

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 006 478**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 80/30 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.07.2018** **PCT/DK2018/050182**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.01.2019** **WO19015731**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.07.2018** **E 18743391 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.11.2024** **EP 3655644**

54 Título: **Pala de aerogenerador**

30 Prioridad:

20.07.2017 DK PA201770584

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.03.2025

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.00%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

HURALT, JEREMY;

KAMRUZZAMAN, MOHAMMAD y

ROWLINSON, BEN

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 3 006 478 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 aerogenerador

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a una pala de aerogenerador que tiene una punta de pala conductora. La invención también se refiere a la punta de pala conductora y a un método de reacondicionamiento de la punta de pala conductora para una pala de aerogenerador existente.

Antecedentes de la invención

10 Los aerogeneradores son vulnerables a ser impactados por rayos; algunas veces en la torre, la góndola y el buje del rotor, pero lo más comúnmente en las palas. Un evento de impacto de rayo tiene el potencial de causar daños físicos a las palas de aerogenerador y también daños eléctricos a los sistemas de control interno del aerogenerador. Los aerogeneradores se instalan a menudo en espacios abiertos lo que hace que los impactos de rayos sean una ocurrencia común. Por consiguiente, en los últimos años se ha hecho mucho esfuerzo por los fabricantes de aerogeneradores para diseñar aerogeneradores de modo que sean capaces de gestionar eficazmente la energía que se les imparte durante un impacto de rayo con el fin de evitar daños a la pala y el coste asociado del tiempo de inactividad del aerogenerador durante la reparación o la sustitución de la pala.

15 Se conocen sistemas de protección contra rayos para palas de aerogeneradores. En un ejemplo, un elemento receptor de rayos conductor de electricidad se dispone sobre una superficie exterior de la pala para recibir el impacto de rayos. Dado que el elemento receptor es conductor de electricidad, es más probable que el rayo se una al elemento receptor en preferencia al material relativamente no conductor de la pala. El elemento receptor está conectado a un cable o 'conductor de bajada' que se extiende en el interior de la pala hasta la raíz y desde allí se conecta a través de una disposición de armadura a una ruta de transferencia de carga en el buje, la góndola y la torre a un potencial de tierra. Por lo tanto, tal sistema de protección contra rayos permite que el rayo sea canalizado desde la pala hasta un potencial de tierra de manera segura, minimizando por ello el riesgo de daños. No obstante, los elementos receptores discretos son relativamente complejos de instalar durante la fabricación de la pala y, además, dejan una parte significativa del área de la pala expuesta al riesgo de impacto de rayos.

20 La observación de los efectos de los impactos de rayos sobre las palas de aerogeneradores ha revelado que la proporción más alta de impactos de rayos ocurren en las puntas de palas. Para abordar esto, el documento WO2005/031158 A2 propone una pala de aerogenerador que tiene una punta de metal macizo. Configurar la punta de la pala de esta forma hace que la punta sea altamente resiliente a los frecuentes impactos de rayos altamente energéticos y significa que se requieren eventos de inspección y mantenimiento menos a menudo. No obstante, un inconveniente de tal configuración es el desafío de integrar la punta de metal en el resto de la estructura de pala de la forma más uniforme posible, al tiempo que se asegure la robustez frente a la intemperie. Un ejemplo adicional se describe en el documento WO2015/055213 A1, en el que un módulo de punta de pala de metal se une a una pala de aerogenerador por medio de un miembro de inserción que se incorpora a la punta de la pala durante la fabricación.

30 El documento DE102005051537 A1 describe un método de unión de una parte superior de sustitución que está hecha de material conductor de electricidad. El documento US2015/217851 A1 describe un ala donde al menos una de las superficies principales comprende variaciones cíclicas en el sentido de la envergadura en o cerca del borde de ataque. El documento US8573541 B2 describe una forma de perfil aerodinámico para lograr una relación de sustentación a resistencia mejorada y para mejorar el rendimiento en ángulos de ataque más altos, con un patrón de onda tridimensional que modifica la forma de un perfil aerodinámico tradicional para coordinar el flujo de aire a través de canales en los lados tanto superior como inferior.

40 Estos receptores de rayos de punta de pala de metal macizo son conformes con la forma de la pala y se ha demostrado que son eficaces para atraer impactos de rayos, protegiendo por ello el material vulnerable de la pala de ser dañado. No obstante, se ha observado que la unión entre el receptor de punta y la pala es vulnerable al desgaste por erosión y por impacto de rayos y que, con el tiempo, los receptores de punta comienzan a mostrar erosión por calor.

Es en este contexto en el que se ha ideado la invención.

Compendio de la invención

50 Un primer aspecto de la invención proporciona una pala de aerogenerador que comprende: una parte de pala principal que tiene un eje longitudinal que se extiende entre un extremo de raíz y un extremo de punta de la parte de pala principal, y un módulo de punta de pala conductor acoplado a un sistema de protección contra rayos de la pala de aerogenerador, el módulo de punta de pala conductor está montado en el extremo de punta de la parte de pala principal y tiene un borde de ataque, un borde de salida, una superficie de barlovento que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, y una superficie de sotavento que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, en donde la parte de pala principal comprende una interfaz de punta de pala que es la parte más externa de la parte de pala principal que se engancha con y se acopla al módulo de punta de pala, en donde el borde de ataque del módulo de punta de pala tiene un perfil parecido a una onda y/o en donde al menos una de las superficies de

barlovento y sotavento del módulo de punta de pala tiene una pluralidad de surcos que se extienden hacia el borde de salida, y en donde el módulo de punta de pala tiene una longitud de cuerda en un extremo de raíz que es mayor que una longitud de cuerda de la interfaz de punta de pala.

5 El término 'conductor' se usa aquí para referirse a la capacidad del módulo de punta de pala para lograr buena conductividad eléctrica. Esto se debería interpretar en el contexto de un receptor de rayos que forma parte de un sistema de protección contra rayos para la pala de aerogenerador y/o para un aerogenerador al que está unida la pala.

10 El término 'perfil parecido a una onda' se usa aquí para referirse a la forma externa ondeada, ondulada o sinuosa del borde de ataque del módulo de punta de pala. El perfil parecido a una onda del borde de ataque puede ser como se observa en 'planta', es decir, perpendicular al eje longitudinal (o en el sentido de la envergadura) de la pala y perpendicular a la línea de cuerda local en el extremo de punta de la parte de pala principal.

15 La invención es ventajosa en el sentido de que el perfil parecido a una onda del borde de ataque del módulo de punta de pala y/o los surcos de las superficies de barlovento o sotavento del módulo de punta de pala proporcionan mejoras aerodinámicas en la punta y reducen el ruido aerodinámico. Para ser robusto frente a los impactos de rayos, el módulo de punta de pala puede tener una geometría que no sea muy adecuada para optimizar la eficiencia aerodinámica, por ejemplo, un mayor espesor mínimo de material o un radio de curvatura mínimo mayor. El borde de ataque con perfil parecido a una onda y los surcos superficiales pueden proporcionar mejoras aerodinámicas para compensar por completo o en parte el efecto aerodinámico perjudicial de los rasgos de forma que aseguran una robustez suficiente frente a impacto de rayos.

20 El perfil parecido a una onda del borde de ataque del módulo de punta de pala puede comprender una pluralidad de protuberancias redondeadas que se extienden hacia delante. En este contexto, 'hacia delante' significa en la dirección contra el flujo de aire entrante. No se pretende una alineación de flujo estricta mediante el uso de este término. Las protuberancias redondeadas crean una depresión entre cada par adyacente de protuberancias. Las protuberancias son de escala macro. Por ejemplo, las protuberancias pueden tener una dimensión del orden de milímetros o centímetros. Las protuberancias se pueden considerar como 'bultos' relativamente grandes en el borde de ataque.

30 El perfil parecido a una onda del borde de ataque del módulo de punta de pala se puede configurar para canalizar el flujo de aire sobre el módulo de punta de pala en una pluralidad de corrientes a velocidades de flujo aumentadas con relación al flujo ascendente. El borde de ataque perfilado se puede configurar para promover el denominado 'efecto tubérculo'. El efecto tubérculo funciona dividiendo o canalizando el flujo de aire aguas arriba (entrante) en corrientes más estrechas sobre la superficie aerodinámica aguas abajo. Esta división del flujo activa el flujo aumentando la velocidad de flujo de las corrientes más estrechas, retrasando el desprendimiento de flujo y la pérdida de sustentación. Canalizar el flujo de esta forma también reduce los efectos de punta aerodinámicos tridimensionales (de la pala en su conjunto) que de otro modo tenderían a permitir que el flujo se enrollara en una única lámina de vórtice en la punta de la pala. El desmoronamiento de vórtices grandes causa ruido y una menor eficiencia aerodinámica. Reduciendo el flujo tridimensional, el efecto tubérculo reduce la fuerza de los vórtices de la punta, dando como resultado una menor resistencia parásita.

40 El perfil parecido a una onda del borde de ataque del módulo de punta de pala puede ser sustancialmente sinusoidal. Los 'picos' o 'valles' del perfil parecido a una onda no necesitan seguir una línea recta y pueden ser curvos. La separación entre picos o valles adyacentes puede ser regular o algo irregular. El perfil parecido a una onda puede seguir una curva suave sin cúspide. El perfil parecido a una onda puede incluir una pluralidad de picos y una pluralidad de valles.

45 El perfil parecido a una onda puede extenderse a lo largo de sustancialmente todo el borde de ataque del módulo de punta de pala. El borde de ataque del módulo de punta de pala se extiende desde un extremo de raíz del módulo de punta de pala hasta un extremo de punta del módulo de punta de pala.

