

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 008 988**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00 (2006.01)

F03D 80/50 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.11.2022** **PCT/EP2022/080971**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.05.2023** **WO23079138**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.11.2022** **E 22813994 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2024** **EP 4355996**

54 Título: **Sistema informático para calcular los cambios de AEP de una turbina eólica debido al deterioro estructural identificadode las palas y método para mantener una turbina eólica**

30 Prioridad:

05.11.2021 DK PA202170545

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.03.2025

73 Titular/es:

POWER CURVE APS (100.00%)
Kastetvej 2, st.
9000 Aalborg, DK

72 Inventor/es:

GAUDERN, NICHOLAS

74 Agente/Representante:

SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio

ES 3 008 988 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

Sistema informático para calcular los cambios de AEP de una turbina eólica debido al deterioro estructural identificado de las palas y método para mantener una turbina eólica

La presente invención se refiere a un sistema informático para calcular los cambios de AEP de una turbina eólica debido al deterioro estructural identificado de las palas. La presente invención también se refiere a un método para mantener una turbina eólica que hace uso de un sistema informático para calcular los cambios de AEP de una turbina eólica debido al deterioro estructural identificado de las palas y el intercambio de una o más de las palas en base al resultado de los cambios de AEP calculados.

De acuerdo con la especificación actual, el término "deterioro estructural de la pala" debe abarcar cualquier forma de cambio en la estructura de la pala que no se desea o no se pretende. Algunos ejemplos no limitativos de deterioros estructurales son suciedad, polvo, moho/alga, daños estructurales y piezas faltantes. Algunos ejemplos no limitativos de daños estructurales son las grietas, la erosión del borde delantero (LE), los daños por rayos, etc. Algunos ejemplos no limitativos de partes faltantes podrían ser generadores de vórtice (VG) que se han caído, estrías de borde trasero que se han caído, aletas Gurney (GF) que faltan total o parcialmente, etc. También debe señalarse que el sistema de la invención actual está diseñado para calcular los cambios debidos a deterioros estructurales; sin embargo, también podría usarse un procedimiento similar para estimar los efectos de las reparaciones y/o la adición de adiciones aerodinámicas a las palas. Esto podría ser a través de un único análisis que combina los efectos de deterioros y reparaciones/optimización o a través de análisis separados.

Además, de acuerdo con la especificación actual, la frase "deterioro estructural identificado de las palas" debe entenderse como deterioro estructural real identificado y/o medido en una pala real. Las deterioraciones estructurales identificadas podrían identificarse y/o medirse por un ser humano que mira una foto tomada por un dron, un ser humano que mira una foto tomada por una cámara de largo alcance, un algoritmo de software de IA que analiza fotos tomadas por un dron, etc.

Además, de acuerdo con la especificación actual, los términos "curvas de elevación y arrastre" deben entenderse como curvas que representan las características de elevación y arrastre de un perfil aerodinámico. Esto se representa típicamente mediante una primera curva que muestra el coeficiente de sustentación (C_L) frente al ángulo de ataque (AoA) y una segunda curva que muestra el coeficiente de arrastre (C_D) frente al ángulo de ataque (AoA). Sin embargo, también pueden usarse otras formas de curvas como se conocerá por el experto en la técnica de la aerodinámica. Además, debe señalarse que las curvas pueden almacenarse en diferentes formatos. En una modalidad, se almacena una tabla de consulta 2D que representa puntos en la curva. En otra modalidad, se almacena un conjunto de parámetros, siendo posible generar una curva en base al conjunto de parámetros almacenados. Por ejemplo, $C_{L_{máx}}$, C_L en 0° , AoA en $C_{L_{máx}}$, etc. Ambas opciones se describen con más detalle más abajo. Las posibilidades adicionales serán conocidas por el experto en la técnica.

Descripción de la técnica relacionada

Se conoce en la técnica que se pueden identificar deterioros estructurales en las palas de turbinas eólicas para evaluar la expectativa de vida útil de las palas y programar trabajos de reparación. Esta identificación de deterioros estructurales a las palas de turbina eólica se realiza típicamente mediante un análisis de fotografías tomadas de las palas. Las fotografías podrían tomarse a través de drones, cámaras telefoto, etcétera... El análisis de imágenes se realiza típicamente a través de expertos humanos que revisan múltiples imágenes de las cuchillas, pero últimamente también se ha realizado algún análisis de imágenes a través de software de inteligencia artificial.

También se conoce que el análisis aerodinámico detallado de turbinas eólicas con palas que tienen deterioros estructurales puede realizarse a través del software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Sin embargo, con las computadoras actuales, a menudo es demasiado complicado y consume mucho tiempo hacer un análisis CFD de las palas dañadas o deterioradas de otro modo. Por lo tanto, los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales en las palas de las turbinas eólicas no se analizan a menudo. En cualquier caso, el análisis no se realiza típicamente para una turbina eólica completa. También se ha hecho algún trabajo teórico sobre el modelado de los efectos sobre la AEP de una turbina eólica debido a la erosión del borde delantero. Sin embargo, los modelos resultantes se han limitado a la erosión y han requerido el uso de grandes bases de datos de resultados de CFD.

Un ejemplo de un sistema de la técnica anterior se conoce de la siguiente publicación:
CAPPUGI LORENZO Y OTROS - "Machine learning-enabled prediction of wind turbine energy yield losses due to general blade leading edge erosion", ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, OXFORD.

Resumen de la invención

Por lo tanto, un primer aspecto de la presente invención es proporcionar un sistema informático que proporcione un cálculo más eficiente de los efectos de las palas estructuralmente deterioradas en la AEP de una turbina eólica.

Es un segundo aspecto de la invención actual proporcionar un sistema informático que requiere menos potencia computacional para calcular los cambios de AEP relativos para un número de turbinas eólicas en un parque de turbinas eólicas.

- 5 Es un tercer aspecto de la invención actual proporcionar un sistema informático que hace posible convertir los datos de evaluación del deterioro estructural existente en datos del efecto aerodinámico de una manera fácil.

Es un cuarto aspecto de la invención actual proporcionar un sistema informático que hace posible calcular el efecto de un mayor número de tipos de deterioro estructural que los métodos de la técnica anterior de una manera fácil.

- 10 Al menos algunos de estos aspectos se proporcionan al menos en parte de acuerdo con las características de la reivindicación 1.

- 15 De acuerdo con esta descripción, el término "conjunto de datos" debe entenderse de manera amplia. El conjunto de datos podría ser tablas de datos almacenadas en una base de datos, podrían ser archivos de texto almacenados en una computadora, o en cualquier otra forma que la persona experta en la técnica de los sistemas informáticos pudiera proporcionar.

- 20 A través de este sistema informático que se dispone como se reivindicó, se vuelve posible analizar un número mucho mayor de turbinas eólicas en un período de tiempo mucho más corto debido a la implementación técnica del sistema informático. El análisis aerodinámico tradicional se basaría en un análisis CFD de estructuras 3D donde los deterioros estructurales tendrían que modelarse en cada pala y en cada turbina eólica. Esto requeriría una gran cantidad de trabajo para modelar todas las palas. Además, almacenar los modelos 3D de todas las palas requeriría un gran volumen de datos. Además, ejecutar el análisis CFD en todos los modelos 3D requeriría una gran cantidad de tiempo y potencia de cálculo. A través del sistema informático proporcionado, se necesita un conjunto de datos muy pequeño y la cantidad de potencia computacional requerida se reduce en muchas magnitudes.

- 25 Además, si el análisis se repitiera un año después en la misma turbina con nuevas deformaciones estructurales identificadas, sería necesario desarrollar un modelo 3D completamente nuevo y sería necesario realizar un análisis CFD completamente nuevo con el sistema de la técnica anterior. Con el sistema de acuerdo con la invención actual, el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados necesitaría actualizarse, y el modelo se ejecutaría nuevamente, pero esto requeriría muchas órdenes de magnitud menos trabajo y menos potencia informática.

- 30 En otros casos, se ha sugerido previamente hacer una declaración general sobre el daño estructural en las turbinas eólicas, donde un "experto" realiza una evaluación de ajuste de AEP en base a la "experiencia". En este caso de la técnica anterior se sugiere un modelo aerodinámico muy simple y genérico, que ha demostrado no proporcionar datos que puedan usarse de manera efectiva y repetida para tomar decisiones sobre el mantenimiento.

- 40 De acuerdo con esta descripción, el término "modelo BEM" debe entenderse como que se refiere a un modelo de una turbina eólica construida de acuerdo con la teoría de "Momento del elemento de palas" (BEM). Existen muchas referencias que describen la teoría BEM en detalle y el experto en la técnica de las turbinas eólicas estará familiarizado con la teoría BEM. Por lo tanto, la teoría BEM no se describirá aquí con más detalle.

- 45 En algunas modalidades, el cambio esperado en la AEP de la turbina eólica se encuentra al comparar la estimación de AEP de referencia con la AEP estimado generado por el modelo BEM modificado.

