se ajustaría suficientemente mediante el accionamiento.

10 El accionamiento del flap puede implicar una rotación parcial de una parte rígida de la pala alrededor de un punto de pivote o un doblado más distribuido de la estructura de borde de salida.

15 En una realización de la invención se prefiere por precaución de seguridad que el estado relajado del flap, es decir el estado en el que estará el flap en el caso menos probable de que los sistemas de control fallen, sea la segunda posición en la que el flap está hacia el lado de succión del perfil aerodinámico en comparación con la primera posición del flap. Con esta disposición, es menos probable que la pala exceda la velocidad o incluso se des controle.

20 En una realización muy preferida, una pala de turbina eólica según la invención comprende una pluralidad de flaps dispuestos cerca del borde de salida. Por ejemplo la pala puede comprender 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 o más flaps. Tener una pluralidad de flaps mejora la flexibilidad con respecto a la optimización del perfil de la pala durante el uso. Esto es particularmente importante cuando la pala individual se optimiza de manera continua con respecto al viento entrante o la tensión de la pala.

25 El tamaño, es decir la longitud en la dirección longitudinal de la pala, del flap deberá elegirse como un equilibrio entre el tamaño de la pala de turbina eólica, el tamaño del flap individual y un número razonable de flaps. Los flaps no deberán ser demasiado pequeños puesto que esto lleva a un gran número de flaps, cada uno con sólo un efecto muy limitado sobre el coeficiente de sustentación máximo. En una realización preferida, al menos una de la pluralidad de flaps se extiende de 2 a 20 metros en la longitud de la pala, preferiblemente el flap se extiende de 5 a 15 metros. Se prefiere que al menos dos de la pluralidad de flaps se extiendan de 5 a 15 metros en la longitud de la pala. El flap puede o no seguir el tamaño del elemento elástico activo aunque se prefiere que los extremos de los flaps estén dispuestos sustancialmente en los extremos del elemento elástico activo correspondiente puesto que esto es estructuralmente más favorable e impide la torsión del elemento elástico activo.

30 Para palas de turbina eólica muy grandes, la velocidad de rotación es normalmente más lenta, y por tanto son aceptables flaps grandes con patrones de reacción más lentos. Se encontró que al menos una de la pluralidad de flaps puede extenderse ventajosamente del 3% al 50% de la longitud de la pala de turbina eólica. Preferiblemente al menos uno de la pluralidad de elementos de flap se extiende del 5% al 40% de la longitud de la pala de turbina eólica. Finalmente, se prefiere además tener al menos dos de la pluralidad de flaps que se extienden del 10% al 35 25% de la longitud de la pala de turbina eólica. Normalmente esto mantendrá el número de flaps en una medida razonable.

40 En una realización muy preferida de la invención, la pluralidad de flaps están dispuestos uno extendiendo al otro en la dirección de longitud de la pala y un conector elástico está dispuesto entre flaps adyacentes de modo que los flaps formen una superficie continua libre de escalones en la dirección longitudinal de la pala. Esto puede realizarse si los flaps que se extienden se separan por una corta distancia, tal como de 10 cm a 50 cm para dejar espacio para el conector elástico, y el conector elástico está conectado a las caras de extremo de ambos flaps y a la parte rígida de la pala.

45 Aunque los medios de actuador del flap puedan accionarse de otras maneras, es muy preferible que los medios de actuador del flap puedan accionarse mediante un fluido y particularmente mediante el mismo fluido que los elementos elásticos activos (si el elemento elástico activo puede accionarse mediante un fluido) puesto que esto permite un sistema de control más sencillo. Además, los medios de actuador del flap pueden estar funcionalmente conectados de manera ventajosa al sistema de distribución de fluido, que está en comunicación con un elemento elástico activo. Esto permite un diseño más sencillo del sistema de distribución de fluido, reduce los requisitos de espacio para el sistema de distribución de fluido global y reduce el peso global del sistema.

50 Otros tipos de medios de actuador para accionar el flap pueden comprender materiales inteligentes, que cambian de forma tras el cambio de un potencial sobre el material, actuadores lineales, dispositivos mecánicos, pistones extensibles por gas o fluido, materiales piezoeléctricos. Particularmente, los actuadores, que sólo necesitan una señal eléctrica para realizar el accionamiento, son ventajosos debido a una instalación relativamente fácil en la pala.

55 Debe observarse que se obtienen los resultados más favorables cuando el perfil aerodinámico está libre de escalones sustanciales en la superficie y que tiene una forma redonda de modo que no se produzca ninguna separación del flujo de aire sobre el perfil aerodinámico (excepto en el borde de salida) durante el uso. Para reducir la sensibilidad hacia los escalones menores, que no puede evitarse prácticamente entre la parte rígida de la pala y el

elemento elástico activo, se prefiere que el perfil aerodinámico tenga un borde de ataque romo. Se dan a conocer formas preferidas en la solicitud de patente en tramitación junto con la presente WO2005IB052355 que está incorporada en el presente documento mediante referencia.

5 En otro aspecto, la invención se refiere a una subunidad para su instalación en una pala de turbina eólica. La pala de turbina eólica tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un
 10 borde de salida para formar una superficie de pala rígida. La subunidad comprende un elemento elástico activo con las propiedades y la forma que se comentaron con respecto a una o más realizaciones de otros aspectos de la presente invención. El elemento elástico activo está adaptado con respecto a la forma y el tamaño para conectarse a
 15 una parte de superficie rígida de una pala de turbina eólica, de modo que durante la operación de una turbina eólica que comprende la pala de turbina eólica con la subunidad instalada en la misma, el elemento elástico activo puede deformarse de una primera forma a una segunda forma. Esto puede realizarse por ejemplo mediante medios de
 20 actuador tal como se comentó con respecto a las realizaciones de uno o más de los otros aspectos de la presente invención, tales como actuadores lineales o fluido que entra y/o sale en/de un compartimento formado al menos parcialmente por el elemento elástico activo. De manera similar al primer aspecto de la invención, el coeficiente de
 25 sustentación máximo de la estructura combinada de la subunidad y la pala de turbina eólica en la primera forma, $C_{L,máx 1}$, es mayor que el coeficiente de sustentación máximo de la estructura combinada de la subunidad y la pala de turbina eólica con el elemento elástico activo en la segunda forma, $C_{L,máx 2}$.

La subunidad es particularmente ventajosa para mejorar una pala de turbina eólica existente de modo que la pala
 20 pueda operarse por ejemplo en un intervalo más grande de viento entrante o para reducir el desgaste de la pala reduciendo la carga por fatiga debido a la ráfaga de viento o vientos extremos. Puesto que la subunidad y particularmente el elemento elástico activo pueden adherirse simplemente a la superficie y el sistema de distribución
 25 de fluido, opcional, instalado dentro de la pala por ejemplo con tubos flexibles, la instalación es sencilla y no implica cambios en la estructura de pala (a excepción del efecto muy limitado de los orificios de conexión entre el elemento elástico activo y el sistema de distribución de fluido a través de la pared de pala) y por consiguiente normalmente no se requiere la adición de un refuerzo adicional.

Todavía en otro aspecto, la invención se refiere a un método de operación de una turbina eólica con una variación
 del perfil aerodinámico efectivo de la pala. El método comprende la etapa de establecer la velocidad del viento
 30 entrante y si la velocidad del viento entrante está por debajo de un primer valor umbral entonces deformar un elemento elástico activo desde la segunda forma a la primera forma, de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo. El anemómetro puede ser de cualquier tipo y preferiblemente del tipo comentado en relación con el primer aspecto de la presente invención. El anemómetro está dispuesto preferiblemente en la pala de turbina eólica, pero el anemómetro también puede estar dispuesto cerca de la turbina
 35 eólica, tal como en una estructura o turbina eólica adyacente, o el anemómetro puede estar dispuesto en otra parte de la turbina eólica, tal como en la torre o la góndola. En una realización particularmente preferida, el anemómetro es un anemómetro láser y está dispuesto en el buje a un ángulo con respecto a la horizontal, de modo que explorará el área delante de la turbina eólica y por consiguiente podrá medir la velocidad del viento entrante instantánea en función de la altura sobre el suelo. Esto permite una optimización muy precisa con respecto a un perfil aerodinámico variable de radio cíclico o paso cíclico de la pala como se comentó en otro lugar. Además o en lugar de medir la
 40 velocidad del viento entrante, el anemómetro puede medir ventajosamente el ángulo de entrada del flujo del viento en la pala de turbina eólica. Por ejemplo, esto puede ser ventajoso porque proporciona datos para una optimización adicional de la pala incluyendo el ángulo de paso.

De manera similar al método descrito en el que se mide la velocidad del viento entrante y se le atribuye un valor
 45 umbral, a los otros parámetros de entrada posibles para controlar la turbina eólica, tal como la carga de la pala por ejemplo mediante un medidor de deformación, el ángulo de entrada del flujo del viento, velocidad de rotor o rendimiento de potencia, también se les pueden atribuir valores umbral individuales o acoplados.

El nivel del primer valor umbral depende del diseño real de la pala de turbina eólica, el/los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s) de la pala así como la ubicación de operación. Un valor típico del primer umbral está en el orden de 10 a 16 m/s, aunque otros valores pueden ser relevantes en algunos casos.

La operación se optimiza normalmente para proporcionar el rendimiento de potencia máximo dentro de un nivel
 50 aceptable de carga por fatiga y/o nivel de emisión de ruido. Además, la operación puede controlarse basándose en el viento entrante medio, basándose en el viento entrante promedio o máximo dentro de un periodo de tiempo dado, basándose en el viento entrante actual o basándose en el ángulo de entrada del flujo del viento según se mide por un anemómetro, basándose en la carga de la pala, por ejemplo por un medidor de deformación, o basándose en los parámetros de operación tales como velocidad de rotor o rendimiento de potencia. Los niveles umbral relevantes
 55 dependen del parámetro de optimización y pueden variar con el tiempo, por ejemplo debido a una variación en una emisión de ruido permisible con la hora del día.

En otra realización del método según la invención, el método comprende además la etapa de si uno de los valores de entrada tal como la velocidad del viento entrante está por debajo de un segundo valor umbral, entonces el flap se
 60 acciona desde la segunda posición a la primera posición de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el flap. El segundo valor umbral puede ser el mismo que el primer valor umbral pero se prefiere que

el segundo valor umbral sea más tolerante que el primer valor umbral, tal como para un viento entrante, por ejemplo 15 m/s, puesto que esto permite más etapas de regulación y por consiguiente un ajuste más preciso de las propiedades aerodinámicas de la pala.

5 Otra realización de un método de operación de una turbina eólica con una pala de turbina eólica según cualquier realización del primer aspecto de la presente invención comprende las etapas de establecer la tensión de la pala de turbina eólica, y, si la tensión está por debajo de un primer valor umbral, de la deformación del elemento elástico activo desde la segunda forma a la primera forma de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo. La tensión de la pala de turbina eólica se establece preferiblemente por unos medios de tensión de pala dispuestos en la pala de turbina eólica tal como en la pared de pala o en una estructura de refuerzo como por ejemplo un larguero. Los medios de tensión de pala son preferiblemente un medidor de deformación. El uso de la medición de deformación como un parámetro de control es ventajoso puesto que se basa directamente en el efecto real del viento sobre la pala y por consiguiente el esfuerzo sobre la pala y no una característica indirecta tal como la velocidad del viento, que se relaciona indirectamente a través de las propiedades de diseño de la pala.

15 En otra realización de un método de operación de una turbina eólica con una pala de turbina eólica según cualquier realización del primer aspecto de la presente invención, la forma del elemento elástico activo se ajusta según la tasa de cambio de tensión de la pala de turbina eólica. Por consiguiente, la forma del elemento elástico activo puede cambiarse a una forma con una sustentación menor cuando la pala comienza a desviarse debido a una ráfaga de viento y no se espera a que la desviación se haga grande. Esto permite un control más delicado con respecto a ráfagas extremas.