El borde trasero del módulo de punta de pala puede ser curvo. El borde trasero del módulo de punta de pala puede ser convexo (cuando se ve en planta) y, preferiblemente, el borde de salida del módulo de punta de pala está suavemente curvado y/o desprovisto de un punto de inflexión.

50 La pluralidad de surcos puede extenderse desde adyacentes al borde de ataque del módulo de punta de pala. Los surcos pueden extenderse desde una ubicación en el borde de ataque del módulo de punta de pala. Alternativamente, los surcos pueden extenderse desde una ubicación detrás del borde de ataque (en la dirección en el sentido de la cuerda aguas abajo) del módulo de punta de pala. Además, alternativamente, uno o más surcos pueden extenderse desde una ubicación adyacente al borde de ataque y uno o más surcos pueden extenderse desde una ubicación detrás del borde de ataque.

55 La pluralidad de surcos crea canales en la superficie exterior del módulo de punta de pala. Los surcos pueden extenderse en ángulo con la línea de cuerda en el extremo de punta de la parte de pala principal. En particular, los surcos pueden extenderse hacia la línea de cuerda en el extremo de punta de la parte de pala principal en la dirección hacia el borde de salida. Estos surcos son de una escala macro. Por ejemplo, los surcos pueden tener una

dimensión del orden de centímetros de longitud, y milímetros o centímetros de ancho. Cada surco puede tener un valle definido entre dos crestas adyacentes, una a cada lado del valle. Los surcos están configurados para crear un efecto de interferencia con el flujo de aire para acelerar el flujo de aire a través de los surcos. La activación del flujo a través de los surcos retrasa el desprendimiento de flujo y la pérdida de sustentación.

- 5 Aunque los surcos se pueden proporcionar en ausencia del borde de ataque con perfil parecido a una onda en algunas disposiciones, los surcos se pueden proporcionar en combinación con el borde de ataque con perfil parecido a una onda para lograr un efecto sinérgico en otras disposiciones. Mientras que el borde de ataque con perfil parecido a una onda puede promover el efecto de tubérculo descrito anteriormente, la alineación de los surcos con las corrientes más estrechas creadas por el efecto de tubérculo se puede usar para activar aún más el flujo, retrasando el desprendimiento de flujo y la pérdida de sustentación.

- 10 La pluralidad de surcos puede extenderse cada uno hasta aproximadamente el 50% al 80% de la cuerda local del módulo de punta de pala. La pluralidad de surcos puede extenderse cada uno hasta aproximadamente el 60% al 70% de la cuerda local del módulo de punta de pala. Preferiblemente, los surcos no se extienden hasta el borde de salida. Preferiblemente, los surcos terminan delante del borde de salida, por ejemplo, en una ubicación como máximo del 70% al 80% de la cuerda local desde el borde de ataque.

La pluralidad de surcos puede extenderse cada uno desde una depresión entre protuberancias adyacentes del perfil parecido a una onda en el borde de ataque del módulo de punta de pala.

La pluralidad de surcos puede tener cada uno una profundidad que disminuye en la dirección hacia el borde de salida.

- 20 La pluralidad de surcos puede tener cada uno un ancho que disminuye en la dirección hacia el borde de salida.

La pluralidad de surcos puede estrecharse suavemente cada uno hacia las superficies de barlovento o sotavento hacia el borde de salida del módulo de punta de pala.

La pluralidad de surcos puede tener cada uno un perfil redondeado, por ejemplo, formando un valle en forma de U entre crestas adyacentes en forma de U invertida.

- 25 La pluralidad de surcos puede extenderse sustancialmente de manera lineal a lo largo de su longitud. Los surcos pueden estar curvados alternativamente a lo largo de su longitud.

La pluralidad de surcos puede extenderse generalmente paralelos entre sí. Alternativamente, los surcos pueden ser convergentes o divergentes, creando ángulos pequeños (por ejemplo, menos de 5-10 grados) entre surcos adyacentes.

- 30 La pluralidad de surcos puede extenderse cada uno en un ángulo con respecto a la línea de cuerda local del extremo de punta del módulo de punta de pala. La inclinación de los surcos puede ayudar a resistir el flujo que se derrama sobre el borde interior del módulo de punta de pala y se separa de la superficie. Esto puede reducir el riesgo de desmoronamiento de vórtices que, de otro modo, aumentaría los niveles de ruido.

- 35 La pluralidad de surcos se puede proporcionar en las superficies tanto de barlovento como de sotavento del módulo de punta de pala. Los surcos de la superficie de barlovento se pueden alinear sustancialmente por encima de los surcos de la superficie de sotavento. Esta disposición puede ser particularmente preferida cuando los surcos se usan en combinación con el borde de ataque parecido a una onda de manera que los surcos de las superficies de barlovento y de sotavento se extiendan desde una depresión común en el borde de ataque. Alternativamente, y particularmente cuando los surcos no se extienden desde una depresión común en el borde de ataque (o de hecho pueden no extenderse desde una depresión en el borde de ataque en absoluto), los surcos de la superficie de barlovento pueden no estar alineados por encima de los surcos de la superficie de sotavento y pueden estar desincronizados hasta 180 grados unos con otros. Además, alternativamente, los surcos se pueden proporcionar solamente en una de las superficies de barlovento y de sotavento del módulo de punta de pala.

- 45 El módulo de punta de pala puede ser de metal. El módulo de punta de pala puede ser sustancialmente macizo, aunque se pueden proporcionar uno o más rebajes en el interior del módulo de punta de pala. El módulo de punta de pala preferiblemente consiste exclusivamente en metal. El módulo de punta de pala se puede fabricar por fundición, usando un molde de una o dos piezas, por ejemplo. El módulo de punta de pala puede ser un único componente. El material del módulo de punta de pala puede estar sustancialmente desprovisto de cavidades.

- 50 El módulo de punta de pala puede comprender un material altamente conductor de electricidad. Por ejemplo, el módulo de punta de pala puede comprender o consistir en material que tenga una conductividad eléctrica de al menos 13,8% IACS (Estándar Internacional de Cobre Recocido). El material altamente conductor de electricidad puede ser cobre o una aleación de cobre, tal como, por ejemplo, bronce.

El módulo de punta de pala puede comprender un material que tenga una temperatura de fusión alta, por ejemplo, por encima de 850 grados Celsius.

- El módulo de punta de pala está acoplado a un sistema de protección contra rayos de la pala de aerogenerador. El módulo de punta de pala puede estar conectado a un sistema de conducción descendente de modo que la energía eléctrica de un impacto de rayo se dirija lejos de la punta hacia un sistema de gestión de rayos instalado en una torre del aerogenerador. El sistema de conducción descendente puede incluir un conductor descendente que discurre a lo largo de la longitud de la parte de pala principal desde el extremo de punta hasta el extremo de raíz.
- El extremo de punta de la parte de pala principal puede estar truncado con una interfaz de punta de pala que define un borde exterior. El módulo de punta de pala puede estar configurado para ajustarse contra la interfaz de punta de pala de manera que un labio del módulo de punta de pala se superponga al borde exterior de la interfaz de punta de pala.
- Dado que el módulo de punta de pala puede estar configurado para superponerse a la punta truncada de la pala, esto puede proteger la unión entre los dos componentes de la erosión debida a la intemperie. La geometría superpuesta puede sellarse con la pala para proteger la unión de la erosión debida al calentamiento eléctrico del módulo de punta de pala que se experimenta durante los impactos de rayos.
- El borde también promueve una geometría más gruesa y más redondeada para el módulo de punta de pala. Para lograr una robustez ideal al impacto de rayos, se puede preferir una profundidad de material de alrededor de 10 mm. No obstante, cuanto más grueso sea el material, es probable que el rendimiento aerodinámico sea peor (especialmente en el borde de salida) y, así, es probable que se prefieran profundidades de menos de 10 mm. De nuevo, para lograr una robustez ideal al impacto de rayos, se puede preferir un radio de curvatura de alrededor de 10 mm. No obstante, cuanto mayor sea el radio de curvatura, es probable que el rendimiento aerodinámico sea peor (especialmente en el borde de salida) y, así, es probable que se prefieran radios de menos de 10 mm.
- La ausencia de radios pequeños o bordes afilados en la superficie exterior del módulo de punta de pala (que de otro modo atraerían los impactos de rayos) puede asegurar que incluso las regiones tradicionalmente delgadas (como el borde de salida) sean lo suficientemente redondeadas para proporcionar robustez al desgaste y desgarrar por rayos.
- Tener una geometría más gruesa y más redondeada da como resultado un rendimiento aerodinámico menor debido a la separación de la capa límite y una resistencia más alta. Además, es probable que también haya un impacto en el ruido de la punta debido al cambio de geometría y la separación de flujo. El borde de ataque parecido a una onda y los surcos ayudan al rendimiento aerodinámico para mitigar estos efectos.
- El módulo de punta de pala puede tener una profundidad de material conductor en cada punto en una superficie exterior del mismo que sea de al menos 3,5 mm, preferiblemente de al menos 5 mm. La 'profundidad' se mide normal a la superficie exterior.
- El módulo de punta de pala puede tener un radio de curvatura en cada punto en una superficie exterior del mismo que sea de al menos 3,5 mm, preferiblemente de al menos 5 mm.
- El módulo de punta de pala puede tener una longitud (en la dirección del eje longitudinal de la pala) que sea menor que el 1% y preferiblemente entre el 0,1% y el 0,5% de la longitud total de la pala.
- El labio superpuesto del módulo de punta de pala puede extenderse alrededor de la totalidad del borde exterior de la interfaz de punta de pala.
- El labio del módulo de punta de pala puede rodear un rebaje en el módulo de punta de pala. La interfaz de punta de pala se puede recibir en el rebaje de modo que el labio del módulo de punta de pala se superponga al borde exterior de la interfaz de punta de pala.
- El rebaje puede comprender una pared de borde. La pared de borde y el borde exterior de la interfaz de punta de pala pueden definir perfiles aerodinámicos complementarios. La pared de borde puede tener una forma que coincida con el borde exterior de la interfaz de punta de pala.
- Una cara extrema del módulo de punta de pala puede ser transversal a una parte de la superficie de la parte de pala principal con la que se superpone.
- Una placa de fijación puede sobresalir de la interfaz de punta de pala para ser recibida en un bolsillo definido en el módulo de punta de pala. La pala de fijación puede unir físicamente el módulo de punta de pala al extremo de punta de la parte de pala principal. La placa de fijación puede ser un acoplador conductor, acoplado eléctricamente a un conductor de bajada en la pala y al módulo de punta de pala. El módulo de punta de pala puede tener orificios para pernos para unirse a la placa de fijación. Los orificios pueden estar rebajados, y ser rellenados y alisados después del empennado de modo que la geometría de la superficie original no se vea afectada.
- El módulo de punta de pala tiene una longitud de cuerda de raíz que es mayor que la longitud de cuerda de la interfaz de punta de pala.