- 50 En algunas modalidades, la etapa de usar el conjunto de datos de efectos aerodinámicos para generar curvas de elevación y resistencia modificadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de cada una de las palas comprende las etapas de buscar el efecto aerodinámico en una localización específica en una tabla y generar una curva de elevación y resistencia modificada para ese efecto aerodinámico específico en base a la información de la tabla. De esta manera, puede evitarse un nuevo análisis CFD para cada localización. En algunas modalidades, las etapas de búsqueda del efecto aerodinámico coinciden con un efecto aerodinámico específico en una localización específica a una curva de elevación y resistencia específica tomada de un número discreto de opciones sin el uso de un análisis CFD para esa localización específica.

- 55 De acuerdo con la invención, se genera un modelo BEM modificado separado para cada pala de la turbina eólica, cada modelo BEM modificado separado se basa en los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados de una de las palas y después la AEP estimada de los modelos BEM modificados separados para las palas separadas se combinan para obtener una AEP estimada para toda la turbina. De esta manera, es posible obtener un modelo que tenga en cuenta los diferentes daños en cada una de las palas. Esto no es típicamente necesario si se modela la erosión del borde delantero, el moho o el polvo/suciedad, ya que estos tipos de daños generalmente serán uniformes en todas las palas. Sin embargo, en la vida real, cada pala tendrá sus propios daños únicos.

- 65 De acuerdo con la invención, se genera un modelo BEM separado para cada pala, se calcula la AEP estimado de cada uno de los modelos BEM separados y después se suma la AEP estimado de cada uno de los modelos BEM separados

y después se divide por el número de palas. En algunas modalidades, si hay N palas en la turbina, entonces se generarán N modelos BEM modificados, uno para cada pala, y cada uno de los modelos BEM modificados representará una turbina eólica que comprende N palas donde se supone que el deterioro estructural de todas las palas es idéntico a la pala para la cual se genera el modelo.

En algunas modalidades, el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos del deterioro estructural identificado se genera al cargar un conjunto de datos que representa los deterioros estructurales identificados de las palas que comprenden el tipo de deterioro, la gravedad del deterioro y la localización en la pala, y aplicar una función de transferencia que convierte el tipo y la gravedad del deterioro estructural en cada localización de la pala en un efecto aerodinámico en dicha localización de la pala y lo almacena en el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos.

En aras de esta descripción, el término "función de transferencia" debe entenderse como una función que toma como entrada el conjunto de datos que representa los deterioros estructurales y produce un conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos. La función de transferencia podría ser una rutina basada en tabla de consulta, un procedimiento de software informático, etc. En algunas modalidades, la función de transferencia toma como entrada un número discreto de opciones de entrada predefinidas y traduce estas opciones de entrada en un número discreto de opciones de salida predefinidas.

En modalidades donde la entrada se proporciona como un conjunto de datos de deterioros estructurales y donde el sistema informático aplica una función de transferencia, los datos que representan la pala de turbina eólica real pueden describirse mediante un conjunto de datos simple y convertirse de una manera simple que permite que el sistema informático genere un análisis AEP de una manera muy acelerada cuando se compara con los métodos de la técnica anterior. En efecto, el sistema informático como se reivindica en la presente descripción, reduce la cantidad de memoria necesaria y la cantidad de potencia computacional requerida para calcular el cambio de AEP.

En algunas modalidades, el conjunto de datos que representa los deterioros estructurales se genera al cargar imágenes de una pala de una turbina eólica, mostrando las imágenes a un evaluador que evalúa las imágenes e identifica tipos específicos de deterioros estructurales, su gravedad y su localización radial en la pala de la turbina eólica, y permite que el evaluador ingrese datos relacionados con los deterioros estructurales identificados en el sistema informático y almacene dichos datos en el conjunto de datos, dichos datos incluyen al menos una identificación de la turbina eólica, una identificación de la pala de la turbina eólica, el tipo de deterioro estructural, una calificación de la gravedad del deterioro y la localización radial del deterioro estructural en la pala.

De acuerdo con esta descripción, el término "evaluador" debe interpretarse en sentido amplio para abarcar tanto sistemas basados en humanos como en computadoras.

En algunas modalidades, el tipo de deterioro estructural se elige de una lista cerrada de opciones estándar y la calificación de la gravedad se elige de acuerdo con una escala estandarizada. Mediante el uso de opciones estandarizadas, es posible aplicar la misma función de transferencia a diferentes turbinas eólicas.

En algunas modalidades, el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos del deterioro estructural identificado se genera al cargar imágenes de una turbina eólica, que muestran las imágenes a un evaluador que evalúa las imágenes e identifica tipos específicos de deterioros estructurales, su gravedad y su localización radial en las palas de la turbina eólica, y permite que el evaluador ingrese datos relacionados con los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados en el sistema informático y almacene dichos datos en el conjunto de datos, dichos datos incluyen al menos una identificación de la turbina eólica, una identificación de la pala de la turbina eólica, el efecto aerodinámico del deterioro estructural y la localización radial del deterioro estructural en la pala.

En algunas modalidades, el sistema informático comprende una pantalla y una interfaz humano-máquina para que un usuario humano ingrese datos y el sistema informático está dispuesto para mostrar las imágenes en la pantalla y aceptar la entrada de datos relacionada con la evaluación del deterioro estructural de un usuario humano.

En algunas modalidades, el evaluador es un sistema de reconocimiento de imágenes basado en software y el sistema de reconocimiento de imágenes basado en software introduce datos relacionados con los deterioros estructurales directamente en el conjunto de datos almacenado en el sistema informático. En algunas modalidades, el sistema de reconocimiento de imágenes basado en software incluye un software que aplica un algoritmo de inteligencia artificial.

En algunas modalidades, el conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original de una turbina eólica se genera por el sistema informático que se dispone para ejecutar las siguientes etapas: cargar un modelo 3D de la pala original y aplicar análisis CFD al modelo 3D cargado de la pala original para generar una tabla de curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original.

En algunas modalidades, el conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original de una turbina eólica se genera por el sistema

informático que se dispone para ejecutar las siguientes etapas: cargar un modelo 3D de la pala original, cortar el modelo 3D en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original para obtener un perfil aerodinámico 2D, y aplicar un análisis CFD 2D a cada perfil aerodinámico 2D para generar una tabla de curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original.

5 En algunas modalidades, las curvas de elevación y arrastre modificadas que tienen en cuenta los deterioros estructurales se basan al menos en parte en el modelado CFD de un ejemplo de deterioro estructural típico con grados variables de gravedad.

10 En algunas modalidades, las curvas de elevación y arrastre modificadas que tienen en cuenta los deterioros estructurales identificados se generan mediante la aplicación de una tabla de factores de penalización a los parámetros de las curvas de referencia.

15 En algunas modalidades, el sistema informático se dispone además para cargar conjuntos de datos que representan los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados relacionados con múltiples turbinas eólicas y realizar la misma estimación del cambio de AEP en cada una de las múltiples turbinas eólicas para generar un conjunto de datos que representa el cambio estimado en AEP de las múltiples turbinas eólicas. De esta manera, es posible identificar qué turbinas eólicas en un parque tienen deterioros estructurales que tienen el mayor impacto en la AEP de la turbina. De esta manera, es posible priorizar el trabajo de mantenimiento para optimizar la AEP general del parque de turbinas eólicas.

20 En algunas modalidades, el sistema informático comprende un modelo de deterioro estructural que representa una estimación del desarrollo de los deterioros estructurales de las palas a lo largo del tiempo y en que el sistema informático está dispuesto para aplicar el modelo de deterioro estructural a los datos de deterioro estructural actuales para desarrollar una estimación futura de los datos de deterioro estructural de una pala en un punto de tiempo en el futuro y después volver a ejecutar el análisis de los efectos aerodinámicos con el deterioro estructural futuro estimado para encontrar el cambio estimado de AEP en un punto de tiempo en el futuro.

25 En algunas modalidades, las reparaciones o mejoras estructurales planificadas se incluyen en el modelo de los cambios en la pala a lo largo del tiempo para que las estrategias de mejora planificadas puedan evaluarse a lo largo del tiempo.

30 En algunas modalidades, el sistema informático comprende componentes del sistema localizados en localizaciones separadas. Por ejemplo, el sistema informático podría comprender un servidor conectado a la nube en una localización y una estación de trabajo cliente en otra localización. En algunas modalidades, la etapa de identificación de los deterioros estructurales se realiza a través de un componente del sistema localizado en una primera localización y la etapa de cálculo de los cambios de AEP estimados se realiza en una segunda localización. Por ejemplo, la etapa de identificación podría realizarse en una estación de trabajo de cliente perteneciente a un experto que analiza los datos de imagen y los conjuntos de datos que comprenden las identificaciones de los deterioros estructurales se almacenan en un servidor conectado a la nube. El sistema informático podría comprender además componentes del sistema adicionales. Por ejemplo, el sistema podría comprender una estación de trabajo cliente adicional en la que se muestran los datos estimados. Están disponibles diferentes opciones como será conocido por el experto en la técnica de los sistemas informáticos.

35 La presente invención también se refiere a un método de acuerdo con la reivindicación 14. De esta manera, las actividades de reparación y/o reemplazo de las palas de una turbina eólica se basan en consideraciones aerodinámicas, así como también en consideraciones estructurales.

