

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 784 027**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.05.2010 PCT/EP2010/056808**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.11.2010 WO10133587**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.05.2010 E 10720913 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020 EP 2432992**

54 Título: **Método para fabricar una pala de aerogenerador que tiene segmento prediseñado**

30 Prioridad:

**18.05.2009 EP 09160496**

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

**21.09.2020**

73 Titular/es:

**LM WIND POWER A/S (100.0%)  
Jupitervej 6  
6000 Kolding, DK**

72 Inventor/es:

**FUGLSANG, PETER;  
BOVE, STEFANO y  
FUGLSANG, LARS**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 784 027 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**

Método para fabricar una pala de aerogenerador que tiene segmento prediseñado

La presente invención está relacionada con un método para fabricar una pala de aerogenerador al usar el diseño de un segmento longitudinal de una primera pala de aerogenerador para el diseño de una segunda pala de aerogenerador, en donde la primera pala de aerogenerador y la segunda pala de aerogenerador comprenden, cada una, una parte de base que se extiende longitudinalmente que tiene: un contorno perfilado que comprende un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde de salida con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, el contorno perfilado genera una sustentación cuando es impactado por un flujo de aire incidente, el contorno perfilado en la dirección radial se divide en una región de raíz con un perfil sustancialmente circular o elíptico lo más cerca del buje, una región de cuerpo de sustentación con un perfil generador de sustentación lo más alejado del buje, y preferiblemente una región de transición entre la región de raíz y la región de cuerpo de sustentación, la región de transición tiene un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial desde el perfil circular o elíptico de la región de raíz al perfil generador de sustentación de la región de cuerpo de sustentación. La invención además está relacionada con un grupo de palas de aerogenerador que comprende al menos una primera pala de aerogenerador y una segunda pala de aerogenerador, así como un grupo de aerogeneradores que comprenden tales grupos de palas.

Tradicionalmente, las palas de aerogenerador modernas se diseñan diseñando inicialmente la forma exterior y las prestaciones aerodinámicas de la propia pala a fin de obtener el objetivo de carga y el objetivo de inducción axial para cada sección radial de la sección de cuerpo de sustentación de la pala. Primero después de eso, se determina cómo fabricar la pala según la especificación de diseño aerodinámico para la pala. Las formas aerodinámicas de tales palas son típicamente complejas con segmentos que tienen contornos con doble curvatura y varias formas de cuerpo de sustentación diferentes a lo largo de la extensión radial de la pala de aerogenerador. Por consiguiente, el proceso de fabricación de las palas así como partes de molde de fabricación para el proceso de fabricación se vuelven bastante complejos. En global, el tiempo desde el arranque inicial para desarrollar el diseño de un nuevo tipo de pala al lanzamiento de producto del nuevo tipo de pala es largo, y los costes globales de producción y desarrollo son altos. Este proceso se describe más minuciosamente en la sección 1 de la posterior descripción.

El documento WO 01/14740 describe maneras para modificar perfiles de pala de aerogenerador a fin de impedir problemas de desprendimiento de flujo.

La patente europea EP 2 031 242 describe un elemento de pala para montar sobre una pala de aerogenerador a fin de cambiar el perfil desde una forma de cuerpo de sustentación con un borde de salida puntiagudo a un perfil de cuerpo de sustentación con un borde de salida truncado.

El documento DE 199 64 114 A1 describe un perfil de cuerpo de sustentación, que tiene instalado un borde de salida divergente en forma de aleta Gurney, que crea una perturbación periódica de flujo.

El documento WO 02/08600 describe una pala de aerogenerador provista de una nervadura, así como generadores de vórtice en la parte de conexión o parte de raíz de la pala.

El documento US 5 088 665 describe una pala de aerogenerador provista de un panel serrado de borde de salida.

El documento WO 2007/140771 describe una pala de aerogenerador provista de tiras generadoras de turbulencia a fin de impedir desprendimiento de flujo y reducir emisiones de ruido.

La patente europea EP 1 944 505 describe una pala de aerogenerador provista de generadores de vórtice en zonas de cuerpo de sustentación que tienen un grosor relativo del 30 %-80 %.

El documento DE 10 2006 017 897 describe una pala de aerogenerador provista de un dispositivo de alerón en la región de raíz y la región de transición de la pala.

El documento WO 03/029644 describe un método para diseñar una pala de turbina para una turbina de flujo subacústico para uso de, p. ej., factor de inducción axial como parámetro de diseño. Los perfiles de pala no se proveen de dispositivos de guiado de flujo.

El documento WO 03/098034 describe un aerogenerador provisto de un extensor de buje. Los perfiles de pala no se proveen de dispositivos de guiado de flujo.

El documento US 2007/140858 describe una pala construida modularmente que incluye secciones de cohesión que se disponen alejándose del borde de ataque y el borde de salida de la pala ensamblada. Los perfiles de pala no se proveen de dispositivos de guiado de flujo.

El documento US 2007/105431 describe una pala construida modularmente que incluye una pluralidad de segmentos modulares apilados, donde los segmentos se sujetan juntos usando cables. Los perfiles de pala no se proveen de dispositivos de guiado de flujo.

La patente europea EP 0 100 131 describe un método para fabricar palas de aerogenerador usando extrusión por estirado o extrusión. Los perfiles de pala no se proveen de dispositivos de guiado de flujo.

Un objetivo de la invención es obtener un nuevo método para fabricar una pala de aerogenerador, que venza o aminore al menos una de las desventajas de la técnica anterior o que proporcione una alternativa útil.

5 Según un primer objeto de la invención esto se obtiene mediante el método de la reivindicación 1 que comprende las etapas de: a) tomar un primer diseño de pala de una primera parte de base de una primera sección longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de una primera pala, b) usar el primer diseño de pala para la primera parte de base en una primera sección longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de una segunda pala, de modo que un factor de inducción de la primera parte de base sobre la segunda pala sin dispositivos alteradores de flujo en un punto de diseño de rotor se desvía de un objetivo de factor de inducción, y c) proporcionar a la primera sección longitudinal de la segunda palas primeros dispositivos alteradores de flujo para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal para cumplir sustancialmente el objetivo de factor de inducción en el punto de diseño en la segunda pala, en donde el primer segmento longitudinal se extiende a lo largo de al menos el 20 % de una extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de la segunda pala.

10 Al usar una primera parte de base con características aerodinámicas inherentes no ideales, que posteriormente son compensadas mediante el uso de dispositivos alteradores de flujo, se hace posible lograr un perfil de parte de base mucho más simple. Es más, el método hace posible lograr un diseño de pala modular, en el que la misma parte de base se puede usar para varios tipos de pala y longitudes de palas diferentes sin perjudicar a las propiedades aerodinámicas de la sección de cuerpo de sustentación que comprende dicha parte de base. Así, es posible reutilizar la parte de base de una pala existente aún más externa en una pala más grande/más larga, o como alternativa reutilizar la parte de base de una pala existente aún más interna en una pala más pequeña/más corta. En definitiva, es posible hacer un diseño de pala de tal manera que el diseño de pala de la región de cuerpo de sustentación se ensambla de secciones prediseñadas y que palas de longitudes diferentes se pueden componer parcialmente de secciones ya existentes de palas anteriores.

15 Además, un segmento de pala con, por ejemplo, una torsión inherente no óptima o una distribución de longitud de cuerda no óptima tiene varias ventajas con respecto a la fabricación de la parte de base, puesto que la forma de la parte de base se puede mantener mucho más simple que las formas de palas de aerogenerador modernas convencionales con una longitud de más de 40 metros. Por ejemplo se pueden evitar perfiles de pala de doble curvatura. Esto también hace más simple la producción de partes de molde para la fabricación de las palas. En definitiva, se puede reducir significativamente el tiempo de arranque inicial para desarrollar el diseño de un nuevo tipo de pala para el lanzamiento de producto del nuevo tipo de pala, y también se pueden reducir los costes de producción globales.

20 Sin embargo, poner este tipo de restricción en los parámetros de diseño del segmento de pala significa que el segmento de pala se desvía del diseño óptimo con respecto a la aerodinámica, en la que la torsión y la longitud de cuerda tiene una dependencia no lineal de la posición radial de la sección de pala. Así, este tipo de segmento de pala será inherentemente no ideal con respecto a la aerodinámica y en particular en relación al factor de inducción axial. Esta desviación se compensa al usar dispositivos alteradores de flujo a fin de ajustar las propiedades de sustentación y flujo entrante de diseño a la inducción axial apropiada casi óptima como función del radio de pala. Sin embargo, el objetivo de factor de inducción axial puede desviarse de la inducción axial aerodinámica óptima de 1/3 debido a consideraciones de estructura y de carga.

25 El ajuste de la carga a otro radio de pala implica la necesidad de usar dispositivos alteradores de flujo. Así, los dispositivos de guiado de flujo se usan para ajustar la pala al punto de diseño de rotor de modo que tiene una condición de flujo entrante y un coeficiente de sustentación casi óptimos.

30 En definitiva, se ve que el concepto inventivo detrás de la idea es una salida del proceso tradicional de diseñar palas de aerogenerador modernas, donde inicialmente se diseña la forma exterior y las prestaciones aerodinámicas de la pala, y lo primero después de eso se determina cómo planificar la fabricación de las palas según la especificación de diseño. La invención proporciona un nuevo proceso de diseño, en el que la producción se optimiza en relación a métodos eficaces para fabricar una parte de base de una pala de aerogenerador, y donde a la parte de base de la pala se les instalan posteriormente dispositivos de guiado de flujo a fin de obtener las especificaciones aerodinámicas apropiadas. Así, la parte de base de la pala puede desviarse sustancialmente del diseño aerodinámico óptimo.

35 El objetivo de inducción axial se puede ver como promedio sobre toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal, o se puede ver como objetivo individual para una pluralidad de segmentos radiales más pequeños dentro del primer segmento longitudinal. Incluso de nuevo, se puede ver como objetivo individual para cada sección transversal del primer segmento longitudinal de la pala.

40 El primer segmento longitudinal también se extiende a lo largo de al menos el 20 % de la extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de la primera pala.

45 Así, la pala comprende al menos un segmento longitudinal que se extiende a lo largo de una parte sustancial de la región de cuerpo de sustentación de la pala. Según una primera realización, la región de cuerpo de sustentación

incluye una región de punta de pala de la pala. Según una segunda realización, la pala comprende además una región de punta de pala que topa en la región de cuerpo de sustentación. Así, la región de punta de pala se puede ver ya sea como parte de la región de cuerpo de sustentación o como parte separada. Típicamente, la región de punta cubre el 5-10 % exterior de la extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación.

- 5 Para aerogeneradores y palas de aerogenerador, el lado de presión de la pala también se define y conoce como el lado contra el viento o el lado contraviento, mientras que el lado de succión también se define y conoce como el lado a favor del viento o el lado sotavento.

10 El punto de diseño de rotor se define como el punto en el que un coeficiente de potencia de la pala de aerogenerador es máximo para una velocidad eólica de diseño y una velocidad de rotor de diseño. Así, cada sección de la pala tiene una ratio de velocidad de punta de diseño local definido como velocidad de rotor de diseño multiplicada por el radio de sección de pala local dividida por el velocidad eólica de diseño. Así, se ve que el punto de diseño es el punto en el que un aerogenerador que usa tales palas de aerogenerador tiene su máxima eficiencia en la velocidad eólica para la que se diseña el aerogenerador. En el punto de diseño, la sección de pala local tiene una cuerda, torsión y forma de cuerpo de sustentación locales, que en el flujo entrante local da como resultado un coeficiente de sustentación de diseño. Todos los parámetros se deben elegir o ajustar con los dispositivos alteradores de flujo a fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial, que gobierna la potencia es producido por esta sección de pala. El punto de diseño de rotor se explica aún más en la sección 1.3.

20 Según la invención reivindicada, el primer segmento longitudinal de la primera pala se ubica a una primera distancia radial desde un extremo de raíz de la primera pala, y en donde el primer segmento longitudinal de la segunda pala se ubica a una segunda distancia radial desde un extremo de raíz de la segunda pala, y en donde la primera distancia radial es diferente de la segunda distancia radial. Así, está claro que las propiedades aerodinámicas no pueden ser idénticas para el primer segmento longitudinal de las dos palas sin el uso de dispositivos alteradores de flujo, puesto que se cambia la torsión y la longitud de cuerda de las diferentes posiciones radiales.

25 Según otra realización ventajosa, la primera parte de base se optimiza para funcionamiento en la primera distancia radial. Esto es, la primera parte de base se optimiza para la primera pala, que significa que la primera parte de base por sí misma puede lograr el objetivo de inducción axial de la primera pala en el punto de diseño de rotor.

30 Según incluso otra realización ventajosa, la primera parte de base tiene una forma de perfil que es sustancialmente un híbrido entre una primera forma de perfil para obtener un objetivo de inducción a una primera distancia radial en el punto de diseño de rotor y una segunda forma de perfil para obtener un objetivo de inducción a una segunda distancia radial en el punto de diseño de rotor. En este caso, ambas de la primera pala y la segunda pala tienen que instalarse posteriormente con dispositivos alteradores de flujo según la etapa c) a fin de obtener prestaciones aerodinámicas óptimas en el punto de diseño de rotor.

35 La primera parte de base puede tener una forma de perfil, por ejemplo, que es sustancialmente un promedio entre la primera forma de perfil y la segunda forma de perfil. Así, la primera parte de base tiene un perfil de diseño, que es aproximadamente un promedio entre un diseño óptimo para la primera pala y un diseño óptimo para la segunda pala.

Según una realización ventajosa, las etapas a) y b) se llevan a cabo conectando un extensor de buje a la primera pala. Así, la primera pala entera se reutiliza para la segunda pala al conectar una sección de raíz extra a la pala, haciendo de ese modo más grande el diámetro de rotor de un aerogenerador que usa la pala.

40 Según un segundo aspecto, la invención proporciona un grupo de palas de aerogenerador según la reivindicación 8 y que comprende al menos una primera pala de aerogenerador y una segunda pala de aerogenerador, en donde la primera pala de aerogenerador y la segunda pala de aerogenerador comprenden, cada una, una parte de base que se extiende longitudinalmente que tiene: un contorno perfilado que comprende un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde de salida con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, el contorno perfilado genera una sustentación cuando es impactado por un flujo de aire incidente, el contorno perfilado en la dirección radial se divide en una región de raíz con un perfil sustancialmente circular o elíptico lo más cerca del buje, una región de cuerpo de sustentación con un perfil generador de sustentación lo más alejado del buje, y preferiblemente una región de transición entre la región de raíz y la región de cuerpo de sustentación, la región de transición tiene un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial desde el perfil circular o elíptico de la región de raíz al perfil generador de sustentación de la región de cuerpo de sustentación. Según la invención, la primera pala de aerogenerador y la segunda pala de aerogenerador comprenden un primer segmento longitudinal que tiene una primera parte de base sustancialmente idéntica, en donde el primer segmento longitudinal se extiende a lo largo de al menos el 20 % de una extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de la segunda pala de aerogenerador, y en donde un factor de inducción de la primera parte de base de la segunda pala sin dispositivos alteradores de flujo en un punto de diseño de rotor se desvía de un objetivo de factor de inducción axial, y en donde el primer segmento longitudinal de la segunda pala se provee de varios primeros dispositivos alteradores de flujo dispuestos para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal para cumplir sustancialmente el objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño de rotor.

Según una realización ventajosa la segunda pala de aerogenerador comprende la parte de base de la primera pala de aerogenerador y además está provista de un extensor de buje.

5 Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene un factor de inducción axial, que sin dispositivos alteradores de flujo se desvía al menos un 5 % de un objetivo de factor de inducción axial en un punto de diseño, y el primer segmento longitudinal se provee de varios primeros dispositivos alteradores de flujo dispuestos para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal para cumplir sustancialmente el objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño.

10 Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión y/o una longitud de cuerda inherentes no ideales, y en donde el perfil en sección transversal se adapta para compensar la torsión y/o la longitud de cuerda no ideales al desplazar la inducción axial hacia el objetivo de inducción axial. Este tipo de pala es particularmente aplicable para diseñar palas de aerogenerador que tienen una parte de base con una distribución de cuerda y/o torsión simplificadas. Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión y/o una longitud de cuerda inherentes no ideales, y en donde el perfil en sección transversal se adapta para compensar la torsión y/o la longitud de cuerda no ideales al desplazar una inducción axial hacia un objetivo de inducción axial. Sin embargo, poner este tipo de restricción en los parámetros de diseño del segmento de pala significa que el segmento de pala se desvía del diseño óptimo con respecto a la aerodinámica. Así, este tipo de segmento de pala será inherentemente no ideal con respecto a la aerodinámica y en particular en relación a un coeficiente de sustentación óptimo para el segmento. Esta desviación se compensa al usar dispositivos alteradores de flujo a fin de ajustar la sustentación de diseño a la inducción axial apropiada casi óptima como función del radio de pala. El ajuste de la carga a otro radio de pala implica la necesidad de usar dispositivos alteradores de flujo.

20 Según otra realización ventajosa, el factor de inducción axial del primer segmento longitudinal con dispositivos alteradores de flujo se desvía no más del 2 % del objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño. Ventajosamente, la desviación no es más del 1 % del objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño.

25 Según incluso otra realización ventajosa, el factor de inducción de la primera parte de base sin medios alteradores de flujo se desvía del objetivo de factor de inducción axial a lo largo de sustancialmente toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal.

Según una realización, el objetivo de factor de inducción axial es sustancialmente igual al objetivo de factor de inducción axial aerodinámica óptima. De ese modo, es posible maximizar sustancialmente la energía extraída del viento y así maximizar la producción de energía de un aerogenerador que utiliza tales palas.

30 Sin embargo, el objetivo de factor de inducción axial puede encontrarse en el intervalo entre 0.25 y 0.4, o entre 0.28 y 0.38, o entre 0.3 y 0.33. Así, se ve que el objetivo de factor de inducción axial - debido a consideración estructural y operacional - puede desviarse del óptimo teórico de 1/3.

35 Según otra realización, el factor de inducción de la primera parte de base sin dispositivos alteradores de flujo en el punto de diseño se desvía al menos 10 %, o 20 % o 30 % del objetivo de factor de inducción axial. En otras palabras, el factor de inducción axial se desplaza de promedio más del 10 % al aplicar los dispositivos alteradores de flujo al primer segmento longitudinal de la pala.

40 Según incluso otra realización, la primera parte de base sin dispositivos alteradores de flujo en el punto de diseño se desvía además de un objetivo de carga, y en donde los primeros dispositivos alteradores de flujo se disponen además para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal para cumplir sustancialmente el objetivo de carga en el punto de diseño. El objetivo de carga se considera a este respecto para ser la fuerza de aire resultante o con más precisión la fuerza normal resultante al plano de rotor que influye en la sección de pala particular. El objetivo de carga se puede ver como promedio sobre toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal, o se puede ver como objetivo individual para una pluralidad de segmentos radiales más pequeños dentro del primer segmento longitudinal. Incluso de nuevo, se puede ver como objetivo individual para cada sección transversal del primer segmento longitudinal de la pala.

45 La carga de la primera parte de base puede sin dispositivos alteradores de flujo en el punto de diseño desviarse al menos un 5 %, o 10 %, o 20 % o 30 % del objetivo de carga. En otras palabras, la carga del primer segmento longitudinal se desplaza de promedio sobre toda la extensión longitudinal en al menos un 5 % o 10 % al aplicar los dispositivos alteradores de flujo al primer segmento longitudinal de la pala.

50 Ventajosamente, la carga del primer segmento longitudinal con dispositivos alteradores de flujo se desvía no más del 2 % del objetivo de carga en el punto de diseño. Ventajosamente, la desviación no es más del 1 % del objetivo de carga en el punto de diseño.

55 Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión inherente no ideal, tal como sin torsión, o una torsión reducida comparada con un objetivo de torsión de pala. Este tipo de parte de base se simplifica aún más comparada con formas de pala convencionales.

Según otra realización ventajosa, el primer segmento longitudinal en la dirección radial se divide en: una pluralidad de

secciones radiales, cada sección radial tiene un ángulo de ataque operativo promedio individual para el punto de diseño y que tiene una forma de cuerpo de sustentación en sección, que sin los primeros dispositivos alteradores de flujo tiene un ángulo de ataque óptimo en sección, en donde los primeros dispositivos alteradores de flujo se adaptan para desplazar el ángulo de ataque óptimo de la de forma de cuerpo de sustentación en sección hacia el ángulo de ataque operativo promedio para la sección radial.

Según incluso otra realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión, que es no ideal a lo largo de sustancialmente toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal. Por consiguiente, la torsión inherente difiere de la torsión ideal a lo largo de sustancialmente toda la extensión longitudinal del segmento, pero la torsión inherente puede ser diversas posiciones radiales idéntica a la torsión óptima. Así, gráficas que representan la torsión ideal y la torsión inherente pueden cruzarse entre sí en cierto punto.

La invención es particularmente idónea para optimizar las prestaciones de palas que sustancialmente no tienen torsión, es decir, palas que inherentemente no se han diseñado para compensar la velocidad de flujo entrante local debido a velocidad local variable de la pala. Por consiguiente, los dispositivos alteradores de flujo se pueden utilizar para variar el ángulo de desplazamiento en la dirección longitudinal de la pala, de modo que el ángulo de desplazamiento corresponde a una torsión virtual de la pala a fin de compensar la velocidad de flujo entrante local debido a la velocidad local variable de la pala. Sin embargo, la invención también se puede utilizar con otros tipos de palas y particularmente en palas que tienen un ángulo de torsión global reducido comparado con el óptimo. Por lo tanto, la pala según una realización de la invención tiene una región de cuerpo de sustentación con una torsión de menos de 8 grados. En otras palabras, la orientación del plano de cuerda cambia menos de 8 grados en la dirección radial de la pala. Sin embargo, la pala todavía puede ser predoblada y/o ser en disminución en la dirección radial de la pala. Según una realización alternativa la torsión es menos de 5 grados, o 3 grados, o incluso menos de 2 grados. De ese modo, es posible proporcionar una pala de aerogenerador con un perfil mucho menos complejo que una pala de aerogenerador convencional, que típicamente tiene una sección de cuerpo de sustentación con una torsión máxima entre 10 y 12 grados, a veces incluso 15 grados, y proporcionar a las palas dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar la torsión "faltante" o proporcionar la torsión "remanente".

Sin embargo, según una realización particularmente ventajosa, la región de cuerpo de sustentación de la pala es sustancialmente recta. En otras palabras, la orientación del plano de cuerda es sustancialmente la misma en la dirección radial entera de la pala. Por consiguiente, cada sección radial puede estar provista de dispositivos alteradores de flujo a fin de optimizar la sustentación de la pala sustancialmente recta. Esto proporciona un gran número de posibilidades para el diseño de palas, puesto que las palas se pueden diseñar sin torsión y todavía optimizarse para la velocidad radial local de la pala durante uso normal, es decir, en el punto de diseño. Esto significa que la pala se puede fabricar de partes individuales de pala de sección, p. ej., como partes de pala individuales, que se conectan mutuamente después de eso, o mediante el uso de partes de molde de sección como se muestra, por ejemplo, en el documento DE 198 33 869. Como alternativa, en una pala dada se puede instalar un extensor de buje sin cambiar la dirección de la cuerda para una posición radial dada de la pala. Esto también hace posible diseñar la pala sin un lado de presión de doble curvatura ideal, es decir, sin necesidad de tener un perfil de superficie tanto convexo como cóncavo en el lado de presión de la pala. En esta situación, los dispositivos alteradores de flujo pueden ser utilizados para compensar un perfil no ideal. Así, los conjuntos de molde se pueden fabricar con una forma mucho más simple. También, este tipo de pala puede hacer posible fabricar la pala por medio de métodos de fabricación más simples, tales como extrusión o algo semejante.

La primera derivada de la torsión se reduce con el aumento de distancia desde el buje. Por lo tanto, la torsión de la parte exterior de la pala, es decir, cerca de la punta, es menor que la torsión de la parte interior de la pala. En consecuencia, no todas las palas tienen que estar provistas de dispositivos alteradores de flujo cerca de extremo de punta. Sin embargo, preferiblemente al menos el 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, o 75 % interior del área de cuerpo de sustentación se provee de sección radial de pala que tiene dispositivos alteradores de flujo. El flujo entrante en la región de punta puede ser compensado alterando el ángulo de paso (*pitch*) de pala y/o la velocidad rotacional del rotor.

Según una realización particularmente ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión sustancialmente constante, p. ej., sustancialmente sin torsión, que significa que la cuerda de la primera parte de base se dispone sustancialmente en la misma dirección. Así, la primera parte de base puede ser sustancialmente recta.

Según otra realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión que depende linealmente de una posición radial. Esto es, el ángulo de torsión o el ángulo de cuerda varían linealmente en la dirección de envergadura o longitudinal del primer segmento longitudinal. Este tipo de segmento de pala se pueda ajustar para que siga la torsión ideal tan cercanamente como sea posible, pero tiene varias ventajas con respecto a obtener un diseño modular factible, donde la primera parte de base se reutiliza en otro tipo de pala o donde se "conecta" a una segunda parte de base de un segundo segmento longitudinal y que tiene otra dependencia de la posición radial, opcionalmente por medio de un segmento de pala intermedio de transición. En otras palabras, este tipo de segmento de pala tiene varias ventajas con respecto a obtener un diseño modular de la pala.

Según una primera realización, la primera parte de base tiene un ángulo de torsión inherente de modo que la primera parte de base sin dispositivos alteradores de flujo en el punto de diseño de rotor tiene un ángulo de flujo entrante, que

es menor que el ángulo de flujo entrante óptimo a lo largo de toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal. En esta situación, un único tipo de dispositivos alteradores de flujo puede ser suficiente para acomodar la estructura aerodinámica no ideal de la primera parte de base.

5 Según una segunda realización, el primer segmento longitudinal tiene un ángulo de torsión inherente de modo que la primera parte de base sin dispositivos alteradores de flujo en el punto de diseño de rotor comprende un primer segmento, en el que el ángulo de flujo entrante es menor que el ángulo de flujo entrante óptimo, y un segundo segmento, en el que el ángulo de flujo entrante es mayor que el ángulo de flujo entrante óptimo. En esta situación, puede ser necesario emplear tipos diferentes de dispositivos alteradores de flujo a fin de acomodar la estructura aerodinámica no ideal de la primera parte de base. Este tipo de pala puede ocurrir, si la torsión inherente de la primera parte de base es linealmente dependiente de la distancia radial desde el buje y donde la torsión inherente "cruza" la torsión ideal, que tiene una dependencia no lineal de la posición radial. Puesto que la torsión ideal tiene una dependencia proporcional inversa de la distancia radial desde el buje, una pala que tiene una primera parte de base con una dependencia de torsión lineal inherente puede comprender - visto desde el buje hacia la punta de pala - un primer segmento que tiene una torsión inherente que es menor que la torsión ideal, un segundo segmento yuxtapuesto que tiene una torsión inherente que es mayor que la torsión ideal, y un tercer segmento yuxtapuesto que tiene una torsión inherente que es menor que la torsión ideal.

20 Ventajosamente, la diferencia de raíz cuadrática media en la extensión longitudinal de la primera sección longitudinal entre el ángulo de flujo entrante promedio y el flujo entrante óptimo de ataque en el punto de diseño es más de 1 grado, o más de 2 grados, o más de 2.5 grados para el primer segmento longitudinal sin dispositivos alteradores de flujo. Así, la diferencia de raíz cuadrática media se calcula como desviación espacial absoluta en la dirección longitudinal de la pala. Esta desviación se observa además en un intervalo de tiempo dado, p. ej., un ciclo completo para un rotor de aerogenerador. Ventajosamente, la diferencia de raíz cuadrática media en la extensión longitudinal de la primera sección longitudinal entre el ángulo de flujo entrante promedio y el ángulo de flujo entrante óptimo en el punto de diseño es menos de 1 grado, o menos de 0.5 grados para el primer segmento longitudinal con los medios alteradores de flujo.

Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene una dimensión interior que varía linealmente en la dirección radial de la pala de tal manera que un factor de inducción de la primera parte de base sin dispositivos alteradores de flujo en un punto de diseño de rotor se desvía de un objetivo de factor de inducción. Este tipo de parte de base simplifica el diseño incluso aún más comparada con el diseño de diseños de pala convencionales.

30 A continuación se describen varias realizaciones ventajosas que tienen dimensiones interiores que varían linealmente y que están simplificadas comparadas con palas de aerogenerador modernas convencionales.

Según una primera realización ventajosa, la longitud de la cuerda de la primera parte de base varía linealmente en la dirección radial de la pala.

35 Según otra realización ventajosa, la primera parte de base tiene un grosor, que varía linealmente en la dirección radial de la pala. El grosor de la pala se define a este respecto como que es el grosor máximo de la pala, es decir, para cada perfil en sección transversal es la distancia máxima entre el lado de succión y el lado de presión de la pala (en una dirección perpendicular a la cuerda de cuerpo de sustentación en sección transversal).

40 Según incluso otra realización ventajosa, la primera parte de base tiene un grosor relativo constante. Esto es, la ratio entre el grosor y la cuerda es constante a lo largo de toda la extensión longitudinal de la primera sección que se extiende longitudinalmente de la pala. En principio el perfil relativo puede ser variable en la dirección longitudinal de la pala; sin embargo, según una realización ventajosa la primera parte de base comprende un perfil relativo constante.

En una realización, la primera parte de base comprende un perfil relativo constante a lo largo de toda la extensión de la primera sección que se extiende longitudinalmente. Esto es, cada sección transversal de la primera parte de base tiene el mismo perfil de cuerpo de sustentación relativo o forma global.

45 En otra realización, la primera parte de base tiene una longitud de cuerda constante. Esto significa que la longitud de cuerda es constante a lo largo de toda la extensión de la primera sección que se extiende longitudinalmente, o en otras palabras que el borde de ataque y el borde de salida de la primera parte de base son paralelos. Este tipo de restricción conlleva una desviación significativa de un objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño, pero puede simplificar significativamente la producción de la pala, así como el diseño y la fabricación de moldes para fabricar la pala.

50 En incluso otra realización, la primera parte de base tiene un grosor constante.

55 En una realización ventajosa particular, la primera parte de base comprende una pluralidad de segmentos longitudinales, cada uno tiene una dependencia separada que varía linealmente en la dirección radial de la pala. Así, por ejemplo, es posible diseñar una pala, que tiene una longitud de cuerda que varía linealmente por pieza. Cada segmento longitudinal debe extenderse a lo largo de al menos el 20 % de la longitud longitudinal de la región de cuerpo de sustentación.

Según una realización ventajosa, la primera parte de base se provee de una precurva lineal. De ese modo, la orientación angular de la parte de base en relación al eje de paso puede ser linealmente dependiente del radio de pala local. Como alternativa, la desviación transversal desde el eje de paso puede ser linealmente dependiente del radio de pala local.

5 De ese modo, es posible encajar la precurva de segmentos de pala individuales a fin de obtener una pala predoblada.

Según otra realización ventajosa, la primera parte de base se predobla, y la región de cuerpo de sustentación comprende segmentos longitudinales que comprenden partes de base sin precurvado. Así, la precurva se puede ubicar en uno o dos segmentos de la pala únicamente, por ejemplo, la parte externa de la región de cuerpo de sustentación y/o en la región de raíz.

10 Según una realización ventajosa, la primera parte de base es un perfil extrudido o extrudido por estirado. Tales partes de base son factibles para fabricación debido a dimensiones interiores que varían linealmente y simplifican significativamente el proceso de fabricación.

15 Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene un perfil en sección transversal, que cuando es impactada por un flujo de aire incidente en un ángulo de ataque de 0 grados tiene un coeficiente de sustentación, que es 0 o menos. Una sustentación positiva se define como coeficiente de sustentación que tiene una componente de sustentación dirigida desde el lado de presión (o lado a contraviento/contra el viento) hacia el lado de succión (o lado a sotavento/a favor del viento) de la pala. Una sustentación negativa se define como coeficiente de sustentación que tiene una componente de sustentación dirigida desde el lado de succión (o lado a sotavento/a favor del viento) hacia el lado de presión (o lado a contraviento/contra el viento) de la pala.

20 Así, la parte de base tiene un perfil en sección transversal que tiene una relación aerodinámica entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque, que cuando se traza en un sistema de coordenadas con el coeficiente de sustentación como función del ángulo de ataque cruza el origen del sistema de coordenadas o cruza el eje de coeficiente de sustentación en un valor negativo. En otras palabras, el coeficiente de sustentación cambia de signo en un ángulo de ataque positivo o en un ángulo de cero grados, es decir, en un ángulo de ataque no negativo.

25 Este tipo de parte de base tendrá por sí misma propiedades aerodinámicas inherentes no óptimas para una pala de aerogenerador convencional que tiene un perfil, que se retuerce en la dirección radial de la pala. Sin embargo, el uso de perfil con tales propiedades hace posible simplificar otras propiedades de la pala, tales como la torsión o la forma de cuerda de la pala. Por ejemplo, se hace posible proporcionar un segmento longitudinal que no tiene torsión o es lineal y/o que tiene una longitud de cuerda que varía linealmente en la dirección radial de la pala. Sin embargo, poner tales restricciones en el diseño de la parte de base de la pala conllevará inherentemente que el segmento se desvíe sustancialmente del objetivo de inducción axial casi óptimo de ese segmento. A fin de compensar tales desviaciones, se necesita cambiar las propiedades globales de flujo entrante y el coeficiente de sustentación del segmento. Sin embargo, puesto que el perfil novedoso tiene una relación entre coeficiente de sustentación y ángulo de ataque, que difiere significativamente de perfiles de pala convencionales, esto puede ser suficiente para uniformizar las desviaciones o al menos cambiar la inducción axial hacia el objetivo de inducción axial de modo que los dispositivos alteradores de flujo únicamente tienen que cambiar ligeramente la inducción axial.

35 Así, la pala comprende al menos un segmento longitudinal que se extiende a lo largo de una parte sustancial de la región de cuerpo de sustentación de la pala. Según una primera realización, la región de cuerpo de sustentación incluye una región de punta de pala de la pala. Según una segunda realización, la pala comprende además una región de punta de pala que topa en la región de cuerpo de sustentación. Así, la región de punta de pala se puede ver ya sea como parte de la región de cuerpo de sustentación o como parte separada. Típicamente, la región de punta cubre el 5-10 % exterior de la extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación.

