

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 919 049**

51 Int. Cl.:

**G01S 17/95** (2006.01)

**G01S 17/58** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.06.2018 PCT/EP2018/066478**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.12.2018 WO18234409**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.06.2018 E 18731117 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.05.2022 EP 3642647**

54 Título: **Método de adquisición y modelización de un campo de viento incidente mediante un sensor LiDAR**

30 Prioridad:

**21.06.2017 FR 1755675**

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

**21.07.2022**

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)  
1 & 4 avenue du Bois-Préau  
92852 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**NGUYEN, HOAI-NAM y  
GUILLEMIN, FABRICE**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 919 049 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 de adquisición y modelización de un campo de viento incidente mediante un sensor LiDAR

5 La presente invención hace referencia al campo de los sensores LiDAR (Light Detection And Ranging o detección y localización por medio de la luz) utilizados como medio de teledetección para medir la velocidad del viento. También hace referencia al campo de los aerogeneradores equipados con sensores LiDAR, así como al control de los mismos.

10 Los rendimientos de los sensores LIDAR en términos de precisión, fiabilidad y disponibilidad de las mediciones, permite elaborar estimaciones y predicciones de la condición del viento para un volumen de aerosol determinado. Sin embargo, los sensores LiDAR tienen ciertas limitaciones en términos de precisión y disponibilidad de datos. Por un lado, sólo proporcionan una medición bruta del viento, es decir, una proyección del viento sobre un eje de medición (también denominado haz LASER para la amplificación de la luz mediante emisión estimulada de radiación o "light amplification by stimulated emission of radiation") y, por otro lado, sólo permiten acceder a un ancho de banda limitado y ruidoso del contenido espectral del viento. Como la medición bruta es una medición indirecta del viento, que corresponde a la proyección del viento sobre el eje de un haz LASER, es necesario entonces combinar varias mediciones brutas de varios haces (o ejes de medición) de distintas direcciones, para obtener una estimación precisa del vector viento.

20 Sin embargo, estas estimaciones no son triviales o directamente accesibles, y requieren el diseño y la puesta a punto de algoritmos de reconstrucción precisos y consistentes relacionados con la calidad variable de la señal, la geometría del sensor y las condiciones del viento.

25 La mayoría de los métodos de reconstrucción desarrollados hasta ahora se basan en la hipótesis de un campo de viento homogéneo y estable en toda la superficie del rotor, según se describe en la publicación "A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms", In 2009 American Control Conference. IEEE. 2009, pp. 2076-2089.

Sin embargo, esta hipótesis no es representativa ni realista, ya que la velocidad del viento varía considerablemente con la altitud, dentro de la capa límite atmosférica, con una dinámica muy compleja.

30 La publicación de "P Towers y B LI Jones, 'Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation', In Wind Energy 19.1 (2016), pp. 133- 150", propone un algoritmo de estimación para reconstruir un campo de viento. El enfoque consiste en utilizar un filtro de Kalman no perfumado "unscented" que incorpora un modelo de flujo basado en las ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes. Sin embargo, esta técnica proporciona una reconstrucción bidimensional (2D) del campo de viento a una altitud fija. Además, la técnica, tal como se describe en esta publicación, se basa en la hipótesis poco realista de que todas las mediciones del LiDAR están disponibles para todos los haces al mismo tiempo.

40 Por último, también se conoce un algoritmo de reconstrucción propuesto por algunos fabricantes de sensores LiDAR. En este caso, el principio es obtener una estimación instantánea de la velocidad del viento en puntos no medidos en el espacio, a partir de interpolaciones sobre las mediciones. Sin embargo, en estos casos sólo es posible obtener, en tiempo real y en línea, una estimación de la componente del viento en el eje del LiDAR. La velocidad del viento longitudinal y la dirección sólo se obtienen a partir de una media deslizante, y no se pueden utilizar para aplicaciones en tiempo real. El documento de F. GUILLEMIN ET AL: "Nacelle LiDAR online wind field reconstruction applied to feedforward pitch control", JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, vol. 753, 1 de septiembre de 2016, página 052019, XP055451670 describe un algoritmo para reconstruir el campo de viento delante de un aerogenerador con el fin de controlar mediante anticipación el ángulo de las palas.