40 En algunas modalidades, la etapa de intercambiar o reparar una o más de las palas de la turbina eólica se realiza si la AEP estimado de la turbina eólica con los deterioros estructurales es menor que un valor predefinido o si la reducción en la AEP es mayor que un valor predefinido.

45 La presente invención también se refiere a un método para mantener un parque de turbinas eólicas real que comprende múltiples turbinas eólicas reales, como se describe en la reivindicación 17. En algunas modalidades, el método puede incluir turbinas eólicas en diferentes parques de turbinas eólicas.

50 En algunas modalidades del método, las palas de la turbina eólica que tiene la mayor reducción calculada en AEP se reparan y/o reemplazan primero.

55 En algunas modalidades del método, el programa de reemplazo y/o reparación de las turbinas eólicas en el parque de turbinas eólicas se basa al menos en parte en las pérdidas de AEP calculadas para las turbinas eólicas. De esta manera, la reparación y/o reemplazo de las palas de turbinas eólicas de turbinas eólicas en el parque de turbinas eólicas puede priorizarse en base a consideraciones aerodinámicas. En algunas modalidades, el programa de reemplazo y/o reparación de las turbinas eólicas en el parque de turbinas eólicas se basa en parte en consideraciones estructurales y en parte en consideraciones aerodinámicas. Por ejemplo, una vez que se realizan las reparaciones

estructurales más críticas, después se realizan las reparaciones aerodinámicas más críticas para que el parque de turbinas eólicas funcione a un nivel óptimo para obtener beneficios financieros.

- 5 Debe enfatizarse que el término "comprende/comprendiendo/que comprende" cuando se usa en esta descripción se toma para especificar la presencia de características, números enteros, etapas o componentes indicados, pero no impide la presencia o adición de una o más características, números enteros, etapas, componentes o grupos de estos.

Breve descripción de los dibujos

- 10 A continuación, la invención se describirá con mayor detalle con referencia a las modalidades mostradas por las figuras adjuntas. Se debe enfatizar que las modalidades mostradas se usan solo con fines ilustrativos y no se deben usar para limitar el alcance de la invención.

- 15 La Figura 1 muestra esquemáticamente una pala de turbina eólica con marcas en localizaciones radiales principales separadas y localizaciones subradiales para ilustrar el método de cálculo.

La Figura 2 muestra esquemáticamente una sección transversal a través de una primera sección de la pala que está más cerca de la raíz de la pala y está definida por la línea II-II en la Figura 1.

- 20 La Figura 3 muestra esquemáticamente una sección transversal a través de una segunda sección de la pala que está más cerca de la punta de la pala y está definida por la línea III-III en la Figura 1.

- 25 La Figura 4 muestra esquemáticamente un ejemplo de una curva de Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque de línea base para la primera sección de la pala como se muestra en la Figura 2 así como también cinco curvas de Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque modificadas para la misma sección con diferentes severidades de deterioro estructural.

- 30 La Figura 5 muestra esquemáticamente un ejemplo de una curva de Coeficiente de Arrastre de Línea Base frente al Ángulo de Ataque para la primera sección de la pala como se muestra en la Figura 2 así como también cinco curvas de Coeficiente de Arrastre frente al Ángulo de Ataque modificadas para la misma sección con diferentes severidades de deterioro estructural.

- 35 La Figura 6 muestra esquemáticamente un ejemplo de una curva de Coeficiente de sustentación de línea base frente a ángulo de ataque para la segunda sección de la pala como se muestra en la Figura 3 así como también cinco curvas de Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque modificadas para la misma sección con diferentes severidades de deterioro estructural.

- 40 La Figura 7 muestra esquemáticamente un ejemplo de una curva de Coeficiente de Arrastre de línea base frente al Ángulo de Ataque para la segunda sección de la pala como se muestra en la Figura 3 así como también cinco curvas de Coeficiente de Arrastre frente al Ángulo de Ataque modificadas para la misma sección con diferentes severidades de deterioro estructural.

- 45 La Figura 8 muestra un ejemplo esquemático de una curva de Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque de referencia para una sección de la pala para su uso en el método y ejemplos de parámetros para describir la curva de manera parametrizada.

- 50 La Figura 9 muestra un ejemplo de una curva de Coeficiente de sustentación inicial frente a Ángulo de ataque como se muestra en la Figura 8, y una curva modificada en base a la aplicación de factores de penalización a los parámetros de la curva inicial.

Descripción detallada de las modalidades

- 55 Para ilustrar el sistema informático con más detalle, algunas modalidades diferentes del sistema informático se describen a continuación. Estas son solo algunas modalidades cubiertas por el alcance actual de las reivindicaciones actuales, y debe quedar claro para el experto en la técnica cuando tome su conocimiento, así como también el contenido de esta descripción en su totalidad, que también podrían desarrollarse otras modalidades del sistema informático.

- 60 También debe señalarse que las figuras muestran curvas esquemáticas para ilustrar los principios de la invención. Algunas de las curvas se dibujan de manera exagerada. El experto en la técnica debe ser capaz de proporcionar curvas relevantes y realistas para una pala particular en base a las enseñanzas de esta descripción junto con el conocimiento del experto en la técnica de la aerodinámica y las palas de turbina eólica.

- 65 También debe señalarse que deben realizarse varias etapas para adquirir el cambio de AEP estimado de una turbina eólica. Ciertas etapas pueden ser o necesitan ser realizadas por operadores humanos y ciertas etapas son realizadas por el sistema informático. También debe señalarse que, en dependencia de la complejidad del sistema informático,

el sistema informático podría realizar más o menos funciones. Por ejemplo, en una modalidad, se usa un programa de inteligencia artificial en el sistema informático para analizar imágenes, mientras que, en otra modalidad, se usa un experto humano para analizar las imágenes.

- 5 También debe señalarse que, en ciertos casos, el sistema informático podría comprender múltiples estaciones informáticas diferentes que se comunican. Algunos ejemplos de esto se describirán más abajo.

10 Para analizar las pérdidas de AEP esperadas de una turbina eólica de acuerdo con la invención actual, se comienza adquiriendo un modelo 3D de la pala limpia original. Una opción para hacer esto es a través de los datos CAD originales del fabricante de la pala. Otra opción es hacer un escaneo 3D de la pala limpia original para generar un modelo 3D de la pala limpia original. En otra modalidad, se podría hacer un escaneo 3D de una pala usada y después eliminar cualquier deterioro estructural identificado en el modelo 3D para obtener un modelo 3D limpio estimado de la pala original.

15 La Figura 1 muestra un esquema de un pala de turbina eólica 1. Se muestra un número de secciones principales 2 espaciadas uniformemente a lo largo de la pala. Dos secciones, definidas por las líneas II-II y III-III se muestran en las figuras 2 y 3 respectivamente. Una primera sección de perfil aerodinámico 4 tomada más cerca de la raíz 6 de la pala se muestra en la Figura 2 y una segunda sección de perfil aerodinámico 8 tomada más cerca de la punta 10 se muestra en la Figura 3. En aras del procedimiento descrito más abajo, se proporcionan subsecciones adicionales 12 entre las secciones principales adyacentes. En la figura, hay 6 secciones principales y 9 sub secciones entre dos secciones principales cualesquiera. Esto da un total de 51 secciones de perfil aerodinámico que describen esta pala. En un procedimiento real, el número específico de secciones y subsecciones principales, así como también la distancia entre ellas, puede elegirse según se desee. También podría usarse un modelo que se basa en una separación no igual.

25 El modelo 3D de la pala se actualiza después con cualquier complemento relevante. Por ejemplo, si hay aletas Gurney (GF), generadores de vórtice (VG), estrías (S), etc., entonces estos se añaden al modelo 3D de la pala.

El modelo 3D de la pala original (pala limpia con cualquier complemento) se carga después en el sistema informático.

30 El sistema informático aplica entonces el modelo 3D de la pala original a un programa CFD 3D y se realiza un análisis CFD 3D de la pala.

El modelo CFD 3D se corta en un cierto número de localizaciones principales (ejemplo 6 como se muestra en la Figura 1).

35 Las secciones principales se analizan y se genera una curva de Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque y una curva de Coeficiente de resistencia frente a ángulo de ataque para cada sección.

40 Un ejemplo de curvas de elevación y arrastre de referencia para la primera sección 4 y la segunda sección 8 se muestran en las líneas sólidas 14, 16 en las figuras 4-7.

Después, la pala se corta adicionalmente un cierto número de veces entre cada rebanada principal (por ejemplo, 9 rebanadas adicionales entre cada una de las rebanadas principales como se muestra en la Figura 1).

45 Las curvas de elevación y arrastre generadas previamente en las secciones principales 2 se interpolan después para generar curvas de elevación y arrastre intermedias en cada subsección 12. También es posible generar manualmente las muchas curvas de elevación y arrastre directamente a partir de los resultados de CFD 3D, sin embargo, esto requiere más tiempo de cálculo y la precisión adicional no siempre es tan evidente en el resultado final.