40 En un ejemplo, en el que el primer segmento longitudinal tiene una torsión cero o una torsión que es menor que la torsión casi óptima, el perfil novedoso (con la relación mencionada anteriormente entre coeficiente de sustentación y ángulo de ataque) compensa la "falta" de torsión, puesto que el ángulo de ataque tiene que ser mayor que un perfil convencional a fin de obtener las características correctas de objetivo, p. ej., con respecto al coeficiente de sustentación necesario a fin de obtener la inducción axial correcta.

45 El uso del perfil novedoso hace factible lograr un diseño de pala modular, en el que la parte de base se puede usar para varios tipos de pala y longitudes de pala diferentes. Así, es posible reutilizar la parte de base de una pala existente aún más externa en una pala más grande/más larga, o como alternativa reutilizar la parte de base de una pala existente aún más interna en una pala más pequeña/más corta. En definitiva, es posible hacer un diseño de pala de tal manera que el diseño de pala de la región de cuerpo de sustentación se ensambla de secciones prediseñadas y que palas de longitudes diferentes se pueden componer parcialmente de secciones ya existentes de palas anteriores.

50 En global, la forma de la parte de base se puede mantener mucho más simple que la forma de palas de aerogenerador modernas convencionales con una longitud de más de 40 metros. Por ejemplo se pueden evitar perfiles de pala de doble curvatura. Esto también hace más simple la producción de partes de molde para la fabricación de las palas. En definitiva, se puede reducir significativamente el tiempo de arranque inicial para desarrollar el diseño de un nuevo tipo de pala para el lanzamiento de producto del nuevo tipo de pala, y también se pueden reducir los costes de producción globales.

- Así, según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene una torsión y/o una longitud de cuerda inherentes no ideales, y en donde el perfil en sección transversal se adapta para compensar la torsión y/o la longitud de cuerda no ideales al desplazar una inducción axial hacia un objetivo de inducción axial. Sin embargo, poner este tipo de restricción en los parámetros de diseño del segmento de pala significa que el segmento de pala se desvía del diseño óptimo con respecto a la aerodinámica. Así, este tipo de segmento de pala será inherentemente no ideal con respecto a la aerodinámica y en particular en relación a un coeficiente de sustentación óptimo para el segmento. Esta desviación se compensa al usar dispositivos alteradores de flujo a fin de ajustar la sustentación de diseño a la inducción axial apropiada casi óptima como función del radio de pala. El ajuste de la carga a otro radio de pala implica la necesidad de usar dispositivos alteradores de flujo.
- 5
- Así, según otra realización ventajosa, el primer segmento longitudinal se provee de varios primeros dispositivos alteradores de flujo dispuestos para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal para cumplir sustancialmente un objetivo de factor de inducción axial en un punto de diseño de rotor.
- 10
- A continuación se describen varias realizaciones ventajosas, todas las cuales proporcionan la relación deseada entre coeficiente de sustentación y ángulo de ataque.
- 15
- Según una realización ventajosa, la primera parte de base tiene un perfil en sección transversal que tiene una línea de alabeo y una línea de cuerda con una longitud de cuerda, y en donde la diferencia promedio entre la línea de cuerda y una línea de alabeo del perfil en sección transversal es negativa en toda la longitud de cuerda. Esto es, el alabeo está de promedio, cuando se ve en toda la longitud de la cuerda, más cerca del lado de presión de la pala que del lado de succión de la pala.
- 20
- Según otra realización, la línea de alabeo está más cerca del lado de presión que el lado de succión en toda la longitud de la cuerda. El alabeo y la cuerda son coincidentes por supuesto en el borde de ataque y en el borde de salida.
- Según una realización alternativa, la primera parte de base tiene un perfil en sección transversal que tiene una línea de alabeo y una línea de cuerda con una longitud de cuerda, en donde la línea de alabeo y la línea de cuerda son coincidentes en toda la longitud de la cuerda. Esto es, el perfil en sección transversal es simétrico alrededor de la cuerda. Este tipo de perfil es sumamente ventajoso desde un punto de vista de fabricación.
- 25
- En definitiva, una primera parte de base que comprende: una cuerda lineal, un grosor lineal, y una torsión, que varía linealmente o es constante en la dirección radial de la pala, tiene varias ventajas cuando se diseña una pala ensamblada modular y con respecto a fabricar tales palas.
- Según un tercer aspecto, la invención proporciona un grupo de aerogeneradores que comprende al menos un primer aerogenerador y un segundo aerogenerador, en donde el primer aerogenerador comprende un rotor con un número, preferiblemente dos o tres, de primeras palas de aerogenerador según el segundo aspecto de la invención, y el segundo aerogenerador comprende un rotor con un número, preferiblemente dos o tres, de segundas palas de aerogenerador según el segundo aspecto de la invención.
- 30
- Preferiblemente, la longitud de la pala de aerogenerador es de al menos 40 metros, o al menos 50 metros, o al menos 60 metros. Las palas puede incluso ser de al menos 70 metros, o al menos 80 metros. También son posibles palas que tienen una longitud de al menos 90 metros o al menos 100 metros.
- 35
- Según una realización ventajosa, la pala y en particular la primera parte de base comprenden una estructura de carcasa hecha de un material composite. El material composite puede ser una matriz de resina reforzada con fibras. En la mayoría de casos el polímero aplicado es resina termoendurecible, tal como poliéster, vinilester o epoxi. La resina también puede ser un termoplástico, tal como nilón, PVC, ABS, polipropileno o polietileno. Incluso de nuevo la resina puede ser otro termoplástico termoendurecible, tal como PBT cíclico o PET. El refuerzo de fibra se basa muy a menudo en fibras de vidrio o fibras de carbono, pero también pueden ser fibras de plástico, fibras vegetales o fibras de metal. El material composite a menudo comprende una estructura laminar que incluye un material de núcleo, tal como polímero espumado o balsa.
- 40
- Según otra realización ventajosa, la pala comprende una sección de refuerzo que se extiende longitudinalmente que comprende una pluralidad de capas de fibra. La sección de refuerzo, también llamada laminado principal, se extenderá típicamente a través la primera parte de base del primer segmento longitudinal.
- 45
- Según una realización ventajosa, el primer segmento longitudinal se extiende a lo largo de al menos un 25 %, o 30 %, o 40 %, o 50 %, de la región de cuerpo de sustentación. El primer segmento longitudinal puede incluso extenderse a lo largo de al menos el 60 %, 70 % o 75 % de la región de cuerpo de sustentación. La extensión del primer segmento longitudinal puede incluso ser hasta un 100 %, cuando la región de punta se considera que no es parte de la región de cuerpo de sustentación. Sin embargo, el primer segmento longitudinal puede como tal ser restringido a parte de la región de cuerpo de sustentación, en la que se pueden lograr prestaciones aerodinámicas teóricas casi óptimas en el punto de diseño. Esto excluye la parte de punta, la sección de raíz y la sección de transición, que debido a consideraciones de carga y estructurales siempre diferirán significativamente de las prestaciones aerodinámicas teóricas casi óptimas.
- 50
- 55

Ventajosamente, la región de cuerpo de sustentación puede comprender además un segmento de transición que se extiende longitudinalmente. El segmento de transición - no confundir con la región de transición de la pala - se puede extender radialmente a lo largo del 5-10 % de la región de cuerpo de sustentación, y se utiliza en la región de cuerpo de sustentación para obtener una transición gradual entre dos segmentos que se extienden longitudinalmente según la invención. Así, se reconoce que la pala puede comprender varias secciones que se extienden longitudinalmente que se extienden a lo largo de una parte sustancial de la pala y varios segmentos de transición. Como ejemplo, la parte exterior de la pala puede comprender un primer segmento de pala que se extiende longitudinalmente que se extiende a lo largo de aproximadamente el 40 % de la región de cuerpo de sustentación, un segmento de transición que se extiende a lo largo de aproximadamente el 10 % de la región de cuerpo de sustentación, un segundo segmento de pala que se extiende longitudinalmente que se extiende a lo largo de aproximadamente el 40 % de la región de cuerpo de sustentación, y finalmente una punta de sección de pala que se extiende a lo largo de aproximadamente el 10 % de la región de cuerpo de sustentación.

Según una realización ventajosa, el primer segmento longitudinal se proporciona en una posición interna de la región de cuerpo de sustentación, es decir, en una parte más cerca de la región de transición o la región de raíz, preferiblemente dentro de dos metros de la región de transición de la región de raíz, y más preferiblemente colindante a la región de transición o la región de raíz opcionales. La pala puede estar provista de segmentos longitudinales adicionales yuxtapuestos al primer segmento longitudinal. Todos estos deben extenderse a lo largo de al menos el 25 % de la extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación.

Ventajosamente, los medios de guiado de flujo comprenden una sección multielemento, tal como un listón, o una aleta, es decir, los medios de guiado de flujo preferiblemente comprenden partes multielemento para cambiar las características de perfil de diferentes segmentos de pala. La sección multielemento se adapta para alterar las propiedades de flujo entrante y la carga del primer segmento longitudinal de la pala. Preferiblemente, la sección multielemento altera al menos una parte sustancial del primer segmento longitudinal, p. ej., a lo largo de al menos el 50 % del primer segmento longitudinal. De ese modo, es posible cambiar varios parámetros de diseño, tales como la sustentación, el alabeo y el ángulo de ataque de diseño para el segmento, de un diseño de base (de la primera parte de base), que tiene un diseño inherentemente no óptimo desde un punto de vista aerodinámico con respecto a tales parámetros, pero que se optimiza desde un punto de vista de fabricación. Así, es posible instalar posteriormente las partes multielemento a la primera parte de base a fin de optimizar la aerodinámica. Por consiguiente, uno o más del número de primeros dispositivos alteradores de flujo se pueden disponer en la proximidad y/o a lo largo del borde de ataque de la primera parte de base. Además, uno o más del número de dispositivos alteradores de flujo se pueden disponer en la proximidad de y/o a lo largo del borde de salida de la primera parte de base. Así, el perfil global puede convertirse en un perfil multielemento que tiene al menos dos elementos separados. Por consiguiente, la primera parte de base se puede construir como parte portadora de carga de la pala, mientras que los medios de guiado de flujo se usan para optimizar la aerodinámica con respecto a hacer coincidir las características aerodinámicas de sección local al punto de diseño de rotor.

La sección multielemento se puede disponer en una posición fija en relación a la primera parte de base. De ese modo, la pala se ha ajustado permanente o semipermanentemente a fin de compensar el perfil no ideal de la primera parte de base. Como alternativa, la sección multielemento puede ser ajustada activamente en relación a la primera parte de base. Así, los parámetros de diseño se pueden ajustar activamente, p. ej., según las condiciones operacionales para el aerogenerador. Los primeros medios de guiado de flujo o la sección multielemento pueden ser operacionales en traslación y/o en rotación o ajustables en relación a la primera parte de base.

Según una realización ventajosa, el número de primeros dispositivos alteradores de flujo comprenden una sección multielemento que tiene un perfil de cuerpo de sustentación con una cuerda que se extiende entre un borde de ataque y un borde de salida. Esta sección multielemento se puede formar como cuerpo de sustentación que tiene una longitud de cuerda en el intervalo del 5 % al 30 % de una longitud de cuerda local de la primera parte de base. Como alternativa, el elemento de perfil mencionado anteriormente tiene una dimensión de sección transversal interior máxima, que corresponde del 5 % al 30 % de la longitud de cuerda de la primera parte de base.

Según una primera realización, el número de primeros medios de guiado de flujo o el elemento de perfil estructural se dispone con una distancia a la primera parte de base. Como alternativa, el elemento de perfil estructural se puede conectar a la superficie de la primera parte de base, así como tal para alterar la superficie envolvente de la propia parte de base.

Según incluso otra realización, la primera parte de base tiene un área superficial que es al menos 5 o 7 veces mayor que la superficie total del número de dispositivos alteradores de flujo.

Incluso de nuevo, el dispositivo de guiado de flujo puede ser ajustable a fin de eliminar pasivamente variaciones de variaciones de flujo entrante.

Los dispositivos alteradores de flujo también pueden comprender un elemento montado en superficie, que altera una envolvente global del primer segmento longitudinal de la pala. Ventajosamente, el elemento montado en superficie se dispone en proximidad del borde de ataque y/o el borde de salida de la primera parte de base.

- Los dispositivos alteradores de flujo también pueden comprender medios de control de capa límite, tales como orificios o una ranura para ventilación, generadores de vórtice y una aleta Gurney. Preferiblemente, los medios de control de capa límite se usan en combinación con las secciones multielemento o los elementos montados en superficie. Típicamente se necesitan secciones multielemento o elementos montados en superficie para lograr el gran cambio en el factor de inducción axial, es decir, para ajuste aproximado al objetivo. Sin embargo, los medios de control de capa límite se pueden utilizar a fin de ajuste fino del factor de inducción axial al objetivo.
- Ventajosamente, la pala comprende varias secciones de pala modulares. El primer segmento longitudinal puede ser, por ejemplo, este tipo de sección de pala. La pala también puede ser una pala divisible o partida, en cuyo caso la pala se puede dividir en un extremo del primer segmento longitudinal. Según una primera realización ventajosa, las secciones de pala modulares comprenden una sección de raíz, el primer segmento longitudinal y una sección de punta. Según una segunda realización ventajosa, la sección de raíz comprende la región de raíz y la región de transición. Según una tercera realización ventajosa, la pala comprende además una sección de extensor para extender la longitud de la pala, preferiblemente añadida a la sección de raíz de la pala, tal como un extensor de buje.
- Según un aspecto adicional, la invención proporciona un sistema que comprende un grupo de secciones de raíz, opcionalmente un grupo de secciones de extensor, un grupo de secciones de cuerpo de sustentación que incluyen la primera parte de base, y un grupo de secciones de punta. Según una realización ventajosa, una sección de pala modular del grupo de secciones de raíz, opcionalmente al menos una sección de pala modular del grupo de secciones de extensor, al menos una sección de pala modular del grupo de secciones de cuerpo de sustentación y una sección de pala modular del grupo de secciones de punta se pueden combinar y ensamblar, para formar palas con longitudes diferentes.
- Según incluso otro aspecto, la invención proporciona un aerogenerador que comprende un rotor que incluye varias palas, preferiblemente dos o tres, según cualquiera de las realizaciones mencionadas anteriormente.
- Ventajosamente, el aerogenerador comprende un vástago de rotor de eje sustancialmente horizontal. Preferiblemente, el aerogenerador funciona en una configuración a contraviento, p. ej., según el "concepto danés".
- La invención se explica en detalle a continuación con referencia a una realización mostrada en los dibujos, en los que la figura 1 muestra un aerogenerador,
- la figura 2 muestra una vista esquemática de una pala de aerogenerador,
- la figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil de cuerpo de sustentación,
- la figura 4 muestra una vista esquemática de velocidades de flujo y fuerzas aerodinámicas en un perfil de cuerpo de sustentación,
- la figura 5 muestra una vista esquemática de una pala que consiste en diferentes secciones de pala,
- la figura 6a muestra una curva de potencia versus la velocidad eólica para un aerogenerador
- la figura 6b muestra una curva de velocidad de rotor versus la velocidad eólica para un aerogenerador
- la figura 6c muestra una curva de paso de punta de pala versus la velocidad eólica para un aerogenerador
- la figura 7 muestra un triángulo de vector de velocidad para una sección en una pala de aerogenerador,
- las figuras 8a y 8b muestran gráficas de flujo entrante y carga de pala, respectivamente, como función de un radio de pala local,
- la figura 9 muestra una primera realización de una pala,
- la figura 10 muestra una segunda realización de una pala,
- la figura 11 muestra una tercera realización de una pala,
- las figuras 12a-c y las figuras 13a-c ilustran medidas compensatorias para corregir torsión no óptima,
- las figuras 14a-c y las figuras 15a-c ilustran medidas compensatorias para corregir longitud de cuerda no óptima,
- la figura 16 muestra el punto de funcionamiento para una sección de pala real de una pala de aerogenerador en comparación con el punto de diseño de sección de cuerpo de sustentación.
- las figuras 17a-17e muestran la sección transversal de una pala provista de orificios de ventilación y el efecto de usar ventilación,

- las figuras 18a-18c muestran la sección transversal de una pala provista de elementos montados en superficie y el efecto de usar elementos montados en superficie,
- la figura 19a muestra las secciones transversales de palas provistas de perfiles multielemento y el efecto de usar tales perfiles,
- 5 las figuras 19b-d muestran diferentes medios para localizar perfiles multielemento en relación a una sección de pala transversal,
- las figuras 20a y 20b muestran las secciones transversales de una pala provista de una aleta Gurney y el efecto de usar una aleta Gurney,
- 10 las figuras 21a-21c muestran la sección transversal de una pala provista de generadores de vórtice y el efecto de usar generadores de vórtice,
- las figuras 22a y 22b muestran las secciones transversales de una pala provista de un elemento de alerón y el efecto de usar un elemento de alerón,
- la figura 23a muestra gráficas del ángulo de ataque promedio y óptimo como función de la distancia radial desde un buje,
- 15 la figura 23b muestra una gráfica del ángulo de desplazamiento como función de la distancia radial desde un buje,
- la figura 23c muestra gráficas de la relación entre el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación y la relación entre el ángulo de ataque y el coeficiente de sustentación para una parte exterior de una pala según la invención, y
- la figura 23d muestra gráficas de la relación entre el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación y la relación entre el ángulo de ataque y el coeficiente de sustentación para una parte interior de una pala según la invención.
- 20 Las figuras 24a-g muestran gráficas que ilustran diferentes realizaciones de palas que tienen torsión y/o cuerda linealmente dependientes,
- la figura 25 muestra una cuarta realización de una pala,
- la figura 26 muestra una gráfica de una realización de una pala que tiene una precurva lineal,
- la figura 27 muestra un perfil de pala que tiene un lado de presión de doble curvatura,
- 25 la figura 28 muestra un perfil de pala sin una doble curvatura,
- la figura 29 muestra una gráfica de una realización de una pala que tiene cero alabeo,
- la figura 30 muestra un perfil de pala simétrico,
- la figura 31 muestra una gráfica de una realización de una pala que tiene un alabeo negativo,
- la figura 32 muestra un primer perfil de pala con un alabeo negativo,
- 30 la figura 33 muestra un segundo perfil de pala con un alabeo negativo,
- la figura 34 ilustra el principio de usar una sección de pala común para dos tipos diferentes de palas de aerogenerador,
- la figura 35 muestra el principio de usar un extensor de buje,
- la figura 36 ilustra el principio de ajustar características de pala a un objetivo de valor,
- la figura 37 muestra un ejemplo de una distribución de longitudes de cuerda,
- 35 la figura 38 muestra una comparación entre la torsión de una pala transformable y la de una pala existente,
- la figura 39 muestra gráficas del ángulo de flujo entrante para diferentes palas y velocidades eólicas,
- la figura 40 muestra gráficas del coeficiente de sustentación para diferentes palas y velocidades eólicas,
- la figura 41 muestra gráficas del factor de inducción axial para diferentes palas y velocidades eólicas,
- la figura 42 muestra gráficas de la distribución de grosores relativos para diferentes palas,
- 40 la figura 43 muestra palas transformables que tienen una parte de base compartida externa,
- la figura 44 muestra un ejemplo de distribuciones de longitudes de cuerda para palas transformables,

la figura 45 muestra gráficas del ángulo de flujo entrante para palas transformables,  
 la figura 46 muestra gráficas del coeficiente de sustentación para palas transformables,  
 la figura 47 muestra gráficas del ángulo de flujo entrante para otras palas transformables,  
 la figura 48 muestra gráficas del coeficiente de sustentación para otras palas transformables,

- 5 la figura 49 muestra un ejemplo de palas transformables escalonadas,  
 la figura 50 muestra otro ejemplo de distribuciones de longitudes de cuerda para palas transformables,  
 la figura 51 muestra gráficas del ángulo de flujo entrante para palas transformables, y  
 la figura 52 muestra gráficas del coeficiente de sustentación para palas transformables.

10 La figura 1 ilustra un aerogenerador contraviento moderno convencional según el llamado "concepto danés" con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un vástago de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un buje 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el buje 8, cada una tiene una raíz de pala 16 más cercana al buje y una punta de pala 14 más alejada del buje 8. El rotor tiene un radio denotado R.

15 La figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala de aerogenerador 10. La pala de aerogenerador 10 tiene la forma de una pala de aerogenerador convencional y comprende una región de raíz 30 más cerca del buje, una región perfilada o de cuerpo de sustentación 34 más alejada del buje y una región de transición 32 entre la región de raíz 30 y la región de perfil de cuerpo de sustentación 34. La pala 10 comprende un borde de ataque 18 encarado a la sentido de rotación de la pala 10, cuando la pala se monta en el buje, y un borde de salida 20 encarado a la dirección opuesta del borde de ataque 18.

20 La región de cuerpo de sustentación 34 (también llamada la región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a generar sustentación, mientras que la región de raíz 30 debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, que, por ejemplo, hace más fácil y más seguro montar la pala 10 en el buje. El diámetro (o la cuerda) de la región de raíz 30 es típicamente constante a lo largo de toda el área de raíz 30. La región de transición 32 tiene un perfil de transición 42 que cambia gradualmente desde la forma circular o elíptica 40 de la región de raíz 30 al perfil de cuerpo de sustentación 50 de la región de cuerpo de sustentación 34.  
 25 La longitud de cuerda de la región de transición 32 típicamente aumenta de manera sustancialmente lineal con el aumento de la distancia r desde el buje.

La región de cuerpo de sustentación 34 tiene un perfil de cuerpo de sustentación 50 con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque 18 y el borde de salida 20 de la pala 10. La anchura de la cuerda disminuye con el aumento de distancia r desde el buje.

30 Cabe señalar que las cuerdas de diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, puesto que la pala puede ser retorcida y/o curvada (es decir, predoblada), proporcionando así al plano de cuerda un curso correspondientemente retorcido y/o curvado, este es a menudo el caso a fin de compensar la velocidad local de la pala que es dependiente del radio desde el buje.

35 La figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil de cuerpo de sustentación 50 de una pala típica de un aerogenerador representada con los diversos parámetros, que se usan típicamente para definir la forma geométrica de un cuerpo de sustentación. El perfil de cuerpo de sustentación 50 tiene un lado de presión 52 y un lado de succión 54, que durante el uso - es decir, durante la rotación del rotor - normalmente se encara hacia el lado contra el viento (o contraviento) y el lado a favor del viento (o sotavento), respectivamente. El cuerpo de sustentación 50 tiene una cuerda 60 con una longitud de cuerda c que se extiende entre un borde de ataque 56 y un borde de salida 58 de la pala. El cuerpo de sustentación 50 tiene un grosor t, que se define como la distancia entre el lado de presión 52 y el lado de succión 54. El grosor t del cuerpo de sustentación varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación desde un perfil simétrico se da por una línea de alabeo 62, que es una línea mediana a través del perfil de cuerpo de sustentación 50. La línea mediana se puede encontrar dibujando círculos inscritos desde el borde de ataque 56 al borde de salida 58. La línea mediana sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia desde la cuerda 60 se llama alabeo f. La asimetría también se puede definir mediante el uso de parámetros llamados el alabeo superior y alabeo inferior, que se definen como las distancias desde la cuerda 60 y el lado de succión 54 y el lado de presión 52, respectivamente.  
 40  
 45

Los perfiles de cuerpo de sustentación se caracterizan a menudo por los siguientes parámetros: la longitud de cuerda c, el alabeo máximo f, la posición  $d_f$  del alabeo máximo f, el grosor máximo de cuerpo de sustentación t, que es el diámetro más grande de los círculos inscritos a lo largo de la línea mediana de alabeo 62, la posición d del grosor máximo t, y un radio de morro (no se muestra). Estos parámetros se definen típicamente como ratios a la longitud de cuerda c.  
 50

La figura 4 muestra una vista esquemática de velocidades de flujo y fuerzas aerodinámicas en el perfil de cuerpo de sustentación 50. El perfil de cuerpo de sustentación se ubica en la posición radial o radio r del rotor de la que la pala

es parte, y el perfil se establece a una torsión o ángulo de paso dados  $\theta$ . Una velocidad de corriente libre axial  $v_a$ , que según la teoría se da óptimamente como 2/3 de la velocidad eólica  $v_w$  y una velocidad tangencial  $r \cdot \omega$ , que se orienta en un sentido de rotación 64 para el rotor, forman combinadas una velocidad resultante  $v_r$ . Junto con la línea de cuerda 60, la velocidad resultante  $v_r$  define un ángulo de flujo entrante,  $\Phi$ , a partir del cual se puede deducir un ángulo de ataque  $\alpha$ .

Cuando el perfil de cuerpo de sustentación 50 es impactado por un flujo de aire incidente, se genera una sustentación 66 perpendicular a la velocidad resultante  $v_r$ . Al mismo tiempo, el cuerpo de sustentación se ve afectado por un arrastre 68 orientado en la dirección de la velocidad resultante  $v_r$ . Sabiendo la sustentación y el arrastre para cada posición radial se hace posible calcular la distribución de fuerzas aerodinámicas resultantes 70 a lo largo de toda la longitud de la pala. Estas fuerzas aerodinámicas 70 se dividen típicamente en dos componentes, es decir una distribución de fuerzas tangenciales 74 (en el plano rotacional del rotor) y un empuje 72 orientado en un ángulo recto con la fuerza tangencial 74. Además, el cuerpo de sustentación es afectado por un coeficiente de momento 75.

La par de impulsión del rotor se puede calcular integrando la fuerza tangencial 74 en toda la longitud radial de la pala. La par de impulsión junto con la velocidad rotacional del rotor proporciona la potencia de rotor global para el aerogenerador. Integrar el empuje local 72 en toda la longitud de la pala produce el empuje de rotor total, p. ej., en relación a la torre.

A continuación (sección 1), se describe el diseño de pala según métodos de diseño convencionales.

#### 1. Estado de la técnica de diseño de pala para aerogeneradores

El diseño de rotor para aerogeneradores actualmente es un compromiso entre prestaciones aerodinámicas y cargas de diseño globales de aerogenerador. Muy a menudo, la pala se diseña para mínimo coste de energía (COE, del inglés *cost of energy*) encontrando la compensación óptima entre rendimiento energético y cargas de turbina. Esto significa que el diseño aerodinámico no se puede ver como problema aislado, porque no tiene sentido ver aislado el máximo rendimiento energético en caso de que esto pueda llevar a cargas excesivas. Por lo tanto, no se aplican suficientemente los métodos clásicos analíticos o semianalíticos para diseñar la pala.

##### 1.1. Diseño de parámetros de pala

El diseño aerodinámico de una pala nueva para un rotor implica directamente el siguiente radio de rotor global,  $R$ , y el número de palas,  $B$ .

La forma plana global de pala, que se describe por medio de los siguientes parámetros en la figura 3 y la figura 4: la longitud de cuerda,  $c$ , torsión,  $\Theta$  y grosor  $t$  relativo a la cuerda  $c$ . Estos se deben determinar todos como función del radio de pala local  $r$ .

La ubicación del eje de paso versus el radio de pala se puede definir como  $x/c(r)$  y  $y/c(r)$ , es decir, retrobarrido y precurvatura. Cuando la pala se monta en el rotor, la precurvatura es una predesviación de la pala en la dirección perpendicular al plano de rotor. La finalidad de la precurvatura es impedir que la pala golpee la torre cuando la pala se desvía durante el funcionamiento. El retrobarrido prescrito permite la colocación de las secciones de cuerpo de sustentación a lo largo del eje longitudinal de la pala, lo que influye en las cargas de sección por toda la pala.

Un elemento clave importante en el estado de la técnica de métodos de diseño de rotor aerodinámico es el uso de cuerpos de sustentación prediseñados. Los cuerpos de sustentación se seleccionan para estaciones de pala a lo largo del radio de pala. Los parámetros que describen cada sección de cuerpo de sustentación se muestran en la figura 4: El coeficiente de sustentación 66,  $c_l$ , el coeficiente de arrastre 68,  $c_d$ , el coeficiente de momento 75  $c_m$ . Para estaciones de pala individuales, estas características de cuerpo de sustentación se describen todas versus el ángulo de ataque,  $\alpha$ , que entonces se determina por el ángulo de flujo entrante de pala global para cada sección.

La gran amplitud operacional para rotores de aerogenerador y la necesidad de características aerodinámicas robustas y fiables en todas condiciones de terreno hacen que los cuerpos de sustentación de aerogenerador difieran de los cuerpos de sustentación tradicionales de aviación y planeadores.

##### 1.2. Estrategia de control

Como receptoras de la potencia y la mayoría de la carga, las palas en el rotor de aerogenerador son componentes muy importantes en el diseño de sistema de aerogenerador. Las palas de aerogenerador por lo tanto se diseñan con un estrecho conocimiento de la estrategia de control de aerogenerador. La estrategia de control define cómo se optimiza y controla la potencia de rotor para diferentes velocidades eólicas.

Existen tres esquemas de control fundamentalmente diferentes:

1. Velocidad de rotor variable donde el objetivo de punto de diseño del rotor se puede obtener para las velocidades eólicas en las que la velocidad de rotor es variable. Usualmente el paso de pala se mantiene constante.

2. Velocidad de rotor constante con paso de pala variable. Aquí el objetivo de punto de diseño del rotor se aproxima lo máximo posible ajustando el paso de pala.

3. Velocidad de rotor constante y paso de pala constante. Aquí el objetivo de punto de diseño del rotor únicamente se puede cumplir en una única velocidad eólica.

5 Las figuras 6a-6c muestran las características de potencia para un aerogenerador típico de velocidad variable y paso controlado (PRVS):

La figura 6a muestra una curva de potencia típica versus la velocidad eólica. A velocidades eólicas bajas, la potencia aumenta con la velocidad eólica hasta alcanzar la potencia nominal. Hay dos regiones importantes de velocidad eólica, es decir una región de optimización de potencia y una región de control de potencia. La potencia se optimiza en la  
10 región en la que la velocidad eólica es menor que un umbral de valor ilustrado por la línea discontinua en la figura 6, mientras que la región de control de potencia se encuentra en la región en la que la potencia es constante a velocidades eólicas más altas. Durante la región de optimización de potencia, el objetivo de punto de diseño de rotor se sigue variando ya sea el paso de punta de pala o la velocidad de rotor. Esto se hace para maximizar la potencia y de ese modo el rendimiento energético.

15 Las figuras 6b y 6c muestran los parámetros de control que gobierna el diseño de pala de aerogenerador: La figura 6b muestra la velocidad de rotor,  $\Omega$ , versus la velocidad eólica y la figura 6c muestra el ángulo de paso de punta de pala,  $\Theta$ . La velocidad de rotor tiene un valor mínimo en velocidades eólicas bajas y cuando se sigue la potencia óptima hasta la potencia nominal esto corresponde a un aumento lineal de la velocidad de rotor con la velocidad eólica. Cuando se alcanza un valor máximo dado para la velocidad de rotor, este se mantiene entonces constante durante el control de potencia. El paso de pala típicamente se mantiene constante durante la optimización de potencia y luego se aumenta con la velocidad eólica durante el control de potencia para impedir que la potencia supere el valor nominal.

20 Durante la región de control de potencia, para la mayoría de turbinas la potencia se mantiene cerca de la potencia nominal de tren de impulsión al ajustar el ángulo de paso de pala ya sea de modo que la pala llega a desprendimiento de flujo y opuestamente hacia menos carga. Algunas turbinas tiene control de desprendimiento de flujo, donde el paso de pala se mantiene constante. Aquí el valor de potencia nominal se obtiene permitiendo que partes de la pala vayan a desprendimiento de flujo pasivamente por diseño.

### 1.3. Objetivo de punto de diseño de rotor

Independientemente del tipo de optimización de potencia, una pala de aerogenerador se diseña para funcionamiento en un objetivo de punto de diseño. Para velocidad de rotor variable y/o paso de pala variable, el funcionamiento en el  
30 objetivo de punto de diseño se puede obtener dentro de un intervalos de velocidades eólicas, mientras que para un rotor controlado por desprendimiento de flujo, el funcionamiento en el objetivo de punto de diseño aparece únicamente en una única velocidad eólica.

El objetivo de punto de diseño de rotor se caracteriza porque la correspondiente ratio de velocidad de punta de diseño, definida como la ratio entre la velocidad de punta y la velocidad eólica,  $X = r \cdot \Omega / V$ , donde  $\Omega$  es la velocidad rotacional del rotor. En el objetivo de punto de diseño, el coeficiente de potencia de rotor es máximo comparado con puntos de  
35 funcionamiento alejados del objetivo de punto de diseño.

El punto de diseño de rotor se puede ver como promedio sobre toda la extensión longitudinal del primer segmento longitudinal, o se puede ver como objetivo individual para una pluralidad de segmentos radiales más pequeños dentro del primer segmento longitudinal. Incluso de nuevo, se puede ver como objetivo individual para cada sección  
40 transversal del primer segmento longitudinal de la pala.

Cuando se determina el objetivo de punto de diseño de rotor y se establece la estrategia de control de turbina, se seleccionan cuerpos de sustentación y se decide el radio de rotor y el número de palas. Los parámetros que se dejan son entonces la cuerda local, la torsión y el grosor versus el radio de pala más el objetivo de punto de diseño de  
45 sección local. Estos se encuentran entonces al optimizar el objetivo de prestaciones de punto de diseño de rotor teniendo en cuenta cargas y coste de energía. El coeficiente de potencia de rotor en el objetivo de punto de diseño no es por lo tanto necesariamente el valor alcanzable óptimo, pero para un rotor dado siempre existirá un objetivo de punto de diseño.

### 1.4. Objetivo de punto de diseño de sección local

El objetivo de punto de diseño de sección local se define a partir del triángulo de velocidades para la sección dada como se muestra en la figura 7. Aquí, la velocidad resultante,  $W$ , se compone por la velocidad de flujo axial,  $V(1-a)$ , y la velocidad de flujo tangencial,  $r \Omega (1+a)$ . La tangente al ángulo de flujo global,  $\Phi$ , es igual a la ratio entre la componente axial y la componente tangencial. El factor de inducción axial,  $a$ , expresa la reducción porcentual de la velocidad de flujo libre en el plano de rotor. El factor de inducción tangencial expresa la rotación porcentual de la estela de rotor en el plano de rotor provocada por el rotor. El ángulo de flujo global,  $\Phi$ , se compone de nuevo por el ángulo  
55 de torsión local,  $\Theta$ , y el ángulo de ataque local,  $\alpha$ , como se muestra en la figura 4.