20 En otra realización del método según la invención, el método comprende además la etapa de que si la velocidad del viento de tensión está por debajo de un segundo valor umbral, entonces el flap se acciona desde la segunda posición a la primera posición de modo que se aumenta adicionalmente la sustentación del perfil aerodinámico en el flap. El segundo valor umbral puede el mismo que el primer valor umbral pero se prefiere que el segundo valor umbral sea mayor que el primer valor umbral puesto que esto permite más etapas de regulación y por consiguiente un ajuste más preciso de las propiedades aerodinámicas de la pala.

Si la turbina eólica se regula por paso, el método según la invención puede comprender ventajosamente la etapa de ajustar el ángulo de paso total de las palas según la tensión y/o velocidad del viento establecida de modo que la operación de la turbina eólica puede optimizarse adicionalmente.

30 Otro método según la invención se refiere a una pala de turbina eólica, que comprende al menos dos elementos elásticos activos dispuestos a distancias diferentes de la raíz de pala y al menos dos de los elementos elásticos activos son independientemente deformables. El método comprende las etapas de, para cada elemento elástico activo, establecer la velocidad del viento entrante en dicho elemento elástico activo y si la velocidad del viento entrante está por debajo de un valor umbral local para ese elemento elástico activo, tal como 10 m/s, entonces el elemento elástico activo se deforma desde la segunda forma a la primera forma. Esto aumenta la sustentación máxima del perfil aerodinámico en dicho elemento elástico activo.

35 El establecimiento de la velocidad del viento entrante en cada elemento elástico activo puede ser indirecto. Por ejemplo, está dentro de la idea inventiva de la presente invención medir la velocidad del viento entrante en sólo una posición en la pala, en la turbina eólica o en una estructura adyacente, o la velocidad del viento entrante puede deducirse de por ejemplo el rendimiento de energía, la tensión de la pala, etc., y usarse para establecer la configuración deseada de los elementos elásticos activos individuales basándose en la posición relativa a lo largo de la longitud de la pala de turbina eólica.

40 En una realización preferida según la invención, se optimizan parámetros, tales como los valores umbral, para la regulación de la operación de la turbina eólica de modo que durante la operación la turbina eólica producirá un rendimiento de energía máximo dentro de un nivel de desgaste aceptable de la turbina eólica. Este método es particularmente ventajoso en ubicaciones con vientos fuertes frecuentes y particularmente cuando la velocidad del viento entrante se mide delante de la turbina eólica, por ejemplo mediante un anemómetro láser. En una variante muy ventajosa de esta realización, la regulación es lo suficientemente rápida para tener en cuenta ráfagas de viento, que normalmente son responsables de una fracción grande del desgaste de fatiga total de las palas de turbina eólica.

45 La alta frecuencia de regulación puede realizarse por ejemplo mediante el uso de un fluido gaseoso que entra/sale en/de un compartimento formado al menos parcialmente por el elemento elástico activo puesto que estos medios de regulación son muy rápidos y fiables.

50 En otra realización preferida según la invención, se optimizan parámetros, tales como los valores umbral, para la regulación de la operación de la turbina eólica de modo que durante la operación la turbina eólica producirá un rendimiento de energía máximo dentro de un nivel de emisión acústica aceptable de la turbina eólica. Este método es particularmente ventajoso en ubicaciones cerca de edificios u otras áreas visitadas a menudo por el ser humano. Los requisitos con respecto a la emisión acústica varían normalmente con la hora del día y los parámetros deben ajustarse de manera correspondiente.

- 5 El elemento elástico activo puede ajustarse con cualquier frecuencia que pueda realizarse por los medios de control y el actuador. Sin embargo, si el elemento elástico activo debe ajustarse solamente con respecto a un viento entrante medio u otro parámetro de entrada, que sólo cambia lentamente, entonces la frecuencia del cambio de forma y la velocidad del cambio de forma puede ser baja, tal como por debajo de 0,1 Hz - 0,01 Hz o incluso menor. Esta frecuencia de cambio de forma permite sólo en una medida limitada el ajuste a cambios a corto plazo en el viento entrante y no puede tener en cuenta una variación en la turbulencia del viento. Por otro lado, una variación de baja frecuencia de la forma podrá tener en cuenta la mayoría de la variación de la velocidad del viento en muchos casos.
- 10 Es muy preferible que el ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales se repita con una frecuencia de más de 10 Hz. El viento entrante y la turbulencia pueden cambiar muy rápidamente, por ejemplo si una ráfaga de viento llega a la turbina eólica. Por tanto, se prefiere incluso más que el ajuste se repita con una frecuencia de más de 20 Hz, tal como con una frecuencia de más de 40 Hz. La capacidad de ajustar muy rápidamente permite que la turbina eólica se opere muy cerca de la configuración óptima, porque por ejemplo las ráfagas de viento entrantes pueden tenerse en cuenta dinámicamente y no es necesario que se tengan en cuenta en la configuración promedio. La frecuencia de ajuste rápida requiere que la forma del elemento elástico activo pueda ajustarse muy rápidamente. Se encontró que particularmente el elemento elástico activo regulado por un gas que entra/sale en/de un compartimento formado al menos parcialmente por el elemento elástico activo permite un ajuste muy rápido. Además, el elemento elástico activo regulado por actuadores ajustables eléctricamente rápidos, tales como por ejemplo elementos piezoeléctricos, puede ser adecuado de la misma manera para tal ajuste rápido de la forma del elemento elástico activo.
- 15
- 20 La frecuencia de ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales puede estar relacionada alternativamente con la velocidad de rotación de la pala. En una realización preferida, el ajuste se repite con una frecuencia correspondiente a menos de una 8ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación. Sin embargo, se prefiere más que el ajuste tenga lugar con una frecuencia correspondiente a menos de una 16ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación, e incluso más preferiblemente con una frecuencia correspondiente a menos de una 40ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación.
- 25
- 30 En una realización muy preferida, la regulación es cíclica con un periodo de la regulación correspondiente a una rotación del rotor de turbina eólica. Dentro de este periodo, uno o más elemento(s) elástico(s) activo(s) y/o flap(s) pueden ajustarse varias veces, pero en total, el patrón de configuración se repite sustancialmente de manera cíclica. Se encontró que tal variación cíclica es particularmente ventajosa al tener en cuenta el efecto de estela y sombra de turbinas eólicas vecinas, por ejemplo en un parque eólico, y/o efectos de un terreno circundante complejo. Estos efectos son normalmente cíclicos aunque no tienen necesariamente un periodo correspondiente a una rotación del rotor. Un ejemplo en el que la variación cíclica con un periodo de una rotación del rotor es particularmente ventajosa es cuando la turbina eólica se opera basándose en un viento entrante promedio de tiempo de modo que la regulación tenga en cuenta principalmente la variación vertical de la velocidad del viento entrante y sólo ajuste cambios en la velocidad del viento entrante total en un periodo de tiempo más largo. Otro ejemplo es la sombra de la torre que también es normalmente un efecto cíclico con un periodo de una rotación del rotor. Esto proporciona una operación relativamente simple, que es particularmente adecuada para turbinas eólicas muy grandes con palas de turbina eólica muy largas, tal como más largas de 40 metros, 50 metros, 60 metros o incluso más largas, en las que la variación vertical en la velocidad del viento entrante es considerable.
- 35
- 40 Para turbinas eólicas operadas mediante paso cíclico, es particularmente ventajoso solapar el paso cíclico con una variación dependiente del radio individual de la sección del perfil aerodinámico puesto que esto permite un ajuste más preciso de las propiedades aerodinámicas de la pala y por consiguiente un rendimiento de potencia superior y/o desgaste por fatiga inferior de la pala.
- 45 En una realización preferida, el ajuste de al menos un elemento elástico activo o flap es gradual, de modo que el elemento elástico activo esté o bien en la primera forma o bien en la segunda forma. Para un elemento elástico activo, que forma al menos una parte de un compartimento para recibir un fluido, esto corresponde preferiblemente al compartimento que se infla totalmente o se evacua completamente. Una regulación gradual de este tipo corresponde a una regulación de activación/desactivación y es ventajosa porque las formas están muy bien definidas y porque se limita por consiguiente la calibración.
- 50 En otra realización preferida, la forma del elemento elástico activo se ajusta sustancialmente de manera continua de modo que el elemento elástico activo se deforma en varias fases, puede deformarse en varias fases, tal como 3, 4, 5, 6, 7, 8 etapas o de manera continua sin ninguna etapa entre la forma que proporciona el menor coeficiente de sustentación máximo y la forma que proporciona el mayor coeficiente de sustentación máximo. Para un elemento elástico activo, que forma al menos una parte de un compartimento para recibir un fluido, esto corresponde al
- 55 compartimento que se llena parcialmente en etapas más pequeñas. Una regulación sustancialmente continua es particularmente ventajosa porque el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo puede ajustarse de manera muy delicada, con lo que puede realizarse la operación más cerca de la situación óptima.
- 60 Otra realización de un método de operación de una turbina eólica que tiene una pala de turbina eólica según la invención implica un algoritmo de control adaptativo o incluso inteligencia artificial. Esto es ventajoso cuando la pala

de turbina eólica comprende planos aerodinámicos ajustables individualmente a diferentes distancias desde la raíz de pala. Por ejemplo, se ha encontrado que esta realización del método de operación es particularmente ventajosa para una turbina eólica que comprende una pluralidad de elementos elásticos activos y/o una pluralidad de flaps y especialmente pero sin limitarse a palas de turbina eólica en las que el al menos uno del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y la(s) flap(s) puede ajustarse a más de dos formas, tal como ajustarse de manera continua puesto que esto proporciona un gran número de configuraciones posibles del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s).

En una realización muy preferida, el elemento elástico y/o los flaps se combinan con un sistema de control tanto con un tiempo de reacción rápida como con un dispositivo de retroalimentación y monitor que permite que el elemento elástico y los flaps se posicionen para una reducción de carga máxima. Cuando se monitorizan las fuerzas de manera constante, un sistema de control adaptativo puede reposicionar los flaps y los elementos elásticos durante ciclos de optimización iterativa para una máxima reducción de carga o producción de potencia. La combinación de una pluralidad de elementos elásticos activos y un dispositivo de control adaptativo permite que la turbina eólica reduzca de manera efectiva la carga desde la frecuencia propia de la pala amortiguando la amplitud de las oscilaciones de la pala. Además una variación de la velocidad del viento en la dirección de la envergadura se reducirá de manera efectiva con la combinación de elementos elásticos activos y un dispositivo de control adaptativo.

El método comprende las etapas de establecer al menos una de la velocidad del viento entrante, emisión de ruido y deformación de la pala; y basándose en inteligencia artificial establecer una configuración de una pluralidad del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y/o flap(s) de la pala. El establecimiento de la configuración se refiere preferiblemente a todos los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s) de la pala, aunque en algunos casos puede ser ventajoso que el establecimiento de la configuración sólo se refiera a algunos del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s) de la pala. La configuración establecida deberá optimizar el rendimiento de potencia de la turbina eólica dentro de un nivel permisible de deformación en la pala de turbina eólica y/o dentro de un nivel permisible de emisión de ruido. Finalmente, el método comprende la etapa de ajustar el/los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s) de manera correspondiente. La configuración de la pluralidad del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y/o flap(s) se optimiza preferiblemente una multiplicidad de veces, tal como 8, 10, 20 o más veces, durante una rotación del rotor que comprende la pala puesto que esto permite operar la pala mediante una variación dependiente del radio individual de la sección del perfil aerodinámico.