50 En otra modalidad, en lugar de realizar un análisis CFD 3D de toda la pala y luego segmentar los resultados CFD 3D, se segmenta un modelo 3D de la pala para obtener un número de perfiles aerodinámicos 2D. Después, se aplica un análisis CFD 2D a cada perfil aerodinámico 2D para obtener una tabla de curvas de elevación y arrastre estimadas en cada localización. Como en el caso anterior, el análisis podría realizarse en cada sección principal y subsección o el análisis podría realizarse en cada sección principal y después los resultados podrían interpolarse para generar las curvas de elevación y resistencia en las secciones secundarias.

55 En cualquier caso, al final de esta etapa, el sistema informático tiene un conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre de referencia de la pala original con cualquier complemento en un número de posiciones radiales de la pala.

60 Con respecto a esto, debe señalarse que, en un ejemplo, el análisis CFD se realiza en un ordenador de análisis CFD dedicado y después los resultados se cargan en un servidor que realiza las etapas siguientes en el método. En este ejemplo, el ordenador de análisis CFD dedicado y el servidor son parte del "sistema informático", aunque podrían localizarse en dos localizaciones separadas. Para las personas expertas en el arte de los sistemas informáticos, se conoce que se dividen diferentes tareas en diferentes subsistemas.

A partir de las curvas de elevación y arrastre de la línea base estimadas de la pala original, el sistema informático genera una estimación de AEP de línea base mediante la ejecución de una simulación BEM en base a las curvas de la pala original. Esto da un resultado de AEP de referencia de la turbina como se fabricó originalmente. El procedimiento para ejecutar una simulación BEM es bien conocido por el experto en la técnica y no se describirá en detalle aquí. Sin embargo, las etapas básicas involucradas en el proceso son generar una curva de potencia para la turbina eólica a diferentes velocidades de viento y luego aplicar un conjunto de datos de viento para estimar la producción total de energía durante el transcurso de un año. En la mayoría de los casos, se usa un conjunto estadístico de datos de velocidad del viento estándar para generar la estimación de AEP. Sin embargo, si se conocen los datos históricos de velocidad del viento para la localización específica, entonces esto puede aplicarse al modelo BEM para obtener una estimación más precisa de la AEP esperado.

El sistema informático carga entonces uno o más conjuntos de datos que representan los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados en cada localización radial y para cada pala. Los ejemplos de datos y formatos relevantes para tales conjuntos de datos se describen con más detalle más abajo.

El sistema informático genera entonces para cada pala y para cada segmento (es decir, para cada localización radial en la pala), una curva de elevación y resistencia modificada en base al conjunto de datos de los efectos aerodinámicos del tipo real de deterioro estructural encontrado en esa localización. Por ejemplo, si el conjunto de datos muestra que, a 20 m de la raíz de la pala, hay un VG faltante y hay una cantidad X de erosión del borde delantero, entonces el sistema informático genera curvas de sustentación y resistencia modificadas para esta localización que toma la curva de referencia y la modifica para representar los efectos aerodinámicos de un VG faltante y una cantidad X de erosión del borde delantero. Esta modificación puede realizarse de diferentes maneras. Algunos ejemplos se proporcionan más adelante en esta descripción.

Cabe señalar que el conjunto de datos de efectos aerodinámicos podría estar en diferentes formatos. En un ejemplo, el conjunto de datos comprende las curvas modificadas en sí mismas. En otro ejemplo, el conjunto de datos comprende datos sobre cómo modificar las curvas de referencia.

El sistema informático tendrá curvas de elevación y arrastre modificadas para cada una de las palas. Dado que los deterioros estructurales de las diferentes palas de una sola turbina pueden ser diferentes, el sistema informático tendrá un número de conjuntos de curvas de elevación y arrastre modificadas, una para cada pala de la turbina eólica. Si hay tres palas en la turbina, entonces habrá tres conjuntos de curvas de elevación y resistencia modificadas, una para cada una de las tres palas.

En base a estas curvas de elevación y arrastre modificadas, el sistema informático construye un modelo BEM modificado que representa la turbina eólica con las palas estructuralmente deterioradas.

Cabe señalar que el modelo BEM estándar asume palas idénticas. Como tal, un modelo BEM estándar no es directamente adecuado para modelar una situación en la que las diferentes palas tienen diferentes deterioros estructurales. Por lo tanto, en una modalidad de la invención actual, se crea un primer modelo BEM basado en las curvas de elevación y arrastre modificadas de la primera pala y se crean modelos BEM adicionales de las otras palas en base a las curvas de elevación y arrastre modificadas respectivas de las otras palas.

Por ejemplo, en una turbina eólica de tres palas, el sistema informático tendrá tres conjuntos de curvas de elevación y resistencia modificadas, una para cada pala. El sistema construirá entonces un primer modelo BEM de una turbina eólica de tres palas asumiendo que las tres palas del primer modelo pueden representarse mediante las curvas de elevación y resistencia modificadas de la primera pala de la turbina eólica real. El sistema informático hará lo mismo para las segundas y terceras palas, terminando así con tres modelos BEM separados de tres turbinas eólicas separadas. Se supone que el primer modelo BEM tiene tres palas idénticas iguales a la primera pala de la turbina real, se supone que el segundo modelo BEM tiene tres palas idénticas iguales a la segunda pala de la turbina real, etc.

Después, se analizan los diferentes modelos para obtener una AEP estimada de las tres turbinas y después se encuentra un promedio. En el ejemplo anterior, los tres AEP estimados se suman y se dividen por tres para obtener una estimación total de la AEP de la turbina real con deterioros estructurales. Debido a esto, los efectos de una pala estructuralmente muy dañada se mostrarán proporcionalmente en la AEP total estimado de la turbina.

En una modalidad, el sistema informático puede entonces comparar además este AEP estimado de la turbina "real" con la AEP de referencia de la turbina "original" para obtener un cambio de AEP estimado o un cambio porcentual estimado en AEP debido a los deterioros estructurales.

Como se mencionó anteriormente, existen múltiples formas diferentes de desarrollar las curvas modificadas. A continuación, se describen algunos métodos diferentes. Sin embargo, también pueden usarse otros métodos.

En una primera modalidad, el sistema informático solo tiene en cuenta el deterioro estructural a la propia pala y no tiene en cuenta el daño a ningún complemento o a ningún complemento faltante.

En esta modalidad, se generan varias curvas modificadas de cada curva de línea base que representan niveles crecientes de daño en el borde delantero a la superficie aerodinámica. Un ejemplo de esto se muestra en las Figuras 4-7. En este caso, la línea sólida en las Figuras 4-7 muestra las curvas de referencia para el ascensor y la resistencia respectivamente. Estas son las curvas que representan las características aerodinámicas de la pala original. Se generan cinco curvas adicionales 18a-e para ilustrar lo que sucede para niveles crecientes de daño en el borde delantero. Se generan cinco de tales curvas para cada segmento de la pala, tanto el segmento principal como el secundario. Las curvas pueden generarse simulando cantidades crecientes de daño a la pala en un análisis CFD, o las curvas pueden generarse mediante reglas resultantes de la experiencia. Por ejemplo, se podría comenzar probando una sola sección de la pala en un túnel de viento (o mediante CFD) y aplicando niveles crecientes de daño y midiendo (calculando) las curvas modificadas. Los efectos observados pueden parametrizarse y las observaciones parametrizadas pueden aplicarse a otras secciones de la pala. De esta manera, no es necesario realizar una simulación de cada una y cada sección de la pala, sino que las observaciones de una sección pueden aplicarse a otras secciones.

En general, podrían hacerse los siguientes comentarios sobre los efectos del deterioro estructural.

- Los perfiles aerodinámicos externos (figura 3) son más delgados que los perfiles aerodinámicos internos (figura 2)
- Las superficies aerodinámicas delgadas sufren menos deterioro estructural que las gruesas.
- Los perfiles aerodinámicos delgados tienen un $C_{L\text{máx}}$
- Los perfiles aerodinámicos delgados tienen un C_D (más pronunciado antes de la pérdida de sustentación)

En una modalidad, generamos cinco curvas modificadas para cada segmento y línea de base. Si tuviéramos seis segmentos principales y nueve subsegmentos, entonces tendríamos 51 curvas de línea base limpias. Si usamos cinco "curvas de daño", entonces también generaríamos 255 curvas modificadas. En una opción, generamos las curvas modificadas en los 6 segmentos principales para obtener 30 curvas modificadas que después interpolamos entre los segmentos principales para obtener las 255 curvas modificadas. En otra opción, generamos las 51 curvas limpias interpoladas y después generamos 255 curvas modificadas en base a las 51 curvas limpias interpoladas.

Después se genera una tabla que identifica qué curva modificada usar en cada localización. Por ejemplo, para una erosión del borde delantero grave a 5 m de la raíz de la cuchilla, se elige la curva modificada 18e. Para una grieta larga pero suave en el borde delantero de la pala, se elige la curva modificada 18a. Para una localización sin ningún daño, se elige la curva de referencia. La elección de la curva modificada puede realizarse de diferentes maneras. De una primera manera, una imagen de la pala se muestra a un experto en aerodinámica que identifica cualquier daño y elige qué curva modificada usar. El experto añade entonces la elección de la curva y la localización radial del daño a una tabla que el sistema informático puede leer para generar la tabla de curvas para usar en el modelo BEM modificado de la pala.