El módulo de punta de pala puede tener una línea de cuerda de raíz en ángulo lejos de la línea de cuerda en la interfaz de punta de pala. La línea de cuerda de raíz puede extenderse generalmente paralela a la pluralidad de surcos. La línea de cuerda de raíz puede ser recta o puede ser curva.

5 El módulo de punta de pala puede tener un espesor de raíz que es mayor que el espesor de la interfaz de punta de pala.

El borde de ataque del módulo de punta de pala puede extenderse más allá de un borde de ataque de la parte de pala principal en la interfaz de punta de pala.

El borde de salida del módulo de punta de pala puede extenderse más allá de un borde de salida de la parte de pala principal en la interfaz de punta de pala.

10 La interfaz de punta de pala puede ser transversal al eje longitudinal de la parte de pala principal.

La interfaz de punta de pala puede ser sustancialmente perpendicular a un eje longitudinal de la parte de pala principal.

Un aspecto adicional de la invención proporciona el módulo de punta de pala del primer aspecto de la invención.

15 Un aspecto adicional más de la invención proporciona un aerogenerador que incluye la pala de aerogenerador del primer aspecto de la invención.

Un aspecto adicional más de la invención proporciona un método de reacondicionamiento de una pala de aerogenerador existente, que comprende retirar un módulo de punta de pala existente de la pala, y unir el módulo de punta de pala del primer aspecto de la invención a la pala.

Breve descripción de los dibujos

20 Ahora se describirán realizaciones de la invención con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

la Figura 1 ilustra un aerogenerador de acuerdo con un ejemplo de la invención;

la Figura 2 ilustra una vista en perspectiva de una de las palas del aerogenerador de la Figura 1, y muestra en un panel insertado una vista ampliada de una región de punta de la pala con más detalle;

la Figura 3 muestra un detalle del extremo de punta de la pala;

25 la Figura 4 muestra una vista en planta de la pala y del módulo de punta de pala;

la Figura 5 muestra una vista esquemática en sección a través del módulo de punta de pala;

las Figuras 6 a 8 muestran vistas adicionales del módulo de punta de pala desde diversos ángulos;

la Figura 9 muestra representaciones esquemáticas de líneas de corriente de velocidad sobre la superficie del módulo de punta de pala;

30 la Figura 10 muestra representaciones esquemáticas de la actividad de vorticidad del módulo de punta de pala;

la Figura 11 muestra una vista esquemática en sección del módulo de punta de pala unido a la pala;

las Figuras 12 a 15 muestran variantes adicionales del módulo de punta de pala; y

la Figura 16 muestra los pasos de reacondicionamiento del módulo de punta de pala para una pala de aerogenerador existente.

35 Descripción detallada de la realización o realizaciones

La Figura 1 muestra un aerogenerador 1 que incluye una góndola 2 soportada sobre una torre 3 que está montada sobre una cimentación 4. El aerogenerador 1 representado aquí es un aerogenerador terrestre de manera que la cimentación 4 está empotrada en el suelo, pero el aerogenerador 1 podría ser una instalación marítima, en cuyo caso la cimentación 4 se proporcionaría mediante una plataforma marina adecuada.

40 La góndola 2 soporta un rotor 5 que comprende un buje 6 al que se unen tres palas 7. Se observará que el aerogenerador 1 es el tipo común de aerogenerador de eje horizontal (HAWT), de modo que el rotor 5 está montado en la góndola 2 para girar alrededor de un eje sustancialmente horizontal definido en el centro en el buje 6. Como es sabido, las palas 7 se accionan por el viento, que hace que el rotor 5 gire alrededor de su eje, operando por ello el equipo de generación que está alojado en la góndola 2. El equipo de generación no se muestra en la figura 1, dado
45 que no es fundamental para los ejemplos de la invención.

Cada una de las palas 7 tiene un extremo de raíz 8 proximal al buje 6 y un extremo de punta 9 distal del buje 6. Un borde de ataque 10 y un borde de salida 11 se extienden entre el extremo de raíz 8 y el extremo de punta 9. El extremo de punta 9 de cada pala 7 está provisto de un módulo de punta de pala conductor 12, que se muestra en forma conceptual en la figura 1, que se describirá con más detalle a continuación.

- 5 Una de las palas 7 se muestra en forma ampliada en la figura 2 en la que la forma del módulo de punta de pala 12 es más claramente evidente. El módulo de punta de pala 12 se puede unir al extremo de punta 9 de una parte de pala principal 13 de la pala 7 y es, al menos parcialmente, de construcción metálica de modo que es conductor y funciona como un receptor de rayos de punta para la pala 7. En este ejemplo, el módulo de punta de pala 12 es de metal macizo y está hecho de un material adecuado tal como cobre o una aleación de cobre tal como latón, a modo de ejemplo no limitativo. Se prevé que el módulo de punta de pala 12 sería un componente fundido, aunque serían adecuadas diversas técnicas de fabricación.

De modo que pueda actuar como receptor de rayos, el módulo de punta de pala 12 se une a un sistema de protección contra rayos 14 de la pala. En este ejemplo, el sistema de protección contra rayos 14 se muestra esquemáticamente como un cable conductor de bajada 15 que discurre a lo largo de la pala 7 hasta el extremo de raíz 8 donde se conecta a tierra a través de un mecanismo de manejo de energía adecuado (no mostrado). Se debería apreciar que los sistemas de protección contra rayos pueden ser más complejos que los mostrados aquí, pero la forma y el detalle precisos del sistema de protección contra rayos no son relevantes para la discusión.

En el ejemplo ilustrado, el módulo de punta de pala 12 no es una parte integral de la pala sino que se une a la pala después de que se haya fabricado la pala. El extremo de punta 9 de la pala 7 comprende por lo tanto un sistema de fijación 16 para unir el módulo de punta de pala 12 al extremo de punta 9 de la pala 7. El sistema de fijación 16 comprende un miembro de inserción 17 que es una pieza polimérica parecida a un rombo que aloja una placa de fijación metálica 18 o "acoplador". La placa de fijación 18 es conductora y, preferiblemente, es de metal macizo, tal como acero inoxidable, aunque son aceptables otros metales (por ejemplo, cobre) o aleaciones metálicas. El conductor de bajada 15 está conectado eléctricamente a la placa de fijación 18 dentro del miembro de inserción 17, que está moldeado por inyección alrededor de la placa 18.

Durante la fabricación, la pala 7 se forma a partir de una carcasa de pala que tiene dos medias carcasas. Las medias carcasas se moldean típicamente a partir de plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP) que comprende tejido de fibra de vidrio incrustado en una matriz de resina curada. La construcción precisa de la carcasa de pala no es fundamental para la invención y, así, se omite una descripción detallada adicional por claridad. Durante la fabricación de la pala 7, el miembro de inserción 17 se une adhesivamente a la cavidad interior de la pala 7 y se coloca de modo que la placa de fijación 18 sobresalga de una interfaz de punta de pala 19 de la pala (como se muestra en la figura 3) proporcionando por ello una pestaña de anclaje a la que se puede unir el módulo de punta de pala 12. En un ejemplo ilustrado, la interfaz de punta de pala 19 es la parte más externa de la parte de pala principal 13 que se engancha con y se acopla al módulo de punta de pala 12. Aquí, la interfaz de punta de pala 19 es sustancialmente plana.

Se prefiere que el módulo de punta de pala 12 sea lo suficientemente grande para abarcar las regiones de alta curvatura de los bordes de ataque y de salida en la punta de pala, aunque debido a que la punta de metal macizo tiene una masa relativamente alta, generalmente es un objetivo para la punta que sea lo más pequeña posible sin reducir su funcionalidad. Generalmente, por lo tanto, el módulo de punta de pala 12 tiene una longitud que es menor que el 1% de la longitud total de la pala y, más preferiblemente, por debajo del 0,5% de la longitud total de la pala. A modo de ejemplo, en una pala con una longitud de 60 metros, la punta puede tener aproximadamente 10 cm de longitud.