Con inteligencia artificial se hace referencia en el presente documento a un sistema de autoaprendizaje o autoajuste, tal como un sistema que puede operarse mediante lógica difusa.

La invención también se refiere al uso de una pala de turbina eólica según el primer aspecto de la invención para una turbina eólica que puede operarse mediante una variación dependiente del radio individual de la sección del perfil aerodinámico. La variación dependiente del radio individual de la sección del perfil aerodinámico es particularmente ventajosa para turbinas eólicas muy grandes, tales como turbinas eólicas con diámetros de rotor de aproximadamente 80 metros, 100 metros, 120 metros o superior, puesto que la variación cíclica de la velocidad del viento entrante para palas grandes de este tipo varía considerablemente. Esta diferencia puede no ajustarse suficientemente mediante un paso regular porque la variación de la velocidad del viento entrante para palas grandes de este tipo depende mucho del radio. Dicho de otro modo, la variación cíclica de la velocidad del viento entrante es mucho menor para partes de la pala hacia la raíz de pala que para partes de la pala hacia la punta de pala.

Un aspecto adicional de la invención se refiere a una turbina eólica, que comprende al menos una pala de turbina eólica según el primer aspecto de la invención. Esta turbina eólica es particularmente ventajosa porque proporciona opciones muy precisas para la optimización del perfil aerodinámico durante el uso y por consiguiente permite la producción de más energía en muchos casos con una menor carga por fatiga y/o una menor emisión de ruido que las turbinas eólicas tradicionales.

Una realización preferida de la turbina eólica según la invención comprende además un anemómetro dispuesto en un buje de la turbina eólica. El anemómetro está conectado funcionalmente a una unidad de control, unidad de control que puede controlar la forma de un elemento elástico activo de dicha al menos una pala de turbina eólica. Es particularmente ventajoso usar un anemómetro láser y disponer el anemómetro láser a un ángulo no horizontal y que el anemómetro láser sea de un tipo que pueda medir la velocidad del viento entrante a diversas distancias desde el anemómetro láser. De este modo, puede medirse la velocidad del viento en una pluralidad de niveles verticales delante de la(s) pala(s) de turbina eólica de modo que el perfil aerodinámico de la(s) pala(s) puede ajustarse según la velocidad del viento entrante en ese momento durante el uso. De este modo, la pala de turbina eólica puede ajustarse, por ejemplo, para tener en cuenta ráfagas de viento antes de que la ráfaga de viento realmente llegue a la pala, reduciendo por consiguiente considerablemente el daño por fatiga a la pala.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se explicará la invención en más detalle con referencia a realizaciones a modo de ejemplo así como a los dibujos, en los que

la figura 1 muestra un perfil aerodinámico con un elemento elástico activo en la primera y la segunda forma y diagramas de sustentación correspondientes,

la figura 2 muestra un perfil aerodinámico con elementos elásticos activos solapados y diagramas de sustentación correspondientes,

5 la figura 3 muestra un perfil aerodinámico con un elemento elástico activo y un flap y diagramas de sustentación correspondientes,

la figura 4 muestra la sección transversal de una pala de turbina eólica según la invención con un medio de actuador lineal,

10 la figura 5 muestra la sección transversal de una pala de turbina eólica según la invención con un sistema de distribución de fluido,

la figura 6 muestra la sección transversal de una pala de turbina eólica según la invención con un sistema de distribución de fluido,

la figura 7 muestra una parte de una pala de turbina eólica con elementos elásticos activos dispuestos extremo con extremo,

15 la figura 8 muestra un ejemplo de un principio de operación de la pala de turbina eólica según la invención,

la figura 9 muestra una pala de turbina eólica y un principio de operación de palas de turbina eólica por ejemplo con variación cíclica.

Todas las figuras son muy esquemáticas y no necesariamente a escala, y muestran sólo partes que son necesarias con el fin de dilucidar la invención, omitiéndose otras partes o sugiriéndolas simplemente.

20 **Descripción de los dibujos**

La pala de turbina eólica según la invención se fabrica normalmente mediante infusión de resina al vacío. El refuerzo principal está dispuesto normalmente en la pared de pala, o en un larguero dispuesto dentro de las paredes de pala. La figura 1A muestra un ejemplo de un perfil de una pala de turbina eólica 2 con una curvatura diferente de la línea de cuerda (correspondiente al eje x). La pala tiene un lado de succión 4 y un lado de presión 6 conectados en el borde de ataque 8 y el borde de salida 10. La pala comprende además un elemento elástico activo 12 dispuesto en el lado de presión. El elemento elástico activo se muestra como una línea discontinua (indicada mediante NACA 62614 I) y corresponde al elemento elástico activo en el estado expandido. El elemento elástico activo forma parte de un compartimento 14 para recibir un fluido, tal como aire.

30 En la figura 1B, se muestra una parte de la figura 1A correspondiente a de 0,6 a 0,9 de la cuerda. Se observa particularmente que el espesor en el elemento elástico aumenta con la expansión del elemento elástico activo. En este caso, el aumento en el espesor es del orden del 30-40% en la flecha correspondiente a una longitud de cuerda de aproximadamente 0,77 desde el borde de ataque. Resultados experimentales han mostrado que un aumento en el espesor del orden del 10-150% en al menos una parte del intervalo de longitud de cuerda entre 0,65 - 0,9 desde el borde de ataque llevará normalmente a propiedades adecuadas de la pala.

35 En la figura 1C, se proporciona una representación gráfica del coeficiente de sustentación c_L en función del ángulo de ataque, α , para el perfil en la figura 1A. Se observa que la representación gráfica correspondiente al perfil con el elemento elástico activo en el estado deformado muestra un coeficiente de sustentación sustancialmente menor en todo el intervalo mostrado y particularmente la sustentación máxima establecida como el coeficiente de sustentación máximo para cada curva es también menor para el perfil con el elemento elástico activo deformado. Esto se observa más claramente en la figura 1D, en la que la reducción del coeficiente de sustentación, c_L , en comparación con el perfil NACA63615 no modificado se presenta en función del ángulo de ataque, α . Se observa que el coeficiente de sustentación se reduce en al menos el 10% en el intervalo hasta el ángulo de ataque crítico de aproximadamente $\alpha = 14^\circ$ (correspondiente al coeficiente de sustentación máximo).

45 El perfil de ejemplo es un perfil NACA 63615 aunque pueden aplicarse los mismos principios para otras palas de turbina eólica. Particularmente, se prefiere que el perfil tenga un alto coeficiente de sustentación máximo.

La figura 2 también se refiere a un perfil aerodinámico de una pala de turbina eólica según la presente invención. La figura 2A muestra el perfil con dos perfiles adicionales indicados como NACA63615 I y NACA63615 HI. Los dos perfiles adicionales pueden formarse mediante la deformación del elemento elástico activo en dos etapas, disponiendo un elemento elástico activo con dos compartimentos o dos elementos elásticos activos individuales uno sobre otro en la sección mostrada en la figura 2A. El diagrama de sustentación de los tres perfiles se muestra en la figura 2B. Se observa que el coeficiente de sustentación disminuye con el tamaño de la desviación del perfil aerodinámico desde el perfil aerodinámico original, no deformado indicado con NACA 63615. Se observa la misma tendencia en la figura 2C, en la que la disminución del coeficiente de sustentación para los dos planos

aerodinámicos ajustados se muestra con respecto al coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico original, no deformado.

La figura 3 también se refiere a un perfil aerodinámico para una pala de turbina eólica según la presente invención. La figura 3A muestra el perfil original junto con un perfil con el elemento elástico activo deformado (NACA 63615 I) y un perfil tanto con el elemento elástico activo deformado como con el flap 16 doblada hacia arriba. En la figura 3, se muestra la región trasera de la pala en más detalle. Debe observarse que para el fin de un modelado, se utiliza un borde de salida afilado, mientras que el borde de salida aplicado de manera práctica tiene un borde de salida finito del orden de aproximadamente el 0,1 al 1% de la longitud de cuerda. El doblado del flap puede tener lugar simultáneamente con la deformación del elemento elástico activo, o el doblado del flap puede tener lugar en una etapa separada tal como se indica en este caso. El diagrama de sustentación para los tres perfiles mostrados en la figura 3A se muestra en la figura 3C. Se observa que el doblado del flap hacia el lado de succión favorece considerablemente la disminución del coeficiente de sustentación. Esto es incluso más evidente en la figura 3D, en la que se muestra la disminución en el coeficiente de sustentación para los perfiles con respecto al perfil aerodinámico original, no deformado. En este caso se observa que la disminución en la sustentación para el perfil aerodinámico con el flap doblada hacia el lado de succión es del orden del 30% o más por debajo del ángulo de ataque crítico.

Las secciones transversales de pala mostradas en la figura 4 indican cómo pueden utilizarse actuadores lineales 22 para provocar la deformación del elemento elástico activo 12. En la figura 4A, el elemento elástico activo 12 se muestra en la forma deformada. El esquema básico en la figura 4A tiene cuatro actuadores lineales en el plano de la sección transversal, aunque pueden usarse o bien más o bien menos actuadores en función del tamaño de la pala real, de modo que normalmente cuanto más grande es la pala, más actuadores habrá. Además, el número requerido de actuadores también depende de la flexibilidad del elemento elástico activo. En la figura 4B, se muestra la misma sección transversal de pala, con el elemento elástico activo en el estado no deformado y los actuadores en un estado comprimido. Los actuadores se muestran posicionados sobre la pared de pala rígida 20, aunque en muchos casos preferiblemente los actuadores pueden integrarse o sumergirse en la pared de pala.

En la figura 5 se muestra una sección transversal de una pala de turbina eólica con un elemento elástico activo adaptado para la deformación mediante la entrada/recuperación de fluido al interior del compartimento 14. En la figura 5A, la pala también comprende un sistema de distribución de fluido 24. El sistema está formado básicamente por dos tubos 24 dispuestos sustancialmente ortogonales al plano de la sección transversal. Los tubos están en comunicación con el compartimento 14 a través de accesorios de conexión (no numerados). Los tubos pueden ser, por ejemplo, un tubo para distribuir el fluido al compartimento (preferiblemente el tubo hacia el borde de ataque) y un tubo para devolver el fluido desde el compartimento a una unidad para distribuir el fluido, tal como una bomba (no mostrada). Los tubos pueden conectarse a compartimentos adicionales dispuestos en otras secciones transversales de la pala. Un sensor 26, tal como un manómetro, está dispuesto en comunicación con el compartimento, de modo que puede establecerse la presencia/ausencia de fluido y/o la presión del fluido durante el uso. El sistema descrito en la figura 5A puede usarse, por ejemplo, para un gas en circulación, tal como aire o nitrógeno, o para un líquido en circulación, tal como agua u otro fluido hidráulico.

La figura 5B ilustra una sección transversal de otra realización de la turbina eólica según la invención. En este caso, sólo está presente un sistema de distribución o tubo 24. Esta realización puede ser particularmente adecuada en dos situaciones distintas.

En el primer caso, puede utilizarse cuando el elemento elástico activo se opera mediante presión de modo que durante el uso el compartimento se expande por aire u otro gas que entra desde el sistema de distribución de fluido 24 a través de la válvula de recepción 24 y al interior del compartimento 14. El compartimento se contrae cerrando la válvula de recepción que conecta el sistema de distribución 24 al compartimento y abriendo la válvula de descarga 28 de modo que el elemento elástico activo vuelve a un estado relajado en el que el compartimento se contrae descargando el aire comprimido desde el compartimento. Esto requiere que el estado de equilibrio del elemento elástico activo corresponda al compartimento que se expande.