En otra modalidad, las imágenes de la pala se muestran a un experto estructural. El experto estructural identifica el tipo de daño, su gravedad y su localización en la pala, y añade esta información a una tabla de deterioros estructurales. El sistema informático puede aplicar entonces una función de transferencia a esta tabla de datos estructurales para convertirla en datos de efecto aerodinámico. Por ejemplo, la función de transferencia puede traducir una erosión de borde delantero de gravedad 5 en una curva modificada 18e elegida. Igualmente, una grieta de gravedad 5 se traducirá en una elección de curva modificada 18a. Aunque el efecto estructural de una gran grieta es grave, el efecto aerodinámico es pequeño. De esta manera, los datos de deterioro estructural existentes pueden convertirse fácilmente en datos del efecto aerodinámico.

Si hay múltiples daños en una localización, por ejemplo, una grieta y la erosión del borde delantero, entonces los daños pueden combinarse. La combinación podría hacerse de diferentes maneras. En una modalidad, el sistema informático podría disponerse para elegir el daño que tiene la mayor penalización aerodinámica y después ignorar el otro daño. En otra modalidad, el sistema podría proporcionarse con reglas más complejas para combinar el daño. Una opción se analiza con más detalle más abajo.

En otra modalidad, en lugar de pregenerar todas las curvas modificadas, las curvas de referencia pueden describirse de una manera parametrizada. Los parámetros de la curva pueden almacenarse en una tabla y, en base a los parámetros de la tabla, la curva de referencia puede generarse mediante el sistema informático. Los efectos de diferentes tipos de daños pueden especificarse entonces como factores de penalización que se aplican a los parámetros de la curva de referencia para generar las curvas modificadas.

Las Figuras 8 y 9 ilustran esto con más detalle. En la Figura 8, se muestra una curva de Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque de referencia 20. La curva se define por cinco puntos, 22, 24, 26, 28, 30. El primer punto 22 es el coeficiente de sustentación en 0 grados de ángulo de ataque. Esto se define por la dimensión D1. El segundo punto 24 se define como el final de la región lineal. Esto se define por las dimensiones D2 y D3, donde D2 es el coeficiente de sustentación al final de la porción lineal y D3 es el ángulo de ataque al final de la región lineal. El tercer punto 26 es el punto de Coeficiente de sustentación máximo ($C_{L\text{Máx}}$). Se define por las dimensiones D4 y D5, donde D4 es el coeficiente máximo de sustentación y D5 es el ángulo de ataque en $C_{L\text{Máx}}$. El cuarto punto 28 es el coeficiente

de sustentación 1 grado después de $C_{LMáx}$ y se define por la dimensión D6 y 1 grado después de $C_{LMáx}$. El quinto punto 30 es el coeficiente de sustentación 2 grados después del ángulo de unión en $C_{LMáx}$ y se define por la dimensión D7 y 2 grados después del ángulo de ataque en $C_{LMáx}$.

- 5 De esta manera, en lugar de almacenar una tabla con la curva real, una tabla puede comprender solo estos siete parámetros para cada curva. En base a los parámetros, el sistema puede construir todas las curvas.

Para generar las curvas modificadas, el sistema puede almacenar una tabla de "factores de penalización" para aplicar a los parámetros. Por ejemplo, si la $C_{LMáx}$ se conoce que disminuye en un 5 % con una erosión de borde líder de gravedad 3, después se puede aplicar un factor de penalización de 0,95 al $C_{LMáx}$ de la curva de referencia. Para cada tipo y gravedad de daño, se puede proporcionar un conjunto de factores de penalización. Los factores de penalización pueden desarrollarse mediante el uso de simulaciones y después parametrizando las curvas, o pueden desarrollarse en base a la experiencia. El experto en la técnica será capaz de generar factores de penalización para diferentes tipos de daños de la manera descrita anteriormente en base a su experiencia y conocimiento.

Tabla 1 - Ejemplo de factores de penalización

Parámetro	Factor de penalización
D1	0,9
D2	0,8
D3	-1
D4	0,8
D5	-1
D6	0,95
D7	0,9

Como un ejemplo, si se considera la curva de referencia 32 mostrada en la Figura 9, entonces se podrían aplicar factores de penalización como se muestra en la Tabla 1 anterior para obtener la curva modificada 34 mostrada en la Figura 9. Los factores de penalización podrían ser una penalización en porcentaje, por ejemplo, 0,9 representa una reducción del 10 % o los factores de penalización podrían ser una penalización absoluta, por ejemplo, una reducción en el ángulo de ataque en $C_{LMáx}$ de 1 grado representado por un factor de penalización de -1.

Para hacer que el sistema sea utilizable, cada tipo de daño se representa mediante una tabla de factores de penalización. Por ejemplo, la erosión del borde delantero puede clasificarse en cinco niveles de gravedad, donde cada nivel de gravedad tiene un efecto predefinido en las curvas. Después, en cada localización radial de la pala, se especifica un tipo de deterioro aerodinámico junto con una gravedad si es relevante. Por ejemplo, podría especificarse que, a 20 m de la raíz de la pala, hay un deterioro estructural que actúa como una erosión del borde delantero de gravedad 5. El sistema informático puede entonces buscar el factor de penalización parametrizado de cómo un tipo de erosión de borde delantero de gravedad 5 afecta la curva de referencia y luego aplicar estos efectos a la curva de referencia para obtener la curva modificada. O podría especificarse que a 30 m de la raíz de la pala hay un VG faltante. Nuevamente, el sistema puede modificar la curva de referencia en esta localización en base a la identificación de que hay un VG faltante. De esta manera, en lugar de pregenerar un gran número de curvas posibles en cada localización, se genera una única curva modificada en cada localización en base a factores de penalización conocidos para el daño específico en esa localización.

Tabla 2 - Conjunto de datos que representa los deterioros estructurales

ID de la turbina eólica	ID de la pala	Ubicación radial	Tipo de deterioro estructural	Gravedad del deterioro estructural
001	A	20 m	VG faltante	5
001	A	30 m	VG faltante	5
001	A	30 m	Erosión LE	3
001	B	40 m	Erosión LE	4
002	A	10 m	Erosión LE	2
002	B	40 m	GF faltante	5
002	C	20 m	LE crack	5

Una tabla de datos ilustrativa se muestra en la tabla 2. Aquí, cada deterioro estructural se describe en la tabla, mediante una ID de la propia turbina eólica, una ID de la pala, la localización radial en la pala, el tipo de deterioro estructural y la gravedad. Estos datos se traducen a través de una función de transferencia en la tabla de efectos aerodinámicos mostrada en la tabla 3.

Tabla 3 - Conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales

ID de WT	ID de la pala	Ubicación radial	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
001	A	20 m	PF1a	PF2a	PF3a	PF4a	PF5a	PF6a	PF7a
001	A	30 m	PF1b	PF2b	PF3b	PF4b	PF5b	PF6b	PF7b
001	A	30 m	PF1c	PF2c	PF3c	PF4c	PF5c	PF6c	PF7c
001	B	40 m	PF1d	PF2d	PF3d	PF4d	PF5d	PF6d	PF7d
002	A	10 m	PF1e	PF2e	PF3e	PF4e	PF5e	PF6e	PF7e
002	B	40 m	PF1f	PF2f	PF3f	PF4f	PF5f	PF6f	PF7f
002	C	20 m	PF1g	PF2g	PF3g	PF4g	PF5g	PF6g	PF7g

Para convertir del deterioro estructural al efecto aerodinámico, se usa una función de transferencia. La función de transferencia puede tomar muchas formas, pero en una modalidad, la función de transferencia tiene la forma de una tabla de consulta, donde el tipo de deterioro estructural y gravedad se busca en una tabla que luego da los factores de penalización que se aplicarán a la curva. Por ejemplo, puede proporcionarse una tabla para todas las severidades de la erosión del borde delantero y después la función de transferencia puede buscar los factores de penalización en la tabla y aplicarlos para obtener los factores de penalización resultantes en cada localización.

Para los casos en los que hay múltiples tipos de deterioro estructural superpuestos, el sistema informático puede proporcionarse con reglas sobre cómo combinar los diferentes tipos de efectos del deterioro estructural. Sin embargo, en ciertos casos, podría ser difícil proporcionar una buena regla sobre cómo combinar los diferentes efectos. Por ejemplo, los efectos de la erosión del borde delantero donde hay un VG y donde no hay VG son difíciles de modelar con dos factores de penalización simples, uno para el VG faltante y otro para la erosión del LE que se multiplican o suman juntos. Por lo tanto, en este caso, se pueden proporcionar múltiples tablas para diferentes condiciones básicas. Por ejemplo, se proporciona una tabla de parámetros aerodinámicos donde un primer conjunto de entradas se refiere a la erosión del borde delantero para diferentes severidades para el caso con un VG y se proporciona un conjunto separado de entradas cuando no hay VG. En este caso, en dependencia de si hay o no un VG, pueden elegirse diferentes parámetros. Por ejemplo:

Tabla 4 - Factores de penalización para deterioros específicos

	Gravedad de la erosión LE 1 + VG faltante	Erosión LE 1 con VG	Erosión LE 2 + VG faltante	Erosión LE 2 con VG	Erosión LE 3 + VG faltante	Erosión LE 3 con VG	Etc...
Parámetro 1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	
Parámetro 2	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
Parámetro 3	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	
Etc...							