El miembro de inserción 17 moldeado proporciona un anclaje mediante el cual el módulo de punta de pala 12 se puede unir a la pala 7 durante el proceso de fabricación. Por ejemplo, durante el moldeado de la pala, se pueden disponer un revestimiento de pala adecuado y otros componentes estructurales, tales como capas de tejido de vidrio o materiales preimpregnados, en un molde de pala truncado que no tiene una superficie de molde conformada para definir una punta de pala. El sistema de fijación 16 se puede disponer entonces con respecto al molde de manera que el miembro de inserción 17 se encuentre frente al componente de revestimiento de pala preparado y el módulo de punta de pala 12 se sitúe frente al extremo truncado del molde. De la forma convencional, el miembro de inserción 17 se puede incorporar luego en la pala durante un proceso de impregnación de resina de modo que, después del curado, el sistema de fijación 16 forme una parte integral de la pala 7, proporcionando el miembro de inserción 17 una superficie de unión para sostener el sistema de fijación 16 en las carcasas de la pala, como se muestra en la figura 11.

En el ejemplo ilustrado, el módulo de punta de pala 12 se une a la parte de pestaña saliente de la placa de fijación 18 mediante un conjunto de sujetadores mecánicos adecuados, tales como pernos. En general, el miembro de inserción 17 puede adoptar la forma que se describe en el documento WO2015/055213, a modo de ejemplo. En tal disposición, se prefiere, aunque no es esencial, que el conductor de bajada 15 se suelde a la placa 18 antes de que el miembro de inserción 17 se moldee sobre la placa 18, en cuyo caso el conductor de bajada 15 forma una unidad con el sistema de fijación 16 con los propósitos del proceso de fabricación de la pala. No obstante, se debería

observar que el sistema de fijación 16 descrito aquí ilustra una forma de incorporar el módulo de punta de pala 12 a la pala 7 y que el experto en la técnica podría concebir otras formas de lograr esto.

La pala 7 tiene un eje longitudinal o "en sentido de la envergadura" A y la interfaz de punta de pala 19 se extiende transversal al eje longitudinal de pala A y está alineada con la cuerda local de la sección aerodinámica de pala en el extremo de punta 9 de la parte de pala principal 13.

El módulo de punta de pala 12 se muestra con mayor detalle en las figuras 4-8. El módulo de punta de pala 12 tiene un extremo de punta 21 que mira lejos de la pala 7 y un extremo de raíz 22 que mira hacia la pala 7. El módulo de punta de pala 12 tiene un perfil aerodinámico en sección transversal, como se muestra mejor en la figura 7, y tiene un borde de ataque 23 y un borde de salida 24. En particular, el módulo de punta de pala 12 tiene una longitud de cuerda en la raíz 22 que es mayor que la longitud de cuerda de la interfaz de punta de pala 19. El borde de ataque 23 del módulo de punta de pala se extiende hacia delante más allá del borde de ataque 10 de la pala 7 en la interfaz de punta 19, y/o el borde de salida 24 del módulo de punta de pala se extiende hacia atrás más allá del borde de salida 11 de la pala 7 en la interfaz de punta 19.

Obsérvese, aquí, que los términos "hacia delante" y "hacia atrás" se usan con respecto a la dirección de rotación normal "R" del HAWT 1, como se muestra en la figura 1. Obsérvese también que el término "longitud de cuerda" es la dimensión tomada a través de la cuerda de pala a través del borde de salida y el borde de ataque. Dado que la longitud de la cuerda de pala varía con la posición en el sentido de la envergadura, y también gira debido a la torsión de la pala, aquí la longitud de la cuerda se expresa como que está en el extremo de punta 9 de la parte de pala principal 13, es decir, en la interfaz de punta de pala 19.

Se ha de observar en particular que, como se muestra en la Figura 4, el módulo de punta de pala 12 tiene un eje longitudinal C que forma un ángulo con el eje longitudinal A de la parte de pala principal 13. El eje longitudinal C del módulo de punta de pala 12 se toma perpendicular a la cuerda de raíz, r_c , del módulo de punta de pala. Un ángulo entre el eje longitudinal C del módulo de punta de pala y el eje longitudinal A de la parte de pala principal es el denominado ángulo de convergencia, θ . En la realización ilustrada, el módulo de punta de pala 12 tiene una línea de cuerda de raíz, r_c , en ángulo lejos de y que se extiende hacia el interior (hacia el buje 6) desde la línea de cuerda, t_c , de interfaz de punta de pala en la dirección aguas abajo para crear un ángulo 'de convergencia' θ .

El módulo de punta de pala 12 tiene una superficie de barlovento, W, que se extiende entre el borde de ataque 23 y el borde de salida 24 en el mismo lado de la pala hasta la superficie de barlovento de la parte de pala principal 13. El módulo de punta de pala 12 tiene una superficie de sotavento, L, que se extiende entre el borde de ataque 23 y el borde de salida 24 en el mismo lado de la pala hasta la superficie de sotavento de la parte de pala principal 13. La superficie de barlovento es la superficie aerodinámica de alta presión (es decir, la superficie de presión) y la superficie de sotavento es la superficie aerodinámica de baja presión (es decir, la superficie de succión) de la pala.

El borde de ataque 23 del módulo de punta de pala tiene un perfil parecido a una onda cuando se observa en planta, como se muestra en la Figura 4. El perfil parecido a una onda comprende una pluralidad de protuberancias redondeadas 25 que se extienden hacia delante. El perfil parecido a una onda parece sustancialmente sinusoidal y está configurado para canalizar el flujo de aire sobre el módulo de punta de pala 12 en una pluralidad de corrientes a velocidades de flujo aumentadas con relación al flujo ascendente. El perfil parecido a una onda se extiende a lo largo sustancialmente de todo el borde de ataque 23. El perfil parecido a una onda del borde de ataque 23 promueve el llamado 'efecto tubérculo'.

El módulo de punta de pala 12 también incluye una pluralidad de surcos 26 que se extienden hacia el borde de salida 24. Los surcos 26 se extienden cada uno desde una depresión 27 entre protuberancias 25 adyacentes del borde de ataque 23 con perfil parecido a una onda. Como se muestra mejor en la vista en sección de la Figura 5, los surcos 26 se proporcionan en las superficies tanto de barlovento, W, como de sotavento, L, del módulo de punta de pala 12. Los surcos 26 crean crestas 28 entre un par adyacente de los surcos 26. Los surcos 26 están situados de manera que los surcos 26 en la superficie de barlovento, W, están sustancialmente por encima y alineados con los surcos 26 en la superficie de sotavento, L, en la dirección del espesor, T, del módulo de punta de pala 12.

Como se muestra mejor en las Figuras 6 y 8, los surcos tienen una profundidad (en la dirección del espesor) que disminuye en la dirección en el sentido de la cuerda aguas abajo. Los surcos también tienen un ancho (a lo largo del eje longitudinal C) que disminuye en la dirección en el sentido de la cuerda aguas abajo. Los surcos tienen un perfil redondeado de manera que los surcos 26 se curvan suavemente hacia las crestas 28 tanto en las superficies de barlovento como de sotavento. Los surcos se extienden hasta aproximadamente el 60%-70% de la cuerda local según se mide desde el borde de ataque 23 de la punta de pala. Los surcos 26 tienen un eje longitudinal que es sustancialmente lineal de manera que los surcos se extiendan generalmente paralelos entre sí.

El eje longitudinal de los surcos es sustancialmente paralelo a la cuerda de raíz, r_c , del módulo de punta de pala 12. Los surcos se estrechan suavemente en las superficies de barlovento y sotavento de manera que la región más allá de alrededor del 70% de la cuerda desde el borde de ataque 23 de las superficies tanto de barlovento como de sotavento del módulo de punta de pala 12 sea sin surcos ni ondulación superficial cuando se observa en la dirección lejos de la raíz 22 hacia la punta 21.

La superficie exterior del módulo de punta de pala 12 es de apariencia notablemente redondeada y, en general, tiene un mayor espesor de material en comparación con el extremo de punta 9 de la parte de pala principal 13. En particular, el módulo de punta de pala 12 tiene un espesor o profundidad de metal macizo en cada punto de su superficie exterior que es de al menos aproximadamente 6 mm. La superficie exterior del módulo de punta de pala también tiene un radio de curvatura en cada punto que es de al menos aproximadamente 6 mm. Esto significa que la superficie exterior del módulo de punta de pala 12 está desprovista de cualquier cúspide o borde afilado o radio afilado que, de otro modo, sería susceptible de fundirse en caso de un rayo. En particular, el borde de salida 24 y la cuerda de raíz r_c también cumplen estos criterios de espesor mínimo y radio de curvatura mínimo.

Como se mencionó anteriormente, el módulo de punta de pala 12 está unido a la parte de pala principal 13 de modo que se apoye contra la interfaz de punta de pala 19. Es común para una pala estrecharse hasta un vértice o punta, por lo que se apreciará que en el ejemplo ilustrado el extremo de punta de pala 9 está truncado y no se estrecha hasta un vértice o punta. Esto proporciona la interfaz de punta de pala 19 que es sustancialmente plana y define una cara extrema que es transversal al eje longitudinal A de la pala. Se observará que en el ejemplo ilustrado la cara extrema de la interfaz de punta de pala 19 es aproximadamente perpendicular al eje longitudinal de la pala, aunque esto no es esencial y por lo tanto el término 'transversal' se ha de interpretar como que no es necesariamente perpendicular.