En otro caso, la pala con la sección transversal ilustrada en la figura 5B puede operarse mediante vacío, de modo que durante el uso, el compartimento se expande por aire que entra desde la superficie de la pared de pala 20 a través de la válvula de recepción 28. Debe observarse que la válvula 28 ha cambiado su finalidad del modo de descarga en el caso anterior al modo de recepción en el presente caso. El estado relajado del compartimento 14 deberá ser para el compartimento que va a expandirse (tal como se muestra en la figura 5B). Esto es particularmente ventajoso desde el punto de vista de la seguridad, puesto que el estado relajado proporciona un perfil aerodinámico con un menor coeficiente de sustentación máximo y por consiguiente tenderá a disminuir la respuesta del viento en el caso poco probable de fallo. Para contraer el compartimento, debe cerrarse la válvula de recepción 28 y debe abrirse la válvula que conecta el compartimento 14 al sistema de distribución. El sistema de distribución debe conectarse a un sistema de vacío, tal como una bomba de vacío para extraer el aire del compartimento.

La figura 6 es una sección a lo largo de la longitud de la pala de la figura 5 en el plano indicado mediante la línea discontinua A---A. Por tanto el tubo del sistema de distribución 24 es preferiblemente el tubo de retorno. Esto

también se observa en la figura 6 en la que la conexión a los compartimentos 14 del elemento elástico activo 12 está dispuesta cerca del extremo del compartimento 14 hacia la punta de la pala. Una válvula 28 está dispuesta en la conexión entre el compartimento 14 y el sistema de distribución. La válvula puede ser por ejemplo una electroválvula u otra válvula que pueda operarse mediante una unidad de control (no mostrada). La ventaja de la disposición de la conexión entre el compartimento y el sistema de distribución se basa principalmente en el fluido que se fuerza hacia el extremo de punta del compartimento mediante la fuerza centrífuga durante el uso. Esto ayudará a vaciar el compartimento durante el uso.

En la figura 7 se muestra una pieza de una pala de turbina eólica 2. La sección de la pala, que se observa en la figura 7, comprende dos elementos elásticos activos 12. Los elementos elásticos activos se conectan en la dirección longitudinal de la pala. La conexión 30 entre los elementos elásticos activos adyacentes está preparada preferiblemente de modo que no estén presentes cambios abruptos en la forma de la pala en ninguna configuración de los elementos elásticos activos. Con ningún cambio abrupto quiere decirse también en este caso cambios en la dirección longitudinal de la pala y no sólo de manera transversal a la longitud de la pala. Esto reduce la probabilidad de que el flujo de aire sobre la superficie de la pala se separe de forma prematura, es decir, se aleje del borde de salida.

En términos generales, se prefiere que el/los elemento(s) elástico(s) activo(s) y/o flap(s) estén dispuestos en la parte más externa de la pala, tal como los 2/3 más externos de la longitud de la pala o, más preferiblemente, el 1/2 más externo de la pala, puesto que la parte externa de la pala representa la mayor parte del rendimiento de potencia. Además, debido al momento de la distancia desde la raíz de pala, las partes más externas de la pala tienden también a provocar una gran parte del desgaste por fatiga, que puede reducirse considerablemente mediante las palas de turbina eólica y el método según la presente invención.

La figura 8 se refiere a un principio general preferido de operación de una pala de turbina eólica según la invención. La figura 8 indica la respuesta deseada a un cambio en la velocidad del viento entrante. Éste puede ser o bien el viento entrante local en el propio elemento elástico activo en el instante de la operación, o un viento general promediado a lo largo del tiempo o a lo largo de la posición por la longitud de la pala. El eje x indica la velocidad del viento entrante. Dos niveles de velocidad del viento umbral se indican con 1 y 2. Comenzando desde la izquierda, la primera mitad de la representación gráfica indicó cómo reaccionar a una disminución en la velocidad del viento entrante. En el lado izquierdo de extremo, el elemento elástico activo debe configurarse en la segunda forma, es decir con un coeficiente de sustentación máximo relativamente bajo, $C_{L,max 2}$. Cuando el viento entrante alcanza el umbral superior 1 (indicado por A), no debe tener lugar ningún cambio en la configuración del elemento elástico activo, pero cuando el viento entrante alcanza el umbral inferior 2 (indicado por B), entonces la configuración del elemento elástico activo debe cambiar a la primera forma, es decir con un coeficiente de sustentación máximo relativamente alto, $C_{L,max 1}$. De manera similar, cuando la velocidad entrante se aumenta gradualmente de manera correspondiente al lado derecho de la representación gráfica. Cuando la velocidad del viento entrante alcanza el umbral inferior 2 (indicado por C), entonces no tiene lugar ningún cambio, mientras que cuando la velocidad del viento entrante alcanza el umbral superior 1, el elemento elástico activo se desplaza a la primera forma, es decir con un coeficiente de sustentación máximo relativamente bajo, $C_{L,max 2}$.

El cambio retardado permite un margen de seguridad. El margen de seguridad puede limitarse según la velocidad del cambio de configuración y la tasa de establecimiento de la velocidad del viento entrante, de modo que cuanto más rápido sea el cambio de configuración y más rápida la tasa de establecimiento de la velocidad del viento entrante, más estrecho será el margen de seguridad que debe utilizarse. Además, el margen de seguridad garantiza que el elemento elástico activo no se mueva hacia delante y atrás sin que sea necesario. Este método de operación es particularmente adecuado para establecer una configuración óptima basándose en un viento entrante medio. Puede utilizarse para una pala de turbina eólica con sólo un elemento elástico activo, aunque solapando varios patrones de control similares, normalmente uno para cada elemento elástico activo o para cada grupo de elementos elásticos activos, puede realizarse fácilmente un control preciso.

La figura 9A muestra un esquema de una pala de turbina eólica con tres elementos elásticos activos E_{α} , E_{β} y E_{γ} y tres flaps F_I , F_{II} y F_{III} . Los flaps están dispuestos en un elemento elástico activo correspondiente. Los flaps y los elementos elásticos activos pueden operarse por ejemplo mediante inteligencia artificial, tal como lógica difusa u otro sistema experto de autoaprendizaje. Alternativamente, puede proporcionarse un conjunto de reglas para la regulación de cada una de los flaps y cada uno de los elementos elásticos activos. En la figura 9B, se indica un ejemplo de un conjunto de reglas. En la parte superior de la figura 9B, se indica la velocidad del viento entrante en cada uno de los elementos elásticos activos. Se observa que la variación en la velocidad del viento entrante es mucho mayor para la parte de punta de la pala que para las partes de la pala más hacia la raíz de pala. Esto ilustra que cuanto más grande sean las turbinas eólicas, peor será el paso cíclico convencional al proporcionar un rendimiento de potencia optimizado, puesto que la inclinación de toda la pala no puede tener en cuenta las diferencias radiales en la variación de la velocidad del viento entrante. Sin embargo, se encontró que utilizando una pala de turbina eólica con medios para ajustar el perfil aerodinámico a diversas posiciones longitudinales a lo largo de la longitud de la pala, el paso cíclico puede optimizarse considerablemente aplicando sobre el paso cíclico una variación de la forma del perfil aerodinámico en función de la posición longitudinal a lo largo de la longitud de la pala. Esto puede realizarse, por ejemplo, con la pala de turbina eólica según la presente invención.

En la parte inferior de la figura 9B, se muestra un ejemplo del esquema de regulación descrito en la figura 8 para los elementos elásticos activos. Se indican valores umbral primero y segundo, T1 y T2 para cada uno de los elementos elásticos activos, E_{α} , E_{β} y E_{γ} mediante líneas longitudinales. Para esta rotación particular de la turbina eólica, se observa que el elemento elástico activo E_{γ} no se desplaza en absoluto desde la primera forma, mientras que durante el movimiento de la pala hacia la posición superior, el elemento elástico activo de punta, E_{α} , se desplaza desde la primera forma a la segunda forma antes del elemento elástico activo de centro, E_{β} . De este modo se reduce prácticamente el diámetro del rotor aerodinámico efectivo. Tras la rotación de la pala hacia la posición inferior, primer se desplaza el elemento elástico activo de centro, E_{β} , y a continuación el elemento elástico activo de punta, E_{α} , a una forma con una sustentación mayor. La variación del viento entrante en la figura 9B sólo tiene en cuenta la variación vertical del viento entrante aunque de manera similar pueden tenerse en cuenta otros efectos tales como efectos de estela o sombra de turbinas eólicas vecinas, el terreno o la torre de turbina eólica. Además, de manera similar pueden usarse otros parámetros de entrada tales como potencia de salida, emisión acústica, carga, etc. para la regulación de la forma de los elementos elásticos activos y/o los flaps. También pueden usarse otros tipos de regulación que uno o dos valores umbral tales como regulación de forma continua preferiblemente en combinación con una regulación adaptativa, para la regulación de la forma de los elementos elásticos activos.

La variación de elasticidad y meramente la longitud de la pala llevan a que la punta esté ligeramente desfasada cuando se inclina la pala. Esto es un problema por ejemplo cuando la pala se opera con paso cíclico. Si las propiedades aerodinámicas de la pala se ajustan principalmente por elementos elásticos activos y/o flaps según la presente invención, o la operación de los elementos elásticos activos se combina con la inclinación, entonces puede sortearse el retardo debido a la elasticidad de la pala y por tanto puede realizarse una operación mucho más óptima.

Además, a medida que las turbinas eólicas se vuelven más grandes, aumenta la variación en la velocidad del viento entrante realizada por una pala. Esto se compensa parcialmente mediante la inclinación, son embargo, la inclinación no puede realizar la orientación óptima del perfil aerodinámico en toda la longitud de la pala de una vez. Por tanto un ajuste de la forma del perfil aerodinámico en combinación con la inclinación es una mejora sustancial con respecto al enfoque de inclinación pura tradicional para la optimización de la operación.

Tabla de identificación

2	pala de turbina eólica
4	lado de succión
6	lado de presión
30	8 borde de ataque
10	borde de salida
12	elemento elástico activo
14	compartimento
16	flap
35	20 pared de pala de turbina eólica
22	medios de actuador
24	sistema de distribución de fluido
26	manómetro
28	válvula
40	30 conexión entre elementos elásticos activos adyacentes