5 Cuando se conoce la cuerda local  $c$ , y la torsión local  $\Theta$ , así como los coeficientes de fuerza de sección de cuerpo de sustentación versus el ángulo de ataque local  $\alpha$ , es posible usar el llamado método de momento de elemento de pala (BEM) para resolver el equilibrio entre el flujo bruto global a través del anillo de rotor cubierto por la sección de pala y las fuerzas locales sobre cada una de las palas. Se puede calcular la fuerza normal resultante perpendicular al plano de rotor y la fuerza tangencial paralela al plano de rotor. A través de este procedimiento de cálculo, se determinan los factores de inducción y, cuando se funciona en el objetivo de punto de diseño de rotor, el factor de inducción se denota entonces como el objetivo de factor de inducción.

10 Viceversa, si se decide sobre el objetivo de factor de inducción es posible derivar la cuerda y la torsión locales cuando se conoce la sección de cuerpo de sustentación. En caso de diseñar la sección local para prestaciones aerodinámicas óptimas, se puede mostrar que el factor de inducción axial óptimo se aproxima a 1/3 para valores altos de la ratio de velocidad de punta, mientras que el factor de inducción tangencial se aproxima a cero.

15 Un existe método simple para determinar la inducción óptima exacta y después de eso la cuerda y la torsión locales para prestaciones aerodinámicas óptimas. Un ejemplo de este tipo de método es el método de Glauert publicado con el método BEM (Glauert, H. Airplane propellers in Aerodynamic Theory, ed. Durand, W.F. Dower Publications, Inc. Nueva York).

### 1.5. Diseño de pala aerodinámica clásica

20 La teoría de momento de elemento de pala clásica (BEM) de Glauert permite resolver el flujo de rotor por medios simples al establecer el equilibrio entre el flujo global a través del disco de rotor y el flujo local alrededor de los cuerpos de sustentación en las palas al dividir el disco de rotor en tubos de corriente anulares. Si se desprecia el arrastre, entonces se puede encontrar una expresión simple para el rotor óptimo:

$$\frac{B}{R} X(c, \Theta) = 8\pi x \frac{a \sin^3 \Phi}{1 - a \cos \Phi},$$

donde como se ha mencionado anteriormente,  $x = \Omega \cdot r / V$  es la ratio de velocidad de punta,  $V$  es el punto de velocidad eólica de diseño,  $X$  es la velocidad de punta basada en  $R$  y  $\Phi$  es el ángulo de flujo entrante local, y  $a$  es la inducción axial.

25 Cuando se define una forma de pala aerodinámica la primera etapa es para elegir el número de palas y el ratio de velocidad de punta de diseño. La carga de rotor ideal definida como la longitud de cuerda multiplicada por el coeficiente de sustentación ( $c \cdot c_l$ ) y el ángulo de flujo entrante,  $\Phi$ , se pueden encontrar entonces versus el radio. Sobre la base de la carga de rotor ideal, se puede decidir el objetivo de carga teniendo en cuenta cargas y limitaciones prácticas.

30 A continuación, al seleccionar los cuerpos de sustentación para las secciones de pala individuales y conociendo el ángulo de flujo se hace posible decidir la torsión de pala. Esta se elige comúnmente de modo que la ratio de sustentación de cuerpo de sustentación a arrastre es óptima en tanto una parte de la pala sea tan grande como sea posible para maximizar el coeficiente de potencia de rotor. El coeficiente de sustentación operativo de pala  $c_{l,o}$  es entonces típicamente el coeficiente de sustentación de diseño de cuerpo de sustentación  $c_{l,d}$  y entonces la cuerda se puede derivar del objetivo de carga. Sin embargo en partes de la pala habrá una diferencia entre el coeficiente de sustentación operativo de pala  $c_{l,o}$  versus el coeficiente de sustentación de diseño de cuerpo de sustentación  $c_{l,d}$  debido a consideraciones sobre cargas, fabricación, etc. Cuando hay una diferencia, el coeficiente de sustentación operativo no llevará a sustentación-arrastre óptimo como se indica en la figura 16 y el ángulo de ataque operativo,  $\alpha_o$  no será igual al ángulo de ataque de diseño de cuerpo de sustentación,  $\alpha_d$ .

40 El grosor de pala se elige como compromiso entre consideraciones estructurales y aerodinámicas, puesto que un mayor grosor favorece la estructura de pala a costa de degeneración de la ratio sustentación de cuerpo de sustentación-arrastre.

45 El método BEM también revela que una inducción axial de 1/3 se asocia desafortunadamente con una alta fuerza de empuje sobre el rotor y que el empuje y de ese modo las cargas se pueden reducir significativamente con únicamente poca reducción de la potencia de rotor. Esto es porque diseñar el óptimo aerodinámico en un único punto no tiene en cuenta el funcionamiento fuera de diseño ni las cargas y de ese modo el mínimo coste de energía. Para reducir las cargas a menudo se reduce la inducción axial comparada con el valor óptimo de 1/3. Por otro lado cuando en el problema de diseño se incluye también funcionamiento fuera de diseño, tal como funcionamiento cerca del control de potencia, puede haber un valor mínimo requerido para el objetivo de factor de inducción para impedir un desprendimiento de flujo prematuro en las palas que lleva a ruido y pérdida de potencia innecesarios. Por tanto, para un rotor moderno el objetivo de factor de inducción no es necesariamente idéntico a la inducción óptima aerodinámica y no hay un único óptimo para el objetivo de inducción versus el radio de pala, puesto que este tipo de óptimo depende de numerosos factores.

50 En las figuras 8a y 8b los valores ideales (líneas de trazos) para cargas ( $c \cdot C_l$ ) y el ángulo de flujo entrante,  $\Phi$ , se muestran junto con el objetivo de valores reales (líneas dibujadas completas) para flujo entrante y carga de una pala

de aerogenerador típica. Se puede ver que hay una coincidencia cercana entre las dos curvas en gran parte de la pala pero también hay discrepancias. Se ve que el objetivo de valor se desvía especialmente de los valores ideales para valores bajos de  $r$ , es decir, cerca de la raíz de pala. Esto se debe principalmente a consideraciones estructurales como se explica en relación a las figuras 2 y 5. Es más, de la figura 8a y la figura 8b parece claramente que puesto que carga y ángulo de flujo entrante varían no linealmente con el radio de pala, este también será el caso tanto para la cuerda como para la torsión - no únicamente para la pala ideal sino también para una pala comercial típica.

#### 1.6. Regiones de pala

Según el diseño de pala, una pala se puede dividir en cuatro regiones diferentes como se muestra en las figuras 2 y 5:

1. La región de raíz de pala 30 junto al buje, que es predominantemente circular.
2. La región de transición 32 entre la región de raíz de pala y la parte de pala restante.
3. Una parte en forma de cuerpo de sustentación 34', que es la parte principal de la pala. Típicamente la parte en forma de cuerpo de sustentación se extiende desde el área de la pala con cuerda máxima y hacia la punta de parte de pala.
4. Una parte de punta de pala 36 - usualmente menor que el 10 % exterior de la pala.

La región de raíz de pala 30 es la interfaz desde la pala al apoyo de pala y el buje, y por lo tanto esta región tiene que finalizar en un reborde circular. El diseño es por lo tanto principalmente estructural. La cuerda y el grosor de pala en esta región corresponden al diámetro de reborde de raíz y la torsión no se puede definir en esta región. Debido a pobres características aerodinámicas de una sección circular, la componente de fuerza normal resultante será significativamente demasiado pequeña como para equilibrar el flujo de rotor, la inducción será demasiado pequeña y el ángulo de flujo entrante será demasiado alto llevando a un pobre coeficiente de potencia local.

La región de transición 32 se forma por la transformación desde la parte en forma de cuerpo de sustentación 34' a la región de raíz de pala 30. Cuerda, torsión y grosor se transforman a sus respectivos valores en el comienzo de la parte en forma de cuerpo de sustentación 34'. Obsérvese que la transformación no necesariamente es linealmente dependiente del radio de pala. En esta región, las características de sección limpias son pobres debido al alto grosor relativo y la cuerda local no es suficientemente alta como para obtener la componente correcta de fuerza normal. Sin embargo, esto se puede alterar si se usa control de flujo para lograr la combinación correcta de la componente de fuerza normal y flujo entrante local para rendir el máximo coeficiente de potencia posible.

La parte en forma de cuerpo de sustentación 34' se diseña principalmente a partir de razones aerodinámicas, opuesta a las otras regiones 30, 32, 36. La parte en forma de cuerpo de sustentación 34' es la parte más grande de la pala y es esta parte la que es responsable principalmente de la potencia de rotor y de las cargas de turbina. Esta región se diseña con aerodinámica de pala casi óptima teniendo en cuenta funcionamiento y cargas fuera de diseño.

La parte de punta de pala 36 es la región de punta, que se diseña principalmente por preocupaciones de ruido y carga y por lo tanto de ella se pueden desviar valores óptimos de cuerda y torsión. La cuerda y el grosor van hacia cero hacia la punta de pala, mientras que la torsión termina en un valor finito.

#### 1.7. Compendio

Tradicionalmente, las palas de aerogenerador modernas se diseñan diseñando inicialmente la forma exterior y las prestaciones aerodinámicas de la propia pala a fin de obtener el objetivo de carga y el objetivo de inducción axial para cada sección radial de la sección de cuerpo de sustentación de la pala. Primero después de eso, se determina cómo planificar la fabricación según la especificación de diseño para la pala.

#### 2. Palas transformables

La presente invención proporciona una salida del proceso tradicional de diseño de palas de aerogenerador modernas. La invención proporciona un nuevo proceso de diseño, en el que se optimiza la producción en relación a métodos eficaces para fabricar una parte de base o una parte principal de pala de una pala de aerogenerador, y donde a la parte de base de la pala se le instalan posteriormente dispositivos de guiado de flujo a fin de obtener las especificaciones aerodinámicas apropiadas, es decir, para obtener el objetivo de factor de inducción axial y carga para cada sección radial. Así, la parte de base de la pala puede desviarse sustancialmente del objetivo punto de diseño y el diseño aerodinámico óptimo.

La invención está relacionada principalmente con un diseño diferente de la parte en forma de cuerpo de sustentación 34' de la pala, véase la figura 5. A continuación, a palas según la invención a veces se les hace referencia como palas transformables.

La figura 9 muestra una primera realización de una pala de aerogenerador. Similar al método convencional para diseñar una pala de aerogenerador, la pala se divide en una región de raíz 130, una región de transición 132, y una

región de cuerpo de sustentación 134. La región de cuerpo de sustentación comprende una parte de punta de pala 136 y una primera sección longitudinal 140 de la pala. La primera sección longitudinal de la pala se divide en una primera parte de base 141 y varios dispositivos alteradores de flujo 146-149. La primera parte de base 141 tiene un perfil, que tiene una estructura simplificada con respecto a, por ejemplo, modularidad de partes de pala y/o la fabricación de la primera parte de base 141, y que en el punto de diseño de rotor por sí mismo se desvía sustancialmente del objetivo de factor de inducción axial y/o el objetivo de carga. Por lo tanto, la primera sección longitudinal 140 se provee de los dispositivos alteradores de flujo, que aquí se representan como primer listón 146 y un segundo listón 147, así como una primera aleta 148 y una segunda aleta 149. Aunque el uso de tales dispositivos alteradores de flujo es sumamente ventajoso a fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial y el objetivo de carga, la invención no está restringida a tales dispositivos alteradores de flujo únicamente. La primera sección longitudinal 140 se extiende a lo largo de al menos el 20 % de la longitud longitudinal de la región de cuerpo de sustentación 134.

Además, la pala puede estar provista de dispositivos alteradores de flujo dispuestos en la región de transición 132 y posiblemente la región de raíz 130 de la pala, aquí representados como listón 133.

En la primera realización, la parte en forma de cuerpo de sustentación de la región de cuerpo de sustentación está sustituida por una única sección longitudinal que comprende una parte de base y dispositivos alteradores de flujo. Sin embargo, la parte en forma de cuerpo de sustentación se puede dividir en secciones longitudinales adicionales como se muestra en las figuras 10 y 11.

La figura 10 muestra una segunda realización de una pala de aerogenerador. Similar al método convencional para diseñar una pala de aerogenerador, la pala se divide en una región de raíz 230, una región de transición 232, y una región de cuerpo de sustentación 234. La región de cuerpo de sustentación comprende una parte de punta de pala 236, una primera sección longitudinal 240, y una segunda sección longitudinal 242. La primera sección longitudinal 240 de la pala se divide en una primera parte de base 241 y varios primeros dispositivos alteradores de flujo 246. La segunda sección longitudinal 242 de la pala se divide en una segunda parte de base 243 y varios segundos dispositivos alteradores de flujo 248. La primera parte de base 241 y la segunda parte de base 243 tienen perfiles, que tiene una estructura simplificada con respecto a, por ejemplo, modularidad de partes de pala y/o fabricación de las partes de base 241, 243, y que en el punto de diseño de rotor por sí mismo se desvía sustancialmente del objetivo de factor de inducción axial y/o el objetivo de carga. Por lo tanto, las secciones longitudinales se proveen de los dispositivos alteradores de flujo, que aquí se representan como un primer listón 246 y una primera aleta 248, sin embargo; los dispositivos alteradores de flujo no se restringen a tales dispositivos alteradores de flujo únicamente. La primera sección longitudinal 240 y la segunda sección longitudinal 242 se extienden ambas a lo largo de al menos el 20 % de la longitud longitudinal de la región de cuerpo de sustentación 234.

Además, la pala puede estar provista de dispositivos alteradores de flujo dispuestos en la región de transición 232 y posiblemente la región de raíz 230 de la pala, aquí representados como listón 233.

La figura 11 muestra una tercera realización de una pala de aerogenerador, en donde numerales de referencia semejantes se refieren a partes semejantes de la segunda realización mostrada en la figura 10. Por lo tanto, únicamente se explica la diferencia entre las dos figuras. La tercera realización difiere de la segunda realización en que la región de cuerpo de sustentación 334 comprende además una sección de transición 344 dispuesta entre la primera sección longitudinal 340 y la segunda sección longitudinal 342. La sección de transición 344 comprende una parte de base de transición 345, que se forma mediante la transformación desde los perfiles extremos de la primera parte de base 341 y segunda parte de base 343, respectivamente. Por consiguiente, la parte de base de transición 345 también tiene una forma de perfil, que en el punto de diseño de rotor por sí mismo se desvía sustancialmente del objetivo de factor de inducción axial y/o el objetivo de carga. En consecuencia, la sección de transición 344 también se provee de varios dispositivos alteradores de flujo 346, 348. Además, la pala puede estar provista de dispositivos alteradores de flujo dispuestos en la región de transición 332 y posiblemente la región de raíz 330 de la pala, aquí representados como listón 333.

A partir de la descripción posterior será evidente que las realizaciones mostradas en las figuras 9-11 también pueden estar provistas de elementos montados en superficie, generadores de vórtice y similares.

### 2.1. Torsión y/o longitud de cuerda subóptimas locales

Cuando se diseñan palas transformables que tienen partes de base simplificadas, dos características de perfil de las partes de base típicamente diferirán localmente del objetivo óptimo de condición, es decir la torsión local de pala y de ese modo el ángulo de flujo entrante en el punto de diseño de rotor, y la longitud de cuerda local.

La figura 12 muestra una primera situación que ilustra la desviación mencionada anteriormente. Como se explica en la sección 1.4, el objetivo de punto de diseño de sección local se define a partir del triángulo de vector de velocidad, en el que la velocidad resultante  $V_{\text{flujoentrante}}$  se compone por la velocidad de flujo axial,  $V_{\text{eólica}}(1-a_{\text{objetivo}})$ , y la velocidad de flujo tangencial,  $r \cdot \omega (1+a')$ , véase también la figura 12a. Esta condición se cumple únicamente en el punto de diseño de rotor, cuando el ángulo de flujo entrante es  $\Phi_1$ . En el punto de diseño de rotor, la sección local tiene un coeficiente de sustentación operacional  $c_l$  y un coeficiente de arrastre operacional  $c_d$ . Las fuerzas aerodinámicas resultantes,

como se ha explicado previamente, se pueden dividir en una fuerza tangencial  $T$ , que se orienta en el plano rotacional del rotor y una carga o empuje, que es la fuerza normal  $N_{\text{objetivo}}$  orientada normalmente al plano de rotor 64'.

5 Para el perfil dado de la sección que tiene una longitud de cuerda local dada  $c$ , el objetivo de condiciones para lograr el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$  y el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$  para el perfil de pala local en el punto de diseño de rotor se cumple únicamente cuando el ángulo de torsión local es igual a un objetivo de torsión  $\theta_1$  y el ángulo de ataque es igual a  $\alpha_1$ .

10 Sin embargo, el perfil de pala local para la parte de base tiene una torsión real  $\Phi_2$ , que es menor que el objetivo de torsión  $\Phi_1$ . En consecuencia, el ángulo de flujo entrante se desplaza a un ángulo alterado  $\Phi_2$ , que es menor que  $\Phi_1$ . Es más, el ángulo de ataque se cambia a un ángulo de ataque alterado  $\alpha_2$ , que es mayor que  $\alpha_1$ . En consecuencia, los dos triángulos vectoriales mostrados están desplazados como se muestra en la figura 12b y la sección de pala obtiene una condición de flujo entrante que tiene un vector de velocidad resultante alterado  $V_{\text{flujoentrante2}}$ , en el que un factor de inducción axial real  $a_2$  se vuelve mayor que el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ . Además, el coeficiente de sustentación se desplaza a un coeficiente de sustentación alterado  $c_{l2}$ , y un coeficiente de arrastre alterado  $c_{d2}$ . En consecuencia, la carga normal se desplaza a una carga normal real  $N_2$ , que es mayor que el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . En consecuencia, se necesitan dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar las condiciones alteradas de flujo entrante y carga normal.

15 A fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ , el ángulo de flujo entrante se debe desplazar nuevamente a  $\Phi_1$  como se muestra en la figura 12c. En consecuencia, el ángulo de ataque compensado deber ser igual a  $\alpha_3 = \Phi_1 - \theta_2$ . En este ángulo de ataque, los dispositivos alteradores de flujo (aquí representados como aleta) deben alterar el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación a valores alterados  $c_{d3}$  y  $c_{l3}$ , en los que la carga normal resultante se vuelve igual al objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . Así, los dispositivos alteradores de flujo se usan para reducir el factor de inducción axial desde  $a_2$  a  $a_{\text{objetivo}}$ , y reducir la carga desde  $N_2$  a  $N_{\text{objetivo}}$ .

20 La figura 13 muestra una situación similar, pero donde el perfil de pala local para la parte de base que tiene una longitud de cuerda local dado  $c$  tiene una torsión real  $\theta_2$ , que es mayor que el objetivo de torsión  $\theta_1$  (como se muestra en la figura 13b). En consecuencia, el ángulo de flujo entrante se desplaza a un ángulo alterado  $\Phi_2$ , que es mayor que  $\Phi_1$ . Es más, el ángulo de ataque se cambia a un ángulo de ataque alterado  $\alpha_2$ , que es menor que  $\alpha_1$ . En consecuencia, los dos triángulos vectoriales mostrados están desplazados como se muestra en la figura 12b y la sección de pala obtiene una condición de flujo entrante que tiene un vector de velocidad resultante alterado  $V_{\text{flujoentrante2}}$ , en el que un factor de inducción axial real  $a_2$  se vuelve menor que el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ . Además, el coeficiente de sustentación se desplaza a un coeficiente de sustentación alterado  $c_{l2}$ , y un coeficiente de arrastre alterado  $c_{d2}$ . En consecuencia, la carga normal se desplaza a una carga normal real  $N_2$ , que es menor que el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . En consecuencia se necesitan dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar las condiciones alteradas de flujo entrante y carga normal.

25 A fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ , el ángulo de flujo entrante se debe desplazar nuevamente a  $\Phi_1$  como se muestra en las figuras 13a y 13c. En consecuencia, el ángulo de ataque compensado deber ser igual a  $\alpha_3 = \Phi_1 - \theta_2$ . En este ángulo de ataque, los dispositivos alteradores de flujo (aquí representados como aleta) deben alterar el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación a valores alterados  $c_{d3}$  y  $c_{l3}$ , en los que la carga normal resultante se vuelve igual al objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . Así, los dispositivos alteradores de flujo se usan para aumentar el factor de inducción axial desde  $a_2$  a  $a_{\text{objetivo}}$ , y aumentar la carga desde  $N_2$  a  $N_{\text{objetivo}}$ .

30 La figura 14 muestra incluso de nuevo una situación similar. Para el perfil dado de la sección que tiene un ángulo de paso dado  $\theta_1$  y un ángulo de ataque  $\alpha_1$ , el objetivo de condiciones para lograr el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$  y el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$  para el perfil de pala local en el punto de diseño de rotor únicamente se cumplen cuando la longitud de cuerda es igual a un objetivo de cuerda  $c_1$  (como se muestra en la figura 14a).

35 Sin embargo, el perfil de pala local para la parte de base tiene una longitud de cuerda real  $c_2$ , que es menor que el objetivo de cuerda  $c_1$ . En consecuencia, el ángulo de flujo entrante se desplaza a un ángulo alterado  $\Phi_2$ , que es mayor que  $\Phi_1$ . Es más, el ángulo de ataque se cambia a un ángulo de ataque alterado  $\alpha_2$ , que es mayor que  $\alpha_1$ . En consecuencia, los dos triángulos vectoriales mostrados son como se muestra en la figura 14b desplazados y la sección de pala obtiene una condición de flujo entrante que tiene un vector de velocidad resultante alterado  $V_{\text{flujoentrante2}}$ , en el que un factor de inducción axial real  $a_2$  se vuelve menor que el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ . Además, el coeficiente de sustentación se desplaza a un coeficiente de sustentación alterado  $c_{l2}$ , y un coeficiente de arrastre alterado  $c_{d2}$ . En consecuencia, la carga normal se desplaza a una carga normal real  $N_2$ , que es menor que el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . En consecuencia, se necesitan dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar las condiciones alteradas de flujo entrante y carga normal.

40 A fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ , el ángulo de flujo entrante se debe desplazar nuevamente a  $\Phi_1$  como se muestra en la figura 14c. En consecuencia, el ángulo de ataque compensado deber ser igual a  $\alpha_3 = \Phi_1 - \theta_2$ . En este ángulo de ataque, los dispositivos alteradores de flujo (aquí representados como aleta) deben alterar el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación a valores alterados  $c_{d3}$  y  $c_{l3}$ , en los que la carga normal resultante se vuelve igual al objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . Así, los dispositivos alteradores de flujo se usan para aumentar el factor de inducción axial desde  $a_2$  a  $a_{\text{objetivo}}$ , y aumentar la carga desde  $N_2$  a  $N_{\text{objetivo}}$ .

La figura 15 muestra incluso de nuevo una situación similar, pero en la que el perfil de pala local para la parte de base que tiene un dado ángulo de torsión  $\theta_2$  tiene una cuerda real  $c_2$ , que es mayor que el objetivo de cuerda  $c_1$  (como se muestra en la figura 15b). En consecuencia, el ángulo de flujo entrante se desplaza a un ángulo alterado  $\Phi_2$ , que es menor que  $\Phi_1$ . Es más, el ángulo de ataque se cambia a un ángulo de ataque alterado  $\alpha_2$ , que es menor que  $\alpha_1$ . En consecuencia, los dos triángulos vectoriales mostrados son como se muestra en la figura 15b desplazados y la sección de pala obtiene una condición de flujo entrante que tiene un vector de velocidad resultante alterado  $V_{\text{flujoentrante}2}$ , en el que un factor de inducción axial real  $a_2$  se vuelve mayor que el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ . Además, el coeficiente de sustentación se desplaza a un coeficiente de sustentación alterado  $c_{d2}$ , y un coeficiente de arrastre alterado  $c_{d2}$ . En consecuencia, la carga normal se desplaza a una carga normal real  $N_2$ , que es mayor que el objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . En consecuencia se necesitan dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar las condiciones alteradas de flujo entrante y carga normal.

A fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial  $a_{\text{objetivo}}$ , el ángulo de flujo entrante se debe desplazar nuevamente a  $\Phi_1$  como se muestra en las figuras 15a y 15c. En consecuencia, el ángulo de ataque compensado deber ser igual a  $\alpha_3 = \Phi_1 - \theta_2$ . En este ángulo de ataque, los dispositivos alteradores de flujo (aquí representados como aleta) deben alterar el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación a valores alterados  $c_{d3}$  y  $c_{i3}$ , en los que la carga normal resultante se vuelve igual al objetivo de carga normal  $N_{\text{objetivo}}$ . Así, los dispositivos alteradores de flujo se usan para disminuir el factor de inducción axial desde  $a_2$  a  $a_{\text{objetivo}}$ , y disminuir la carga desde  $N_2$  a  $N_{\text{objetivo}}$ .

## 2.2. Dispositivos alteradores de flujo y efecto aerodinámico

En esta subsección se describen diversos dispositivos alteradores de flujo, que se pueden usar para compensar la torsión y la cuerda fuera de objetivo, junto con su efecto aerodinámico. En general se necesitan dispositivos multielemento, tales como aletas y/o listones, como se muestra en la figura 19, o elementos montados en superficie como se muestra en la figura 18 a fin de compensar la sustancial desviación del objetivo de torsión y de cuerda de la parte de base de las secciones longitudinales de la pala. Sin embargo, puede ser necesario usar dispositivos adicionales alteradores de flujo, tales como dispositivos de alta sustentación, p. ej., generadores de vórtice y/o aletas Gurney, a fin de obtener los coeficientes correctos de sustentación y de arrastre en el ángulo de ataque dado.

La figura 17 muestra un primer ejemplo de dispositivos alteradores de flujo 80 para compensar parámetros de diseño fuera de objetivo de la parte de base de la respectiva sección longitudinal de la pala. En esta realización, los medios alteradores de flujo consisten en varios orificios de ventilación 80 para soplar o succionar entre un interior de la pala y un exterior de la pala. Los orificios de ventilación se aplican ventajosamente al lado de succión de la pala como se muestra en las figuras 17a y 17b. Los orificios de ventilación 80 se pueden utilizar para crear un cinturón de flujo conectado. Aire ventilado desde los orificios de ventilación 80 se puede usar para energizar y reenergizar la capa límite a fin de mantener el flujo conectado a la superficie exterior de la pala como se muestra en la figura 17b. Como alternativa, los orificios de ventilación se pueden usar para succión como se muestra en la figura 17a, por lo que se elimina el bajo flujo de momento en la capa límite y el flujo restante de ese modo es reenergizado y atraído hacia la superficie de la pala. Como alternativa, los orificios de ventilación se pueden usar para generar un flujo pulsante, p. ej., como chorro sintético. A pesar de no generar un flujo, esto trasfiere momento al flujo y de ese modo reenergiza la capa límite y altera la separación de flujo. Ejemplos de tales realizaciones se muestran en las figuras 17c y 17d, en las que los orificios de ventilación se proveen de membranas. Las membranas se pueden proporcionar cerca de la superficie exterior de la pala como se muestra en la figura 17d o cerca de la superficie interior de la pala como se muestra en la figura 17c.

La línea dibujada completa en la figura 17e muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin succión o soplado. Al usar succión como se muestra en la figura 17a o soplado tangencial, es decir, aire de ventilación de manera sustancialmente tangencial a la superficie de la pala, la capa límite se energiza y reenergiza. De manera semejante un chorro pulsante como se muestra en las figuras 17c y 17d energizará la capa límite. En consecuencia, el coeficiente de sustentación se vuelve más grande. Al mismo tiempo, el máximo coeficiente de sustentación se encuentra en un ángulo de flujo entrante ligeramente mayor. Así, la gráfica se desplaza hacia arriba y ligeramente a la derecha como se muestra con la línea discontinua en la figura 17e. Como alternativa, es posible aplicar soplado en un ángulo no tangencial, p. ej., en un ángulo de más de 45 grados y posiblemente de manera sustancialmente normal a la superficie de pala. En este caso, la capa límite se desconecta de la superficie de la pala. En consecuencia, el coeficiente de sustentación se vuelve menor. Al mismo tiempo, el máximo coeficiente de sustentación se encuentra en un ángulo de flujo entrante ligeramente menor. Así, la gráfica se desplaza hacia abajo y ligeramente a la izquierda como se muestra con la línea de puntos en la figura 17e.

La figura 18 muestra un segundo ejemplo de dispositivos alteradores de flujo de dispositivos alteradores de flujo 180, 181, 182 para compensar parámetros de diseño fuera de objetivo de la parte de base de la pala. En esta realización, los medios alteradores de flujo consisten en varios elementos montados en superficie. La figura 18a muestra una primera realización, en la que un primer elemento de borde de salida 180 se monta cerca del borde de salida de la pala en el lado de succión de la pala, un segundo elemento de borde de salida 181 se monta cerca del borde de salida de la pala en el lado de presión de la pala, y un elemento de borde de ataque 182 se monta cerca del borde de ataque de la pala en el lado de presión de la pala. La figura 18b muestra una segunda realización, en la que en el lado de succión de la pala únicamente se utiliza un primer elemento de borde de salida.

5 La línea dibujada completa en la figura 18c muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin el uso de elemento montado en superficie. Al utilizar el elemento de borde de ataque 182 y el segundo elemento de borde de salida 181 en el lado de presión de la pala, se aumenta el alabeo eficaz del cuerpo de sustentación y se aumenta el coeficiente de sustentación operativo en el punto de diseño de rotor. También se aumenta el máximo coeficiente de sustentación. Al utilizar el primer elemento de borde de salida 180 en el lado de succión de la pala, se reduce el alabeo del cuerpo de sustentación y se disminuye el coeficiente de sustentación operativo en el punto de diseño de rotor, así como el máximo coeficiente de sustentación.

10 La figura 19 muestra el efecto de usar cuerpos de sustentación multielemento, tales como listones o aletas, como dispositivos de guiado de flujo. La gráfica representada muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin el uso de cuerpos de sustentación multielemento. Al utilizar un borde de salida aleta orientado hacia el lado de presión de la pala, la gráfica se desplaza hacia menores ángulos de ataque. Al utilizar un borde de salida aleta orientado hacia el lado de succión de la pala, la gráfica se desplaza hacia mayores ángulos de ataque. Al usar un listón cerca del lado de succión de la pala, se aumenta el coeficiente de sustentación, y además el máximo coeficiente de sustentación se encuentra en un ángulo de ataque ligeramente mayor. Al usar un listón cerca del lado de succión de la pala y una aleta orientada hacia el lado de presión de la pala, se aumenta el coeficiente de sustentación, y además el máximo coeficiente de sustentación se encuentra en un menor ángulo de ataque. Al usar un listón cerca del lado de succión de la pala y una aleta orientada hacia el lado de succión de la pala, se aumenta el coeficiente de sustentación, y además el máximo coeficiente de sustentación se encuentra en un mayor ángulo de ataque.

15 Listones y aletas se pueden implementar de diversas maneras. Un listón se puede conectar, por ejemplo, a la primera parte de base de la pala por medio de un elemento de conexión como se muestra en la figura 19b. El listón se puede conectar a la primera parte de base de tal manera que sea movable rotacional y/o traslacional en relación a la primera parte de base. De manera semejante, una aleta se pueden proporcionar como elemento separado como se muestra en la figura 19c, que se puede mover rotacional y/o traslacional en relación a la primera parte de base. Así, el perfil de pala es un perfil multielemento. Como alternativa, la aleta se puede implementar como aleta de alabeo como se muestra en la figura 19d, que se puede usar para cambiar la línea de alabeo del perfil de pala.

20 La figura 20 muestra otro ejemplo de dispositivos alteradores de flujo 280 para compensar parámetros de diseño fuera de objetivo de la parte de base de la pala. En esta realización, los medios alteradores de flujo comprenden un dispositivo conectado al lado de presión en el borde de salida, en este caso una aleta Gurney 280 como se muestra en la figura 20a. Otras conexiones con similares medios alteradores de flujo son una cuña triangular o un desgarrador que forma un ángulo de más de 90 grados con la superficie del perfil. La línea dibujada completa en la figura 20b muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin el uso de elemento montado en superficie. Al utilizar la aleta Gurney, se aumenta el coeficiente de sustentación operativo en el punto de diseño de rotor, así como el máximo coeficiente de sustentación, que también se aumenta como se muestra como línea discontinua en la figura 20.

25 La figura 21 muestra incluso otro ejemplo de dispositivos alteradores de flujo 380 para compensar parámetros de diseño fuera de objetivo de la parte de base de la pala. En esta realización, los medios alteradores de flujo comprenden varios generadores de vórtice como se muestra en la figura 21a. Los generadores de vórtice 380 se representan aquí como que son de tipo paleta, pero pueden ser cualquier otro tipo de generadores de vórtice. Los generadores de vórtice 380 generan estructuras turbulentas coherentes, es decir, vórtices que se propagan en la superficie de la pala hacia el borde de salida de la pala. Los generadores de vórtice cambian eficientemente el ángulo de ataque óptimo para la sección radial y alteran la sustentación de la sección de pala al reenergizar la capa límite y retrasar la separación.