Por ejemplo, cuando se considera la Tabla 4, para el caso en el que hay un VG faltante y hay una erosión de borde delantero de gravedad 3, entonces se elegirían los parámetros X5, Y5 y Z5. En otro caso, si no falta VG y hay una erosión LE de gravedad 1, entonces se elegirían los parámetros X2, Y2, Z2.

Si se necesitan tener en cuenta formas adicionales de complementos, entonces la tabla podría proporcionarse con más opciones. Por ejemplo (VG=Generador de vórtice, GF=Aleta de Gurney, S=Estrías de borde trasero):

Tabla 5 - Otra forma de factores de penalización para deterioros específicos

Erosión LE	1	2	3	4	5	1	2	3	4	Etc...
VG	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
GF	X	X	X	X	X	-	-	-	-	
S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Parámetro 1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
Parámetro 2	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	
Parámetro 3	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
Etc...										

En este ejemplo, el sistema podría buscar el conjunto de parámetros que mejor se ajuste a la situación actual. Por ejemplo, Erosión LE 2 + VG presente + GF faltante + S presente elegiría los parámetros X7, Y7, Z7.

Si hay múltiples deterioros que interactúan de una manera fácil, entonces las tablas podrían configurarse de manera que todos los factores de penalización para todos los deterioros diferentes pudieran aplicarse a la curva de línea base, uno tras otro. Por ejemplo, se podría proporcionar una tabla como sigue:

5 Tabla 6 - Otra forma de factores de penalización para deterioros específicos

Erosión LE	1	2	3	4	5			1	2	Etc...
VG	X	X	X	X	X	X	-	X	X	
GF	X	X	X	X	X	-	X	-	-	
S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Parámetro 1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
Parámetro 2	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	
Parámetro 3	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
Etc...										

Por ejemplo, teniendo en cuenta la tabla 6, en un caso donde hay un VG faltante, un GF faltante y una erosión LE de gravedad 2, entonces los factores de penalización del VG faltante (X7,Y7,Z7) se aplican primero a la curva de línea base, después los factores de penalización de un GF faltante (X6,Y6,Z6) se aplican a la curva modificada previamente, después los factores de penalización de la erosión LE de gravedad 2 para el caso donde hay un VG o GF faltante (X9,Y9,Z9) se aplican a la curva modificada.

Los parámetros podrían proporcionarse en diferentes tablas o combinarse en una sola tabla. El principio es esencialmente el mismo, solo la forma de elegir los factores de penalización es diferente.

También debe señalarse que, en dependencia de la geometría de la pala usada, puede ser necesario proporcionar tablas diferentes para diferentes secciones de la pala. Por ejemplo, los efectos de un VG faltante en la punta o en la raíz de la pala serán bastante diferentes. Igualmente, los efectos de la erosión del borde delantero para un perfil aerodinámico delgado serán diferentes a los de la erosión del borde delantero para un perfil aerodinámico grueso. Por lo tanto, puede ser necesario dividir la pala en secciones separadas y tener tablas diferentes para las diferentes secciones de la pala.

En dependencia del nivel de complejidad deseado, el número de entradas en las tablas puede aumentarse o disminuirse y el procedimiento para mapear los deterioros estructurales a los efectos aerodinámicos puede cambiarse. Sin embargo, uno de los grandes beneficios de este modelo es que, incluso aplicando simplificaciones significativas, aún puede resultar en una comparación útil entre diferentes turbinas eólicas en un parque, ya que las mismas simplificaciones se aplican a cada una de las turbinas eólicas de la misma manera. Por lo tanto, el "error" en las estimaciones se reflejará en todas las estimaciones. Por lo tanto, aunque la estimación real de la AEP podría estar bastante equivocada, los efectos relativos de los diferentes daños estructurales a las diferentes turbinas eólicas aún deberían ser evidentes en los resultados finales. Por lo tanto, la planificación del trabajo de reparación y la priorización del trabajo de reparación aún pueden optimizarse en base a un modelo incluso muy simplificado.

Cabe señalar que las figuras y la descripción anterior a veces han mostrado y descrito las modalidades ilustrativas de una manera simple y esquemática. Muchos de los detalles más específicos no se han mostrado o descrito ya que el experto en la técnica debería estar familiarizado con estos detalles y solo complicarían innecesariamente esta descripción. Por ejemplo, el PC, el servidor y la red específicos usados y el lenguaje de programación y la codificación específicos usados no se han descrito en detalle, ya que se mantiene que el experto en la técnica sería capaz de encontrar componentes y soluciones de programación adecuados para proporcionar el sistema de acuerdo con la invención actual.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema informático para estimar y/o calcular el cambio esperado y/o real en la producción de energía anual (AEP) de una turbina eólica debido al deterioro estructural identificado de las palas de la turbina eólica, dicho sistema informático se dispone para ejecutar las siguientes etapas:
 - a. cargar un conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original de la turbina eólica,
 - b. construir un modelo de momento del elemento de la pala (BEM) de referencia de la turbina eólica en base a dichas curvas de elevación y arrastre estimadas de la pala original y analizar el modelo para proporcionar una estimación de AEP de referencia de la turbina eólica con palas originales,
 - c. cargar un conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados en localizaciones radiales específicas a lo largo de cada una de las palas de la turbina eólica,
 - d. mediante el uso del conjunto de datos de efectos aerodinámicos para generar curvas de elevación y arrastre modificadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de cada una de las palas,
 - e. construir un modelo BEM modificado de la turbina en base a las curvas de elevación y arrastre modificadas, y
 - f. analizar el modelo BEM modificado para obtener una estimación de la AEP de la turbina eólica cuando se tienen en cuenta los deterioros estructurales,

caracterizado porque dicho sistema informático se dispone además para ejecutar la siguiente etapa:

 - g. generar un modelo BEM modificado separado para cada pala de la turbina eólica, cada modelo BEM modificado separado se basa en los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados de una de las palas y después la AEP calculada y/o estimada de los modelos BEM modificados separados para las palas separadas se combinan para obtener una AEP calculada y/o estimada para toda la turbina.
2. Un sistema informático de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque el sistema informático se dispone para calcular el cambio en la producción de energía anual (AEP) de una turbina eólica física específica debido al deterioro estructural identificado y medido de las palas de la turbina eólica.
3. Un sistema informático de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos del deterioro estructural identificado se genera al
 - a. cargar un conjunto de datos que representa los deterioros estructurales de las palas que comprenden el tipo de deterioro, la gravedad del deterioro y la localización en la pala, y
 - b. aplicar una función de transferencia que convierte el tipo y la gravedad del deterioro estructural en cada localización de la pala en un efecto aerodinámico en dicha localización de la pala y lo almacena en el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos.
4. Un sistema informático de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado porque el conjunto de datos que representa los deterioros estructurales se genera al
 - a. cargar imágenes de una pala de una turbina eólica,
 - b. mostrar las imágenes a un evaluador que evalúa las imágenes e identifica tipos específicos de deterioros estructurales, su gravedad y su localización radial en la pala de turbina eólica, y
 - c. permitir que el evaluador ingrese datos relacionados con los deterioros estructurales identificados en el sistema informático y almacene dichos datos en el conjunto de datos, dichos datos incluyen al menos una identificación de la turbina eólica, una identificación de la pala de la turbina eólica, el tipo de deterioro estructural, una calificación de la gravedad del deterioro y la localización radial del deterioro estructural en la pala.
5. Un sistema informático de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el tipo de deterioro estructural se elige de una lista cerrada de opciones estándar y la calificación de la gravedad se elige de acuerdo con una escala estandarizada.
6. Un sistema informático de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque el conjunto de datos que representa los efectos aerodinámicos del deterioro estructural identificado se genera al
 - a. cargar imágenes de una turbina eólica,
 - b. mostrar las imágenes a un evaluador que evalúa las imágenes e identifica tipos específicos de deterioros estructurales, su gravedad y su localización radial en las palas de la turbina eólica,
 - c. permitir que el evaluador ingrese datos relacionados con los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados en el sistema informático y almacene dichos datos en el conjunto de datos, dichos datos incluyen al menos una identificación de la turbina eólica, una identificación de la pala de la turbina eólica, el efecto aerodinámico del deterioro estructural y la localización radial del deterioro estructural en la pala.

7. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 3-6, caracterizado porque el sistema informático comprende una pantalla y una interfaz hombre-máquina para ingresar datos por un usuario humano y porque el sistema informático se dispone para mostrar las imágenes en la pantalla y aceptar la entrada de datos relacionada con la evaluación del deterioro estructural de un usuario humano.
8. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 3-6, caracterizado porque el evaluador es un sistema de reconocimiento de imágenes basado en software y porque el sistema de reconocimiento de imágenes basado en software introduce datos relacionados con los deterioros estructurales directamente en el conjunto de datos almacenado en el sistema informático.
9. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque el conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original de una turbina eólica se genera por el sistema informático que se dispone para ejecutar las siguientes etapas:
 - a. cargar un modelo 3D de la pala original, y
 - b. aplicar análisis CFD al modelo 3D cargado de la pala original para generar una tabla de curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original.
10. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque el conjunto de datos que representa las curvas de elevación y arrastre estimadas en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original de una turbina eólica se genera por el sistema informático que se dispone para ejecutar las siguientes etapas:
 - a. cargar un modelo 3D de la pala original,
 - b. cortar el modelo 3D de la pala original en localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original para obtener perfiles aerodinámicos 2D en las localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original y
 - c. aplicar análisis CFD a los perfiles aerodinámicos 2D para generar una tabla de curvas de elevación y arrastre estimadas en dichas localizaciones radiales específicas a lo largo de la pala original.
11. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-10 caracterizado porque el sistema informático se dispone además para cargar conjuntos de datos que representan los efectos aerodinámicos de los deterioros estructurales identificados relacionados con múltiples turbinas eólicas y realizar la misma estimación del cambio de AEP en cada una de las múltiples turbinas eólicas para generar un conjunto de datos que representa el cambio estimado en AEP de las múltiples turbinas eólicas.
12. Un sistema informático de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado porque el sistema informático comprende un modelo de deterioro estructural que representa una estimación del desarrollo de los deterioros estructurales de las palas a lo largo del tiempo y porque el sistema informático se dispone para aplicar el modelo de deterioro estructural a los datos de deterioro estructural actuales para desarrollar una estimación futura de los datos de deterioro estructural de una pala en un punto de tiempo en el futuro y después volver a ejecutar el análisis de los efectos aerodinámicos con el deterioro estructural futuro estimado para encontrar el cambio estimado de AEP en un punto de tiempo en el futuro.

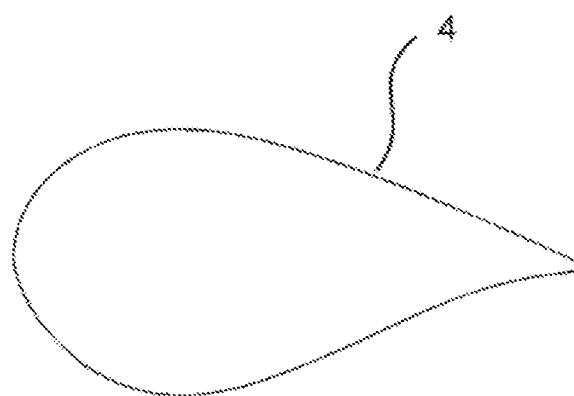
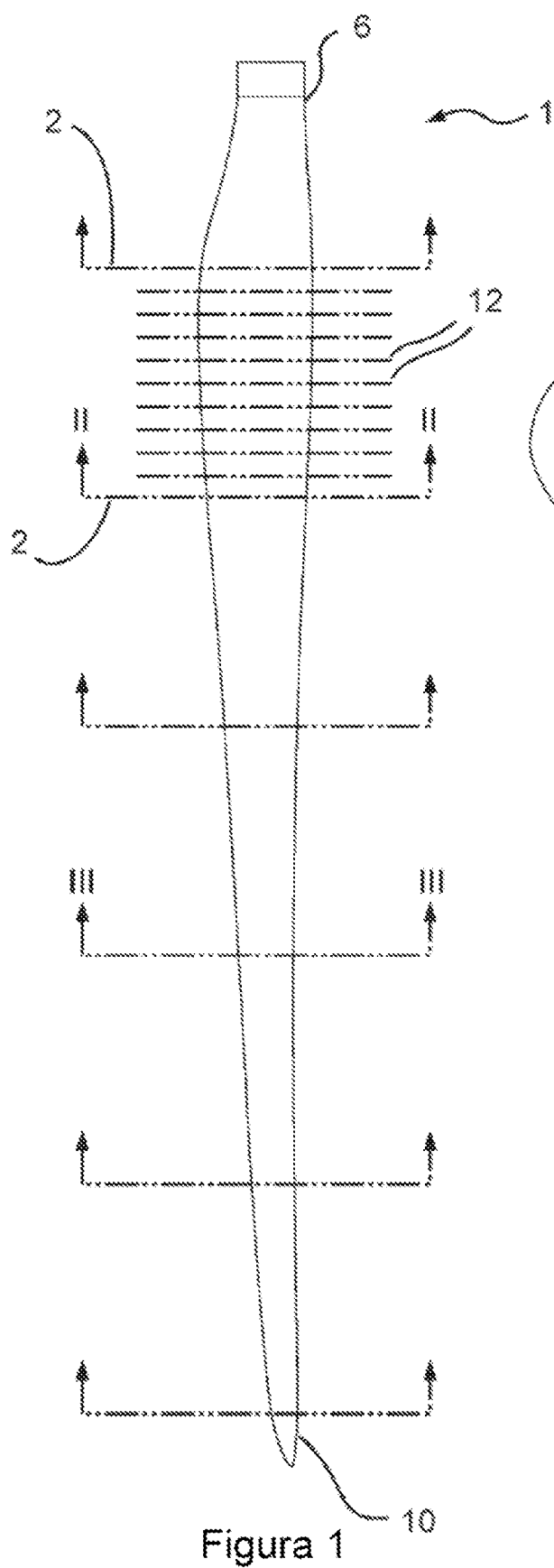


Figura 2

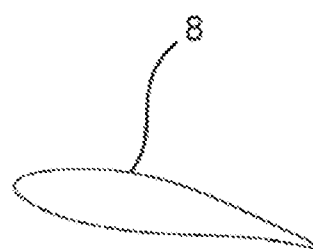
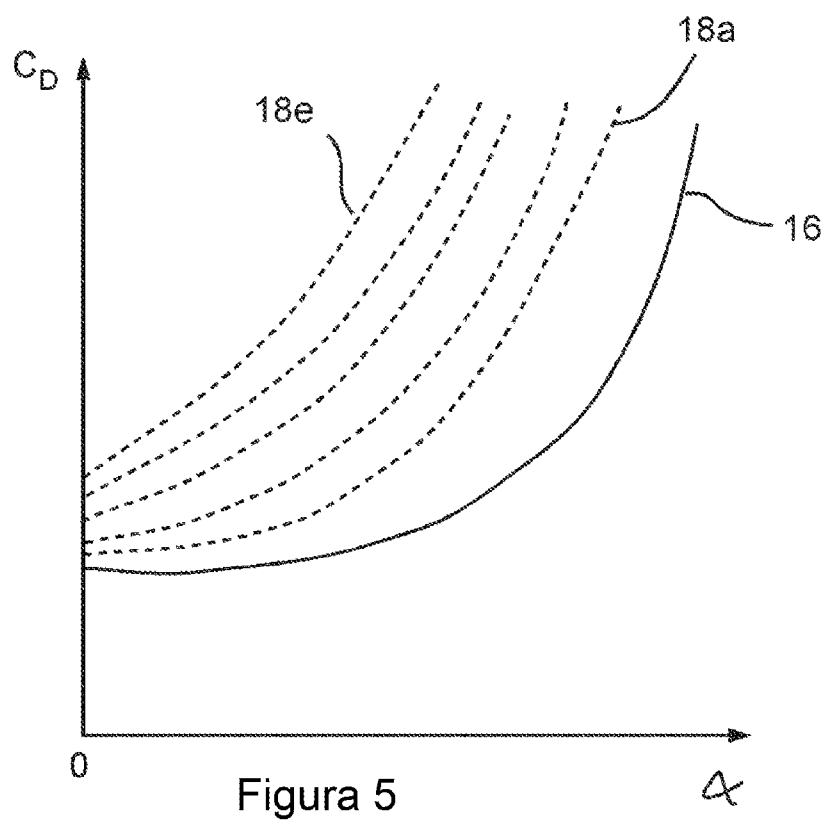
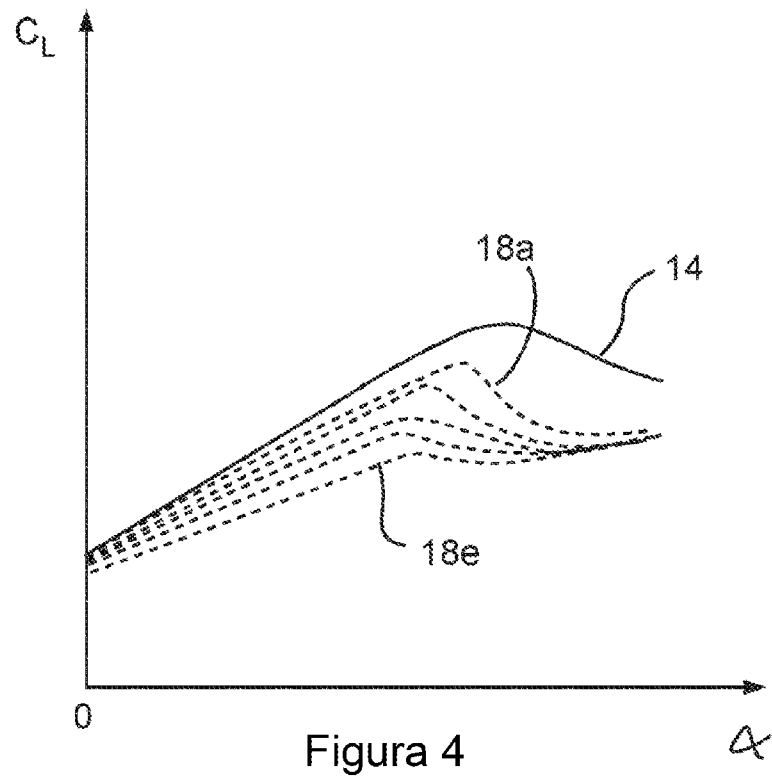