REIVINDICACIONES

1. Pala de turbina eólica (2) que tiene un lado de succión (4) y un lado de presión (6), lados que están conectados en un borde de ataque (8) y un borde de salida (10), comprendiendo la pala adicionalmente un elemento elástico activo (12) dispuesto con acceso a la superficie de la pala de turbina eólica, en la que el elemento elástico activo (12) puede deformarse de una primera forma a una segunda forma, y el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 1}$, de un perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma es mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo (12) en la segunda forma, en la que dicho elemento elástico activo (12) está dispuesto de modo que el espesor de la pala cambia con la deformación del elemento elástico activo de manera que la línea de curvatura se desplaza con respecto a la línea de cuerda, caracterizada por que dicho elemento elástico activo (12) está dispuesto en el lado de presión (6) del perfil aerodinámico de la pala (2).
2. Pala de turbina eólica (2) según la reivindicación 1, en la que el elemento elástico activo (12) está dispuesto en un área entre el borde de salida (10) y aproximadamente el 40% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque, preferiblemente el elemento elástico activo está dispuesto en un área entre el borde de salida y aproximadamente el 50% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque; y/o en la que el elemento elástico activo para el perfil aerodinámico está dispuesto desde aproximadamente el 50 - 70% de la cuerda, preferiblemente desde aproximadamente el 55 - 65% de la cuerda, tal como aproximadamente el 60% de la cuerda, y hasta aproximadamente el 80 - 90% de la cuerda, preferiblemente hasta aproximadamente el 90 - 98% de la cuerda, tal como aproximadamente el 95% de la cuerda; y/o en la que dicho elemento elástico activo está dispuesto en el 50% más externo del radio de la pala; preferiblemente el elemento elástico activo está dispuesto en el 25% más externo del radio de la pala.
3. Pala de turbina eólica según la reivindicación 1 ó 2, en la que dicho elemento elástico activo está dispuesto en un área entre el espesor máximo del perfil aerodinámico de la pala y el borde de salida; y/o que comprende además un anemómetro dispuesto cerca de la punta de la pala, estando conectado funcionalmente dicho anemómetro a una unidad de control que puede controlar la forma del elemento elástico activo, siendo preferiblemente el anemómetro un anemómetro láser o un tubo de Pitot; y/o que comprende además unos medios de tensión de pala dispuestos en la pala para establecer la tensión de la pala, estando conectados funcionalmente dichos medios de tensión de pala a una unidad de control que puede controlar la forma del elemento elástico activo, siendo preferiblemente los medios de tensión de pala un medidor de deformación dispuesto en una pared de pala o un larguero de la pala, o unos medios que comprenden una fibra óptica o conductora.
4. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende una pluralidad de elementos elásticos activos dispuestos en el lado de presión de la pala, preferiblemente 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 o más elementos elásticos activos, más preferiblemente una mayoría de los elementos elásticos activos están dispuestos en un área entre el espesor máximo de los planos aerodinámicos de la pala y el borde de salida; y/o que comprende además un número de anemómetros distribuidos longitudinalmente a lo largo de la pala, en la que cada uno de dicho número de anemómetros está dispuesto cerca de uno diferente de dicha pluralidad de elementos elásticos activos, y estando conectado funcionalmente dicho número de anemómetros a una unidad de control que puede controlar la forma de dicha pluralidad de elementos elásticos activos individualmente, siendo preferiblemente el anemómetro un anemómetro láser o un tubo de Pitot; y/o en la que al menos uno de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiende de 2 a 30 metros en la longitud de la pala, preferiblemente de 5 a 20 metros; más preferiblemente al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos se extienden de 8 a 15 metros en la longitud de la pala; y/o en la que al menos uno de la pluralidad de elementos elásticos activos se extiende del 3% al 50% de la longitud de la pala de turbina eólica, preferiblemente del 5% al 40% de la longitud de la pala de turbina eólica; más preferiblemente al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos se extienden del 10% al 25% de la longitud de la pala de turbina eólica; y/o en la que al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos sustancialmente extremo con extremo de modo que un primer elemento elástico activo se extiende desde un segundo elemento elástico activo en la longitud de la pala; y/o en la que al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos uno al lado del otro de modo que un primer elemento elástico activo se extiende desde el segundo elemento elástico activo sustancialmente ortogonal a la longitud de la pala; y/o en la que al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos están dispuestos solapándose al menos parcialmente en la longitud de la pala y/o sustancialmente ortogonales a la longitud de la pala; y/o que comprende además medios para controlar la forma de los elementos elásticos activos individualmente.
5. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que la segunda forma del elemento elástico activo es un estado relajado del elemento elástico activo; y/o en la que el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 1}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma es al menos el 10% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma, preferiblemente el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 1}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma es al menos el 15% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma, más preferiblemente el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx 1}$, del perfil aerodinámico

con el elemento elástico activo en la primera forma es al menos el 20% mayor que el coeficiente de sustentación máximo, $c_{L,máx,2}$, del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma.

- 5 6. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la que la diferencia en el coeficiente de sustentación para el perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma y la segunda forma, Δc_L , debe ser mayor que el 10% del mayor de los coeficientes de sustentación a un ángulo de ataque para todos los ángulos de ataque entre $\alpha = \alpha_{máx} - 5^\circ$ y $\alpha_{máx}$, preferiblemente, $\Delta c_L > 20\%$ del mayor de los coeficientes de sustentación al ángulo de ataque para todos los ángulos de ataque entre $\alpha = \alpha_{máx} - 5^\circ$ y $\alpha_{máx}$, tal como $\Delta c_L > 25\%$ o incluso $\Delta c_L > 50\%$, más preferiblemente el intervalo de α , para el que Δc_L debe estar por encima del valor definido, es $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha_{máx} + 2^\circ$, e incluso más preferiblemente el intervalo de α , para el que Δc_L debe estar por encima del valor definido, es $\alpha = -2^\circ$ a $\alpha_{máx} + 3^\circ$; en la que $\alpha_{máx}$ es el ángulo de ataque correspondiente al coeficiente de sustentación máximo; y/o en la que el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma, $c_{L,máx,1}$, es mayor que 1,2 y/o el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma, $c_{L,máx,2}$, está por debajo de 1,0, en la que el coeficiente de sustentación máximo corresponde a Re en el intervalo de 1 - 10 millones y un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso; preferiblemente $c_{L,máx,1}$ es mayor que 1,25 y/o $c_{L,máx,2}$ está por debajo de 0,9, en la que los coeficientes de sustentación máximos corresponden a Re en el intervalo de 1 - 10 millones y un flujo bidimensional que pasa por una superficie de perfil liso; y/o en la que la curvatura del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma difiere de la curvatura del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la segunda forma, y la diferencia en la curvatura es una distancia de al menos el 0,25% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 10% de la línea de cuerda; preferiblemente la diferencia en la curvatura es una distancia de al menos el 0,25% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 15% de la línea de cuerda; más preferiblemente la diferencia en la curvatura es una distancia de al menos el 0,30% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 10% de la línea de cuerda; y lo más preferiblemente la diferencia en la curvatura es una distancia de al menos el 0,30% de la cuerda ortogonal a la línea de cuerda para una parte del perfil aerodinámico correspondiente a al menos el 15% de la línea de cuerda; y/o en la que la línea de curvatura del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma se desvía en al menos el 1,5% de la longitud de cuerda ortogonalmente desde la línea de cuerda del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma en al menos el 10% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida; preferiblemente en al menos el 20% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida, tal como en al menos el 30% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida; más preferiblemente la línea de curvatura del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma se desvía en al menos el 3% de la longitud de cuerda ortogonalmente desde la línea de cuerda del perfil aerodinámico con el elemento elástico activo en la primera forma en al menos el 10% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida; preferiblemente en al menos el 20% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida, tal como en al menos el 30% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida.
- 40 7. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el elemento elástico activo comprende un compartimento para recibir un fluido; y/o en la que el elemento elástico activo en combinación con una parte rígida de la pala de turbina eólica forma un compartimento para recibir un fluido; y/o que comprende además una válvula de recepción para controlar el transporte de fluido a dicho compartimento, estando dispuesta dicha válvula de recepción cerca del compartimento que va a controlarse y estando conectada funcionalmente dicha válvula de recepción a dicho compartimento; y/o en la que la válvula de recepción está dispuesta cerca de un extremo del compartimento hacia la raíz de la pala; y/o que comprende una válvula de descarga para controlar el transporte de fluido desde dicho compartimento, estando dispuesta dicha válvula de descarga cerca del compartimento que va a controlarse y estando conectada funcionalmente dicha válvula de descarga a dicho compartimento; y/o en la que la válvula de descarga está dispuesta cerca de un extremo del compartimento hacia la punta de la pala; y/o en la que la válvula de descarga está dispuesta para descargar el fluido a una superficie de la pala de turbina eólica.
- 55 8. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende además unos medios de detección, tales como un manómetro o un caudalímetro, estando conectados funcionalmente los medios de detección al compartimento y siendo capaces de establecer dichos medios de detección un volumen de fluido en el compartimento por ejemplo a través de la presión del fluido en el compartimento o el flujo de fluido a y/o desde el compartimento; y/o que comprende además un sistema de distribución de fluido en comunicación con el compartimento, preferiblemente a través de dicha válvula de recepción y/o dicha válvula de descarga; y/o que comprende además unos medios para transportar el fluido, estando dichos medios en comunicación con el sistema de distribución de fluido.
- 60 9. Pala de turbina eólica según la reivindicación 8, en la que el fluido es un gas.
10. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende además un flap dispuesto cerca del borde de salida del perfil aerodinámico; siendo dicho flap activo en el sentido de que puede

accionarse mediante unos medios de actuador entre una primera posición y una segunda posición; el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el flap en la primera posición es mayor que el coeficiente de sustentación máximo del perfil aerodinámico con el flap en la segunda posición.

- 5 11. Pala de turbina eólica según la reivindicación 10, en la que el flap se extiende desde entre el 80 y el 90% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque hasta el borde de salida, preferiblemente el flap se extiende desde entre aproximadamente el 85% de la longitud de cuerda desde el borde de ataque hasta el borde de salida; y/o en la que la segunda posición del flap es hacia el lado de succión del perfil aerodinámico en comparación con la primera posición del flap, y la segunda posición del flap es un estado relajado del flap.
- 10 12. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 10 u 11, que comprende una pluralidad de flaps dispuestos cerca del borde de salida de la pala, preferiblemente 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 o más flaps dispuestos cerca del borde de salida; y/o en la que al menos una de la pluralidad de flaps se extiende de 2 a 20 metros en la longitud de la pala, preferiblemente de 5 a 15 metros; más preferiblemente al menos dos de la pluralidad de elementos elásticos activos se extienden de 5 a 15 metros en la longitud de la pala; y/o en la que al menos una de la pluralidad de flaps se extiende del 3% al 50% de la longitud de la pala de turbina eólica, preferiblemente del 5% al 40% de la longitud de la pala de turbina eólica; más preferiblemente al menos dos de la pluralidad de flaps se extienden del 10% al 25% de la longitud de la pala de turbina eólica; y/o en la que la pluralidad de flaps están dispuestas una extendiendo la otra en la dirección de longitud de la pala y un conector elástico está dispuesto entre flaps adyacentes de modo que los flaps formen una superficie continua libre de escalones en la dirección longitudinal de la pala; y/o en la que los medios de actuador pueden accionarse mediante un fluido, preferiblemente mediante el mismo fluido que los elementos elásticos activos; y/o en la que los medios de actuador están conectados funcionalmente al sistema de distribución de fluido, sistema de distribución de fluido que está en comunicación con el elemento elástico activo.
- 15 13. Subunidad para su instalación en una pala de turbina eólica, pala de turbina eólica que tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un borde de salida para formar una superficie de pala rígida, comprendiendo dicha subunidad un elemento elástico activo adaptado con respecto a la forma y el tamaño para conectarse a una parte de superficie rígida de una pala de turbina eólica, de modo que durante la operación de una turbina eólica que comprende dicha pala de turbina eólica con dicha subunidad, dicho elemento elástico activo es deformable de una primera forma a una segunda forma, de modo que el espesor de la pala cambia con la deformación del elemento elástico activo de manera que la línea de curvatura se desplaza con respecto a la línea de cuerda de la pala; y el coeficiente de sustentación máximo de la estructura combinada de la subunidad y la pala de turbina eólica en la primera forma, $c_{L,máx 1}$, es mayor que el coeficiente de sustentación máximo de la estructura combinada de la subunidad y la pala de turbina eólica con el elemento elástico activo en la segunda forma, $c_{L,máx 2}$.
- 20 14. Método de operación de una turbina eólica que tiene una pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende las etapas de establecer la velocidad del viento entrante, preferiblemente a través de un anemómetro dispuesto en la pala de turbina eólica, y si la velocidad del viento entrante está por debajo de un primer valor umbral, tal como 10 m/s, entonces deformar un elemento elástico activo desde la segunda forma a la primera forma de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo.
- 25 15. Método según la reivindicación 14, que comprende además la etapa de, si la velocidad del viento entrante está por debajo de un segundo valor umbral, accionar el flap desde la segunda posición a la primera posición de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el flap, preferiblemente el segundo valor umbral es mayor que el primer valor umbral tal como 15 m/s.
- 30 16. Método de operación de una turbina eólica que tiene una pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende las etapas de establecer la tensión de la pala de turbina eólica, preferiblemente a través de unos medios de tensión de pala dispuestos en la pala de turbina eólica, y si la tensión está por debajo de un primer valor umbral, entonces deformar el elemento elástico activo desde la segunda forma a la primera forma de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo.
- 35 17. Método de operación de una turbina eólica que tiene una pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende las etapas de establecer la tasa de cambio de tensión de la pala de turbina eólica, preferiblemente a través de unos medios de tensión de pala dispuestos en la pala de turbina eólica, y si la tensión aumenta más rápidamente que un primer valor umbral, deformar el elemento elástico activo desde la primera forma a la segunda forma de modo que se disminuye la sustentación del perfil aerodinámico en el elemento elástico activo; y/o que comprende además la etapa de, si la velocidad del viento de tensión está por debajo de un segundo valor umbral, accionar el flap desde la segunda posición a la primera posición de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en el flap.
- 40 18. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 17, en el que la turbina eólica tiene un paso regulado y que comprende además la etapa de ajustar el ángulo de paso total de las palas según la tensión y/o velocidad del viento establecida.
- 45 50 55