30 La figura 21b muestra una realización ventajosa que tiene una disposición de parejas de generadores de vórtice de paleta, que han demostrado ser particularmente idóneos para retrasar la separación de flujo de aire. La disposición consiste en al menos una primera pareja de generadores de vórtice de paleta que comprende una primera paleta y una segunda paleta, y una segunda pareja de generadores de vórtice de paleta que comprende una primera paleta y una segunda paleta. Las paletas se diseñan como elementos planos en forma triangular que sobresalen desde la superficie de la pala y se disponen de modo que la altura de las paletas aumenta hacia el borde de salida de la pala. Las paletas tienen una altura máxima  $h$ , que se encuentra en un intervalo entre el 0.5 % y 1 % de la longitud de cuerda en la disposición de parejas de paletas. Las paletas se disponen en un ángulo  $b$  entre 15 y 25 grados con la dirección transversal de la pala. Típicamente el ángulo  $b$  es de aproximadamente 20 grados. Las paletas de una pareja de paletas se disponen de modo que los puntos extremos, es decir, el punto más cerca del borde de salida de la pala, se espacian con un espaciamiento  $s$  en un intervalo de 2.5 a 3.5 veces la altura máxima, típicamente aproximadamente tres veces la altura máxima ( $s = 3h$ ). Las paletas tienen una longitud  $l$  correspondiente entre 1.5 y 2.5 veces la altura máxima  $h$  de las paletas, típicamente aproximadamente dos veces la altura máxima ( $l = 2h$ ). Las parejas de paletas se disponen con un espaciamiento radial o longitudinal  $z$  correspondiente entre 4 y 6 veces la altura máxima  $h$  de las paletas, típicamente aproximadamente cinco veces la altura máxima ( $z = 5h$ ).

35 La línea dibujada completa en la figura 21c muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin el uso de generadores de

vórtice. Al utilizar los generadores de vórtice 380, el máximo coeficiente de sustentación se desplaza hacia un mayor ángulo de ataque. La línea de puntos muestra la correspondiente relación, cuando se posicionan generadores de vórtice en una posición hacia delante, es decir, hacia el borde de ataque de la pala, mientras que la línea discontinua muestra la correspondiente relación, cuando se posicionan generadores de vórtice en una posición hacia atrás, es decir, hacia el borde de salida de la pala. Se ve fácilmente que el uso de generadores de vórtice se puede usar para cambiar el ángulo de flujo entrante de diseño, así como la máxima sustentación.

La figura 22 muestra incluso otro ejemplo de dispositivos alteradores de flujo 480 para compensar parámetros de diseño fuera de objetivo de la parte de base de la pala. En esta realización, los medios alteradores de flujo comprenden un elemento de alerón, que sobresale desde el lado de presión de la pala como se muestra en la figura 22a. El elemento de alerón se usa usualmente en la región de transición de la pala y posiblemente en una parte interna de la región de cuerpo de sustentación de la pala. La línea dibujada completa en la figura 22b muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de flujo entrante (o como alternativa el ángulo de ataque) para el cuerpo de sustentación básico sin el uso de elemento montado en superficie. Se ve que el coeficiente de sustentación es muy bajo para la región de transición. Al utilizar un elemento de alerón, el máximo coeficiente de sustentación se aumenta significativamente. Al utilizar un elemento de alerón posicionado en una posición hacia delante de la pala, es decir, hacia el borde de ataque de la pala o hacia la posición de grosor máximo, se aumenta el coeficiente de sustentación operativo en el punto de diseño de rotor, así como el máximo coeficiente de sustentación como se muestra con línea discontinua en la figura 22b. Al utilizar un elemento de alerón posicionado en una posición hacia atrás de la pala, es decir, hacia el borde de salida de la pala o hacia la posición de grosor máximo, el coeficiente de sustentación operativo en el punto de diseño de rotor, así como el máximo coeficiente de sustentación, se desplaza hacia un valor más alto, así como hacia un mayor ángulo de ataque como se muestra con línea de puntos en la figura 22b.

### 3. Partes de base simplificadas de la pala

En esta sección, se describen varias estructuras simplificadas de parte de base para palas transformables.

#### 3.1. Parte de base con torsión subóptima

Una pala de aerogenerador moderna diseñada según métodos convencionales tendrá una torsión inherente, que es no linealmente dependiente del radio local de la pala. Es más, la torsión es relativamente alta - tanto como 20 grados. La torsión especialmente tiene que ser bastante grande en la parte interna de la región de cuerpo de sustentación y la región de transición de la pala, puesto que la velocidad de flujo entrante resultante en el punto de diseño de rotor cambia relativamente mucho en la dirección radial de la pala en esta parte, mientras que la torsión es bastante pequeña en la parte externa de la pala cerca de la punta de pala, puesto que la velocidad de flujo entrante resultante en el punto de diseño de rotor en esta parte de la pala cambia más lenta en la dirección radial de la pala. Debido a esta no linealidad, el diseño de palas de aerogenerador modernas según métodos convencionales es bastante complejo. Por consiguiente, el diseño de partes de molde para fabricar tales palas también será bastante complejo.

Por lo tanto, desde un punto de vista de diseño y de fabricación sería ventajoso obtener una parte de base de la pala que tuviera una torsión simplificada, tal como una torsión linealmente dependiente o una torsión reducida comparada con una torsión óptima. Tal torsión simplificada hace factible lograr un diseño de pala modular, en la que la parte de base con la torsión no óptima se puede usar para varios tipos de pala y longitudes de pala diferentes. Así, es posible reutilizar la parte de base de una pala existente aún más externa en una pala más grande/más larga, o como alternativa reutilizar la parte de base de una pala existente aún más interna en una pala más pequeña/más corta. En definitiva, es posible hacer un diseño de pala de tal manera que el diseño de pala de la región de cuerpo de sustentación se ensambla de secciones prediseñadas y que palas de longitudes diferentes se pueden componer parcialmente de secciones ya existentes de palas anteriores.

Sin embargo, poner este tipo de restricción en el diseño de pala implica la necesidad de usar dispositivos alteradores de flujo a fin de compensar el no poder funcionar en el objetivo de torsión ideal de diseño para las diferentes secciones de pala como se explica en la subsección 2.1.

A fin de compensar esta torsión no ideal, una pala se puede dividir en varias secciones radiales separadas de pala 38 como se muestra en la figura 2, que cada una se provee con dispositivos alteradores de flujo (no se muestran) a fin de compensar la torsión no ideal para esa sección radial de pala 38. Las secciones radiales de pala 38 se representan aquí como que se extienden solo ligeramente en el área de cuerpo de sustentación 34. Sin embargo, a fin de obtener una compensación óptima para la torsión no óptima, la pala se debe proveer de secciones radiales de pala compensadas individualmente 38 a lo largo de sustancialmente toda el área de cuerpo de sustentación 34. Puesto que la torsión de la parte exterior de la pala, es decir, cerca de la punta, es pequeña, no todas las realizaciones de la pala según la invención tienen que ser provistas de dispositivos alteradores de flujo cerca del extremo de punta. Sin embargo, preferiblemente al menos el 75 % interior del área de cuerpo de sustentación 34 se provee de secciones radiales de pala 38 que tienen dispositivos alteradores de flujo. Cada una de las secciones radiales 38 tiene un ángulo de ataque promedio individual para un punto de diseño dado y la parte de base de la pala tiene una forma de cuerpo de sustentación en sección que sin dispositivos alteradores de flujo tiene un ángulo de ataque óptimo en sección. Se pueden usar dispositivos alteradores de flujo, p. ej., como se muestra en las figuras 17-22, para desplazar el ángulo de ataque óptimo de la forma de cuerpo de sustentación en sección hacia el ángulo de ataque promedio para la

sección radial.

La figura 23a muestra gráficas de un ángulo de ataque promedio  $78^\circ$  para la pala como función de la distancia radial  $r$  desde el buje del rotor. La figura 23a también muestra una gráfica de un ángulo de ataque óptimo  $76^\circ$  de la pala sin dispositivos alteradores de flujo como función de la distancia radial desde el buje. Se puede ver que el ángulo de ataque promedio  $78^\circ$  es mayor que el ángulo de ataque óptimo  $76^\circ$ , lo que claramente indica que la pala no tiene una torsión óptima de pala. Por lo tanto, la pala puede estar provista de dispositivos alteradores de flujo como, por ejemplo, se muestra en las figuras 17-22 a fin de desplazar el ángulo de ataque óptimo con un ángulo de desplazamiento  $\Delta\alpha$ , desplazando de ese modo el ángulo de ataque óptimo hacia el ángulo de ataque promedio para una distancia radial dada  $r$  desde el buje.

La figura 23b muestra una gráfica del ángulo de desplazamiento  $\Delta\alpha$  como función de la distancia radial desde el buje. Se puede ver que el ángulo de desplazamiento  $\Delta\alpha$  es continuamente decreciente con el aumento de distancia  $r$  desde el buje.

Las figuras 23c y 23d ilustran el efecto de proporcionar a las palas dispositivos alteradores de flujo para la parte exterior 44 y la parte interior 42 de la pala, respectivamente. La figura 23c muestra gráficas de la relación entre el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación, así como la relación entre el ángulo de ataque y el coeficiente de sustentación. Las gráficas son ejemplos de parámetros de diseño para la pala a una distancia radial dada desde el buje que se encuentra dentro de la parte exterior 44 de la pala. El punto de diseño se representa con un punto y se elige sobre la base de una relación óptima entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, p. ej., al maximizar la ratio sustentación-arrastre. Al proporcionar a las palas dispositivos alteradores de flujo, la gráfica que muestra la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque se desplaza hacia mayores ángulos, compensando de ese modo la "falta" de torsión de la parte exterior 44 de la pala.

La figura 23d muestra gráficas similares para la parte interior 42 de la pala. Se puede ver que el uso de dispositivos alteradores de flujo en la parte interior 42 de la pala tiene dos efectos, es decir que la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque se desplaza hacia un mayor ángulo de ataque y hacia un mayor coeficiente de sustentación. Así, los dispositivos alteradores de flujo no únicamente compensan la "falta" de torsión de la parte interior 42 de la pala, sino también compensan el perfil no óptimo con respecto a generar sustentación de la parte interior 42 de la pala, que típicamente comprendería el área de raíz 30 y el área de transición 32 de la pala.

Sin embargo, en relación a la modularidad de las partes de pala, es ventajoso que la torsión sea linealmente dependiente del radio de pala local. Las figuras 24a-d ilustran la relación entre torsión,  $\Theta$ , y radio local para diversas realizaciones que tienen una torsión linealmente dependiente. Las líneas de trazos ilustran el ángulo de torsión óptimo a fin de obtener el objetivo de punto de diseño de rotor para una pala sin dispositivos alteradores de flujo, y las líneas dibujadas completas ilustran la relación entre ángulo de torsión y radio de pala local para una parte de base que tiene torsión subóptima y provista de dispositivos alteradores de flujo. Como se muestra en la figura 24a, el ángulo de torsión puede ser menor que el ángulo de torsión óptimo a lo largo de toda la extensión longitudinal de la sección de pala longitudinal. La figura 24b ilustra una segunda realización, en la que el ángulo de torsión de la parte de base es igual al ángulo de torsión óptimo para una única sección transversal únicamente, y donde el resto de la sección de pala longitudinal tiene un ángulo de torsión, que es menor que el ángulo de torsión óptimo. Sin embargo, en principio, la sección de pala longitudinal puede tener una parte, en la que el ángulo de torsión es menor que el ángulo de torsión óptimo, una segunda parte, en la que el ángulo de torsión es mayor que el ángulo de torsión óptimo, y una tercera parte, en la que el ángulo de torsión es mayor que el ángulo de torsión óptimo. Esto se ilustra en la figura 24c. Incluso de nuevo, es sumamente ventajoso si la parte de base se diseña sin ninguna torsión, lo que se ilustra en la figura 24d.

### 3.2. Parte de base con cuerda lineal

Como se ha mencionado anteriormente, una pala de aerogenerador moderna diseñada según métodos convencionales tiene una distribución de longitudes de cuerda, que es no linealmente dependiente del radio local de la pala. Sin embargo, como con respecto a la torsión, desde un punto de vista de diseño y de fabricación es ventajoso obtener una parte de base de la pala que tenga una distribución simplificada de longitudes de cuerda, p. ej., una longitud de cuerda linealmente.

Las figuras 24e-g ilustran la relación entre longitud de cuerda,  $c$ , y radio local para diversas realizaciones que tienen una longitud de cuerda linealmente dependiente. Las líneas de trazos ilustran la cuerda óptima a fin de obtener el objetivo de punto de diseño de rotor para una pala sin dispositivos alteradores de flujo, y las líneas dibujadas completas ilustran la relación entre longitud de cuerda y radio de pala local para una parte de base que tiene una distribución lineal de longitudes de cuerda y provista de dispositivos alteradores de flujo. Como se muestra en la figura 24a, la longitud de cuerda puede ser menor que la longitud de cuerda a lo largo de toda la extensión longitudinal de la sección de pala longitudinal. La figura 24b ilustra una segunda realización, en la que la longitud de cuerda de la parte de base es igual a la longitud de cuerda óptima para una única sección transversal únicamente, y donde el resto de la sección de pala longitudinal tiene una longitud de cuerda, que es menor que la longitud de cuerda óptima.

La figura 24c ilustra una realización ventajosa que tiene una primera parte, en la que la longitud de cuerda es menor que la longitud de cuerda óptima, una segunda parte, en la que la longitud de cuerda es mayor que la longitud de

cuerda óptima, y una tercera parte, en la que la longitud de cuerda es mayor que la longitud de cuerda óptima. La distribución lineal de longitudes de cuerda se puede elegir, por ejemplo, como línea mediana de la distribución óptima de longitudes de cuerda.

5 Realizaciones que tienen secciones longitudinales de pala con longitud de cuerda linealmente dependiente se muestran en las figuras 9-11. En todas estas realizaciones, la longitud de cuerda de la pala es decreciente en la dirección longitudinal o radial de la pala hacia la punta de pala. Sin embargo, la pala también puede comprender una parte de pala longitudinal, en la que la longitud de cuerda es constante. Una realización de este tipo de pala se muestra en la figura 25. La pala se divide en una región de raíz 430, una región de transición 432, y una región de cuerpo de sustentación 434. La región de cuerpo de sustentación comprende una parte de punta de pala 436, una primera sección longitudinal 440, y una segunda sección longitudinal 442. La primera sección longitudinal 440 de la pala se divide en una primera parte de base 440 y varios primeros dispositivos alteradores de flujo 446, 448. La segunda sección longitudinal 442 de la pala se divide en una segunda parte de base 443 y varios segundos dispositivos alteradores de flujo 449. La primera parte de base 441 tiene una longitud de cuerda constante a lo largo de toda la extensión longitudinal de la primera sección longitudinal 440, mientras que la segunda parte de base 443 tiene una longitud de cuerda, que es linealmente decreciente en la dirección longitudinal de la segunda sección longitudinal de la pala.

### 3.3. Parte de base con grosor linealmente dependiente

No se muestra en las figuras, pero es ventajoso que el grosor de la pala también sea linealmente dependiente del radio local de la pala. La sección de pala longitudinal particular puede tener, por ejemplo, el mismo perfil relativo a lo largo de toda la extensión longitudinal de la sección de pala longitudinal.

### 3.4. Parte de base con precurva linealmente dependiente

Incluso de nuevo, también puede ser ventajoso - especialmente con respecto a la modularidad - diseñar la parte de base de la sección longitudinal particular con una precurva lineal,  $\Delta y$ , como se ilustra en la figura 26.

### 3.5. Perfiles de pala

25 Normalmente, palas de aerogenerador diseñadas según métodos convencionales comprenden secciones de pala que tienen un perfil 150 con lados de presión de doble curvatura como se muestra en la figura 27. La invención hace posible simplificar el diseño de los perfiles 250 sin lado de presión de doble curvaturas como se muestra en la figura 28 y para compensar el perfil fuera de diseño mediante el uso de dispositivos alteradores de flujo como se ha explicado previamente.

30 Incluso de nuevo, como se muestra en la figura 30, el perfil puede simplificarse, para al menos una parte de la sección longitudinal, incluso aún más a un perfil simétrico 350 que tiene una cuerda 360 y alabeo 362, que son coincidentes. Este tipo de perfil de pala tiene una relación entre coeficiente de sustentación y ángulo de flujo entrante, que cruza el origen del sistema de coordenadas como se muestra en la figura 29. Esto significa que la gráfica se desplaza hacia mayores ángulos de flujo entrante en comparación con perfiles de pala convencionales no simétricos con un alabeo positivo. Esto también implica que se puede obtener un coeficiente de sustentación particular en un mayor ángulo de ataque que el perfil de pala convencional. Esto es ventajoso para realizaciones que tienen una torsión reducida comparada con una torsión óptima como se explica en la subsección 3.1. En otras palabras, la torsión reducida y el perfil simétrico se compensan al menos parcialmente entre sí.

40 Esta compensación puede ser explotada incluso aún más al proporcionar al menos una parte de la sección longitudinal con un perfil 450 como se muestra en la figura 32 que tiene un "alabeo negativo", es decir, una pala donde el alabeo 462 se ubica más cerca del lado de presión 452 de la pala que el lado de succión 454 de la pala (o equivalentemente, donde el alabeo 462 se ubica por debajo de la cuerda 460). Una sección de pala tiene un coeficiente de sustentación negativo para un flujo de aire incidente en un ángulo de ataque de 0 grados, es decir, la gráfica que ilustra la relación entre coeficiente de sustentación y ángulo de ataque se desplaza incluso aún más hacia mayores ángulos de flujo entrante. Esto a su vez significa que se puede obtener un coeficiente de sustentación particular en un ángulo de ataque incluso mayor. El uso de perfiles que tienen un alabeo negativo puede ser ventajoso especialmente para palas que tienen una torsión muy baja o sin torsión, puesto que tales palas tienen secciones de pala en las que el ángulo de ataque operacional en el punto de diseño de rotor es muy alto. Esto es particularmente relevante para la parte interna de la región de cuerpo de sustentación y la región de transición.

50 Sin embargo, el alabeo 462 no tiene que estar ubicado localmente más cerca del lado de presión de la pala que el lado de succión de la pala a lo largo de toda la cuerda del perfil como se muestra en la figura 32. Como se muestra en la figura 33, también es posible proporcionar una sección de pala con perfil 550 que tiene un alabeo negativo 562, en la que una parte del alabeo está más cerca del lado de succión 554 de la pala que el lado de presión de la pala 552 (o encima de la cuerda 560) siempre que el alabeo 562 de promedio esté más cerca del lado de presión 552 que el lado de succión de la pala 554.

#### 4. Modularidad y reutilización de secciones de pala

Como se ha mencionado anteriormente, el uso de una parte de base simplificada de la sección longitudinal de la pala hace posible usar esa parte de base para varios tipos diferentes de palas y usar dispositivos alteradores de flujo para compensar las características fuera de diseño de la parte de base.

5 La figura 34 ilustra este principio. Una pala de aerogenerador 410 se divide en una región de raíz 430, una región de transición 432, y una región de cuerpo de sustentación 434. La región de cuerpo de sustentación 434 comprende una parte de punta de pala 436, una primera sección longitudinal 440, y una segunda sección longitudinal 442. La primera sección longitudinal 440 de la pala se divide en una primera parte de base 441 y varios primeros dispositivos alteradores de flujo 446. La segunda sección longitudinal 442 de la pala se divide en una segunda parte de base 443 y varios segundos dispositivos alteradores de flujo 448. La primera parte de base 441 y la segunda parte de base 443 tienen perfiles, que tiene una estructura simplificada con respecto a, por ejemplo, modularidad de partes de pala y/o fabricación de las partes de base 441, 443, y que en el punto de diseño de rotor por sí misma se desvía significativamente del objetivo de factor de inducción axial y/o el objetivo de carga. Las partes de base 441 se representan aquí como que tienen longitudes de cuerda linealmente dependientes, pero ventajosamente, las secciones también tendrán un grosor linealmente dependiente y torsión linealmente dependiente o sin torsión. Por lo tanto, las secciones longitudinales se proveen con los dispositivos alteradores de flujo, que aquí se representan como un primer listón 446 y una primera aleta 448, sin embargo; los dispositivos alteradores de flujo no se restringen a tales dispositivos alteradores de flujo únicamente. La primera sección longitudinal 440 y la segunda sección longitudinal 442 se extienden ambas a lo largo de al menos el 20 % de la longitud longitudinal de la región de cuerpo de sustentación 434. La primera sección longitudinal o parte de base se ubica a una primera distancia radial  $r_1$ .

La primera parte de base 441 se reutiliza para una segunda pala 410', que también comprende una región de raíz 430', una región de transición 432', y una región de cuerpo de sustentación 434'. La región de cuerpo de sustentación 434' comprende una parte de punta de pala 436', una primera sección longitudinal 440', una segunda sección longitudinal 442' que tiene una segunda parte de base 443', y una tercera sección longitudinal o sección de transición 445' ubicada entre la primera sección longitudinal 440' y la región de transición 432'. La primera sección longitudinal y primera parte de base 441 de la segunda pala 410' se ubican a una segunda distancia radial  $r_2$ . Por lo tanto, las condiciones de flujo entrante para la primera parte de base 441 son diferentes de la primera pala 410 y la segunda pala 410'. Además, el objetivo de longitudes de cuerda (para partes de base sin dispositivos alteradores de flujo) tiene que ser diferente a fin de obtener el objetivo de factor de inducción axial y el objetivo de carga normal. En consecuencia, la segunda pala 410' necesita diferentes dispositivos alteradores de flujo 446', 448' que la primera pala 410 a fin de compensar las condiciones fuera de diseño.

La primera parte de base 441 se puede diseñar de modo que sin dispositivos alteradores de flujo sea subóptima tanto para la primera pala 410 como para la segunda pala 410' como se ilustra en la figura 34. Sin embargo, en principio, la primera parte de base 441 se puede optimizar para una de las dos palas, de modo que dispositivos alteradores de flujo únicamente se necesitan para la otra de las dos palas.

En principio, una primera pala se puede reutilizar enteramente para una segunda pala, por ejemplo, al proporcionar a la primera pala un extensor de buje como se muestra en la figura 35. En esta situación, sustancialmente toda la parte de trazos de la segunda pala se carga con condiciones fuera de diseño y una mayoría de esta sección necesitará el uso de dispositivos alteradores de flujo, ventajosamente ambas de la región de cuerpo de sustentación y la región de transición de la segunda pala.

#### 5. Funcionamiento de un aerogenerador con palas transformables

En esta sección, se describe el funcionamiento o el control de un aerogenerador que comprende un rotor que tiene palas transformables según la invención. El principio se ilustra en la figura 36, en la que (a) muestra la primera realización de la pala de aerogenerador según la invención (también mostrada en la figura 9).

45 La figura 36 (b) muestra la carga como función del radio de pala local, en la que la línea dibujada completa es el objetivo de carga, y la línea discontinua es la carga real de la parte de base de la pala sin dispositivos alteradores de flujo. El paso de pala y la velocidad rotacional se ajustan de modo que una parte externa de la pala para valores por encima de una distancia radial  $r_0$  cumple el objetivo de carga en el punto de diseño de rotor. En esta situación, el objetivo real de carga de la primera parte de base 141 sin dispositivos alteradores de flujo es subóptimo como se ilustra con la línea discontinua. Por lo tanto, la primera parte de base 141 y otras posibles partes de la pala se proporcionan a fin de compensar las condiciones fuera de diseño y ajustar la carga de la sección de pala para cumplir el objetivo de carga a lo largo de toda la extensión longitudinal de la misma como se muestra en la figura 36 (c).

Se pueden trazar gráficas similares para el factor de inducción axial, ya que la sección de pala también necesita cumplir el objetivo de factor de inducción axial.

#### 55 6. Ejemplos

La siguiente sección describe un estudio del concepto de palas transformables por medio de ejemplos. Como se ha mencionado anteriormente la pala transformable comprende una parte de base y una parte ajustable. La parte

ajustable comprende dispositivos aerodinámicos o medios alteradores de flujo, que se instalan en la parte de base a fin de ajustar y cumplir el objetivo de diseño aerodinámico de las secciones de pala. Al ajustar únicamente los medios alteradores de flujo, la afinación de sección aerodinámica permite el desacoplamiento parcial entre el diseño estructural y el aerodinámico. La parte de base se puede diseñar para tener propiedades estructurales óptimas y no necesariamente aerodinámica óptima. Posteriormente, los dispositivos alteradores de flujo se diseñarán para cubrir las holguras aerodinámicas desde objetivos de condiciones no óptimas a casi óptimas. Dispositivos alteradores de flujo, entre otros, incluyen aletas, listones, generadores de vórtice y alerones como se describe en la sección 2.2.

Algunas de las gráficas presentadas son en cierto modo bastas debido al uso de un número limitado de puntos de muestreo en la herramientas de simulación usadas para verificar el concepto de pala transformable.

#### 6.1. Pala de 40.3 m con cuerpo de sustentación DU-91-w2-250 y sin torsión

El primer ejemplo toma un punto de separación de una pala que tiene una longitud de 40.3 metros y que tiene una región de cuerpo de sustentación con un factor de inducción axial ideal (es decir,  $a = 0.33$ ) para cada sección transversal. La longitud de cuerda  $c$  se muestra como función de la distancia radial  $r_i$  desde la punta en la figura 37. La distribución de longitudes de cuerda es sustancialmente idéntica a la pala existente LM40.3p fabricada y vendida por el presente solicitante. Se ve que la distribución de longitudes de cuerda es no linealmente dependiente en la dirección radial de la pala.

La pala transformable del primer ejemplo tiene una distribución de longitudes de cuerda idéntica a la pala LM40.3p, pero los 26 metros exteriores de la regiones de cuerpo de sustentación han sido sustituidas por un perfil de cuerpo de sustentación DU-91-W2-250. Es más, la pala transformable no está retorcida en esta región. Finalmente, el grosor relativo del perfil de cuerpo de sustentación DU-91-W2-250 es constante en la región. En el presente ejemplo el grosor relativo es un 25 %, es decir, la ratio entre el grosor máximo en sección transversal y la longitud de cuerda en una sección transversal dada es un 25 %. Así, la región de cuerpo de sustentación se simplifica sumamente en que tiene únicamente una única forma de cuerpo de sustentación a lo largo de aproximadamente el 75 % de la región de cuerpo de sustentación y que no tiene torsión.

La figura 38 muestra gráficas de la torsión  $\Theta$  representada como función de la distancia radial  $r_i$  desde la punta. Una primera gráfica 510 muestra la torsión para las palas ideales, y otra gráfica 520 muestra la torsión para la pala transformable. Se ve que la torsión de la pala transformable tiene una fuerte desviación respecto la torsión ideal de varios grados de promedio sobre la extensión radial de la pala.

La figura 39 muestra gráficas de la distribución de ángulo de flujo entrante a lo largo del tramo de diversas palas de 40.3 m (como función de la distancia radial  $r_i$  desde la punta). Las gráficas primera y segunda 550, 560 muestran la distribución del ángulo de flujo entrante  $\Phi$  para la pala ideal en velocidades eólicas de 8 m/s y 10 m/s, respectivamente, mientras que las gráficas tercera y cuarta 570, 580 muestran la correspondiente distribución del ángulo de flujo entrante  $\Phi$  para la pala transformable, respectivamente.

La figura 40 muestra gráficas de la distribución de coeficiente de sustentación a lo largo del tramo de diversas palas de 40.3 m (como función de la distancia radial  $r_i$  desde la punta). Las gráficas primera y segunda 600, 610 muestran la distribución del ángulo de coeficiente de sustentación  $c_l$  para la pala ideal en velocidades eólicas de 8 m/s y 10 m/s, respectivamente, mientras que las gráficas tercera y cuarta 620, 630 muestran la correspondiente distribución del ángulo de coeficiente de sustentación  $c_l$  para la pala transformable, respectivamente.

La figura 41 muestra gráficas de la distribución de factor de inducción axial a lo largo de la tramo de diversas palas de 40.3 m (como función de la distancia radial  $r_i$  desde la punta). Las gráficas primera y segunda 650, 660 muestran la distribución del ángulo de factor de inducción axial  $a$  para la pala ideal en velocidades eólicas de 8 m/s y 10 m/s, respectivamente, mientras que las gráficas tercera y cuarta 670, 680 muestran la correspondiente distribución del factor de inducción axial  $a$  para la pala transformable, respectivamente. Se ve que el factor de inducción axial sobre la región de cuerpo de sustentación difiere al menos un 10 % del objetivo de factor de inducción axial de aproximadamente 0.33.

Al cambiar la parte exterior de la región de cuerpo de sustentación con el perfil de cuerpo de sustentación de DU-91-W2-250, la producción de energía de un aerogenerador que usa tales palas en velocidades eólicas de 8 m/s y 10 m/s sin el uso de dispositivos alteradores de flujo se reduce un 3 % comparado con un aerogenerador que usa las palas ideales de 40.3 metros. Es más, el cambio de perfil lleva a una desviación respecto un coeficiente de potencia óptimo a una velocidad eólica de 8 m/s en una región que va de 10 metros a 26 metros desde la punta (no se muestra en la gráficas). Las figuras 40 y 41 muestran que esta desviación es provocada por una sobrecarga en esta región de la pala. Por tanto, esta parte de la pala transformable debe ser provista de dispositivos alteradores de flujo capaces de reducirla sustentación, mejorando de ese modo la salida de potencia mecánica de un aerogenerador que usa tales palas.

Las figuras 40 y 41 también muestran que los 15 metros exteriores de la parte de base de la pala transformable están infracargadas a una velocidad eólica de 10 m/s, provocando una caída de la potencia mecánica. Los dispositivos aerodinámicos, tales como aletas Gurney y listones, adaptados para aumentar la sustentación aumentarían la salida de potencia mecánica. A menos que se usen dispositivos aerodinámicos controlados activamente, no es posible lograr

condiciones óptimas para ambas velocidades eólicas, y se tiene que alcanzar un compromiso.

En global, se logra un diseño aerodinámico sumamente simplificado de la parte de base de una pala transformable comparada con la pala existente LM40.3p. Los 26 metros exteriores de la parte de base de la pala transformable comprende únicamente un único perfil de cuerpo de sustentación relativo y sin torsión. Esto no únicamente simplifica el diseño aerodinámico de la parte de base, pero también simplifica el proceso de fabricación de la pala y el proceso de fabricación de moldes para fabricar partes de pala de la pala. Sin embargo, la parte de base por sí misma conlleva una pérdida de rendimiento de potencia de aproximadamente el 3 % comparada con las condiciones ideales. Entonces se han usado dispositivos alteradores de flujo para ajustar las características aerodinámicas al objetivo de valores y en particular el factor de inducción axial, compensando así totalmente la pérdida del 3 %.

La figura 42 muestra una primera gráfica 710 que muestra el grosor relativo de la pala transformable comparada con una segunda gráfica 700 que muestra el grosor relativo de la pala existente LM40.3p como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta. Se ve que el grosor relativo de la pala transformable es mayor que el grosor relativo de la pala LM40.3p. La rigidez a flexión de una pala de aerogenerador que comprende un cuerpo de carcasa es proporcional al cubo de la distancia entre el eje neutro de la pala y el cuerpo de carcasa. Esto significa que el cuerpo de carcasa de un perfil grueso relativo puede ser más delgado que un perfil más delgado relativo y todavía obtener la misma fortaleza y rigidez. El cuerpo de carcasa se hace típicamente como estructura laminada que comprende un material de matriz reforzado con fibras, tales como fibras de vidrio y/o fibras de carbono. En el presente ejemplo la parte rediseñada de la pala transformable es el 14.8 % más ligero que la parte correspondiente de la pala LM40.3p, y la reducción de peso global es del 7.7 %. Así, se ve que también el coste de material de una pala transformable se puede reducir comparado con palas existentes.

Se hizo un estudio similar de una pala transformable que tiene un grosor relativo del 30 % para la 32 metros exteriores. El peso de la parte rediseñada se reduce un 21.4 % comparada con la correspondiente parte de una pala LM40.3p, y la reducción de peso global fue el 12.3 %. No obstante, el rendimiento de potencia mecánica de un aerogenerador que usa la pala transformable se puede maximizar a partir del uso de los dispositivos alteradores de flujo.

## 6.2. Grupo de palas que tienen partes de base externa idénticas

Los siguientes ejemplos demuestran el uso de una parte de base externa idéntica 830 para tres palas transformables diferentes 800, 810, 820 que tienen longitudes de palas diferentes como se muestra en la figura 43. Además, los ejemplos demuestran un método para hacer funcionar un aerogenerador que tiene un rotor con tales palas transformables. Las palas estudiadas tienen longitudes de 44.1, 52.1, y 60.1 metros, respectivamente. Las distribuciones de cuerda 801, 811, 821 de las tres palas se muestran en la figura 44 como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta.

En el siguiente ejemplo se estudian las palas transformables para uso en rotores con una velocidad de punta idéntica de 70 m/s para las tres palas transformables 800, 810, 820. La figura 45 muestra las correspondientes gráficas 802, 812, 822 del ángulo de flujo entrante operacional como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta, y la figura 46 muestra las correspondientes gráficas 803, 813, 823 de los coeficientes de sustentación operacionales como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta.

Si las diferentes palas transformables 800, 810, 820 van a funcionar a la misma velocidad de punta, se ve que los 30 metros externos de las palas transformables, donde todas las palas comparten la misma sección radial, tienen diferentes coeficientes de sustentación operacionales, y así, está claro que el producto de la longitud de cuerda y el coeficiente de sustentación también es diferente para las tres palas. Para lograr la condición operacional para las tres palas, está claro que se necesitan dispositivos alteradores de flujo a lo largo de toda la extensión radial de la parte externa para que al menos dos de estas palas cumplan el objetivo de factor de inducción axial, mientras que la tercera pala puede alcanzar el objetivo de factor de inducción axial por diseño.

Sin embargo, la distribución de coeficiente de sustentación que se muestra en la figura 46 puede ser alterado al cambiar los parámetros de rotor. Por consiguiente, al cambiar el paso de las palas, es posible trasladar sustancialmente el coeficiente de sustentación hacia valores mayores o menores, mientras que es posible "inclinarse" las curvas de coeficiente de sustentación al alterar la velocidad de punta operacional. A fin de reducir la diferencia de coeficiente de sustentación operacional de las tres palas transformables 800, 810, 820 en la parte externa de las palas, las tres palas se evalúan a continuación en cuanto a velocidades de punta de 70 m/s, 75 m/s, y 80 m/s para las palas transformables de 44.1, 52.1, y 60.1 m, respectivamente.