50 En el campo de los aerogeneradores, la productividad de los mismos y los costes de mantenimiento dependen en gran medida de la capacidad de supervisión del sistema y, en particular, de la capacidad de explotar la información relevante sobre el viento. En efecto, las principales fuentes de daños infligidos en la estructura y los componentes del aerogenerador están relacionadas con las condiciones de viento que implican cargas extremas (viento fuerte y turbulento, ráfagas) y con la fatiga de los materiales sometidos a fenómenos vibratorios y oscilantes. Se generan por las interacciones entre el aerogenerador y el campo eólico, en particular los problemas de vibración que excitan los modos propios del aerogenerador. Hay algunas estrategias de control que se aplican actualmente, pero no disponen de información fiable sobre el viento que se pueda integrar en el bucle de control para garantizar el tiempo de funcionamiento previsto. En algunos casos, la velocidad del rotor se regula mediante el par del generador y el par aerodinámico (por medio de la orientación de las palas). En otros casos, no se utiliza directamente la medición del viento en el bucle de control, por lo que la regulación de la velocidad del rotor es un método de retroalimentación. También es posible tener una alineación a partir de un sensor anemométrico situado en una zona turbulenta (góndola) y sujeto a derivas, lo que hace que el aerogenerador esté a menudo mal alineado.

60 En cualquier caso, esto obliga a integrar limitaciones en el diseño del aerogenerador, con estructuras reforzadas y un coste de inversión adicional asociado, y también con una pérdida de producción y riesgos asociados de carga de la estructura.

65

Para superar los inconvenientes mencionados anteriormente, un primer aspecto de la invención consiste, por tanto, en desarrollar un método mejorado para estimar la velocidad y la dirección de un campo de viento tridimensional (3D) en línea, en tiempo real, en un volumen situado aguas arriba de un sensor LiDAR, con el fin de disponer de una estimación y una previsión a corto plazo del campo de viento que incide sobre el sensor LiDAR. Un segundo aspecto de la invención tiene como objetivo utilizar este método y este sensor LiDAR en una estrategia de control del aerogenerador para tener predicciones de la carga del rotor del aerogenerador, para detectar ráfagas, turbulencias, cizalladuras, etc.

Para ello, la invención hace referencia a un método de adquisición y modelización mediante un sensor LiDAR de un campo de viento incidente en un espacio situado aguas arriba de dicho sensor LiDAR. Para el método, se realizan las siguientes etapas:

- a) una etapa de mallado del espacio situado aguas arriba de dicho sensor LiDAR en la que el mallado del espacio se lleva a cabo mediante un conjunto de puntos discretizados colocados a lo largo de un mallado tridimensional predefinida que comprende un conjunto de mallas compuestas por puntos de estimación y puntos de medición.

La etapa de mallado permite discretizar (o muestrear) el espacio aguas arriba del sensor LiDAR en un mallado tridimensional compuesta por puntos discretizados y poder hacer coincidir estos diferentes puntos discretizados como puntos de medición o como puntos de estimación necesarios para el método de modelización. También permite situar los puntos de medición y estimación relativamente entre sí y conocer las distancias que separan todos estos puntos discretizados.

- b) una etapa de medición de la amplitud y la dirección del viento en diferentes puntos de medición situados en el espacio aguas arriba y colocados a al menos dos distancias distintas del sensor LiDAR, a lo largo de al menos tres ejes de medición,

Las mediciones realizadas en esta etapa permiten obtener datos iniciales suficientes y fiables para alimentar un algoritmo que tiene por objetivo estimar la amplitud y la dirección del viento en los puntos de estimación.

- c) una etapa de estimación de la amplitud y la dirección del viento en cualquier instante del conjunto de puntos de estimación y la estimación se realiza por medio de la optimización mediante un método de mínimos cuadrados recursivos ponderados de una función de coste  $J(t)$  que utiliza al menos los datos de los puntos medidos datos de coherencia espacial de la velocidad del viento, datos de coherencia temporal de la velocidad del viento, así como datos que califican la calidad de las mediciones realizadas en los puntos de medición y dicha función de coste  $J(t)$  en cualquier instante (t) se escribe en la forma definida en el párrafo que une las páginas 4 y 5 de la solicitud.

Tener en cuenta estos diferentes parámetros en una función de coste a optimizar es lo que va a permitir acceder a una estimación de la amplitud y la dirección del viento en cada punto de estimación del mallado.

- d) una etapa de reconstrucción, en tiempo real y en un sistema de referencia definido, del campo de viento incidente en tres dimensiones (3D) a partir de las amplitudes y direcciones del viento estimadas y medidas para cada punto.

Esta etapa permite reconstruir el campo de viento incidente en 3D en el volumen muestreado por el mallado tridimensional. En esta etapa se realiza un historial de las mediciones LiDAR, que permite conocer los estados pasados del campo de viento, y esto se incorpora en la síntesis de las estimaciones actuales y futuras del campo de viento 3D, lo que permite una reconstrucción en tiempo real.