- 5 19. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 18, en el que la pala de turbina eólica comprende al menos dos elementos elásticos activos dispuestos a distancias diferentes de la raíz de pala, y al menos dos de los elementos elásticos activos son independientemente deformables, comprendiendo dicho método las etapas de, para cada elemento elástico activo, establecer la velocidad del viento entrante en dicho elemento elástico activo, y si la velocidad del viento entrante está por debajo de un valor umbral local para ese elemento elástico activo, tal como 10 m/s, entonces deformar dicho elemento elástico activo desde la segunda forma a la primera forma de modo que se aumenta la sustentación del perfil aerodinámico en dicho elemento elástico activo.
- 10 20. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 19, en el que se optimizan parámetros, tales como los valores umbral, para la regulación de la operación de la turbina eólica de modo que durante la operación, la turbina eólica producirá un rendimiento de energía máximo dentro de un nivel de desgaste aceptable de la turbina eólica; y/o en el que se optimizan parámetros, tales como los valores umbral, para la regulación de la operación de la turbina eólica de modo que durante la operación la turbina eólica producirá un rendimiento de energía máximo dentro de un nivel de emisión acústica aceptable de la turbina eólica.
- 15 21. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 20, en el que se repite el ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales con una frecuencia de menos de aproximadamente 0,1 Hz, preferiblemente se repite el ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales con una frecuencia de menos de aproximadamente 0,01 Hz; y/o en el que se repite el ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales con una frecuencia de más de 10 Hz, preferiblemente con una frecuencia de más de 20 Hz, y más preferiblemente con una frecuencia de más de 40 Hz; y/o en el que se repite el ajuste de la forma de los elementos elásticos activos individuales con una frecuencia correspondiente a menos de una 8ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación, preferiblemente con una frecuencia correspondiente a menos de una 16ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación, y más preferiblemente con una frecuencia correspondiente a menos de una 40ª parte de una rotación de la pala alrededor del eje de rotación.
- 20 22. Método según la reivindicación 14 ó 21, en el que la regulación es cíclica de modo que el periodo de la regulación corresponde a una rotación del rotor de turbina eólica.
- 25 23. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 22, que comprende además la etapa de ajustar el paso individual de la pala de manera cíclica.
- 30 24. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 23, en el que se ajusta la forma de al menos un elemento elástico activo o flap gradualmente de modo que el elemento elástico activo esté o bien en la primera forma o bien en la segunda forma.
- 35 25. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 24, en el que se ajusta la forma de al menos un elemento elástico activo o flap sustancialmente de manera continua de modo que el elemento elástico activo puede deformarse en varias etapas, tal como 3, 4, 5, 6, 7, 8 etapas o de manera continua sin ninguna etapa entre la forma que proporciona el menor coeficiente de sustentación máximo y la forma que proporciona el mayor coeficiente de sustentación máximo.
- 40 26. Método de operación de una turbina eólica que tiene una pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, comprendiendo dicha pala de turbina eólica una pluralidad de elementos elásticos activos y/o una pluralidad de flaps, comprendiendo el método las etapas de establecer al menos una de velocidad del viento entrante, emisión de ruido, deformación de la pala; establecer una configuración deseada de una pluralidad del/de los elemento(s) elástico(s) activo(s) y/o flap(s) de la pala basándose en inteligencia artificial; y ajustar el/los elemento(s) elástico(s) activo(s) y flap(s) de manera correspondiente, preferiblemente se repiten las etapas del método de operación a una frecuencia correspondiente a al menos 8 veces una frecuencia de rotación de la pala de turbina eólica.
- 45 27. Uso de la pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 12 para una turbina eólica que puede operarse mediante variación dependiente del radio individual de la sección del perfil aerodinámico.
- 50 28. Turbina eólica que comprende al menos una pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
- 55 29. Turbina eólica según la reivindicación 28, que comprende además un anemómetro dispuesto en un buje de la turbina eólica, estando conectado funcionalmente dicho anemómetro a una unidad de control capaz de controlar la forma de un elemento elástico activo de dicha al menos una pala de turbina eólica, siendo preferiblemente el anemómetro un anemómetro láser dispuesto a un ángulo no horizontal y que puede medir la velocidad del viento entrante a diversas distancias desde el anemómetro láser de modo que la velocidad del viento puede establecerse durante el uso en una pluralidad de niveles verticales delante de la(s) pala(s) de turbina eólica.

Fig. 1 A)

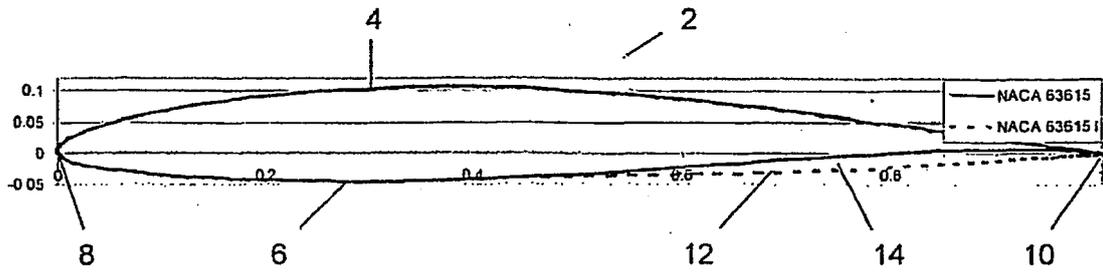


Fig. 1 B)

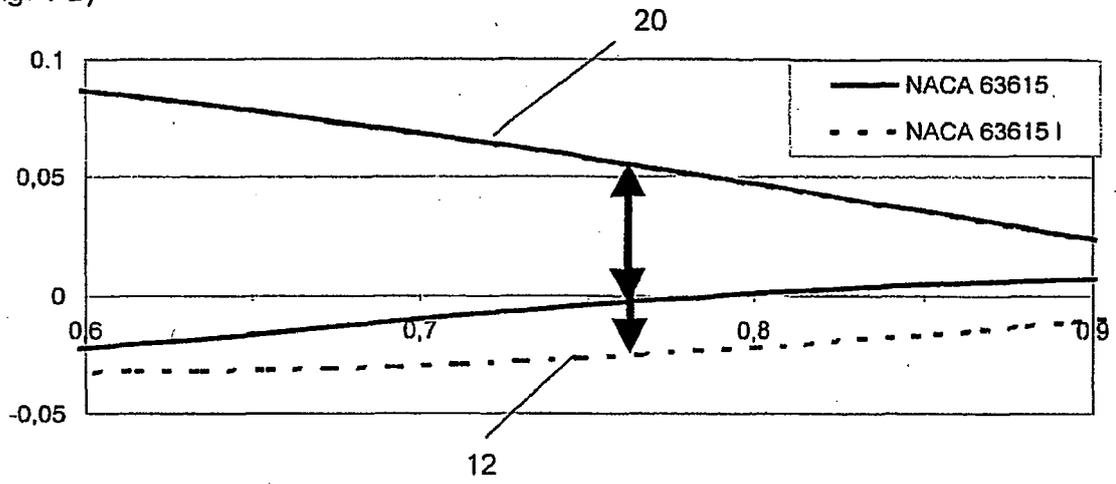


Fig. 1 C)

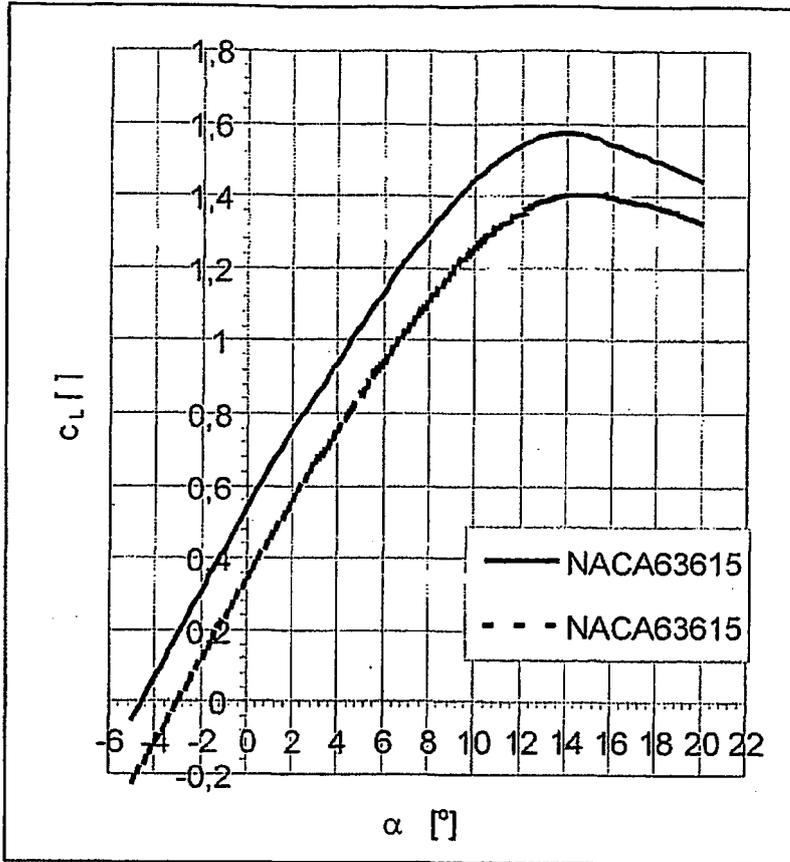


Fig. 1 D)

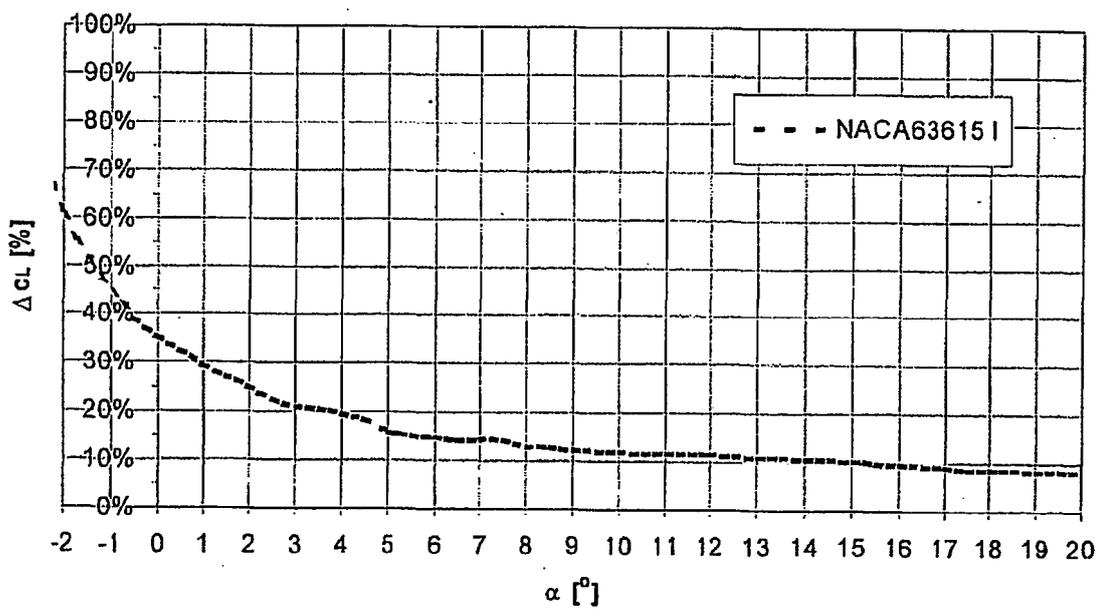


Fig. 2 A)