La figura 47 muestra las correspondientes gráficas 804, 814, 824 del ángulo de flujo entrante como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta, y la figura 48 muestra las correspondientes gráficas 805, 815, 825 de los coeficientes de sustentación como función de la distancia radial  $r_t$  desde la punta. Los resultados indican una mejora significativa en los coeficientes de sustentación de funcionamiento. En los 20 metros externos de las palas transformables, los coeficientes de sustentación son sustancialmente idénticos. Así, no se necesitan dispositivos alteradores de flujo para que esta parte cumpla el objetivo de factor de inducción axial. Las partes internas de la región de cuerpo de sustentación de las partes de base de las palas transformables, sin embargo, se tienen que proveer de dispositivos alteradores de flujo a fin de cumplir el objetivo de factor de inducción axial.

Por consiguiente, se ha demostrado que es posible ajustar el paso de la pala y la velocidad rotacional del rotor para cumplir el objetivo de factor de inducción axial de la sección externa, mientras que la parte interna se provee de dispositivos alteradores de flujo a fin de cumplir el objetivo de factor de inducción axial de la sección interna de la región de cuerpo de sustentación.

5 6.3. Grupo de palas escalonadas

Como con la ejemplo anterior, se estudia una primera pala transformable 900, una segunda pala transformable 910, y una tercera pala transformable 920 que tienen una longitud de pala de 44.1 m, 52.1 m, y 60.1 m, respectivamente. Las tres palas transformables 900, 910, 920 comparten una parte de base de medio panel o interna idénticas 930. Así, las tres palas transformables se escalonan como se muestra en la figura 49. Se ve que las palas transformables 900, 910, 920 tienen diferentes partes de punta y partes de raíz (y de transición).

La figura 50 representa gráficas 901, 911, 921 de la distribución de longitudes de cuerda para las tres palas transformables 900, 910, 920, respectivamente, como función de la distancia radial  $r_r$  desde la punta. Se ve que las palas tienen una sección común con una variación lineal de longitud de cuerda y ubicaciones de punta escalonadas. La sección 930 de la pala transformable 920 de 60.1 m se escalona a 2.5 y 5 m desde las secciones idénticas de la pala transformable 910 de 52.1 m y la pala transformable 920 de 44.1 m, respectivamente. Esto significa que la sección compartida 930, por ejemplo, se puede ubicar a 15 m, 12.5 m, y 10 m desde la punta de las tres palas, respectivamente.

En las siguientes gráficas, la punta de las palas de 44.1, 52.1 y 60.1 m se coloca a 0, 2.5 y 5 m, respectivamente. Esto simplifica la comparación de resultados entre secciones idénticas encontradas en la misma ubicación de eje horizontal. Los siguientes cálculos se llevan a cabo imponiendo una velocidad de punta de 75 m/s en todas las palas.

La figura 51 muestra las correspondientes gráficas 902, 912, 922 del ángulo de flujo entrante como función de la distancia radial  $r_r$  desde la punta, y la figura 52 muestra las correspondientes gráficas 903, 913, 923 de los coeficientes de sustentación como función de la distancia radial  $r_r$  desde la punta. Se ve que los coeficientes de sustentación de secciones que van de 10 a 20 metros desde la punta de pala de las tres palas transformables 900, 910, 920 muestran excelente concordancia, lo que significa que en esta región no se necesitan dispositivos alteradores de flujo. Además, se ve que las palas transformables 910, 920 de 52.1 y 60.1 m muestran una concordancia de los rasgos aerodinámicos en el intervalo de 20 a 30 metros desde la punta. Así, si la sección de pala compartida 930 se optimiza para las palas transformables 910, 920 de 52.1 y 60.1 m, únicamente en la pala transformable 900 de 44.1 m se tienen que instalar dispositivos alteradores de flujo en esta región a fin de cumplir el objetivo de factor de inducción axial. Sin embargo, se ve que en la sección más allá de 30 metros desde la punta de pala, los parámetros operacionales aerodinámicos de las tres palas transformables son significativamente diferentes, lo que significa que se necesitan dispositivos alteradores de flujo en la parte interna de al menos dos de estas palas a fin de cumplir el objetivo de factor de inducción axial.

Así, se ha demostrado que una sección de una pala se puede compartir para un grupo escalonado de palas en una parte de medio panel o de media envergadura de las palas de tal manera que una gran parte de la sección compartida no tiene que ser provista de dispositivos alteradores de flujo para cumplir el objetivo de factor de inducción axial. Por consiguiente, el paso de las palas y la velocidad rotacional del rotor se ajustan para cumplir el objetivo de factor de inducción axial de la sección de medio panel, mientras que la parte interna (y posiblemente la externa parte) se provee de dispositivos alteradores de flujo para cumplir el objetivo de factor de inducción axial de la sección interna (y la parte externa) de la región de cuerpo de sustentación. Es más, al escalonar las palas, también es posible obtener momentos de flexión en aleta casi idénticos (no se muestran). Esto significa que no únicamente el contorno exterior de la sección compartida es el mismo sino que la estructura laminada también se puede proveer del mismo diseño y grosor.

Comentarios finales

La invención se ha descrito con referencia a una realización preferida. Sin embargo, el alcance de la invención no se limita a la realización ilustrada, y se pueden llevar a cabo alteraciones y modificaciones sin desviarse del alcance de la invención.

**Lista de numerales de referencia**

2	aerogenerador
4	torre
6	góndola
8	buje
10, 410	pala
14	punta de pala
16	raíz de pala
18	borde de ataque
20	borde de salida

## ES 2 784 027 T3

30, 130, 230, 330, 430	región de raíz
32, 132, 232, 332, 432	región de transición
34, 134, 234, 334, 434	región de cuerpo de sustentación
36, 136, 236, 336, 436	región de punta
38	secciones radiales de pala
140, 240, 340	primera sección longitudinal
141, 241, 341, 441	primera parte de base
242, 342	segunda sección longitudinal
243, 343, 443	segunda parte de base
344	sección de transición
345	parte de base de transición
146-149, 246, 248, 346-349, 446, 448	dispositivos alteradores de flujo
50, 150, 250, 350, 450, 550	perfil de cuerpo de sustentación
52, 452, 552	lado de presión
54, 454, 554	lado de succión
56	borde de ataque
58	borde de salida
60, 360, 460, 560	cuerda
62, 362, 462, 562	línea de alabeo / línea mediana
64	sentido de rotación
66	sustentación
68	arrastre
70	fuerza aerodinámica resultante
72	fuerza axial (empuje)
74	fuerza tangencial
75	coeficiente de momento
76	ángulo de ataque óptimo para perfil de cuerpo de sustentación de sección radial de pala sin dispositivos alteradores de flujo
78	ángulo de ataque promedio para sección radial de pala
80, 180-182, 280, 380, 480	dispositivos alteradores de flujo
a	factor de inducción axial
a'	factor de inducción tangencial
b	ángulo de paleta
c	longitud de cuerda
C <sub>d</sub>	coeficiente de arrastre
C <sub>i</sub>	coeficiente de sustentación
C <sub>m</sub>	coeficiente de momento
d <sub>t</sub>	posición de grosor máximo
d <sub>f</sub>	posición de alabeo máximo
f	alabeo
h	altura de paleta
l	longitud de paleta
r·ω	velocidad rotacional
r	radio local, distancia radial desde raíz de pala
r <sub>t</sub>	distancia radial desde punta de pala
s	espaciamiento de paleta
t	grosor
z	espaciamiento de pareja de paletas
x	ratio de velocidad de punta
B	número de palas
N	fuerza normal
P	potencia
R	radio de rotor
T	fuerza tangencial
X	velocidad de punta
V	velocidad eólica de punto de diseño

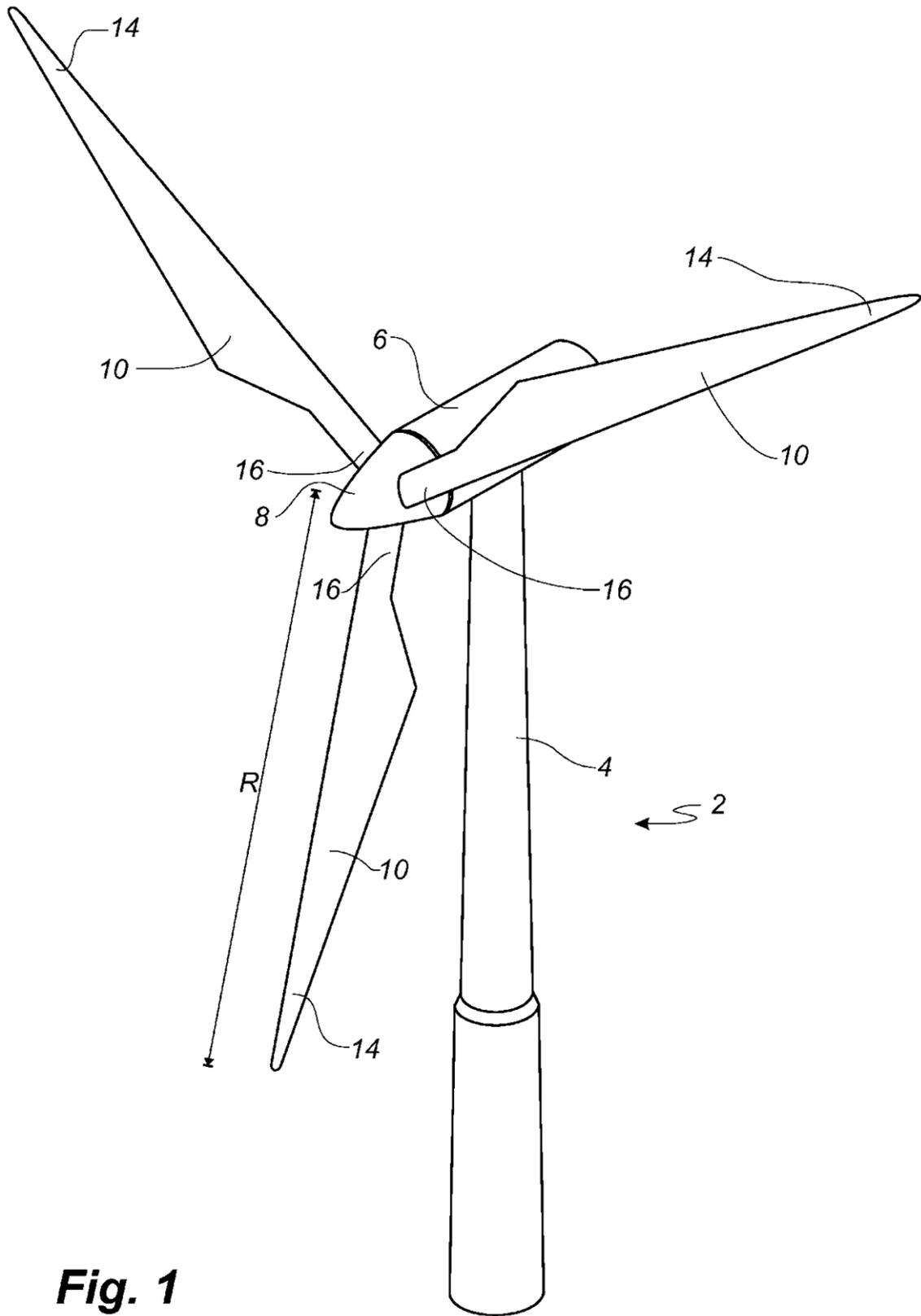
## ES 2 784 027 T3

$v_a$	velocidad axial
$v_\omega$	velocidad eólica
$v_r, W, V_{\text{flujoentrante}}$	velocidad resultante, velocidad de flujo entrante
$\alpha$	ángulo de ataque
$\omega, \Omega$	velocidad rotacional de rotor
$\Theta, \theta$	torsión, paso
$\Delta y$	precurva

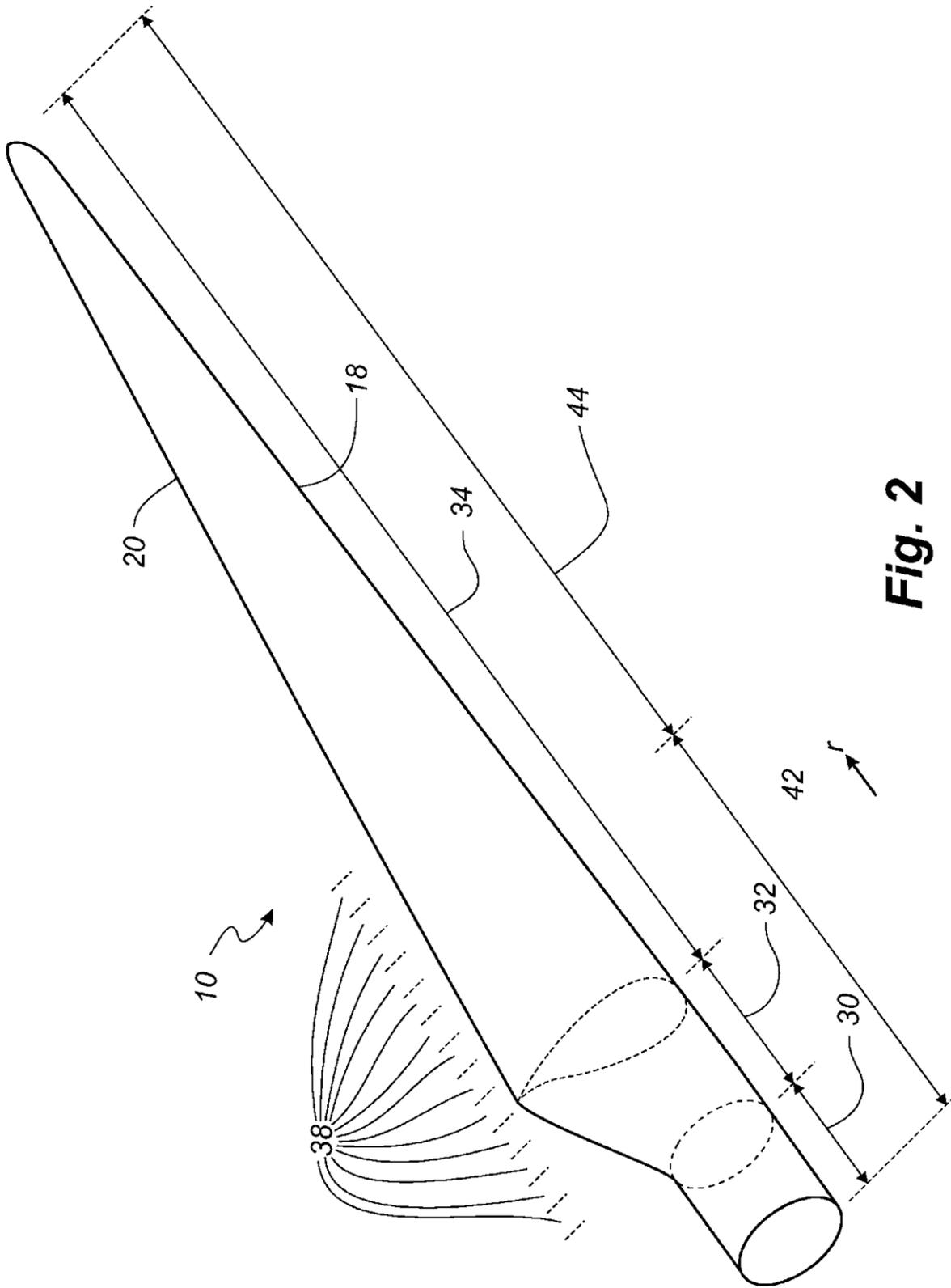
**REIVINDICACIONES**

1. Un método para fabricar una pala de aerogenerador al usar el diseño de un segmento longitudinal de una primera pala de aerogenerador (410) para el diseño de una segunda pala de aerogenerador (410'), en donde la primera pala de aerogenerador (410) y la segunda pala de aerogenerador (410') comprenden, cada una, una parte de base que se extiende longitudinalmente que tiene:
- un contorno perfilado que comprende un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde de salida con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, el contorno perfilado genera una sustentación cuando es impactado por un flujo de aire incidente,
  - el contorno perfilado en la dirección radial se divide en una región de raíz con un perfil sustancialmente circular o elíptico lo más cerca del buje, una región de cuerpo de sustentación con un perfil generador de sustentación lo más alejado del buje, y preferiblemente una región de transición entre la región de raíz y la región de cuerpo de sustentación, la región de transición tiene un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial desde el perfil circular o elíptico de la región de raíz al perfil generador de sustentación de la región de cuerpo de sustentación, caracterizado por que el método comprende las etapas de:
    - a) tomar un primer diseño de pala de una primera parte de base (441) de un primer segmento longitudinal (440) de la región de cuerpo de sustentación de una primera pala (410),
    - b) usar el primer diseño de pala para la primera parte de base (441) en un primer segmento longitudinal (440') de la región de cuerpo de sustentación de una segunda pala (410'), de modo que un factor de inducción axial de la primera parte de base (441) sobre la segunda pala (410') sin dispositivos alteradores de flujo en un punto de diseño de rotor se desvía de un objetivo de factor de inducción axial, y
    - c) proporcionar al primer segmento longitudinal (440') de la segunda pala (410') primeros dispositivos alteradores de flujo (446'; 448') para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal (440') y obtener los coeficientes correctos de sustentación y de arrastre en el ángulo de ataque dado para cumplir sustancialmente el objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño en la segunda pala, en donde el primer segmento longitudinal (440') se extiende a lo largo de al menos el 20 % de una extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de la segunda pala (410'), en donde el primer segmento longitudinal de la primera pala se ubica a una primera distancia radial desde un extremo de raíz de la primera pala, y en donde el primer segmento longitudinal de la segunda pala se ubica a una segunda distancia radial desde un extremo de raíz de la segunda pala, y en donde la primera distancia radial es diferente de la segunda distancia radial.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde la primera parte de base se optimiza para funcionamiento a la primera distancia radial.
3. Un método según la reivindicación 1, en donde la primera parte de base tiene una forma de perfil que es sustancialmente un híbrido entre una primera forma de perfil para obtener un objetivo de factor de inducción axial a una primera distancia radial en el punto de diseño de rotor y una segunda forma de perfil para obtener un objetivo de factor de inducción axial a una segunda distancia radial en el punto de diseño de rotor.
4. Un método según la reivindicación 3, en donde la primera parte de base tiene una forma de perfil que es sustancialmente un promedio entre la primera forma de perfil y la segunda forma de perfil.
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde las etapas a) y b) se llevan a cabo al conectar un extensor de buje a la primera pala.
6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde los dispositivos alteradores de flujo comprenden dispositivos elegidos del grupo de:
- secciones multielemento, tales como un listón, o una aleta, y/o
  - elementos montados en superficie, tales como un elemento de borde de ataque o una aleta montada en superficie, que altera un envolvente global del primer segmento longitudinal de la pala.
7. Un método según la reivindicación 6, en donde los dispositivos alteradores de flujo comprenden adicionalmente medios de control de capa límite, tales como orificios o una ranura para ventilación, generadores de vórtice y una aleta Gurney.
8. Un grupo de palas de aerogenerador que comprende al menos una primera pala de aerogenerador (410) y una segunda pala de aerogenerador (410'), en donde la primera pala de aerogenerador (410) y la segunda pala de aerogenerador (410') comprenden, cada una, una parte de base que se extiende longitudinalmente que tiene:

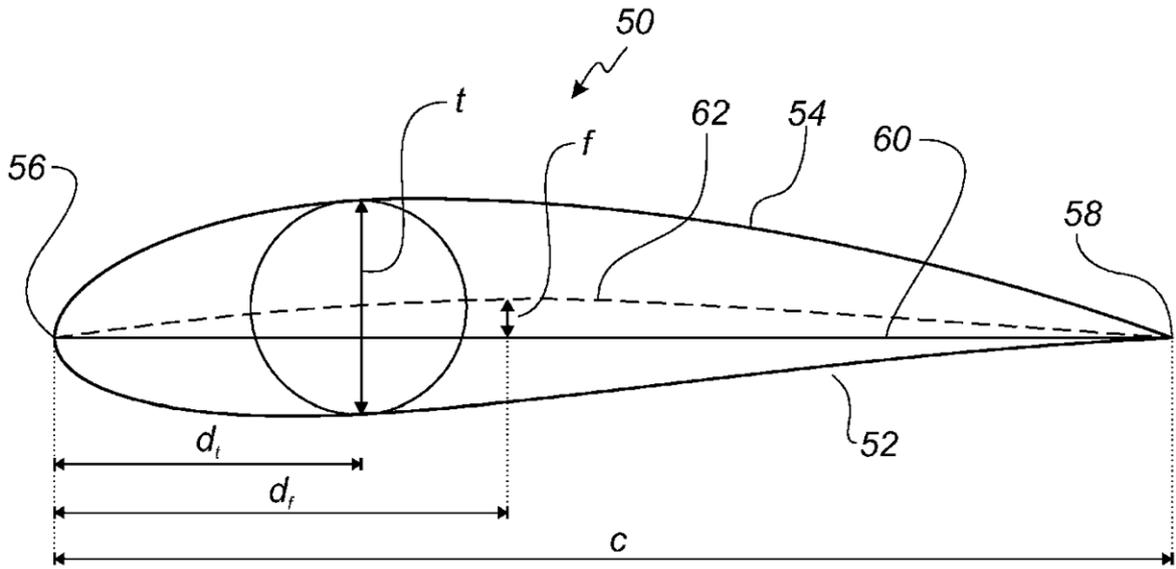
- un contorno perfilado que comprende un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde de salida con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque y el borde de salida, el contorno perfilado genera una sustentación cuando es impactado por un flujo de aire incidente,
- 5
- el contorno perfilado en la dirección radial se divide en una región de raíz con un perfil sustancialmente circular o elíptico lo más cerca del buje, una región de cuerpo de sustentación con un perfil generador de sustentación lo más alejado del buje, y preferiblemente una región de transición entre la región de raíz y la región de cuerpo de sustentación, la región de transición tiene un perfil que cambia gradualmente en la dirección radial desde el perfil circular o elíptico de la región de raíz al perfil generador de sustentación de la región de cuerpo de sustentación, caracterizado por que
- 10
- la primera pala de aerogenerador (410) y la segunda pala de aerogenerador (410') comprenden un primer segmento longitudinal (440; 440') que tiene una primera parte de base sustancialmente idéntica (441), en donde
  - el primer segmento longitudinal (440') se extiende a lo largo de al menos el 20 % de una extensión longitudinal de la región de cuerpo de sustentación de la segunda pala de aerogenerador (410'), y en donde
- 15
- un factor de inducción axial de la primera parte de base de la segunda pala (410') sin dispositivos alteradores de flujo en un punto de diseño de rotor se desvía de un objetivo de factor de inducción axial, y en donde
  - el primer segmento longitudinal (440') de la segunda pala (410') se provee de varios primeros dispositivos alteradores de flujo (446', 448') dispuestos para ajustar las propiedades aerodinámicas del primer segmento longitudinal (440') y obtener los coeficientes correctos de sustentación y de arrastre en el ángulo de ataque dado para cumplir sustancialmente el objetivo de factor de inducción axial en el punto de diseño de rotor, en donde el primer
- 20
- segmento longitudinal de la primera pala se ubica a una primera distancia radial desde un extremo de raíz de la primera pala, y en donde el primer segmento longitudinal de la segunda pala se ubica a una segunda distancia radial desde un extremo de raíz de la segunda pala, y en donde la primera distancia radial es diferente de la segunda distancia radial.
- 25
9. Un grupo de palas de aerogenerador según la reivindicación 8, en donde la segunda pala de aerogenerador comprende la parte de base de la primera pala de aerogenerador y además está provista de un extensor de buje.
10. Un grupo de aerogeneradores que comprende al menos un primer aerogenerador y un segundo aerogenerador, en donde el primer aerogenerador comprende un rotor con un número, preferiblemente dos o tres, de primeras palas de aerogenerador según la reivindicación 8 o 9, y el segundo aerogenerador comprende un rotor con un número, preferiblemente dos o tres, de segundas palas de aerogenerador según la reivindicación 8 o 9.