Como se muestra en la figura 3, la cara extrema 29 está rodeada por un borde exterior 30 de la interfaz de punta de pala 19 que tiene un perfil aerodinámico. Dado que tiene una cara extrema plana 29, la punta de la pala 7 tiene una superficie adecuada para apoyarse contra el módulo de punta de pala 12. Por lo tanto, la interfaz de punta de pala 19 actúa como una interfaz o montaje en el que se puede montar el módulo de punta de pala 12. La configuración ilustrada aquí es una posibilidad, pero un experto entendería que serían posibles otras configuraciones mientras que se conserve la función de ser un punto de montaje para el módulo de punta de pala 12.

Una relación de colocación a tope simple entre el módulo de punta de pala 12 y la interfaz de punta de pala 19 significaría que la unión entre las dos partes tendría que ser sellada antes de que se pudiera usar la pala. Este es el caso del módulo de punta de pala descrito en el documento WO2015/055213. No obstante, es una ventaja del módulo de punta de pala 12 de la realización ilustrada que está configurado para apoyarse contra la interfaz de punta de pala 19 de una forma que protege la unión entre las dos partes.

Como se puede ver particularmente a partir de las Figuras 3, 4, 5 y 7, el módulo de punta de pala 12 está unido a la pala 7 en una interfaz de módulo 31 que tiene una forma en general para coincidir con el perfil aerodinámico de la interfaz de punta de pala 19 en el extremo de punta 9 de la pala 7, aunque es ligeramente más grande para proporcionar un ajuste con holgura. La interfaz de módulo 31 comprende un rebaje 32 como se muestra en las Figuras 5 y 7. El rebaje 32 está definido por una pared de borde interna 33 y una base o suelo 34. El módulo de punta de pala 12 comprende un labio 35 que se extiende alrededor de la periferia del extremo de raíz 22 del módulo de punta de pala 12 y que define el rebaje 32. El labio 35 comprende el material del módulo de punta de pala 12 que está entre la pared de borde 33 y la superficie exterior del módulo de punta. Por lo tanto, la pared de borde 33 define la parte interior radial del labio 35.

Cuando la interfaz de punta de pala 19 se recibe en el rebaje 32 de modo que la pared de borde interna 33 se superponga a un borde exterior 19a de la interfaz de punta de pala 19, el borde exterior 19a de la interfaz de punta de pala está cubierto por el labio 35. En el ejemplo ilustrado, la pared de borde interna 33 se extiende alrededor de la totalidad del borde exterior 19a de la interfaz de punta de pala 19, en otras realizaciones la pared puede tener una forma de modo que se superponga solamente a una parte de la interfaz de punta de pala.

Significativamente, el módulo de punta de pala 12 tiene un espesor sustancial de material en la región del labio 35. Esto significa que el módulo de punta de pala 12 es robusto contra los impactos de rayos dado que hay suficiente masa de material alrededor del labio 35 para absorber los efectos de calentamiento intensos de un impacto de rayo. Por el contrario, si el labio 35 fuera delgado, entonces el módulo de punta de pala 12 sería más vulnerable a la erosión térmica. Por lo tanto, el labio 35 se puede describir como un labio protector que protege la interfaz de punta de pala 19.

Con el fin de acomodar la parte de pestaña saliente de la placa de fijación 18, la interfaz de módulo 31 incluye un bolsillo o ranura rectangular 36 que se extiende hacia el cuerpo del módulo de punta de pala 12 desde una abertura o boca 37 en el suelo 34 del rebaje 32. El bolsillo 36 está dimensionado para recibir la parte de pestaña saliente de la placa de fijación 18 de modo que el módulo de punta de pala 12 sea capaz simplemente de ser empujado sobre la placa de fijación 18 donde se puede asegurar mediante sujetadores mecánicos 20 adecuados. En el ejemplo ilustrado, el cuerpo del módulo de punta de pala 12 se muestra como que define tres orificios 38 que se extienden hacia abajo hacia el cuerpo del módulo de punta de pala 12 desde la superficie de sotavento, L, del mismo. Los orificios se forman mediante perforación. Los orificios 38 no están en línea para reducir las concentraciones de tensión.

Cada uno de los orificios 38 incluye una parte de vástago relativamente ancha provista de una rosca de tornillo (no mostrada) y una parte de pasador de bloqueo relativamente estrecha. Por lo tanto, un sujetador roscado 20 formado adecuadamente es capaz de ser atornillado en la parte de vástago relativamente ancha de manera que un pasador

de bloqueo pase a través de la parte de pasador de bloqueo para engancharse con el agujero de bloqueo correspondiente proporcionado en la placa de fijación 18. Después de la instalación del sujetador, la abertura avellanada de los orificios 38 se rellena y alisa de tal forma que la geometría de la superficie original no se ve afectada. Se debería observar que esta manera de fijar el módulo de punta de pala 12 a la placa de fijación 18 es una forma en la que se podría lograr la fijación, aunque serían adecuadas diversas técnicas de fijación.

Las Figuras 9 y 10 ilustran los efectos aerodinámicos de la forma del módulo de punta de pala 12. La Figura 9 muestra cómo el perfil de borde de ataque parecido a una onda divide o canaliza el flujo de aire aguas arriba (entrante) en corrientes más estrechas sobre la superficie del módulo de punta de pala 12. Esta división de flujo activa el flujo aumentando la velocidad de flujo de las corrientes más estrechas, retrasando el desprendimiento de flujo de la superficie y la pérdida de sustentación.

Dado que los surcos 26 se extienden hacia atrás desde depresiones respectivas entre las protuberancias que se proyectan hacia delante 25 en el borde de ataque 23, las corrientes más estrechas de flujo activado creadas por el perfil parecido a una onda del borde de ataque entran en los surcos 26 que crean un efecto de interferencia con el flujo de aire para acelerar el flujo de aire a través de los surcos. Esto activa aún más el flujo a través de los surcos, retrasando aún más el desprendimiento de flujo de la superficie y la pérdida de sustentación.

En la Figura 9, las líneas de puntos indican esquemáticamente las líneas de corriente que muestran el flujo convergente aguas arriba del borde de ataque 23 y el flujo canalizado activado que sale a través de los surcos 26. La Figura 10 ilustra esquemáticamente los efectos aerodinámicos tridimensionales logrados por la forma del módulo de punta de pala 12. La canalización del flujo por medio del borde de ataque 23 con perfil parecido a una onda y los surcos 26 reduce los efectos de punta aerodinámicos tridimensionales (de la pala en su conjunto) que de otro modo tenderían a permitir que el flujo se enrolle en una sola lámina de vórtice en la punta de la pala. Manteniendo el flujo unido, la lámina de vórtice principal que emana desde cerca de la punta 21 del módulo de punta de pala 12 tiene una magnitud similar a un módulo de punta de pala conforme (tal como se muestra en la Figura 16a). No obstante, también puede haber alguna actividad de vorticidad menor que ocurra en el borde de salida de raíz del módulo de punta de pala 12.

Manteniendo la lámina de vórtice principal en una magnitud similar a la de un módulo de punta de pala conforme, la resistencia parásita y el ruido debido a la lámina de vórtice principal permanecen sustancialmente sin cambios, pero el espesor significativamente mayor y el radio de curvatura mínimo del módulo de punta de pala 12, en comparación con un módulo de punta de pala conforme, significa que el módulo de punta de pala 12 es sustancialmente más robusto a los efectos de un impacto de rayo en comparación con el módulo de punta de pala conforme de bordes más finos y afilados.

Las Figuras 12 a 15 ilustran diversas realizaciones alternativas del módulo de punta de pala en las que se han usado números de referencia similares para indicar partes similares con la realización descrita anteriormente. Cualquiera de las características de los módulos de punta de pala alternativos de las figuras 12 a 15 se puede combinar apropiadamente con cualquiera de las otras realizaciones descritas.

La Figura 12 muestra un módulo de punta de pala 112 que tiene sustancialmente el mismo borde de ataque 23 con perfil parecido a una onda y surcos 26 pero con un extremo de raíz curvado 122. En todos los demás aspectos, el módulo de punta de pala 112 es idéntico al módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente. En comparación con el borde interior recto del extremo de raíz 22 del módulo de punta de pala 12, el perfil en planta curvado del extremo de raíz 122 puede seguir ventajosamente más de cerca las líneas de corriente locales sobre el extremo de punta 9 de la parte de pala principal 13, retrasando el desprendimiento de flujo y la pérdida de sustentación. En todos los demás aspectos, el módulo de punta de pala 112 es idéntico al módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente.

La Figura 13 ilustra un módulo de punta de pala 212 que es idéntico al módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente, excepto por la omisión de los surcos 26 en las superficies de barlovento y sotavento del módulo de punta de pala. El borde de ataque 23 tiene el mismo perfil parecido a una onda que todavía logra el 'efecto tubérculo' y por lo tanto proporciona al menos algunos de los efectos aerodinámicos ventajosos logrados por el módulo de punta de pala 12. La ausencia de los surcos 26, por ejemplo, puede ser apropiada cuando no se requiere el efecto aerodinámico adicional de los surcos o cuando la profundidad total del material del módulo de punta de pala en la dirección del espesor no puede soportar los surcos mientras que se proporciona un espesor mínimo de material para ser robusto contra un impacto de rayo. En todos los demás aspectos, el módulo de punta de pala 212 es idéntico al módulo de punta de pala 12 como se describió anteriormente.