El interés de utilizar un enfoque de optimización, utilizando una forma recursiva de mínimos cuadrados ponderados, es que se puede determinar una imagen tridimensional (3D) completa del viento incidente que se propaga en el espacio aguas arriba del sensor LiDAR.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la medición  $m$  de la amplitud y la dirección del viento en un punto de medición viene dada por una relación de la forma:

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

donde  $v_{j,x}(k)$ ,  $v_{j,y}(k)$ ,  $v_{j,z}(k)$  son valores de la velocidad del viento proyectados sobre un sistema de referencia x, y, z en un instante inicial (k), y  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  con  $j = 0, 1, 2, 3, 4$ , son coeficientes de medición, que vienen dados como,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\varphi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\varphi_j) \end{cases}$$

donde  $\theta_j$ ,  $\varphi_j$  son el cenit y el acimut, respectivamente, del eje de medición en un sistema de coordenadas esféricas.

5 De este modo, el vector viento, en cada instante muestreado, para todos los puntos del espacio está compuesto por las tres componentes que van a permitir determinar la imagen tridimensional completa. Además, la elección de los coeficientes de medición sólo depende de los ángulos de los haces y no es función de las distancias de medición, lo que facilita la programación informática de la función de coste  $J$ .

10 El núcleo de la invención está definido por la función de coste  $J$  en cualquier instante (t) escrita de la siguiente forma:

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

15 donde  $\omega$  es un vector ordenado compuesto por todas las componentes de la velocidad de los puntos del espacio donde se estima el viento,  $\hat{\omega}(0)$  es la estimación de la velocidad del viento en el instante 0,  $P_0$ ,  $Q$ ,  $R_s$  y  $R_m$  son matrices de ponderación de dimensión adecuada, y  $C_s$ ,  $C_m$  son matrices que tienen en cuenta la velocidad del viento y el ruido de la medición.

20 Utilizando dicha función de coste, es posible estimar la velocidad del viento en un punto de estimación. Además, una función de este tipo permite una interpretación clara de las matrices de ponderación  $P_0$ ,  $Q$ ,  $R_s$  y  $R_m$ .

25 De acuerdo con un aspecto de la invención, las mediciones de la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medición se realizan con una frecuencia de muestreo de al menos 0,25 Hz. La utilización de una gama de frecuencias de muestreo de este tipo tiene el efecto de obtener varias mediciones simultáneamente en el mismo eje de medición, al tiempo que se obtienen mediciones fiables y precisas.

30 De acuerdo con un aspecto de la invención, las mediciones de la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medición se toman al menos a dos distancias diferentes a lo largo del eje de medición. Las mediciones realizadas a al menos dos distancias permiten definir un volumen tridimensional suficiente para abarcar las palas de un aerogenerador, según se describirá más adelante.

35 De acuerdo con un aspecto de la invención, las mediciones de la amplitud y la dirección del viento se realizan a lo largo de al menos tres ejes de medición. Disponer de al menos tres ejes de medición permite un mallado preciso del espacio aguas arriba y también permite tener una cantidad suficiente de mediciones para la etapa de estimación de la velocidad del viento.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la coherencia espacial de la velocidad del viento a lo largo de los ejes x, y y z de un sistema de referencia cartesiano se estima mediante una fórmula del tipo: donde:

40 
$$C_s \omega \approx 0$$

con

$$C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

45 -  $C_l$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje longitudinal x y

-  $C_t$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje lateral y y

50 -  $C_v$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje vertical z y

Una caracterización de este tipo tiene por efecto hacer posible la codificación informática de una función de este tipo.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la coherencia espacial de la velocidad del viento a lo largo de los ejes x, y y z del sistema de referencia cartesiano se estima con las siguientes hipótesis:

- 5 - La variación de la velocidad del viento a lo largo del eje longitudinal x es pequeña y la derivada parcial  $dv_x/dx$  es relativamente pequeña a lo largo del eje longitudinal,
- el viento cambia suavemente a lo largo del eje lateral y y la derivada parcial  $dv_x/dy$  es pequeña a lo largo eje lateral y,
- 10 - el viento cambia con una ley de potencia a lo largo del eje vertical z que viene dado por:

$$v_l = v_{lr} \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

donde  $\alpha$  es un exponente de ley de potencia,  $V_l$  es el viento longitudinal a una altitud z sobre el suelo, y  $z_r$  es una altitud de referencia.

15 Hipótesis de este tipo son realistas y permiten realizar estimaciones fiables y precisas de las velocidades del viento.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la calidad de las mediciones realizadas por el LiDAR se representa mediante un modelo de la forma:

$$20 \quad C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

donde  $\epsilon_m$  describe el ruido de la medición.

25 La formulación de este tipo permite tener en cuenta las inexactitudes de las mediciones LiDAR.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la estimación de las amplitudes y las direcciones del campo de viento en un instante (t) sobre todos los puntos de estimación viene dada por la siguiente fórmula:

$$30 \quad \omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

La fórmula anterior tiene la ventaja de relacionar las estimaciones de la velocidad del viento en el tiempo para los puntos de estimación.

35 La invención también hace referencia a un producto de programa informático que comprende instrucciones de código dispuestas para llevar a cabo las etapas del método de adquisición y modelización descrito anteriormente. El programa se ejecuta en una unidad de procesamiento del LiDAR.