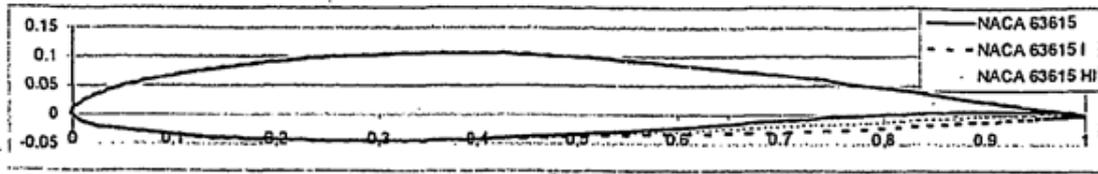


Fig. 2 B)

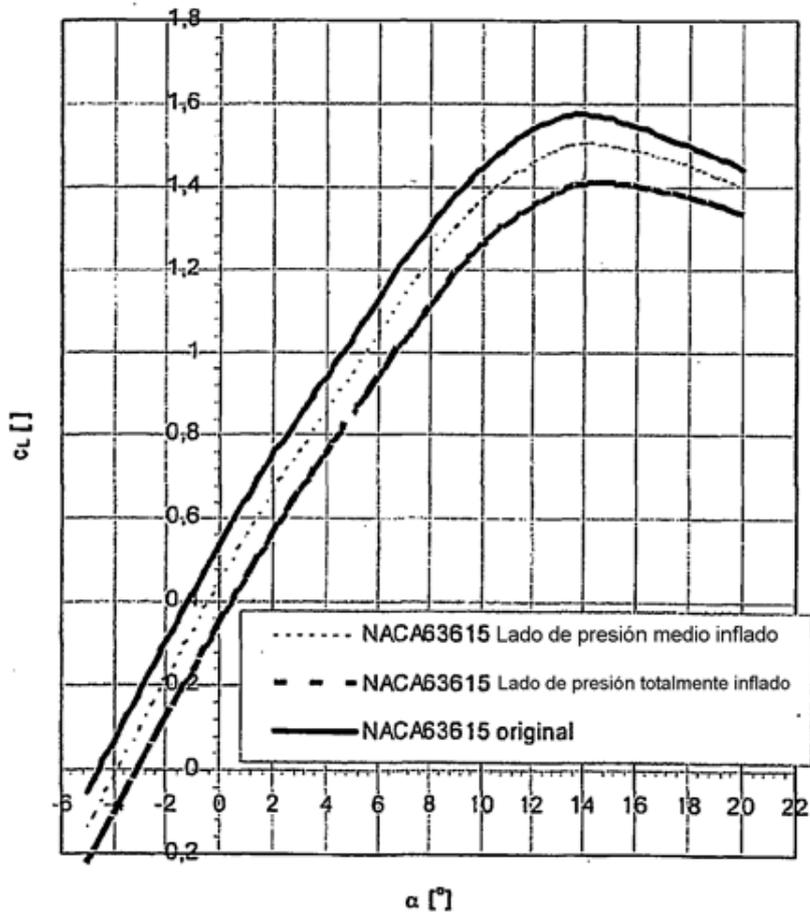


Fig. 2 C)

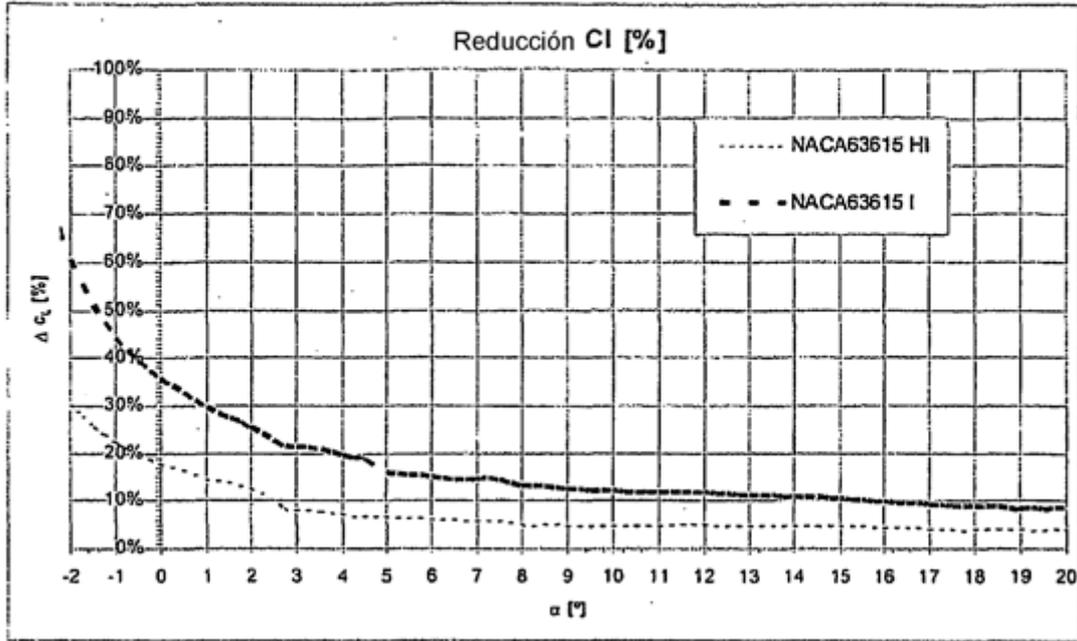


Fig. 3A)

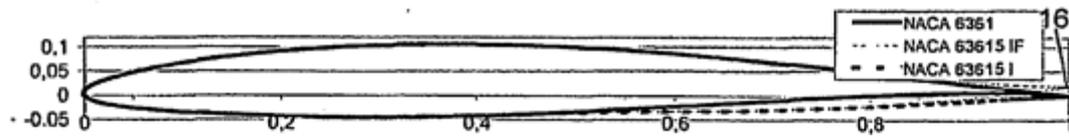


Fig. 3B)

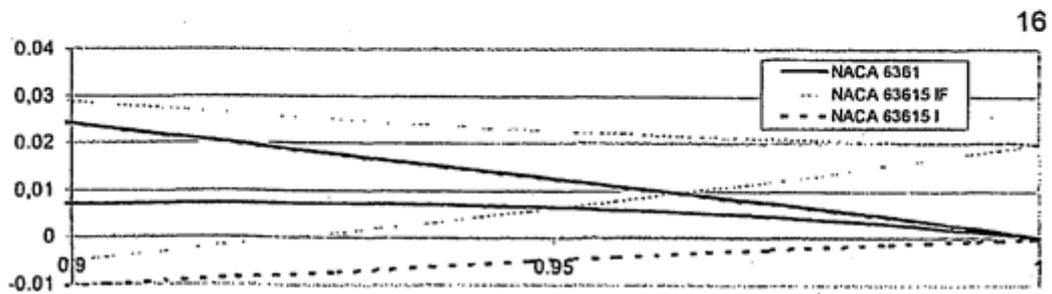


Fig. 3 C)

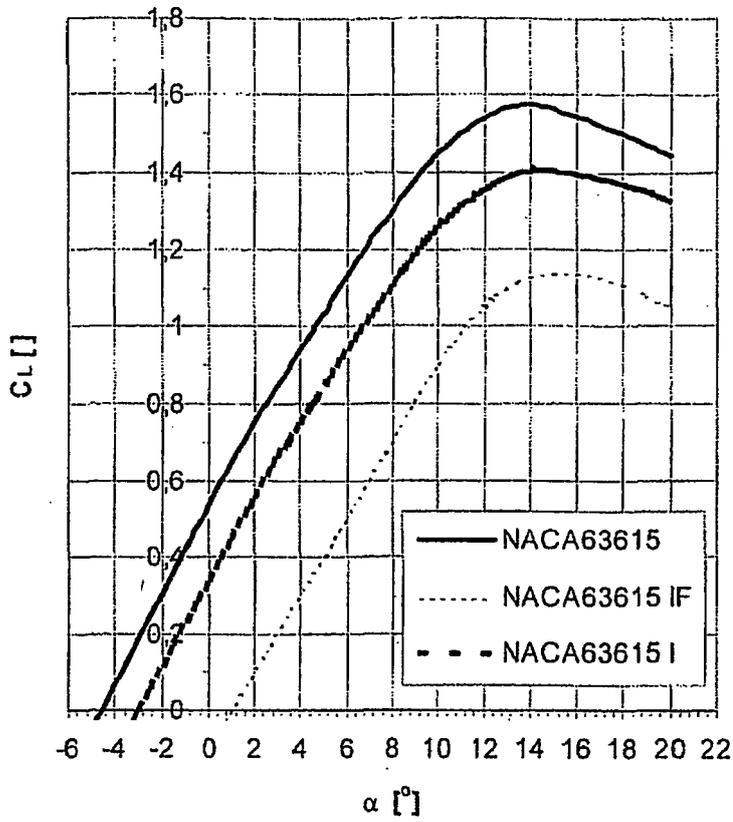


Fig. 3 D)

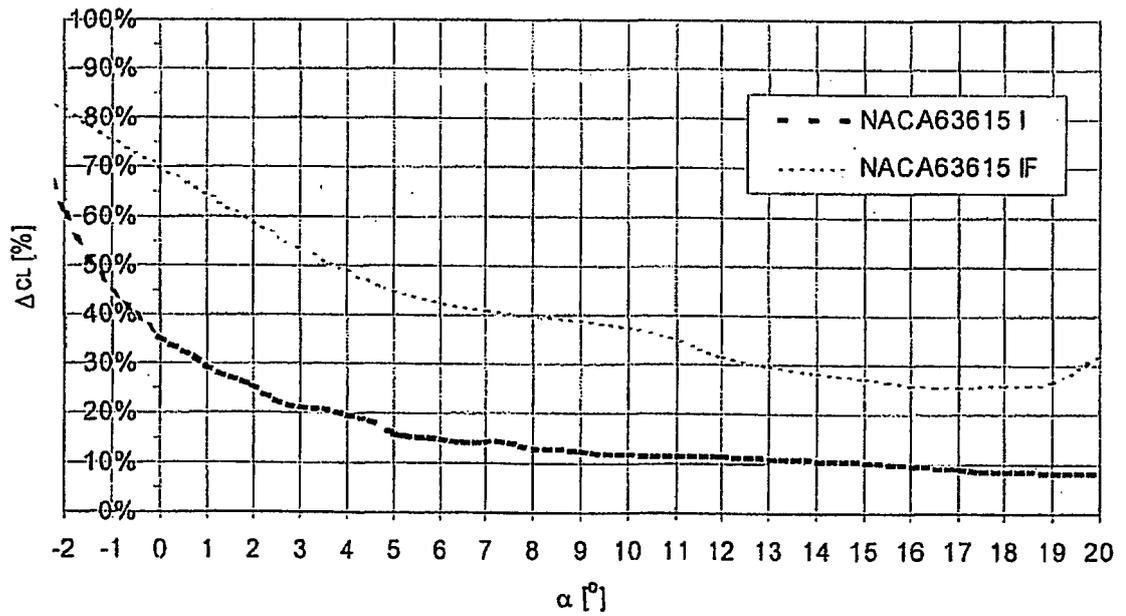


Fig. 4 A)