La Figura 14 ilustra un módulo de punta de pala 312 que tiene sustancialmente el mismo borde de salida 24 pero tiene un borde de ataque 323 suavemente curvado que no tiene inflexión y por lo tanto no tiene un perfil parecido a una onda. El módulo de punta de pala 312 todavía tiene surcos 326 en las superficies de barlovento y sotavento (o solo una de éstas), pero los surcos no se extienden desde el borde de ataque 323 y, en su lugar, se extienden desde una corta distancia detrás del borde de ataque 323. Por lo tanto, los surcos 326 adoptan la forma de canales que se estrechan suavemente hacia la superficie exterior del módulo de punta de pala 312 en ambos extremos en la dirección longitudinal del surco. Los surcos 326 todavía pueden proporcionar el efecto aerodinámico beneficioso de crear un efecto de interferencia para el flujo de aire para acelerar el flujo de aire a través de los surcos y, por ello,

activar el flujo a través de los surcos para retrasar el desprendimiento de flujo de la superficie y la pérdida de sustentación. En todos los demás aspectos, el módulo de punta de pala 312 es idéntico al módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente.

La Figura 15 ilustra un módulo de punta de pala 412 que es conceptualmente muy similar al módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente pero que tiene varias diferencias en términos de forma. Similar al módulo de punta de pala 12, el módulo de punta de pala 412 tiene un borde de ataque 423 con perfil parecido a una onda y surcos 426 que se extienden generalmente en el sentido de la cuerda que emanan de depresiones entre protuberancias redondeadas en el borde de ataque 423. En general, el módulo de punta de pala 412 está inclinado para producir un mayor ángulo 'de convergencia' θ_4 , que se refiere al ángulo entre el eje longitudinal A de pala y el eje longitudinal del módulo de punta de pala 412. Esto asegura que los surcos 426, que se extienden generalmente en el sentido de la cuerda (es decir, transversales y generalmente perpendiculares al eje longitudinal del módulo de punta de pala) se alineen más estrechamente con el flujo local alrededor de la punta de pala de aerogenerador.

El borde interior en el extremo de raíz 422 del módulo de punta de pala 412 también está curvado para curvarse hacia dentro (hacia el buje 6) desde el borde de ataque hasta el borde de salida. El ángulo de convergencia θ_4 puede ser lo suficientemente grande como para que la interfaz de punta de pala 419 esté curvada de manera que la interfaz de punta de pala no se proyecte a través del borde de salida 424 del módulo de punta de pala 412 y por ello se mantenga el espesor mínimo del material del cuerpo del módulo de punta de pala 412. Los surcos 426 se extienden generalmente paralelos entre sí y están formados en las superficies tanto de barlovento como de sotavento del módulo de punta de pala 412. De nuevo, debido a la inclinación significativa del módulo de punta de pala 412, la longitud de los surcos 426 se acorta significativamente entre el surco interior y el surco exterior y, en general, hay menos surcos en comparación con el módulo de punta de pala 12. Si bien el módulo de punta de pala 412 se ha optimizado sustancialmente para el rendimiento aerodinámico y la robustez contra los impactos de rayos, las modificaciones a la interfaz de punta de pala 419 para que esté curvada, en comparación con la interfaz de punta de pala 19 truncada transversal plana de la parte de pala principal 13, significa que es poco probable que el módulo de punta de pala 412 sea adecuado para el reacondicionamiento de una pala de aerogenerador existente.

Finalmente, la Figura 16 ilustra un método de reacondicionamiento del módulo de punta de pala 12 descrito anteriormente para una pala de aerogenerador 7 existente para reemplazar un módulo de punta de pala 'conforme' 512. El módulo de punta de pala conforme 512 se ilustra en la Figura 16a y se considera conforme en el sentido de que los bordes de ataque y de salida 10, 11 de la parte de pala principal 13 continúan suavemente hacia los bordes de ataque y de salida del módulo de punta de pala conforme 512 para encontrarse con un vértice en la punta, y la superficie de barlovento y de sotavento de la parte de pala principal también continúa suavemente hacia la superficie de barlovento y de sotavento del módulo de punta de pala 512 para encontrarse con un vértice en la punta. La extracción del módulo de punta de pala conforme 512 expone la interfaz de punta de pala 19 y la parte de pestaña saliente de la placa de fijación 18 como se muestra en la Figura 16b. La interfaz de punta de pala 19 está lista entonces para recibir el módulo de punta de pala 12 como se muestra en la Figura 16c que se une mediante fijación de la manera descrita anteriormente. Sustituir el módulo de punta de pala conforme 512 con el módulo de punta de pala 12 puede reducir ligeramente la envergadura total de la pala, pero el impacto aerodinámico de esto es insignificante.

Aunque la invención se ha descrito anteriormente con referencia a una o más realizaciones preferidas, se apreciará que se pueden hacer diversos cambios o modificaciones sin apartarse del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Una pala de aerogenerador (1) que comprende:

una parte de pala principal que tiene un eje longitudinal que se extiende entre un extremo de raíz (8) y un extremo de punta (9) de la parte de pala principal, y

5 un módulo de punta de pala conductor (12) acoplado a un sistema de protección contra rayos de la pala de aerogenerador, el módulo de punta de pala conductor está montado en el extremo de punta (9) de la parte de pala principal y tiene un borde de ataque (23), un borde de salida (24), una superficie de barlovento que se extiende entre el borde de ataque (23) y el borde de salida (24), y una superficie de sotavento que se extiende entre el borde de ataque (23) y el borde de salida (24),

10 en donde la parte de pala principal comprende una interfaz de punta de pala (19) que es la parte más externa de la parte de pala principal que se engancha con y se acopla al módulo de punta de pala (12),

y caracterizada por que el borde de ataque (23) del módulo de punta de pala (12) tiene un perfil parecido a una onda y/o en donde al menos una de las superficies de barlovento y de sotavento del módulo de punta de pala (12) tiene una pluralidad de surcos (26) que se extienden hacia el borde de salida (24), y por que el módulo de punta de pala (12) tiene una longitud de cuerda en el extremo de raíz (22) que es mayor que la longitud de cuerda de la interfaz de punta de pala (19).

2. La pala de aerogenerador (1) de la reivindicación 1, en donde el perfil parecido a una onda del borde de ataque (23) del módulo de punta de pala (12) comprende una pluralidad de protuberancias redondeadas (25) que se extienden hacia delante.

20 3. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde el perfil parecido a una onda del borde de ataque (23) del módulo de punta de pala (12) es sustancialmente sinusoidal.

4. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde el perfil parecido a una onda se extiende a lo largo sustancialmente de todo el borde de ataque (23) del módulo de punta de pala (12).

25 5. La pala de aerogenerador (1) de cualquiera reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) se extienden desde el borde de ataque adyacente del módulo de punta de pala.

6. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) se extienden cada uno hasta aproximadamente el 50% al 80% de la cuerda local del módulo de punta de pala, preferiblemente hasta aproximadamente el 60% al 70% de la cuerda local del módulo de punta de pala.

30 7. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) se extienden cada uno desde una depresión entre protuberancias (25) adyacentes del perfil parecido a una onda en el borde de ataque (23) del módulo de punta de pala.

8. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) tienen cada uno una profundidad y/o ancho que disminuye en la dirección hacia el borde de salida (24).

35 9. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) se estrechan suavemente cada uno hacia las superficies de barlovento o de sotavento hacia el borde de salida (24) del módulo de punta de pala (12).

10. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) se extienden cada uno en un ángulo con respecto a la línea de cuerda local en el extremo de punta (9) de la parte de pala principal en la dirección hacia el borde de salida (24).

40 11. La pala de aerogenerador (1) de la reivindicación 10, en donde la pluralidad de surcos (26) se extienden cada uno hacia la línea de cuerda local en el extremo de punta (9) de la parte de pala principal en la dirección hacia el borde de salida (24).

12. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde la pluralidad de surcos (26) están dispuestos en las superficies tanto de barlovento como de sotavento del módulo de punta de pala (12).

45 13. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde el módulo de punta de pala (12) es de metal.

14. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde el módulo de punta de pala (12) consiste exclusivamente en metal.

50 15. La pala de aerogenerador (1) de cualquier reivindicación anterior, en donde el extremo de punta (9) de la parte de pala principal está truncado y tiene una interfaz de punta de pala (19) que define un borde exterior (30), y en

donde el módulo de punta de pala (12) está configurado para encajar contra la interfaz de punta de pala (19) de manera que un labio (35) del módulo de punta de pala se superponga al borde exterior (30) de la interfaz de punta de pala (19).