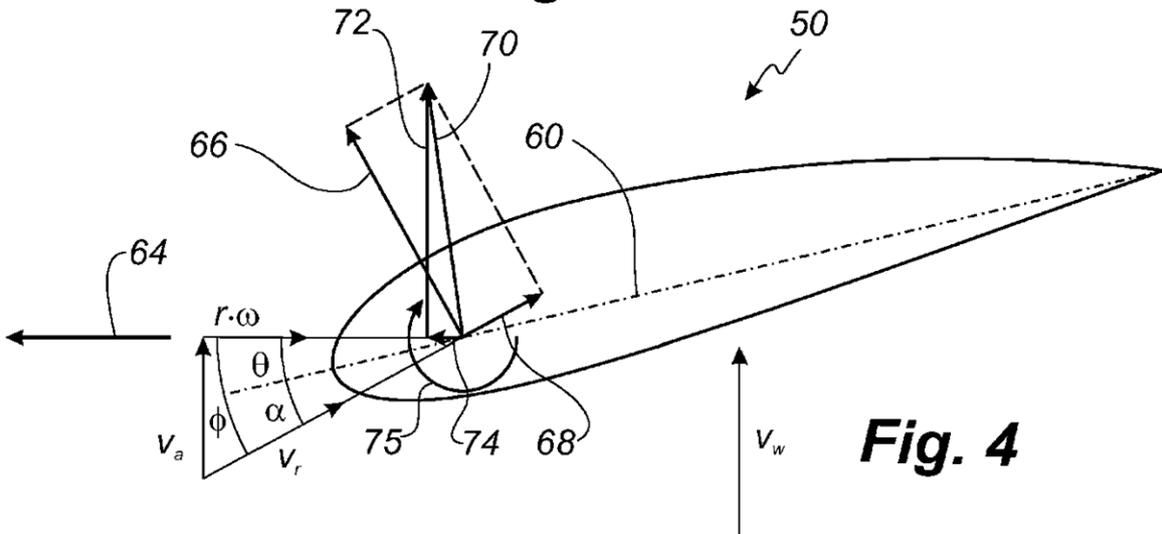
**Fig. 1**



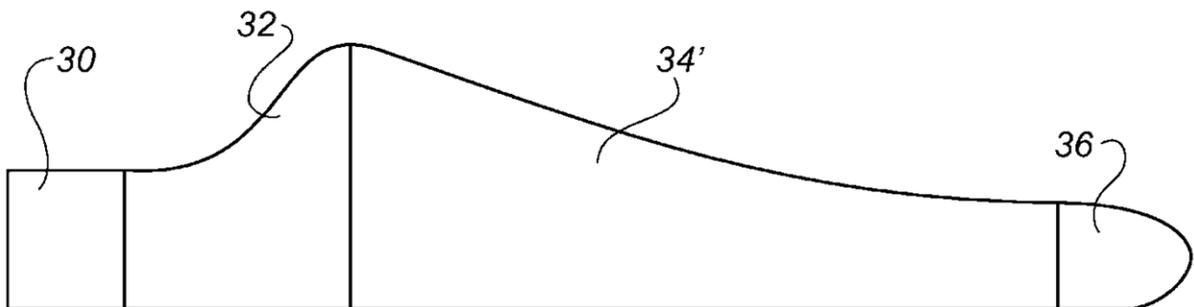
**Fig. 2**



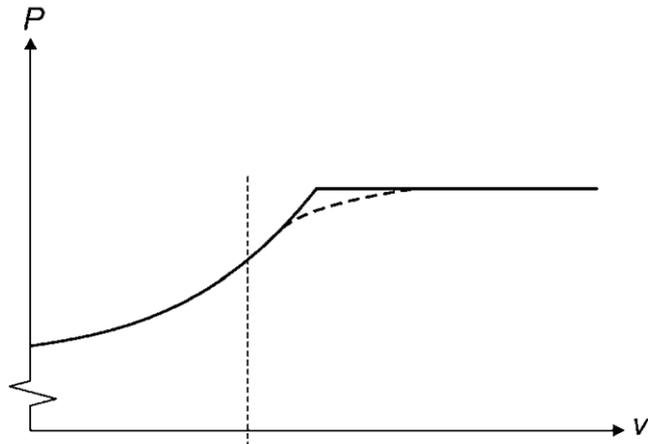
**Fig. 3**



**Fig. 4**



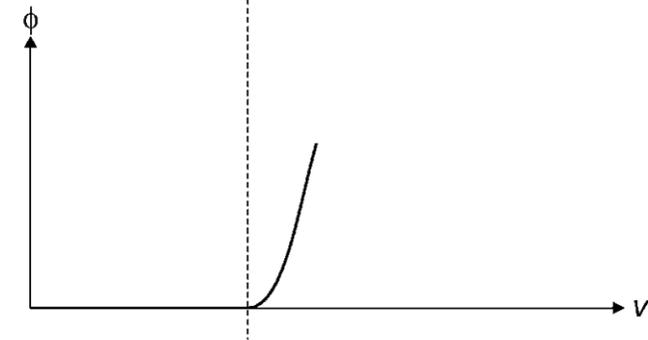
**Fig. 5**



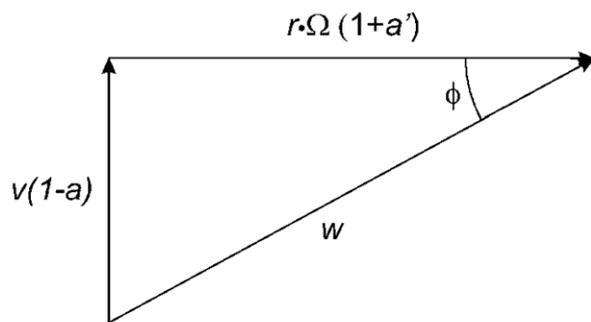
**Fig. 6a**



**Fig. 6b**

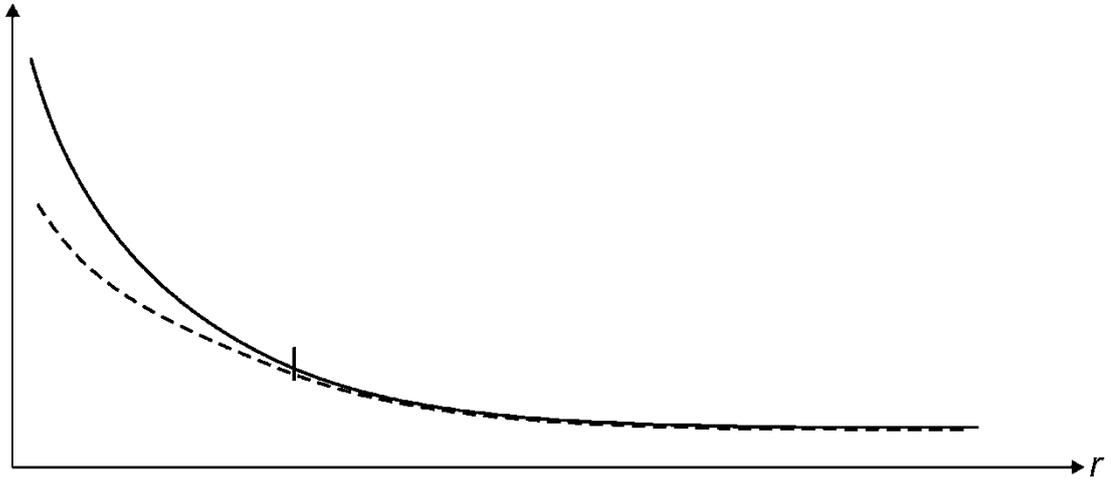


**Fig. 6c**



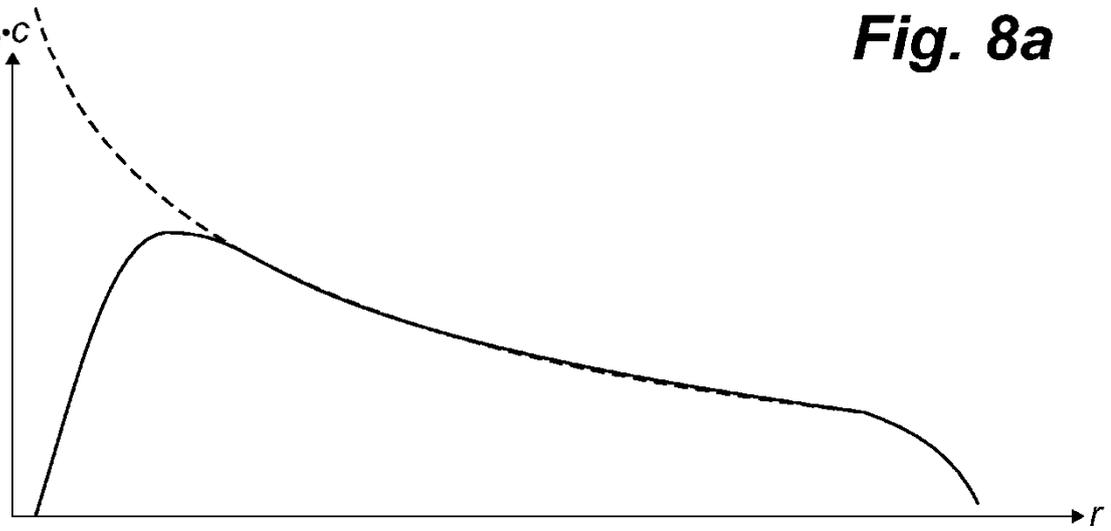
**Fig. 7**

flujo  
entrante

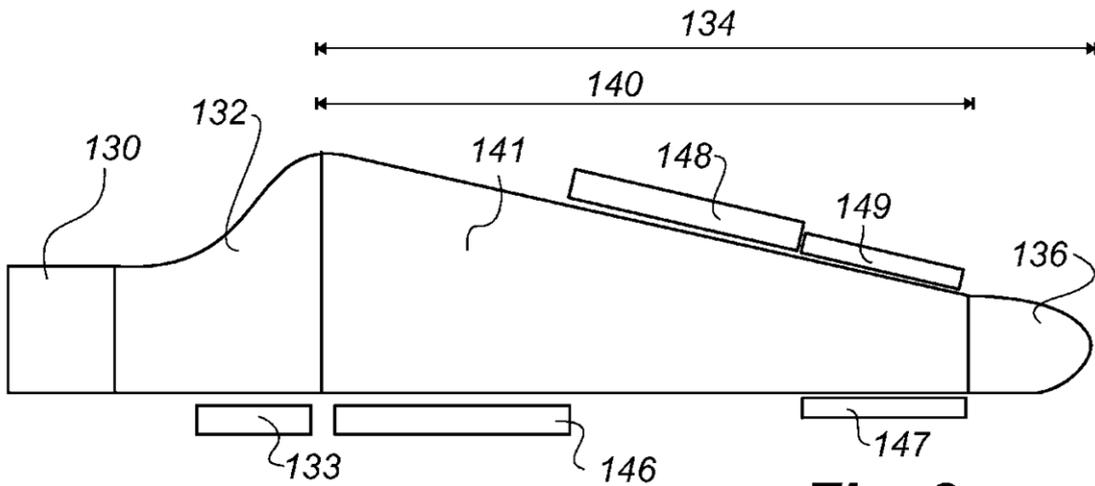


**Fig. 8a**

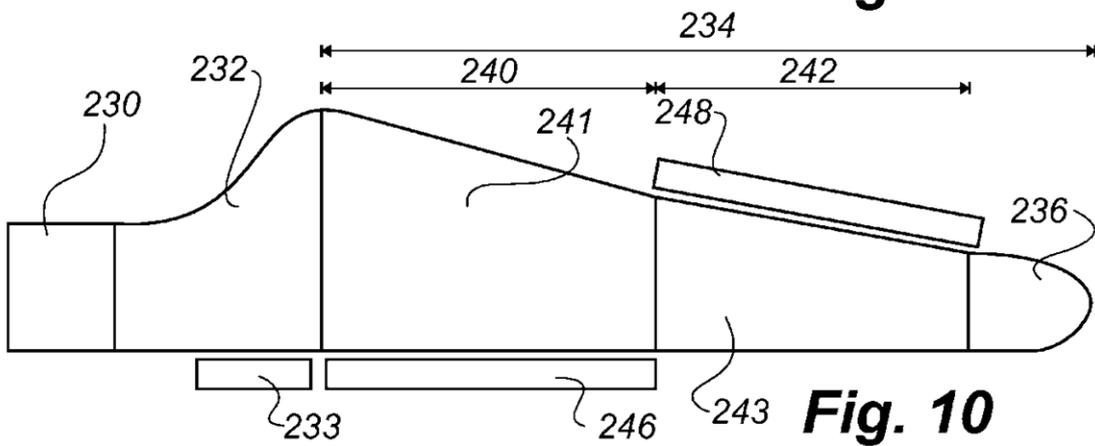
$c_i \cdot c$



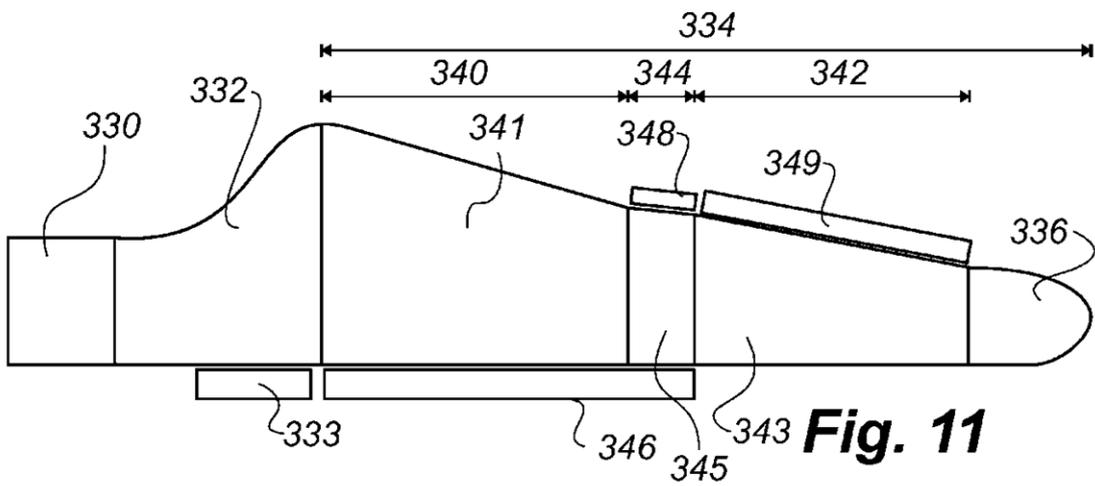
**Fig. 8b**



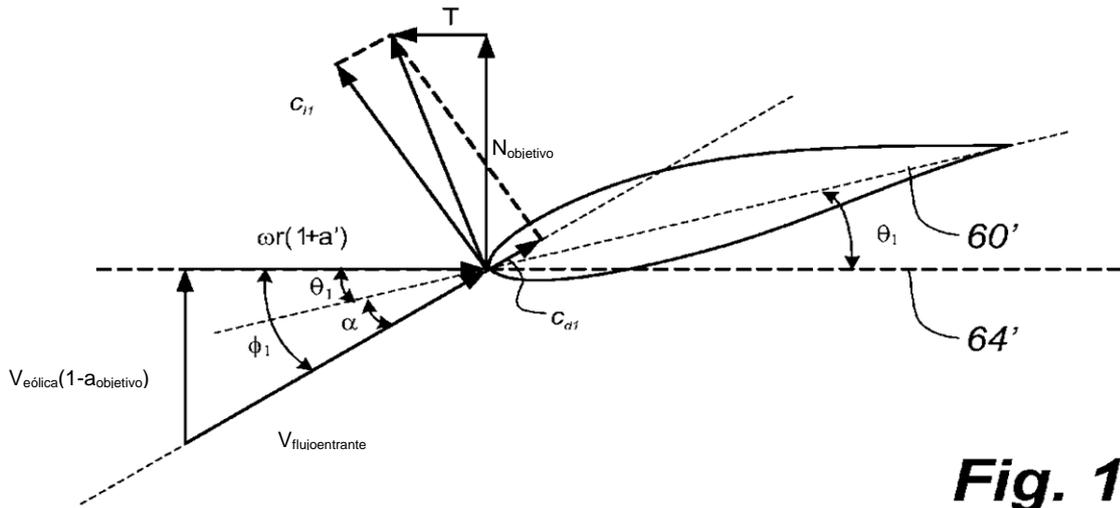
**Fig. 9**



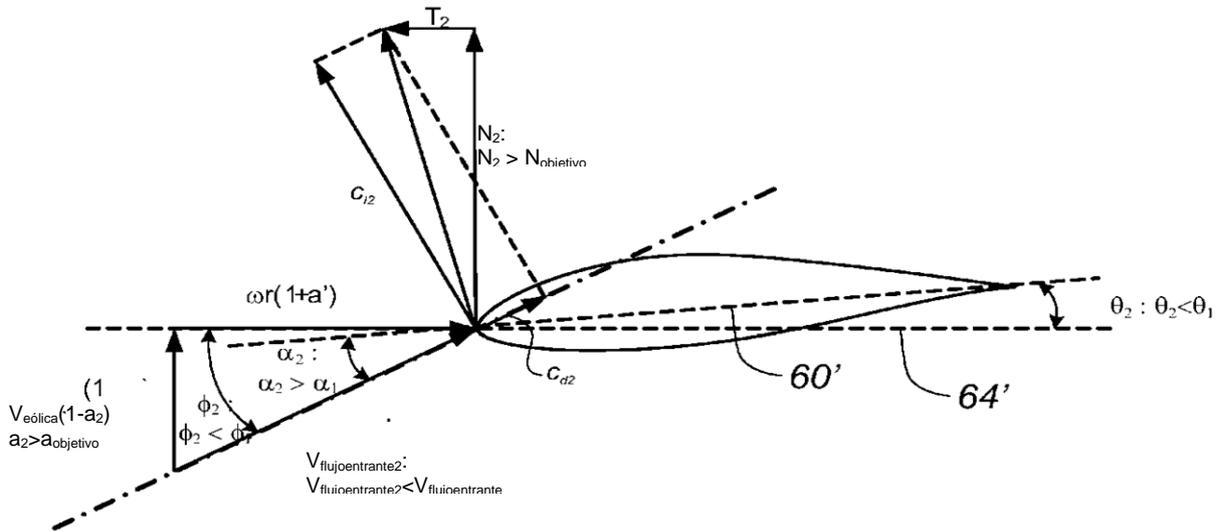
**Fig. 10**



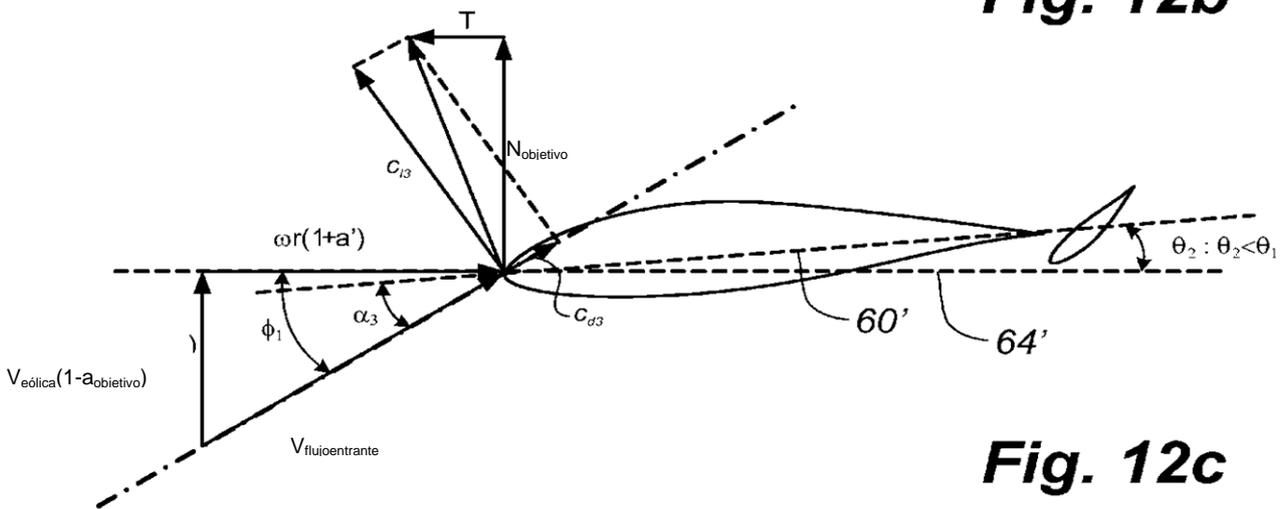
**Fig. 11**



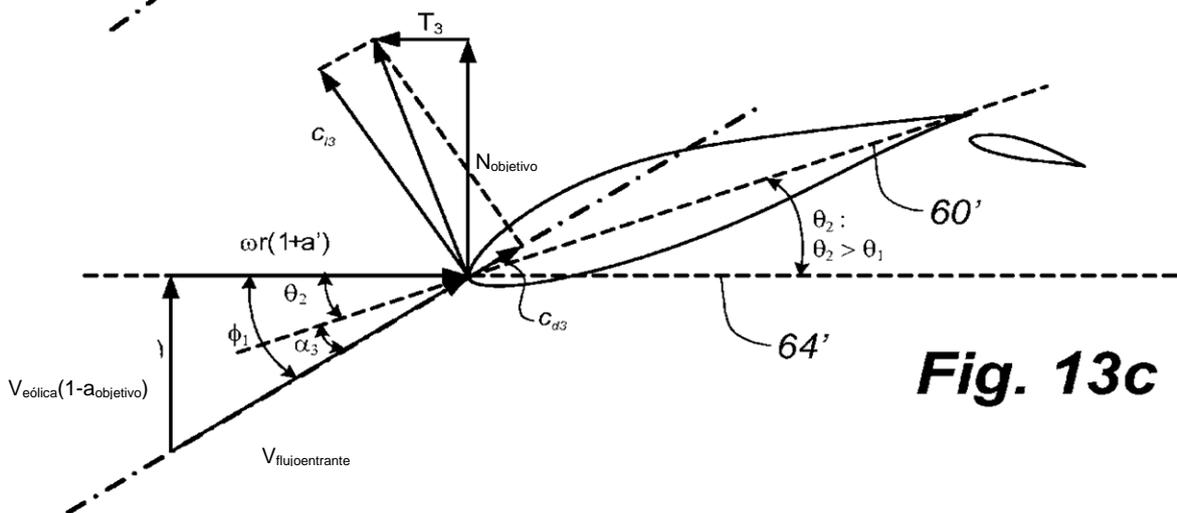
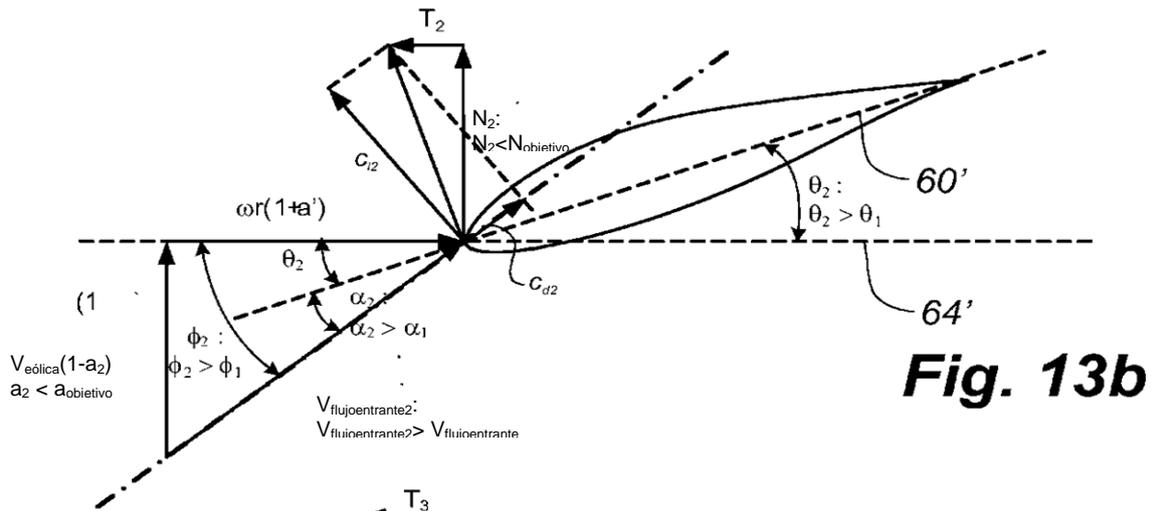
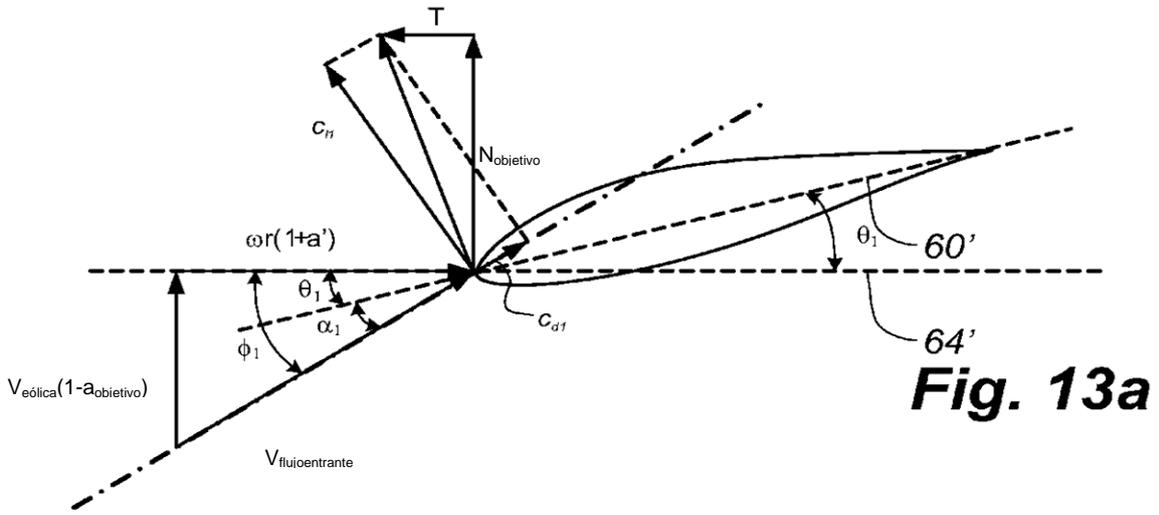
**Fig. 12a**

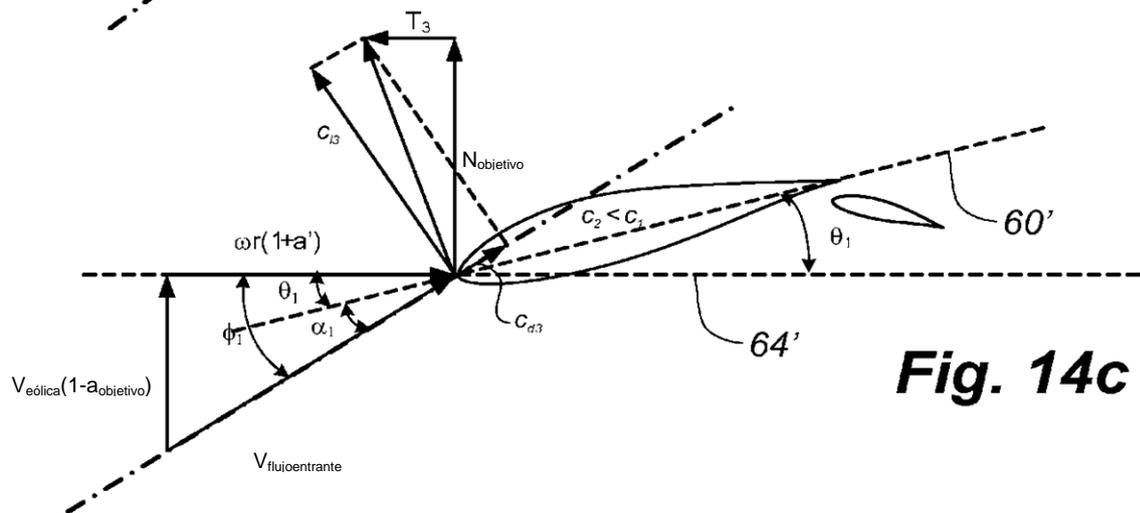
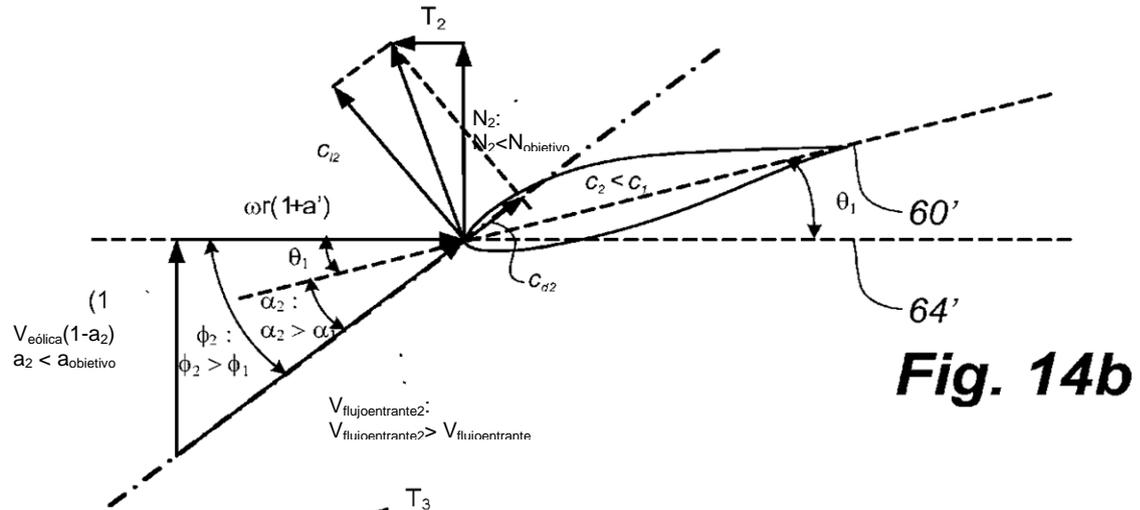
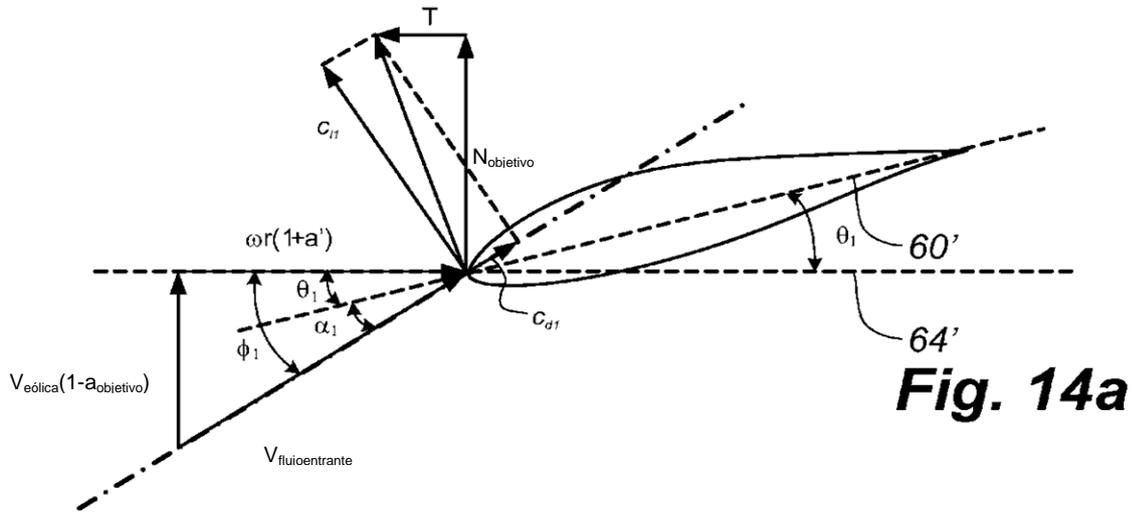


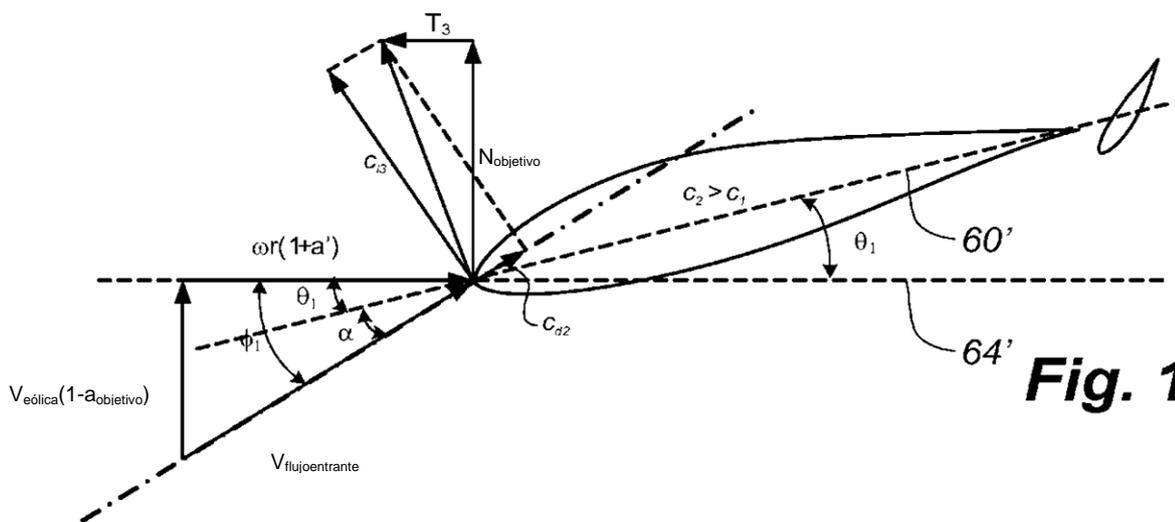
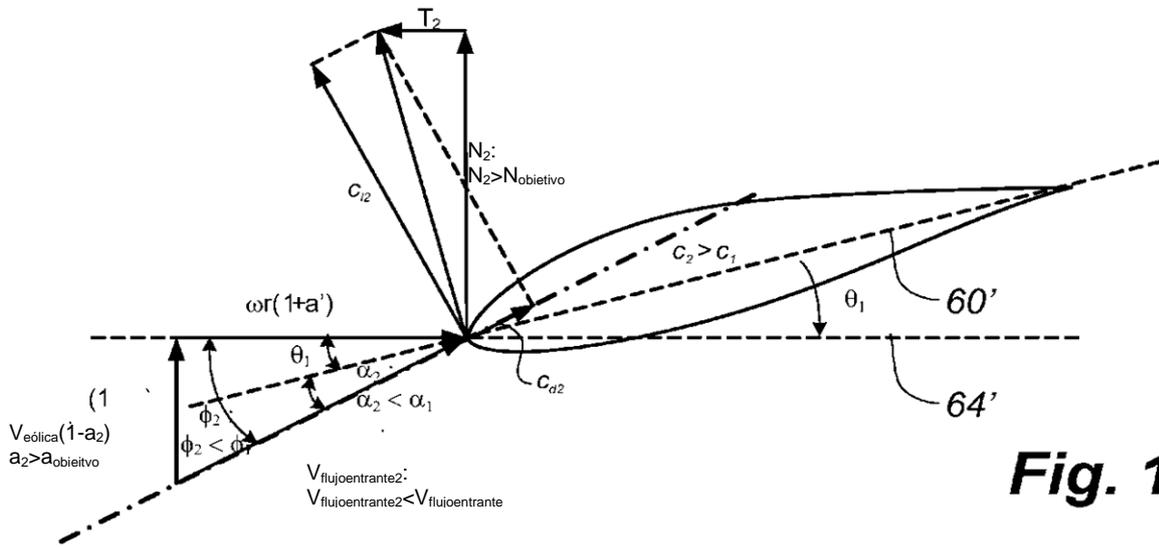
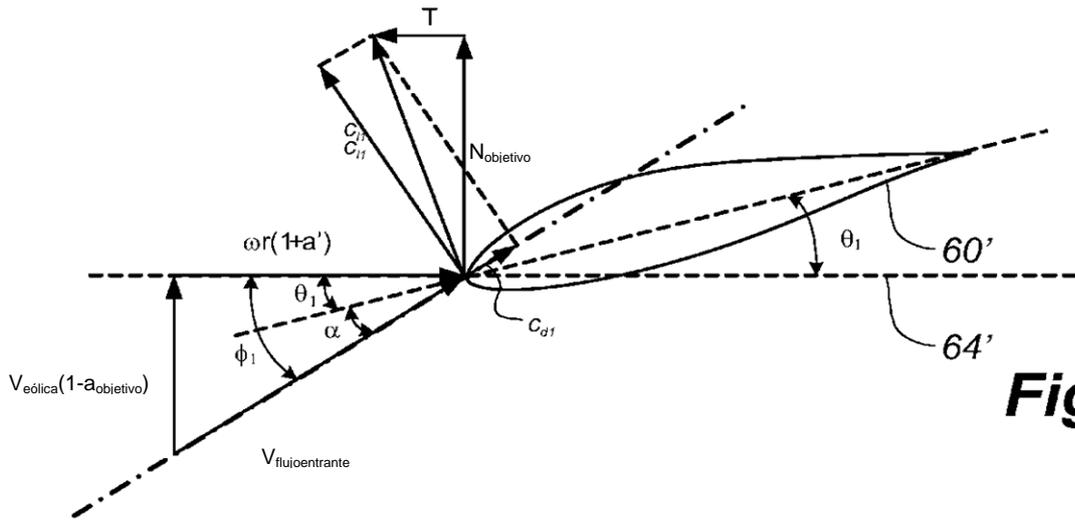
**Fig. 12b**