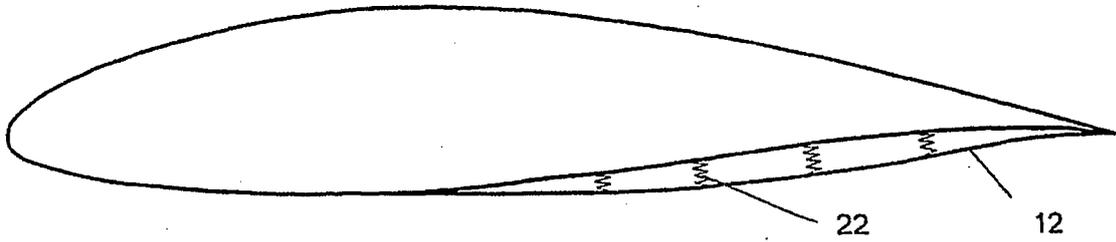


Fig. 4 B)

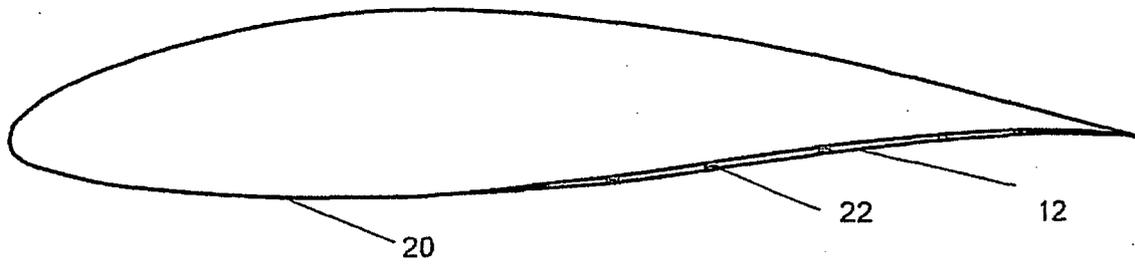


Fig. 5 A)

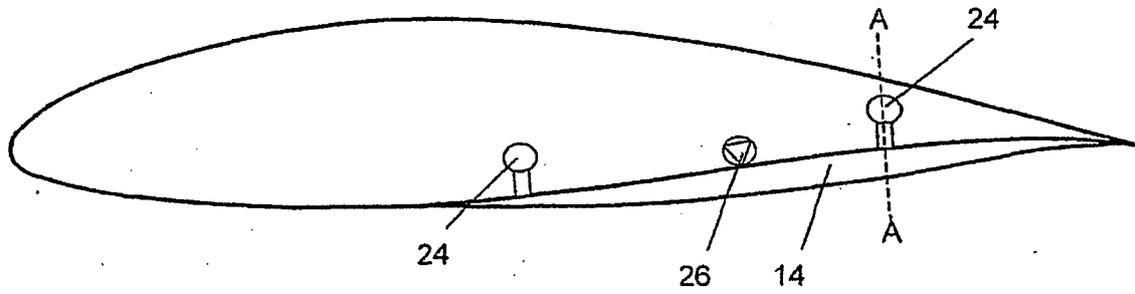


Fig. 5 B)

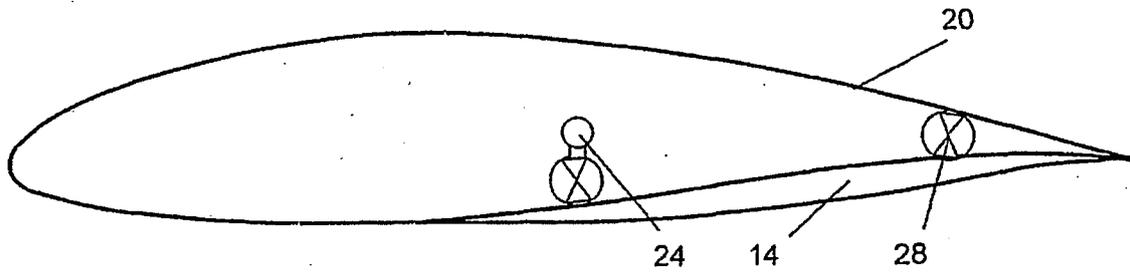


Fig. 6

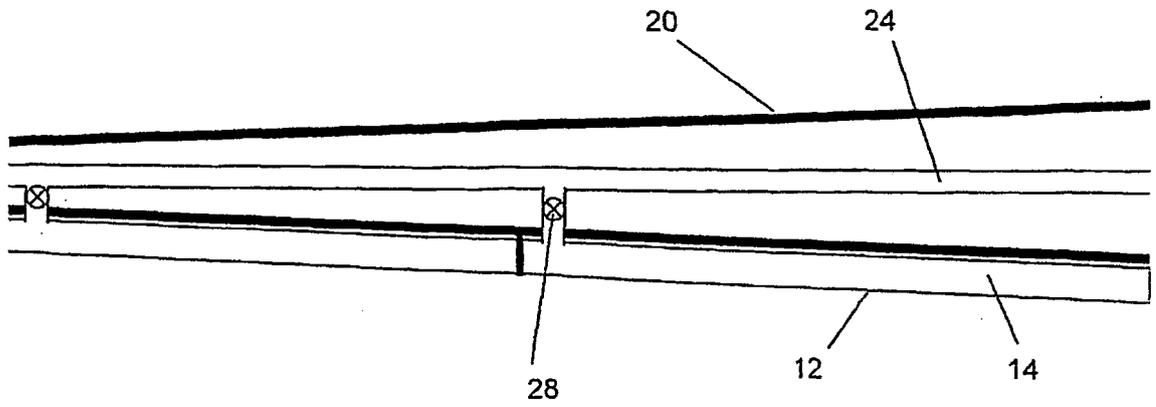


Fig. 7

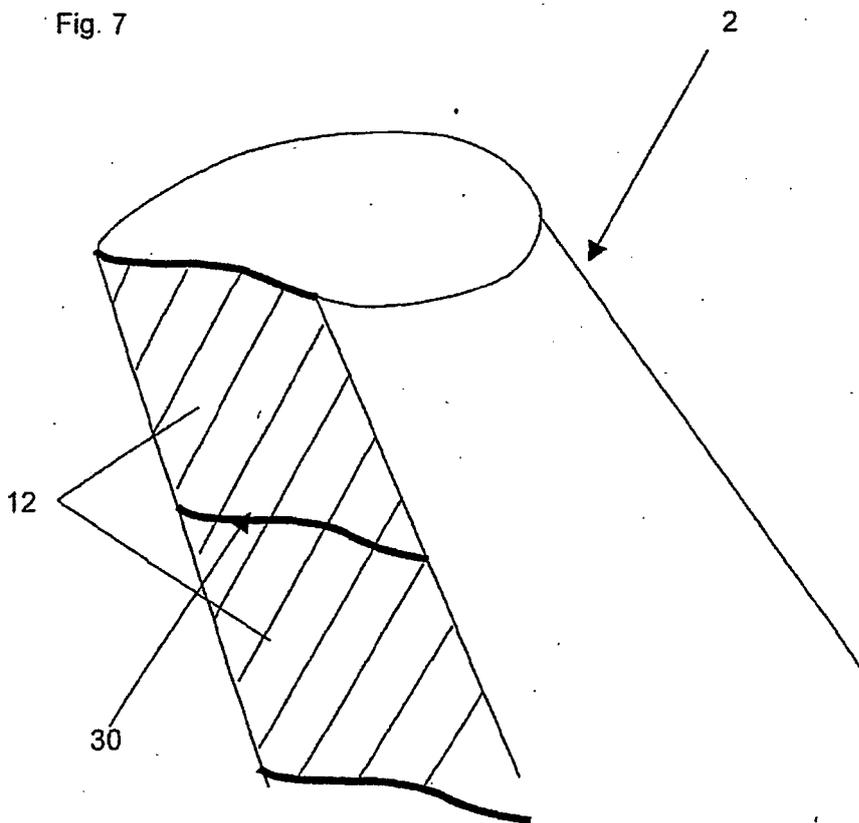


Fig. 8

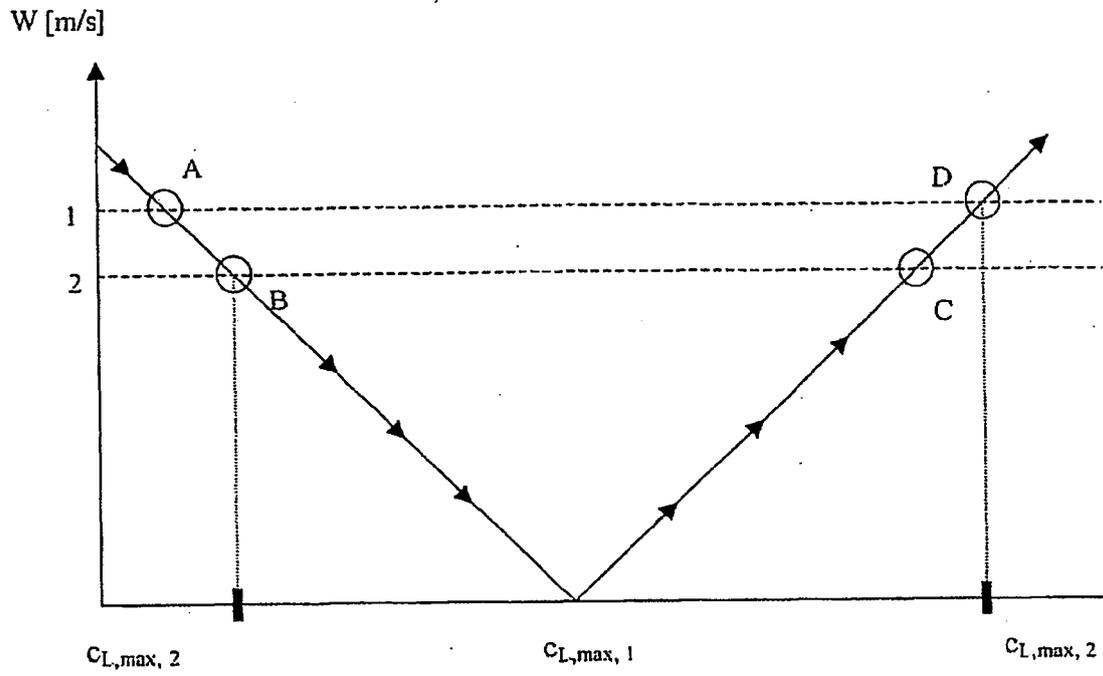


Fig. 9 A)

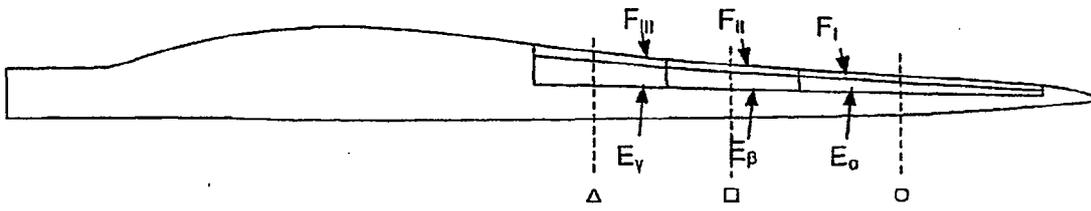


Fig. 9 B)