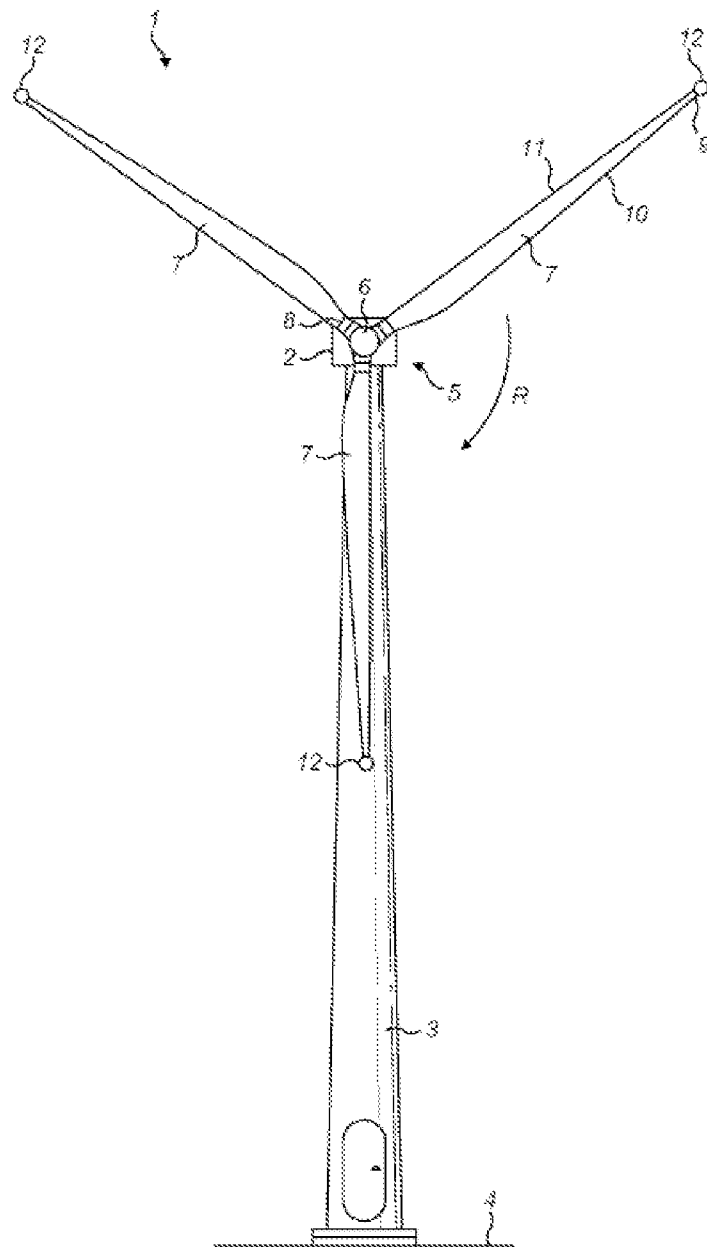


FIG. 1

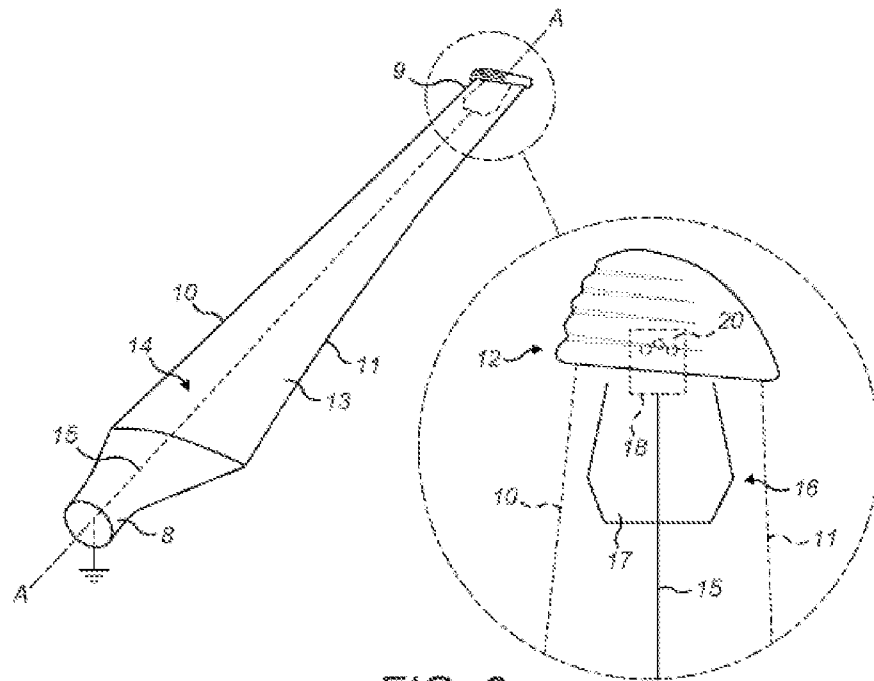


FIG. 2

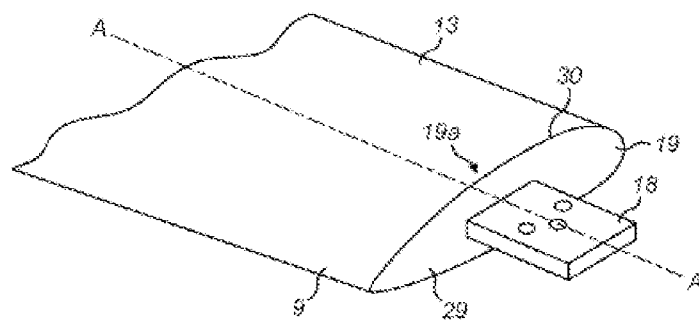


FIG. 3

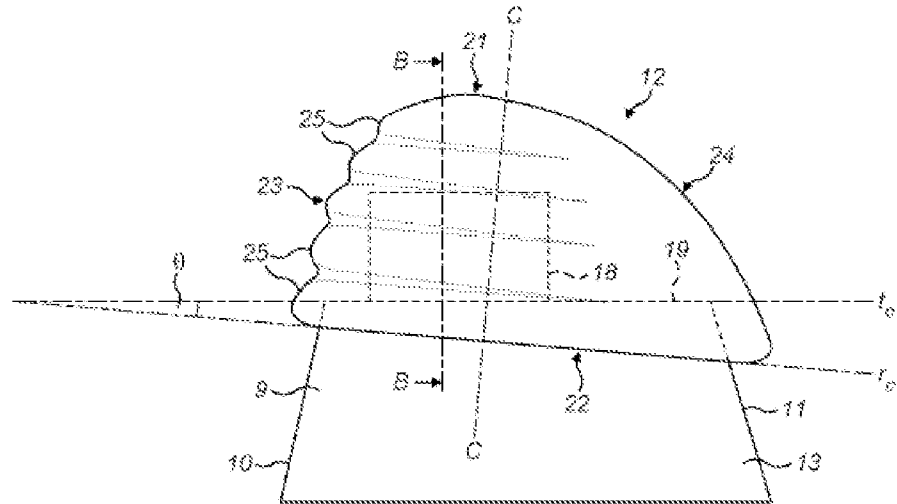


FIG. 4

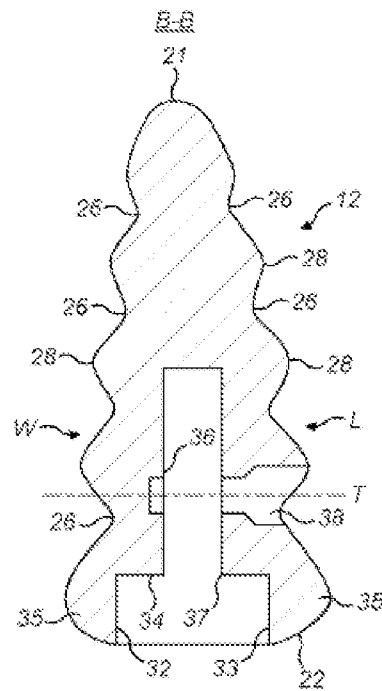


FIG. 5

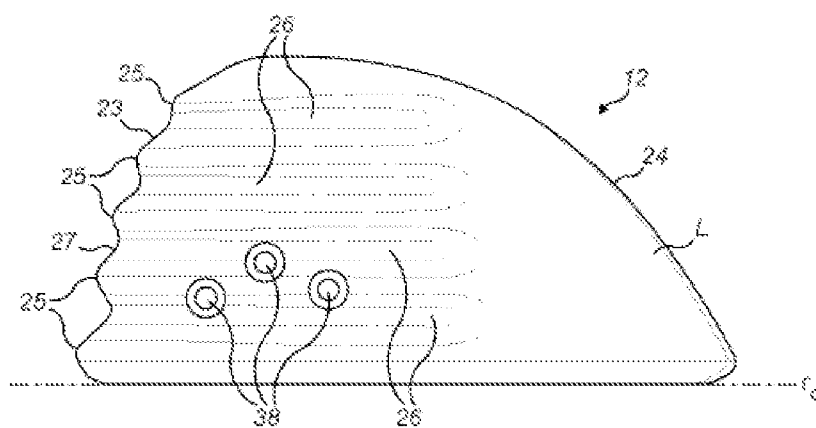


FIG. 6

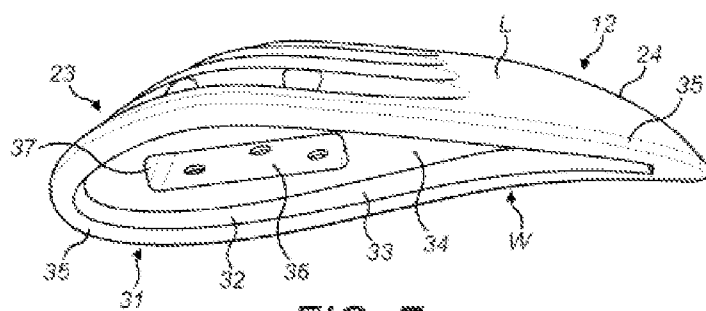


FIG. 7

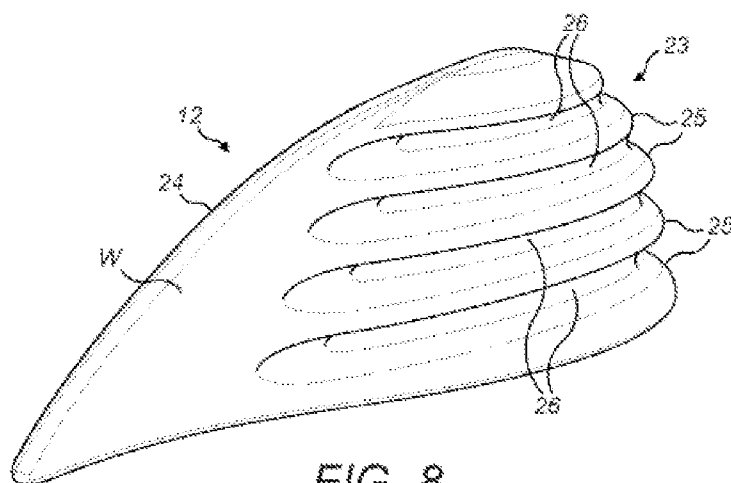


FIG. 8

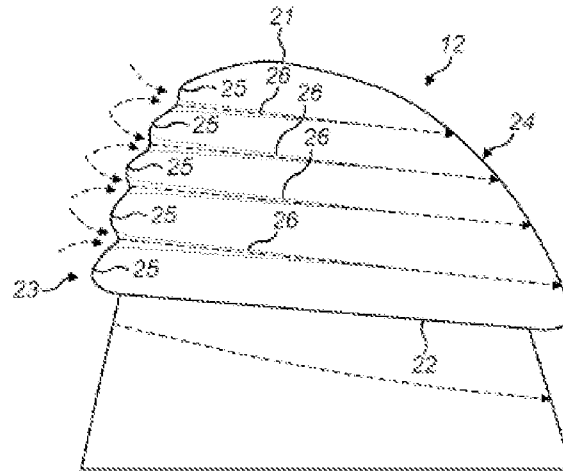


FIG. 9