Figura 3



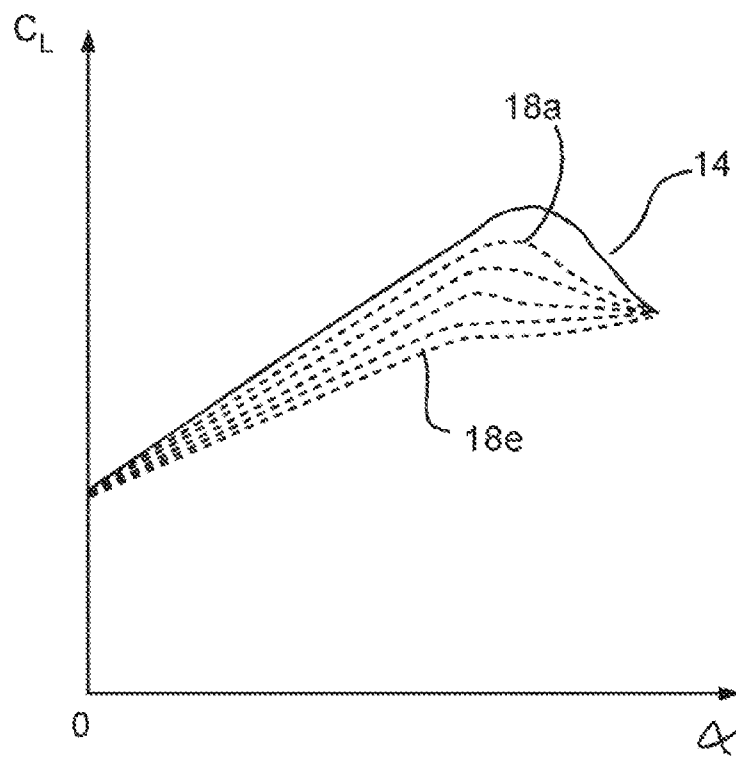


Figura 6

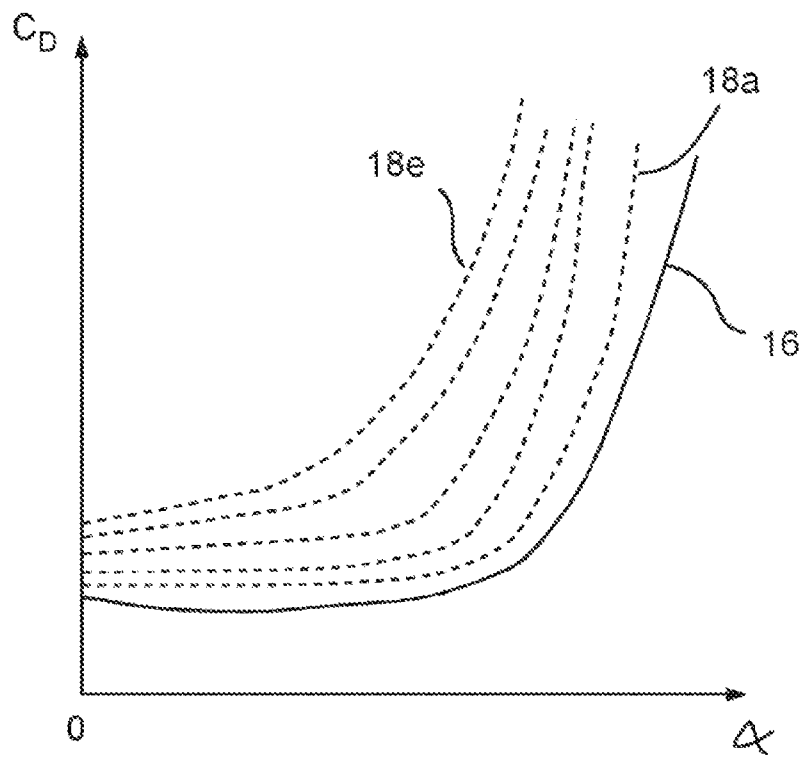


Figura 7

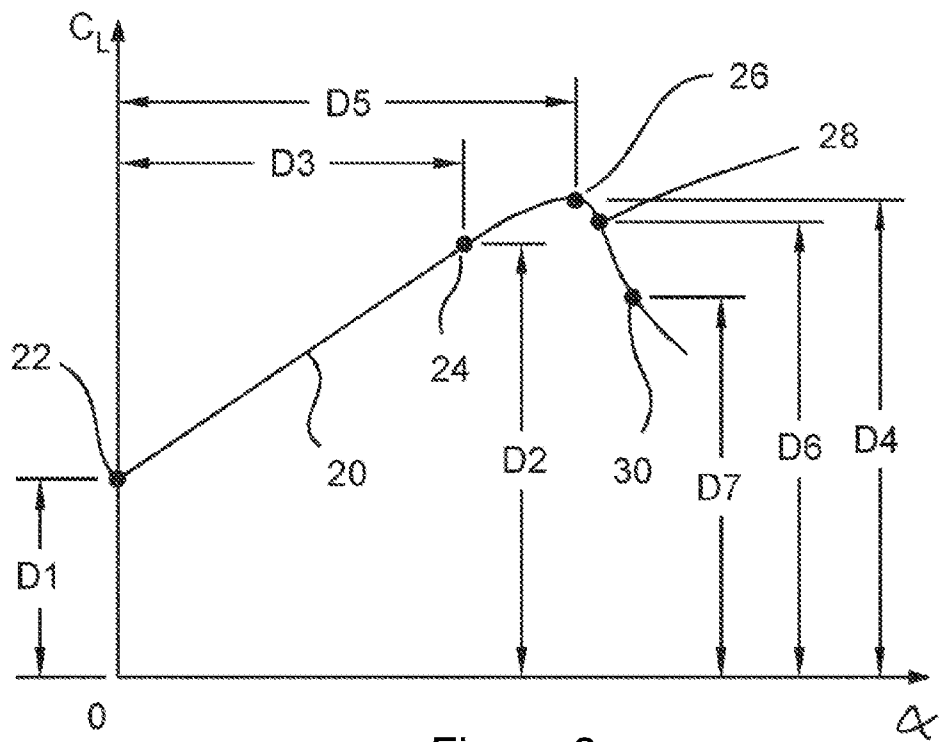


Figura 8

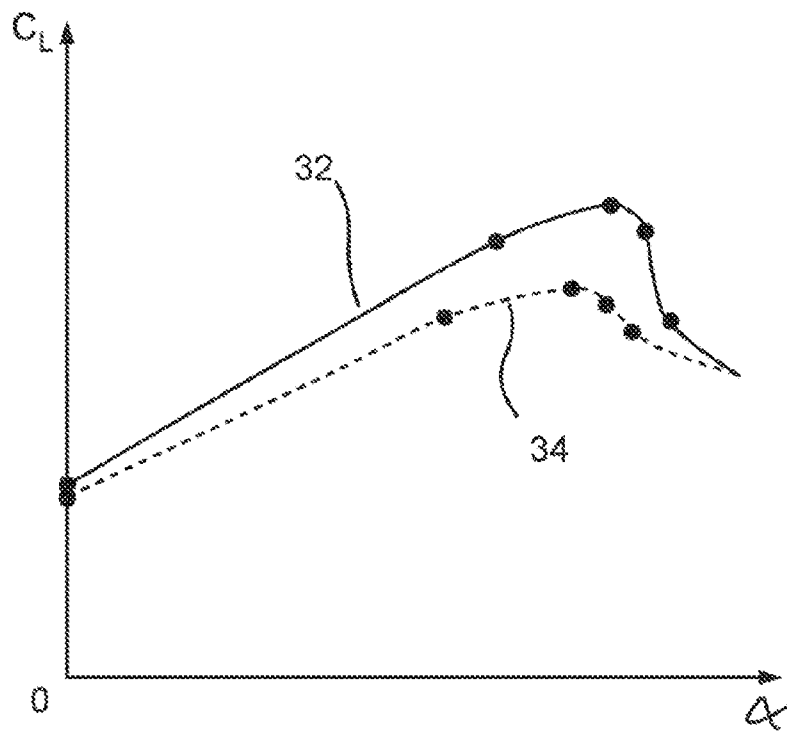


Figura 9