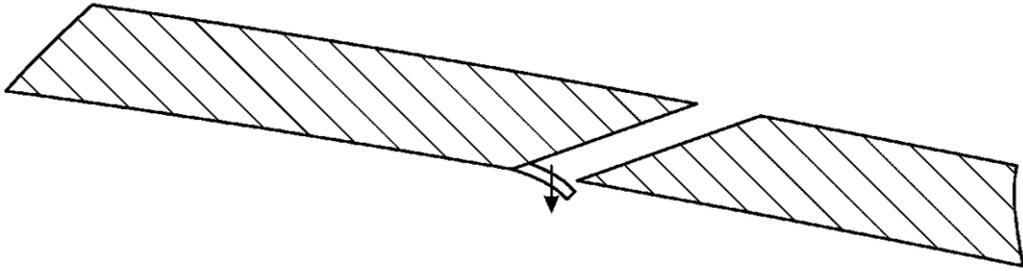
**Fig. 12c**



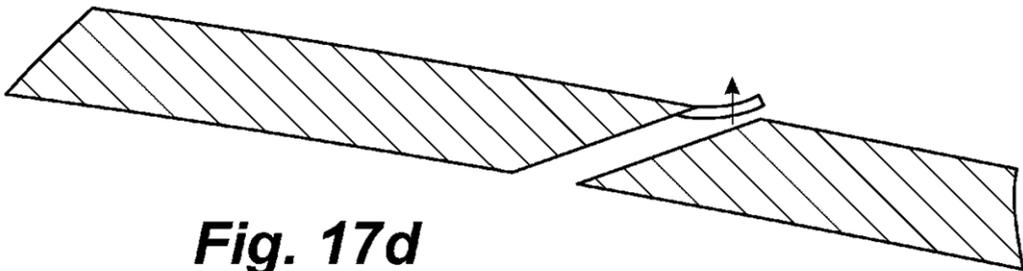




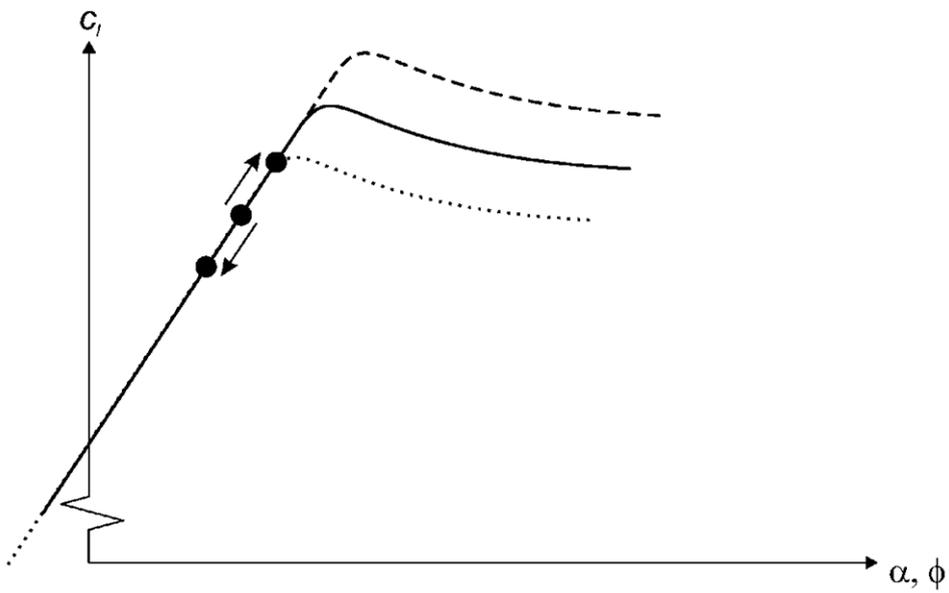




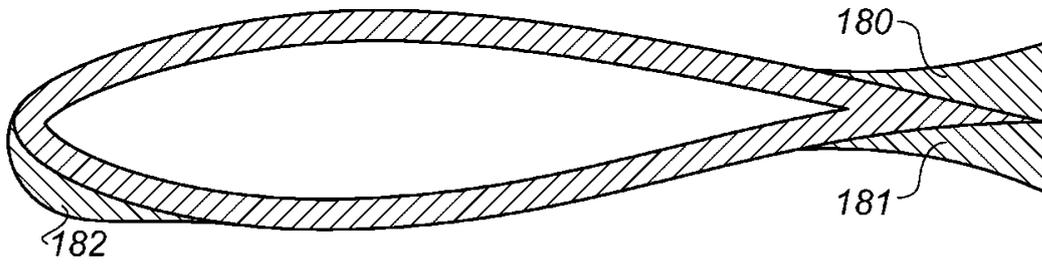
**Fig. 17c**



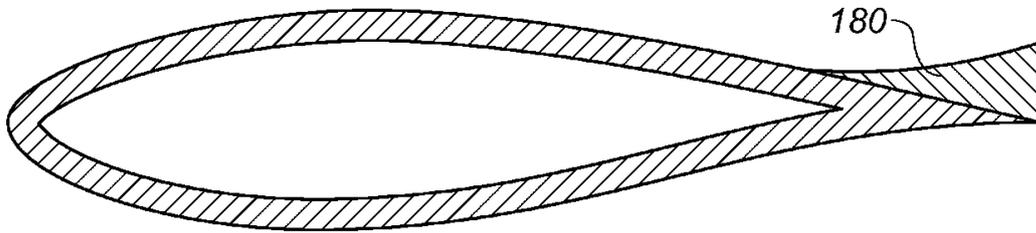
**Fig. 17d**



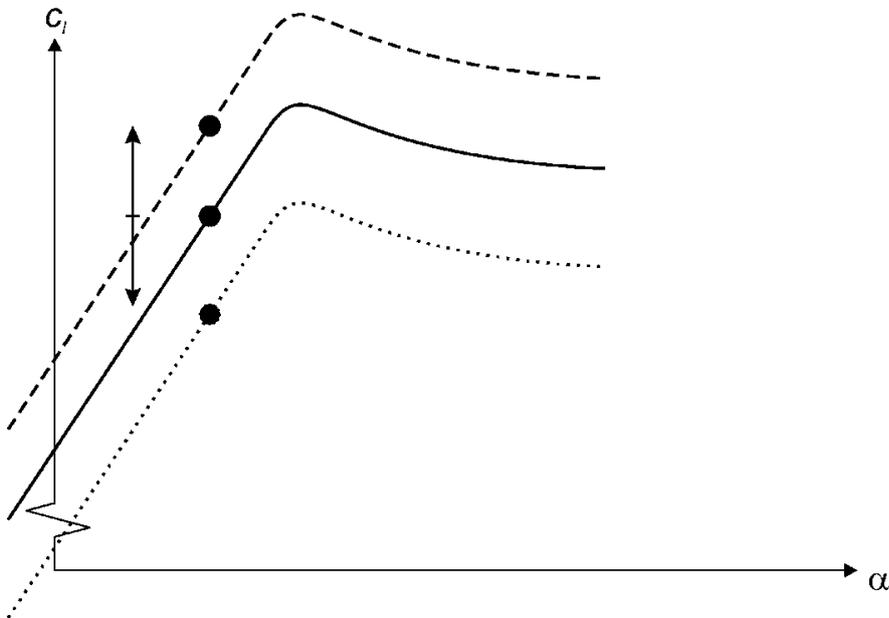
**Fig. 17e**



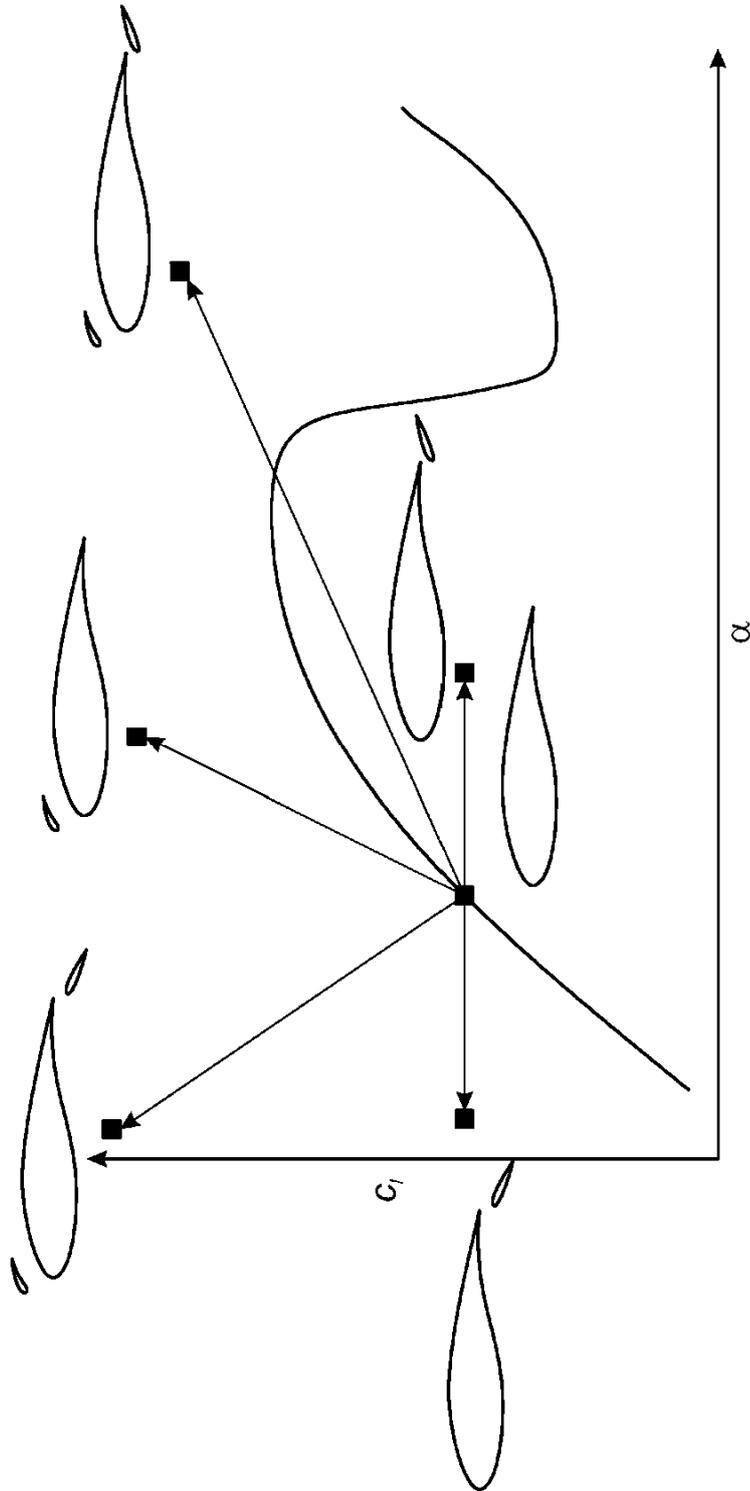
**Fig. 18a**



**Fig. 18b**



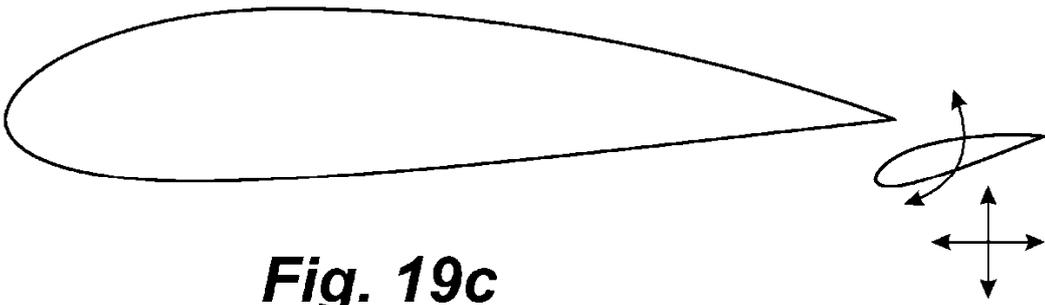
**Fig. 18c**



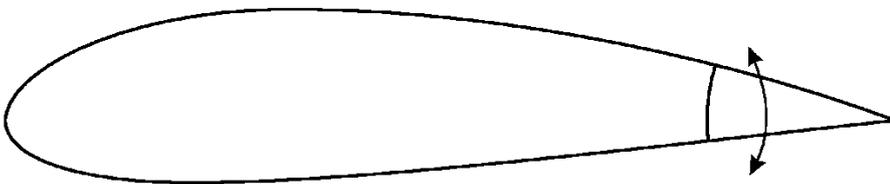
**Fig. 19a**



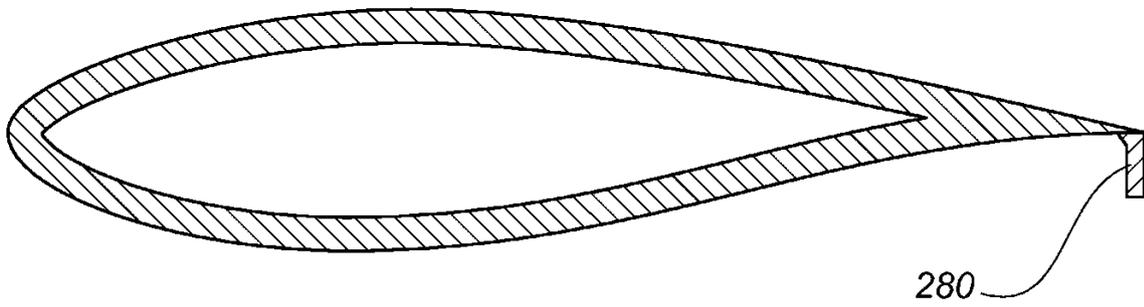
**Fig. 19b**



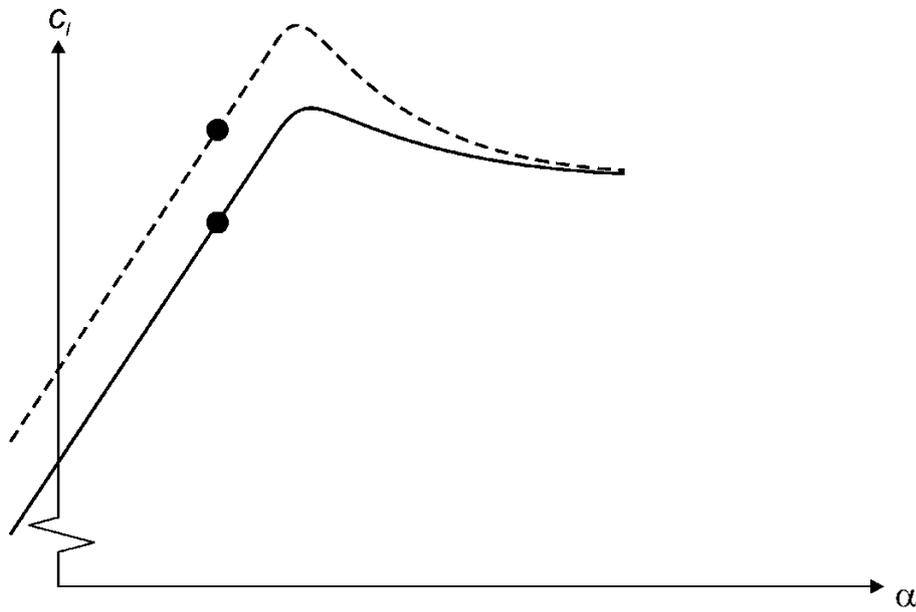
**Fig. 19c**



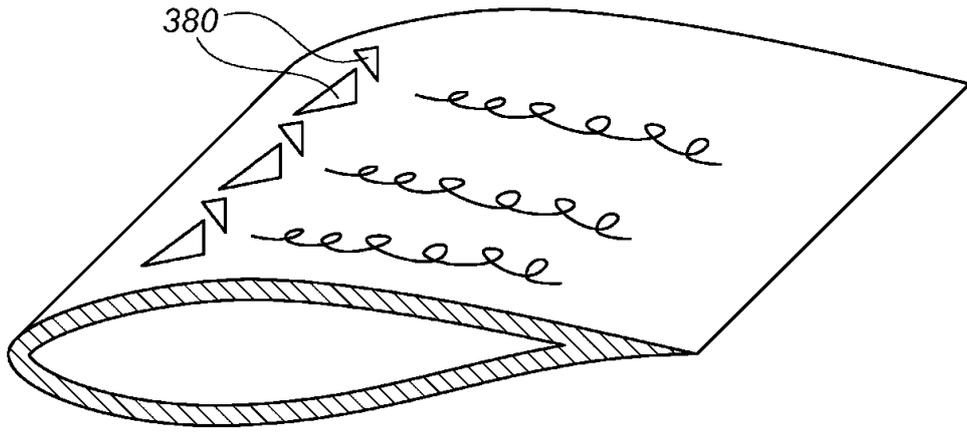
**Fig. 19d**



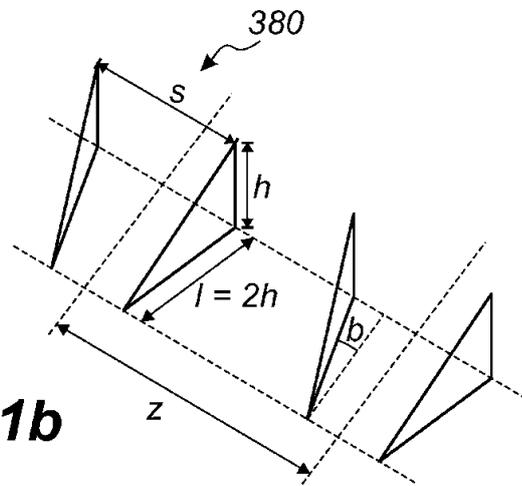
**Fig. 20a**



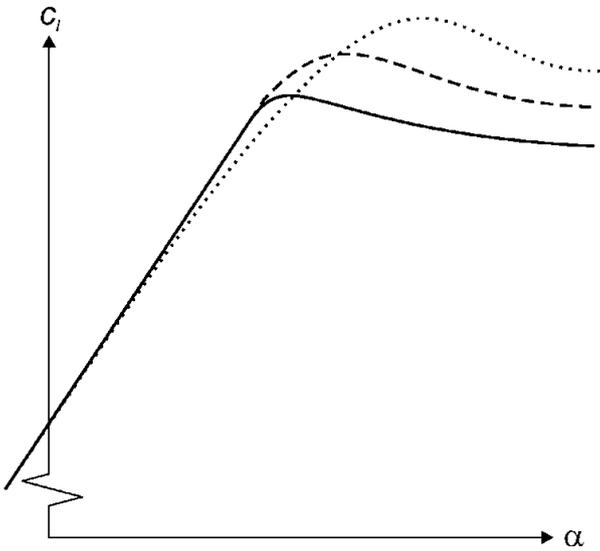
**Fig. 20b**



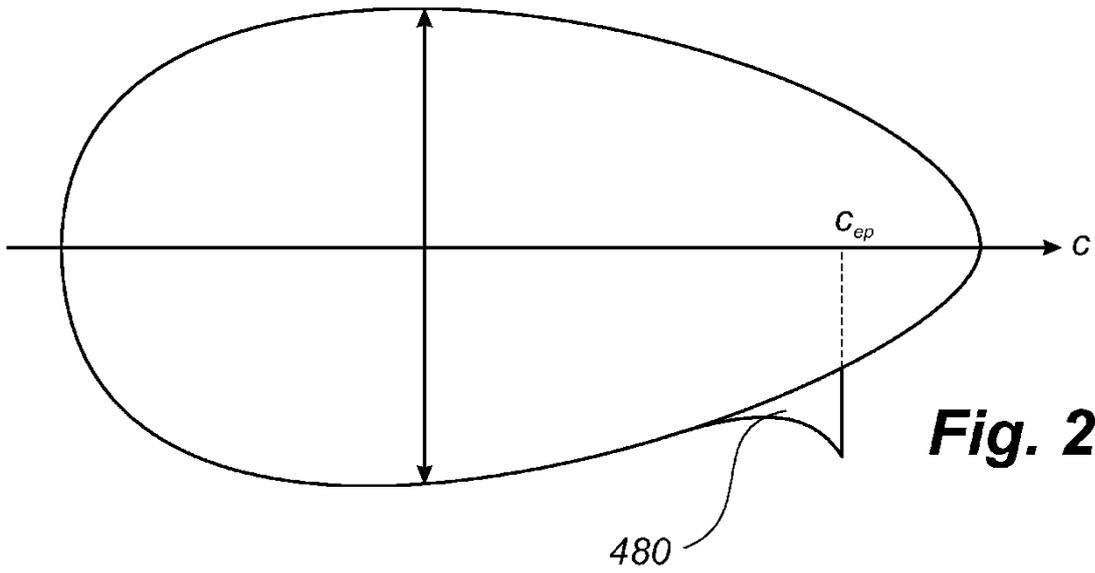
**Fig. 21a**



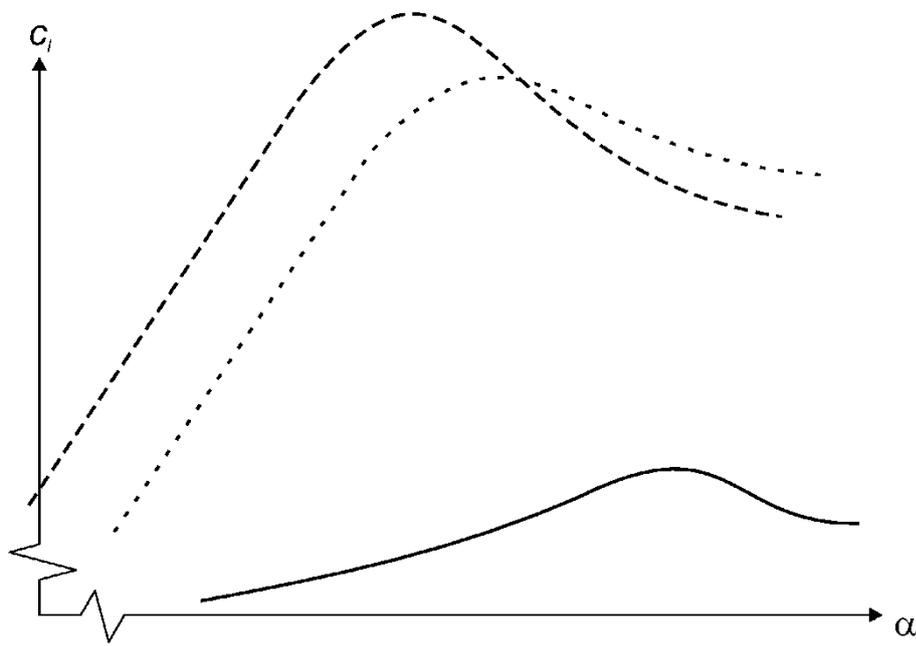
**Fig. 21b**



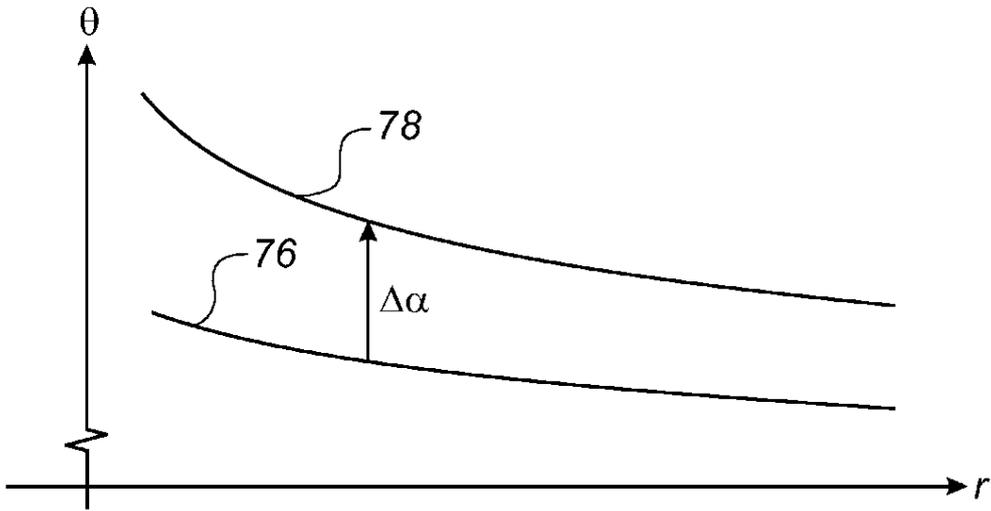
**Fig. 21c**



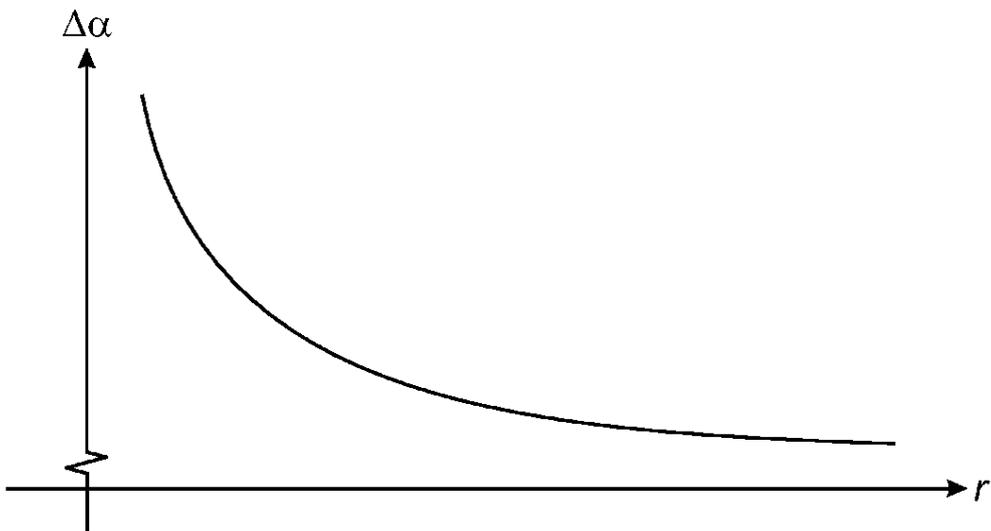
**Fig. 22a**



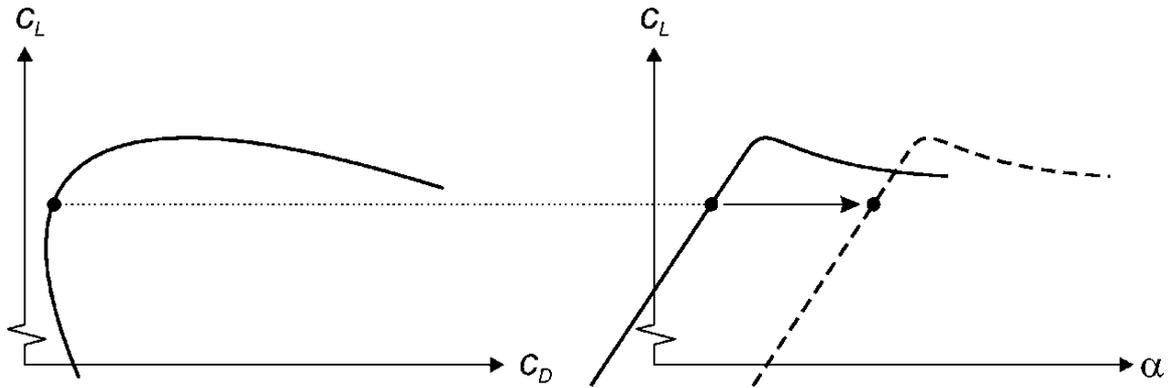
**Fig. 22b**



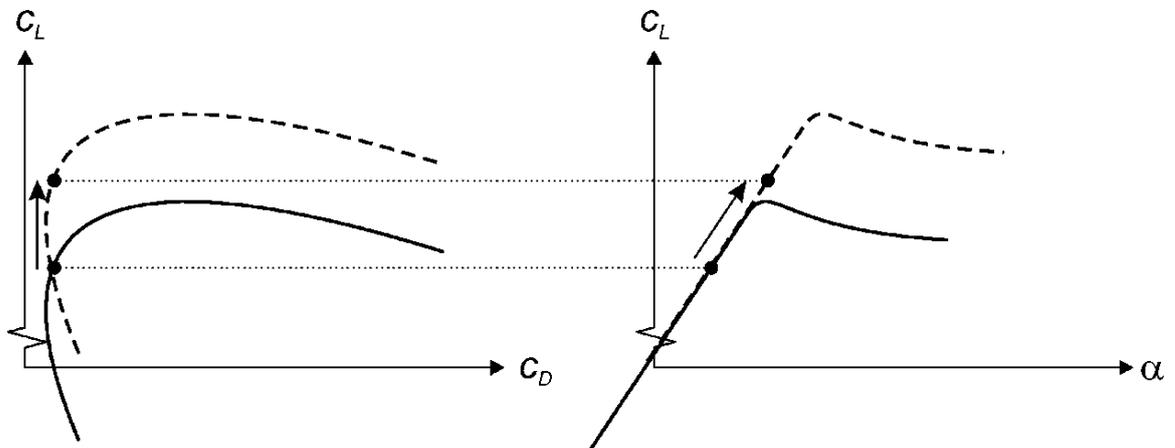
**Fig. 23a**



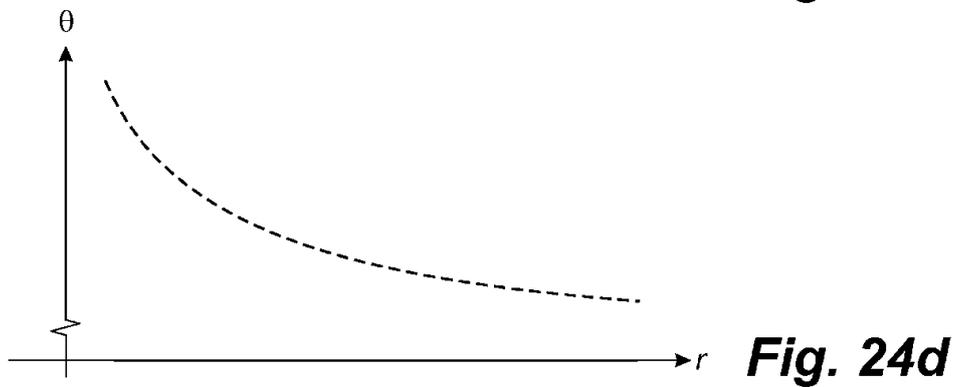
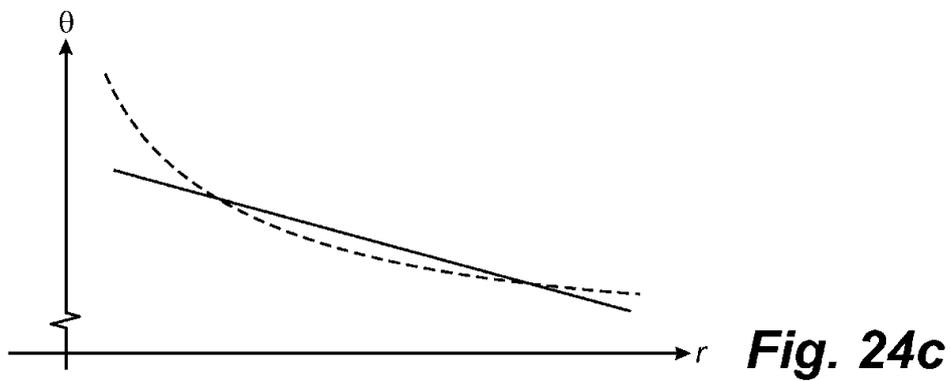
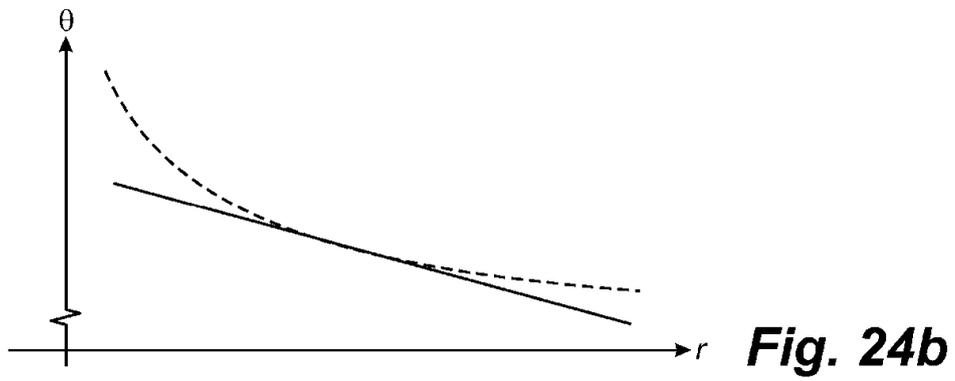
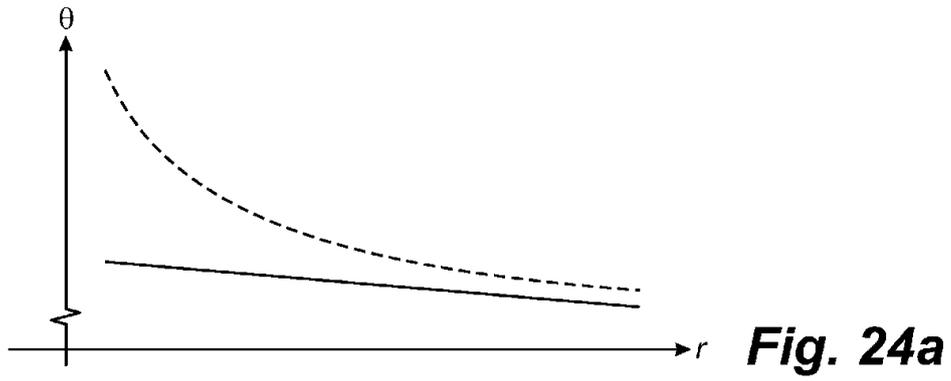
**Fig. 23b**

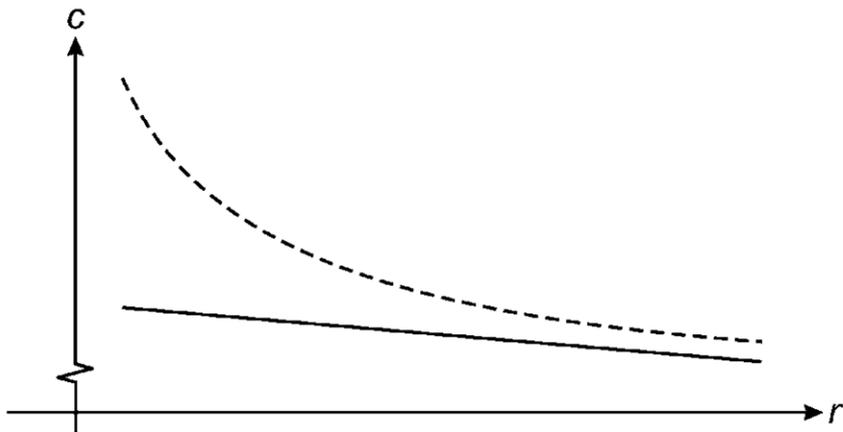


**Fig. 23c**

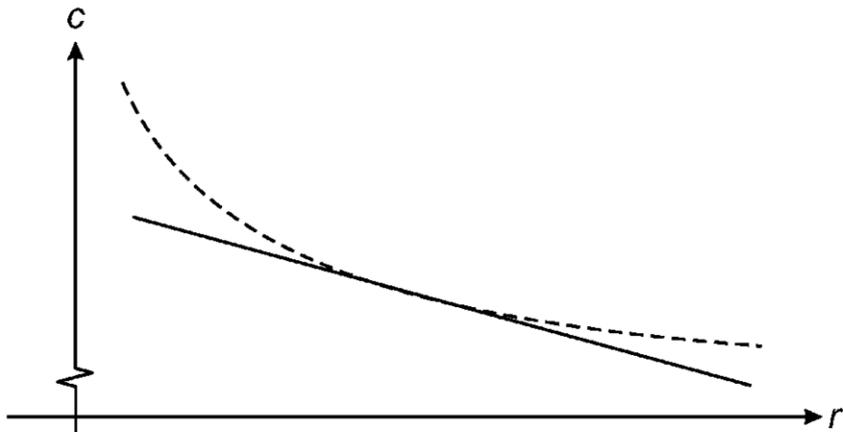


**Fig. 23d**

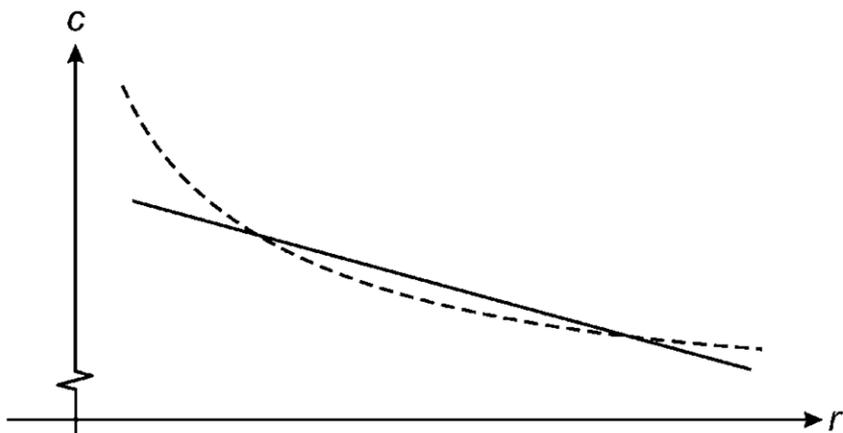




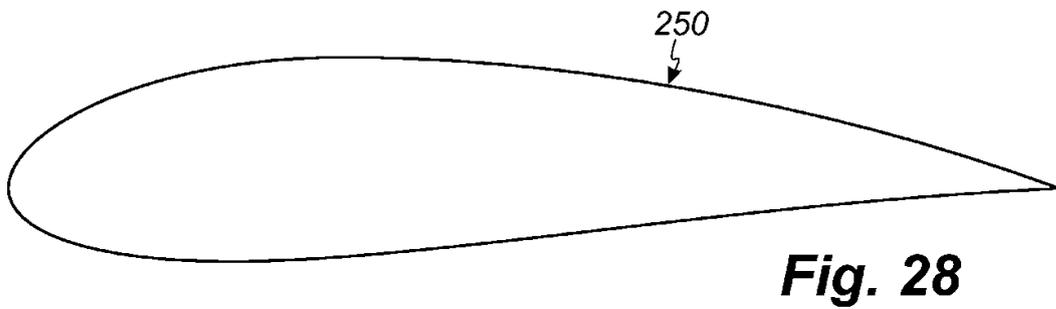
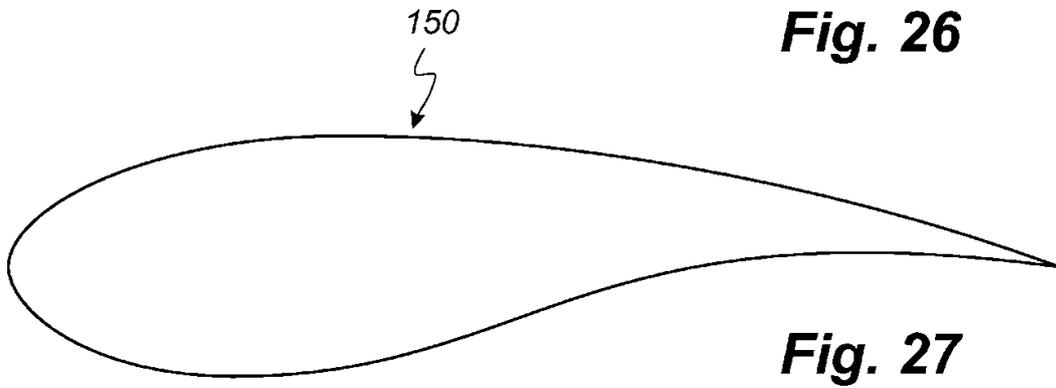
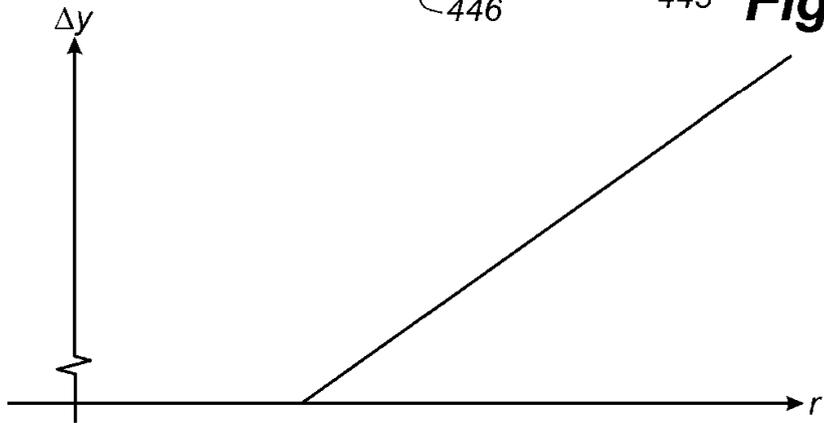
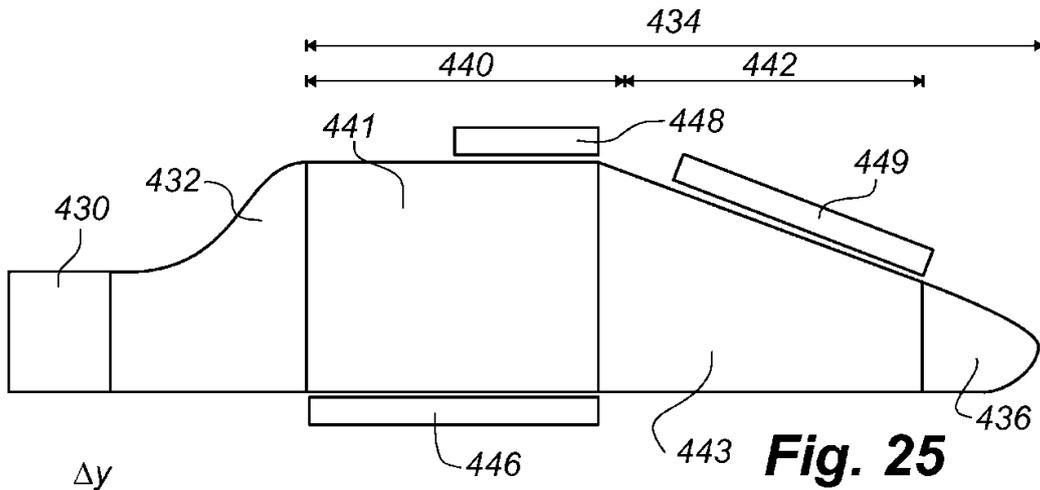
**Fig. 24e**