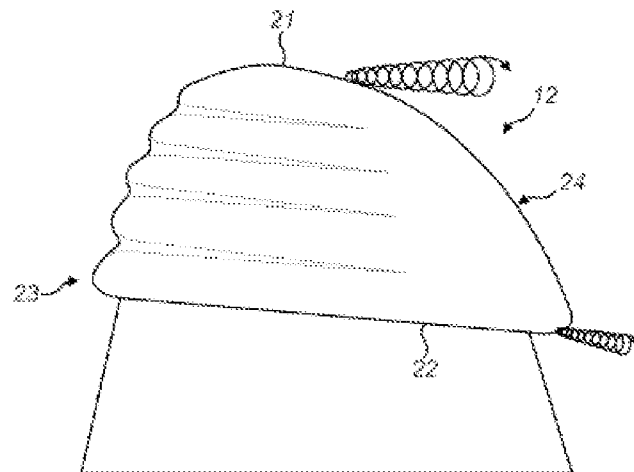


FIG. 10

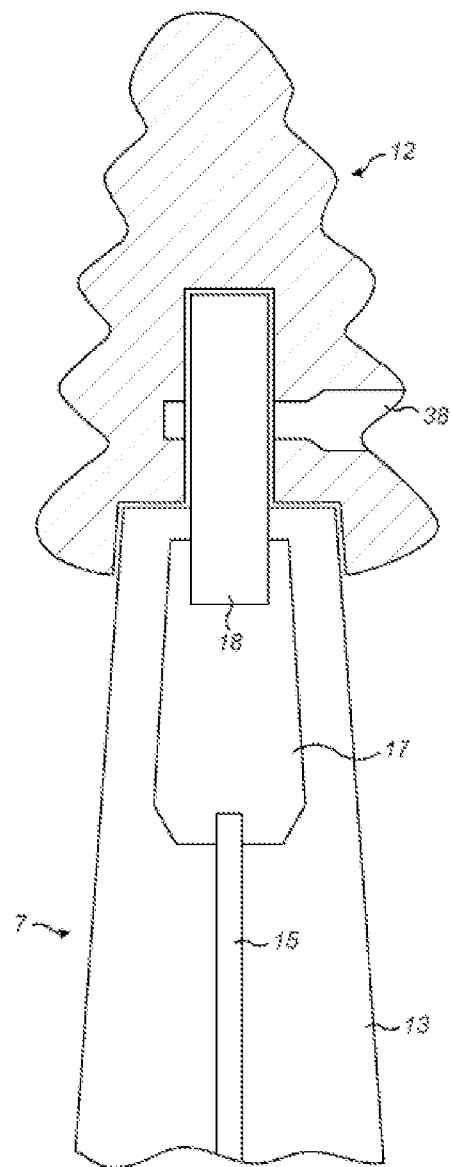


FIG. 11

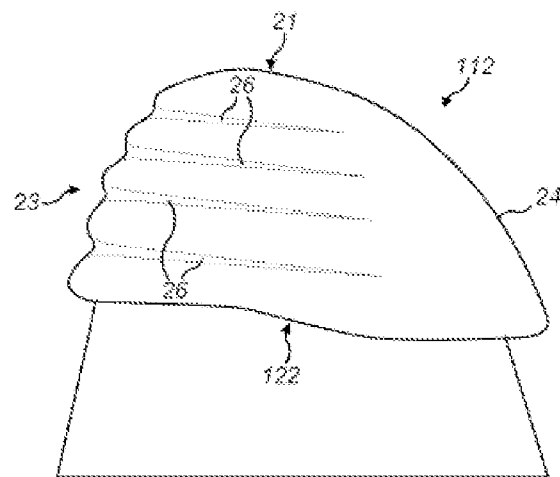


FIG. 12

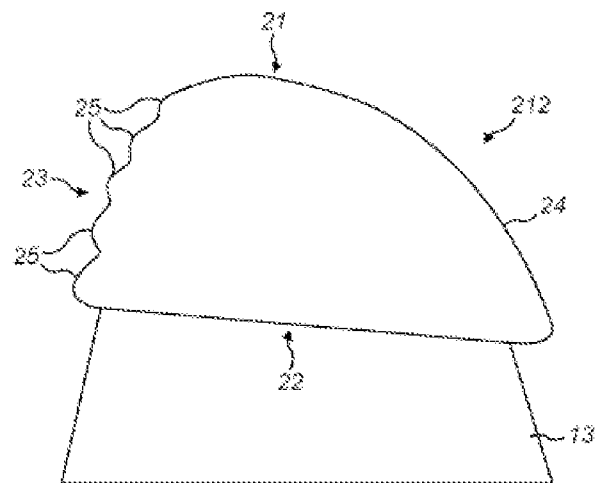


FIG. 13

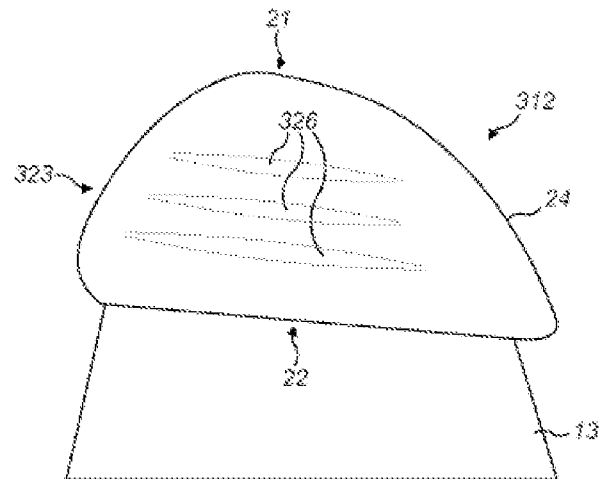


FIG. 14

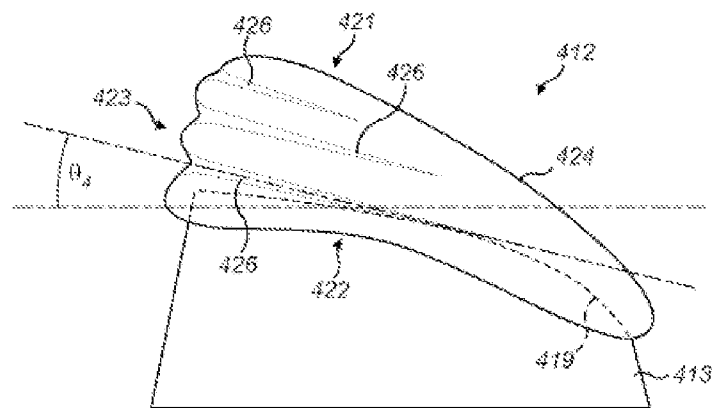


FIG. 15

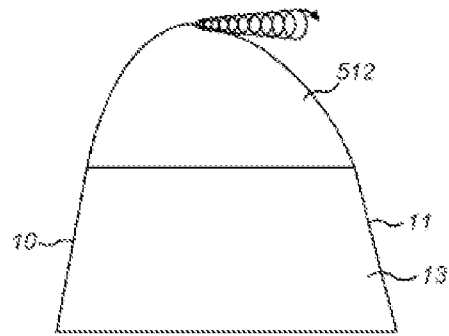


FIG. 16a

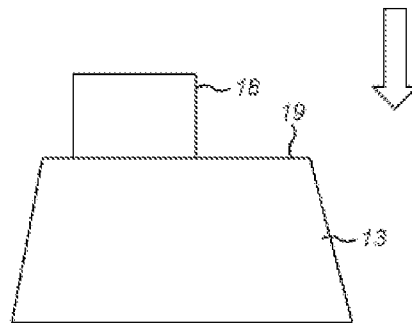


FIG. 16b

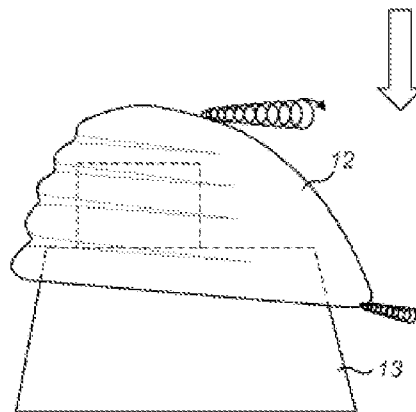


FIG. 16c