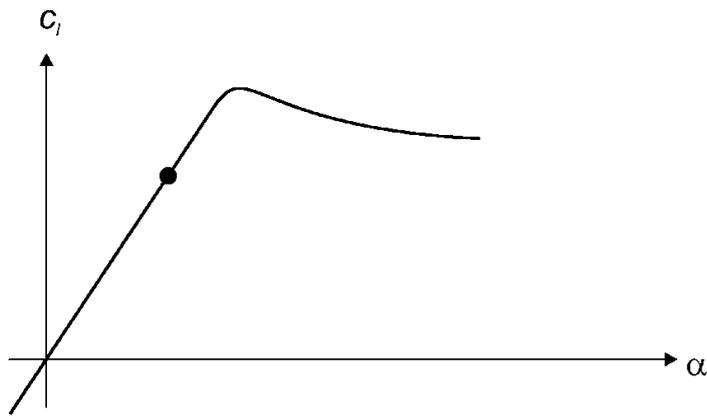


**Fig. 24f**

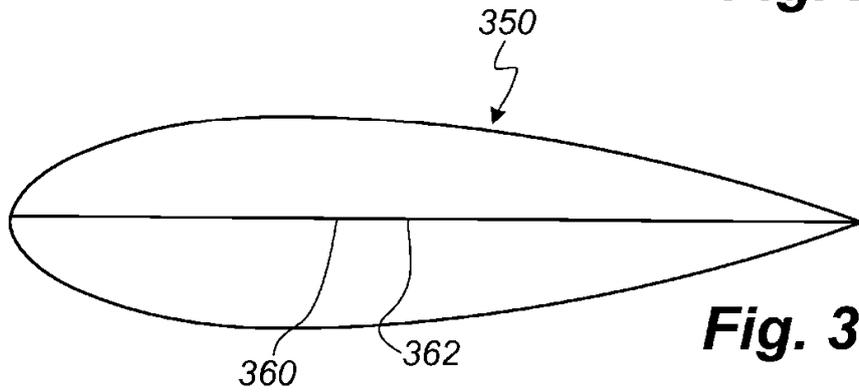


**Fig. 24g**

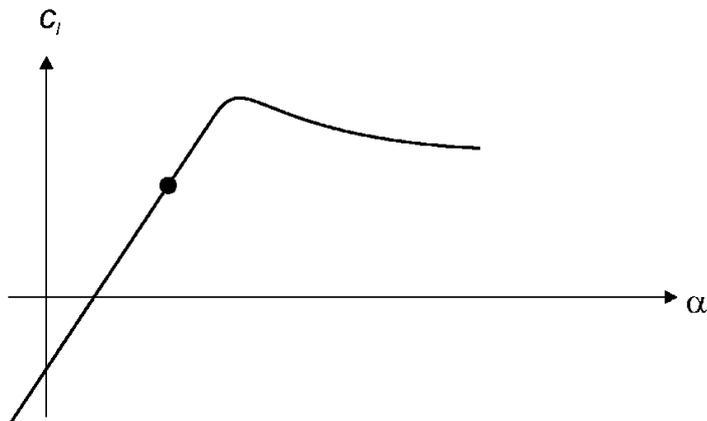




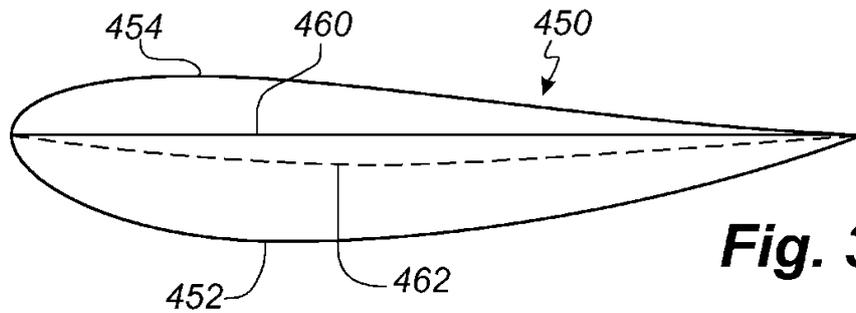
**Fig. 29**



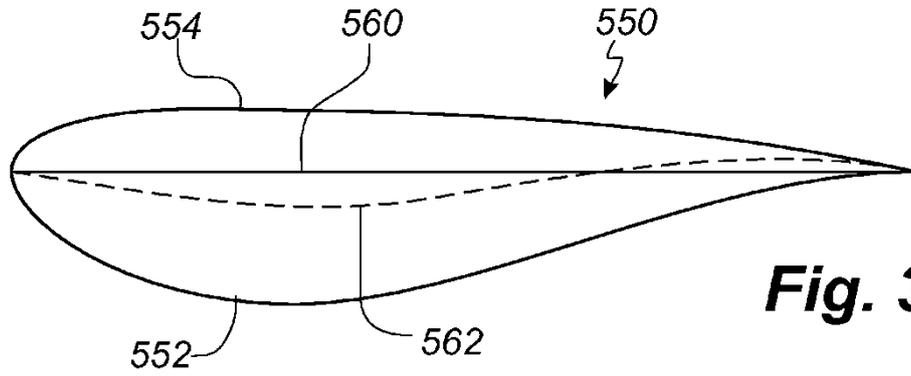
**Fig. 30**



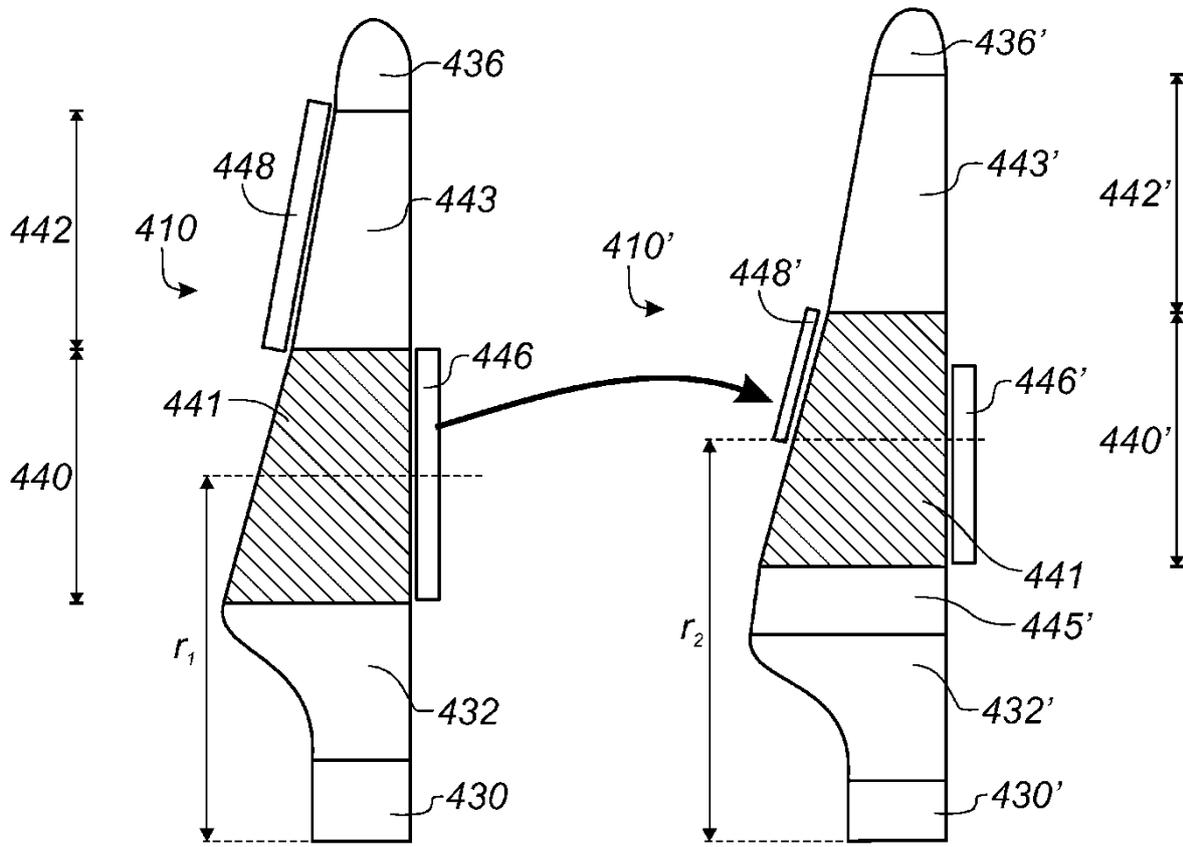
**Fig. 31**



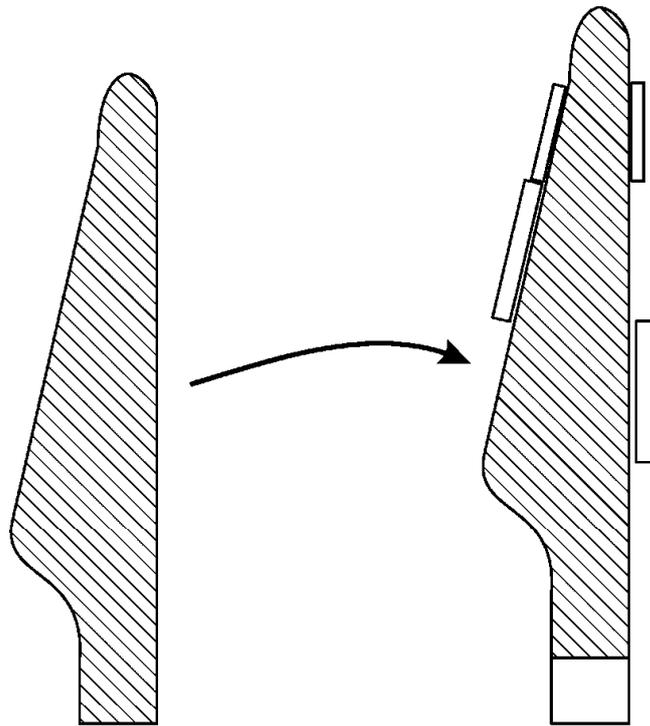
**Fig. 32**



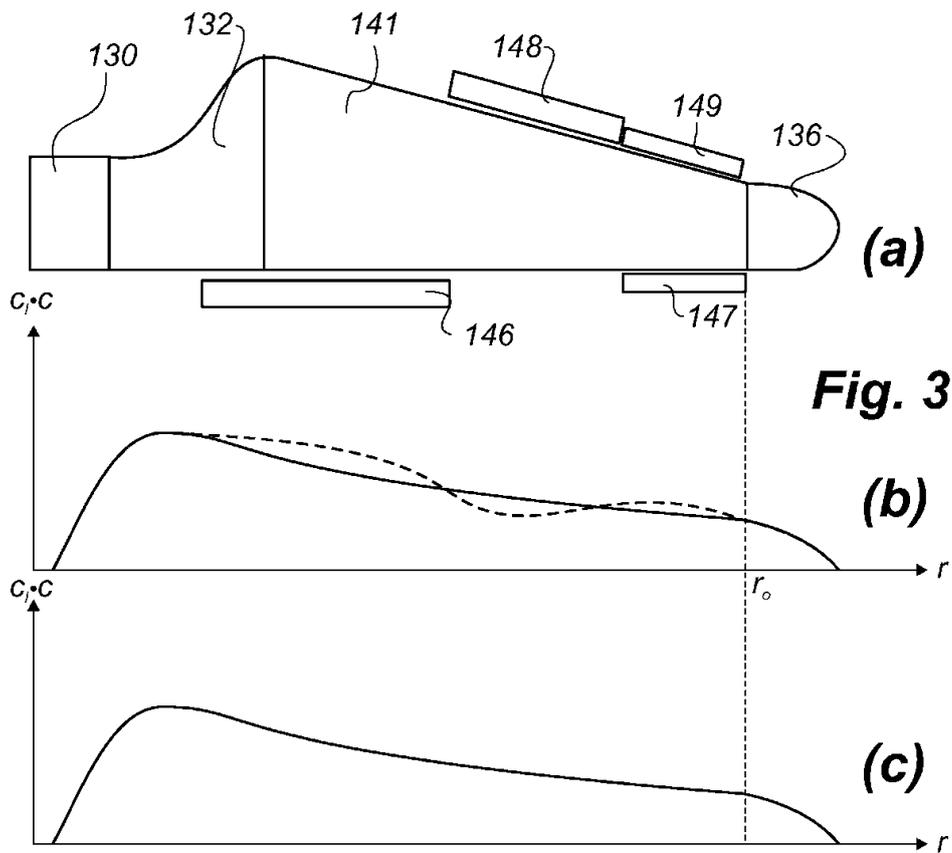
**Fig. 33**



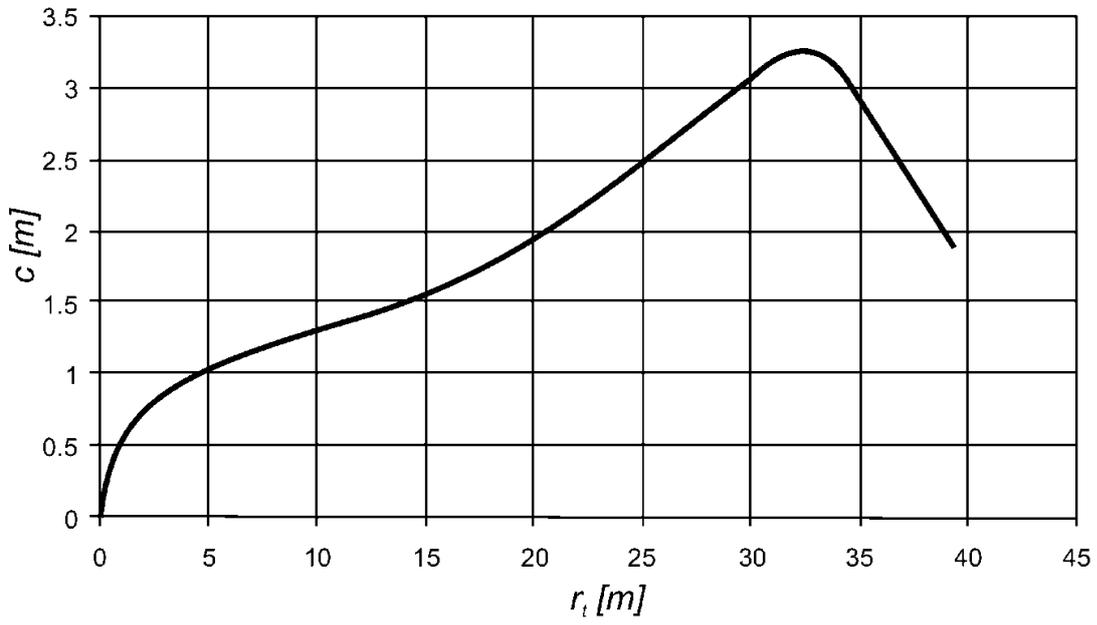
**Fig. 34**



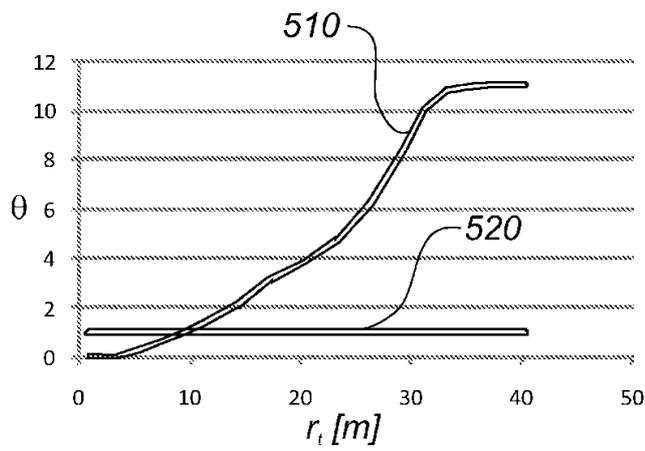
**Fig. 35**



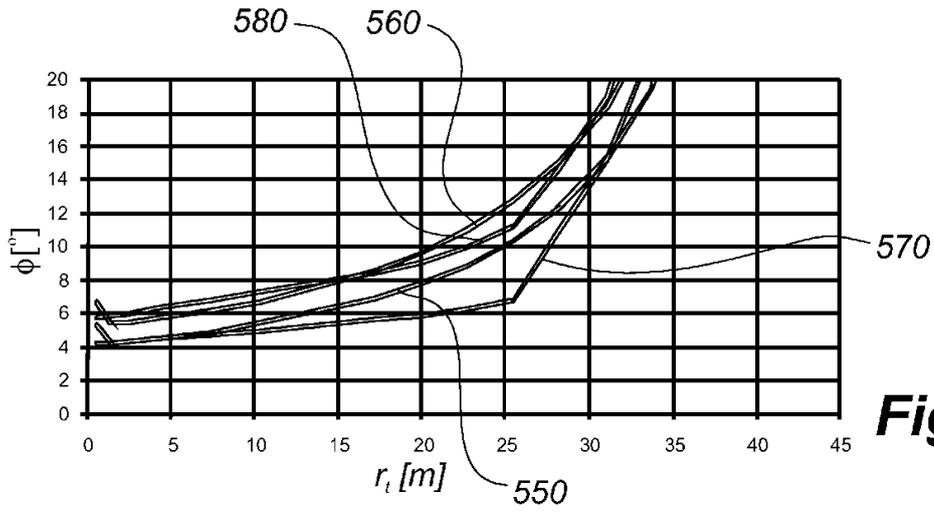
**Fig. 36**



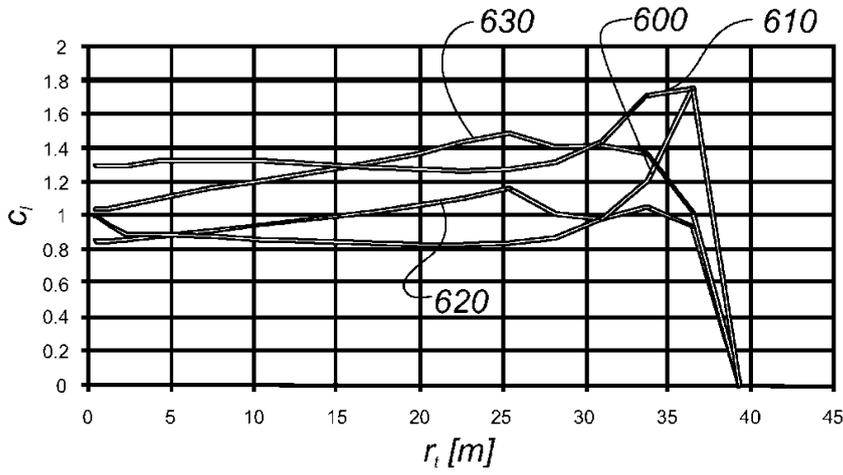
**Fig. 37**



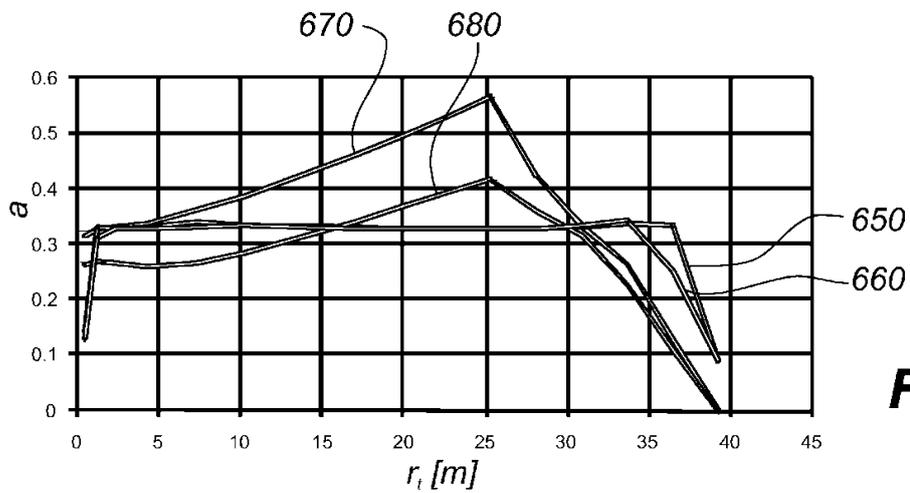
**Fig. 38**



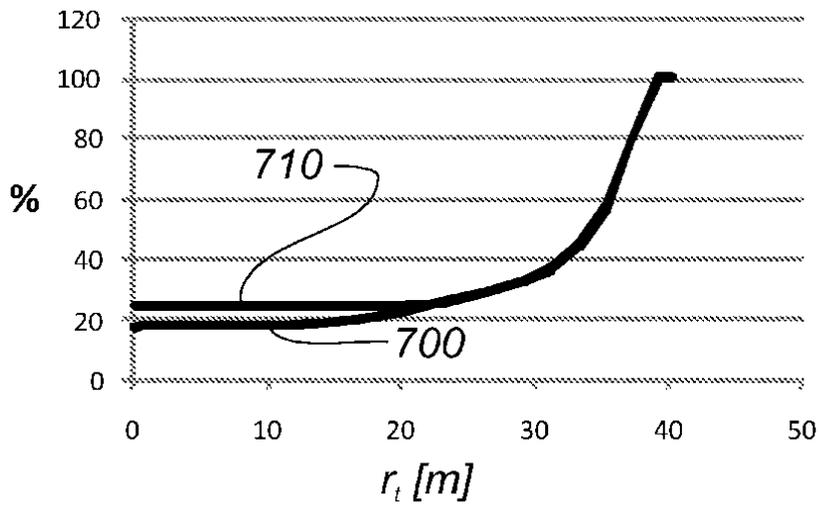
**Fig. 39**



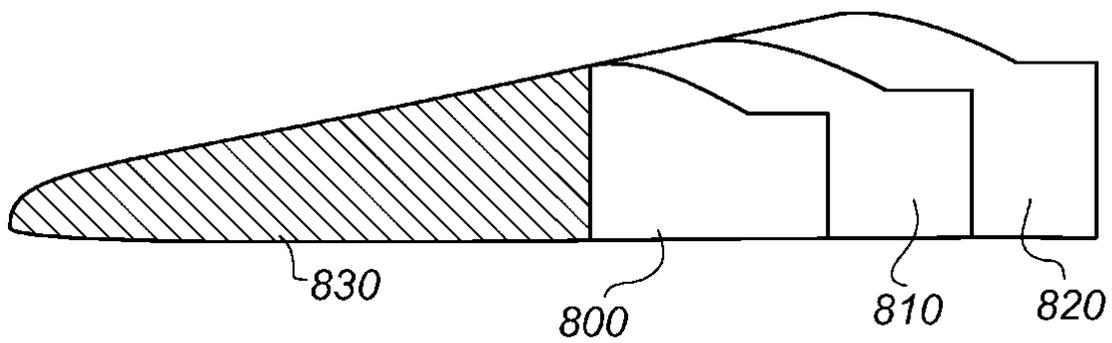
**Fig. 40**



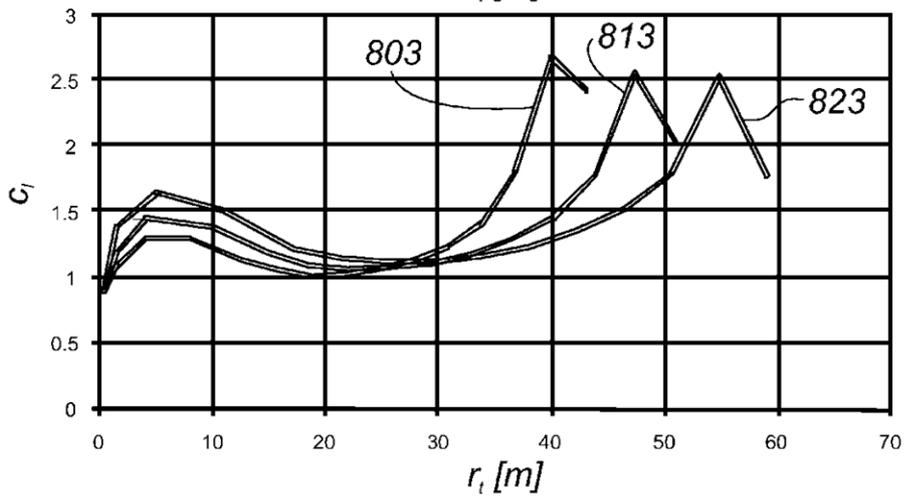
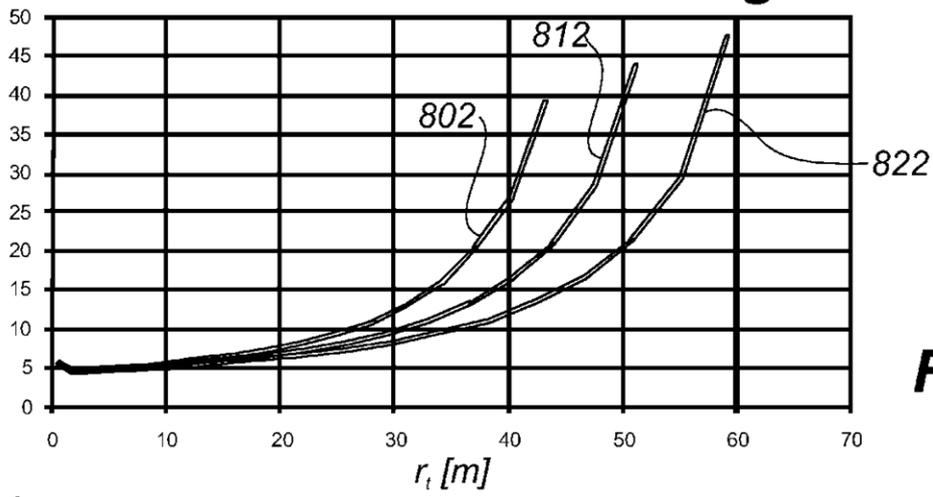
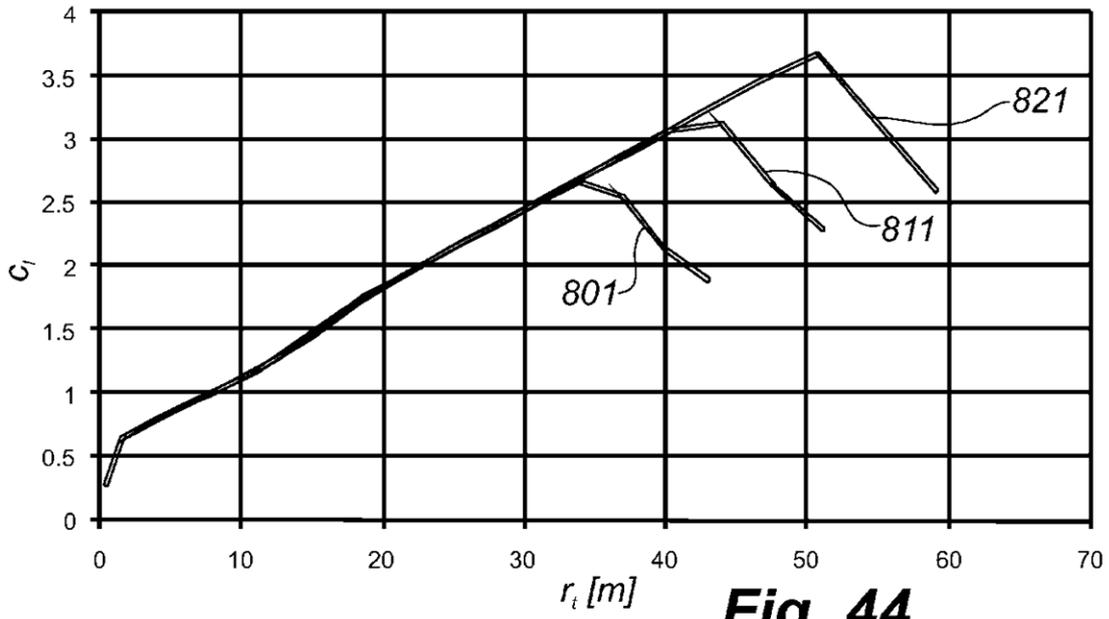
**Fig. 41**

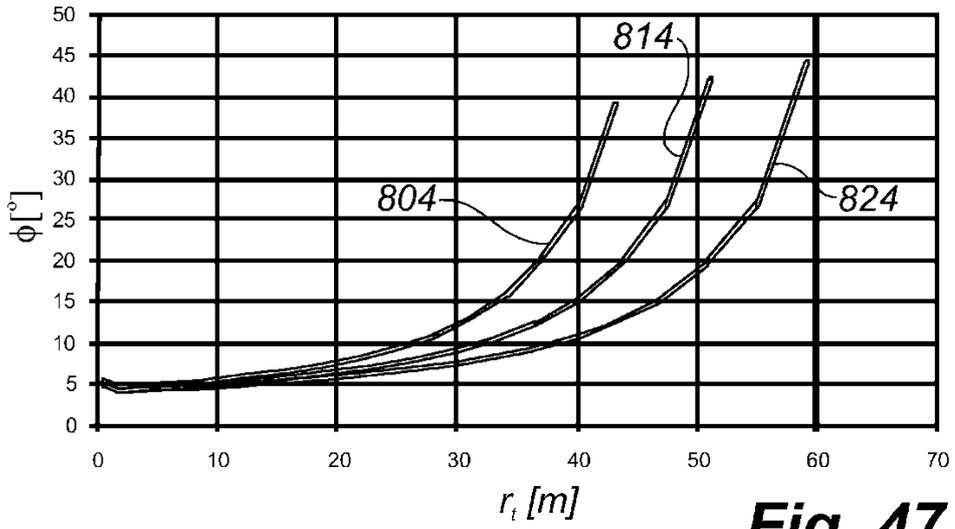


**Fig. 42**

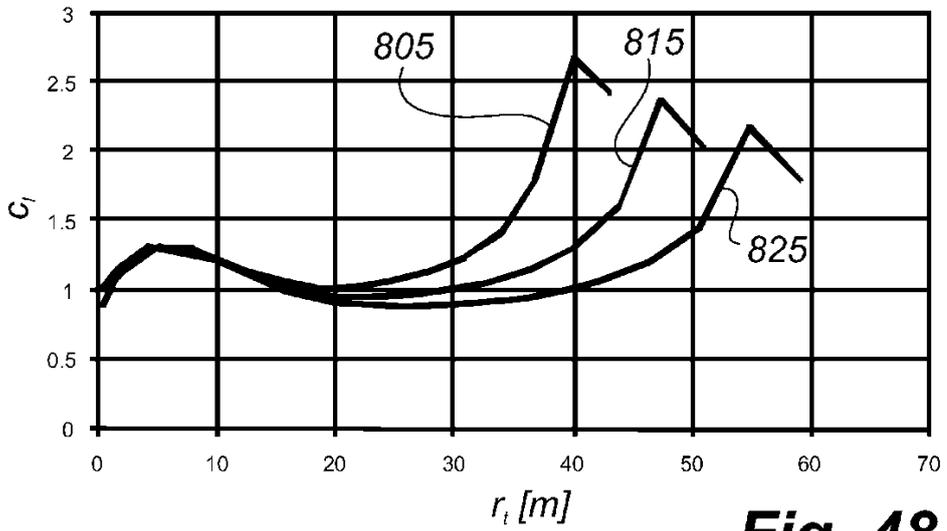


**Fig. 43**

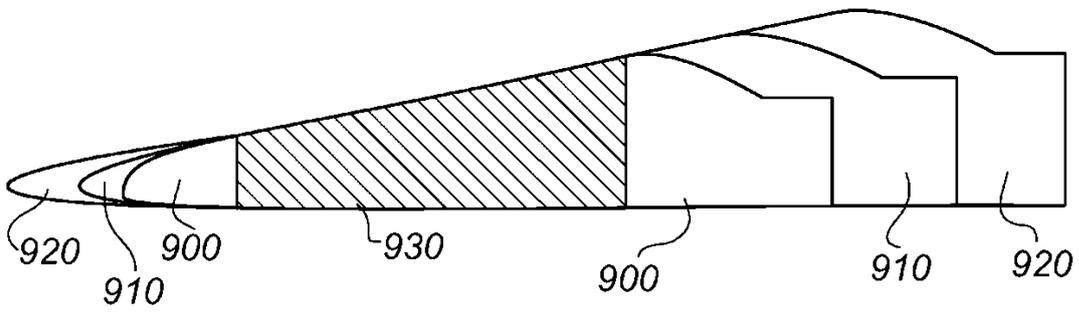




**Fig. 47**



**Fig. 48**



**Fig. 49**