40 La invención también hace referencia a un sensor LiDAR que incluye en la memoria las instrucciones de código de un producto de programa informático como por ejemplo se ha descrito anteriormente y que se dispone para ejecutar un producto de programa informático de este tipo.

De este modo, un sensor LiDAR que ejecute un producto de programa informático de este tipo devolverá información fiable de un campo de viento incidente en tres dimensiones y en tiempo real.

45 Un objetivo de la invención también hace referencia a un aerogenerador que incluye un sensor LiDAR como por ejemplo el descrito anteriormente.

De acuerdo con un aspecto de la invención, el sensor LiDAR se dispone en la góndola de dicho aerogenerador.

50 Por último, la invención también hace referencia a un método para controlar y/o supervisión de un aerogenerador equipado con un sensor LiDAR y un autómata de control, y el método comprende las siguientes etapas:

55 a) Una etapa de desarrollo de una estrategia de control por anticipación de dicho aerogenerador explotando la reconstrucción del campo de viento incidente en tres dimensiones y en tiempo real,

b) Una etapa de control que integra la estrategia de control elaborada y que consiste en controlar el ángulo de las palas o la orientación de la góndola.

60 De este modo, la disponibilidad de información suficientemente consistente y precisa sobre el estado del viento incidente que se aproxima al rotor, permite un nuevo enfoque de control, con la integración de un término de

preposicionamiento dinámico y preventivo. Además, la capacidad de reconstruir en línea, en tiempo real, un campo de viento incidente que se aproxima al plano del rotor abre numerosas perspectivas de explotación: cuantificación de la desalineación del aerogenerador, curva de potencia, función de transferencia de la góndola, detección de ráfagas, supervisión y diagnóstico de riesgos de carga y fatiga, optimización del mantenimiento preventivo, análisis de recursos, optimización de la producción. Por tanto, esto permite aumentar la eficiencia de los aerogeneradores, reducir los costes de mantenimiento, aumentar la vida útil de los componentes y reducir los costes de inversión optimizando el diseño.

### Breve presentación de las figuras

Otras características y ventajas del método de acuerdo con la invención se harán evidentes con la lectura de la siguiente descripción de un ejemplo no restrictivo de una forma de realización, con referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

La Figura 1 muestra un aerogenerador equipado con un sensor LiDAR de acuerdo con la invención.

La Figura 2 muestra las etapas del método de adquisición y modelización mediante el sensor LiDAR de acuerdo con la invención.

La Figura 3 es una vista frontal del mallado espacial de acuerdo con la invención.

La Figura 4 es una vista en perspectiva del mallado espacial de acuerdo con la invención.

La Figura 5 muestra un campo de viento 3D reconstruido a partir de las mediciones del LiDAR en un caso particular.

La Figura 6 muestra las etapas del método de control del aerogenerador de acuerdo con la invención.

### Descripción detallada de la invención

#### Notaciones

Durante la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

–  $x, y, z$ : direcciones del sistema de referencia tridimensional, siendo  $z$  el eje vertical y  $x$  la dirección principal del viento.

–  $\theta$  y  $\varphi$ : ángulos de orientación de dicho sensor LiDAR. Estos ángulos se explican en la Figura 1: el ángulo  $\theta$  es el ángulo formado por la proyección del eje de medición del LiDAR en el plano  $(y, z)$ , y  $\varphi$  es el ángulo formado por la proyección del eje de medición del LiDAR en un plano formado por el eje  $x$  y la proyección del eje de medición del LiDAR en el plano  $(y, z)$ .

–  $m(t)$ : medición del sensor LiDAR en un punto de medición.

–  $v_{j,x}(k), v_{j,y}(k), v_{j,z}(k)$ : proyecciones de la velocidad del viento en  $x, y, z$ .

–  $\omega$ : un vector ordenado compuesto por todas las componentes de la velocidad del viento en los puntos del espacio donde se estima el viento en los ejes  $x, y$  y  $z$  del sistema de referencia tridimensional.

–  $\hat{\omega}(t)$ : estimación de  $\omega(t)$  en el instante  $t$ .

–  $P(t)$ : matriz auxiliar variable en el tiempo, que se puede obtener en el instante  $t$ .

–  $P_\theta, Q, R_s$  y  $R_m$  son matrices de ponderación de tamaño adecuado.

A partir de ahora en la descripción, el término "LiDAR" se utiliza para designar un sensor "LiDAR".

La invención hace referencia en primer lugar a un método de adquisición y de modelización mediante un sensor LiDAR de un campo de viento incidente con el fin de estimar la velocidad y la dirección del viento para un campo de viento que se aproxima y se encuentra aguas arriba del LiDAR de la manera más fiable posible. Esta estimación se debe realizar en línea, en tiempo real, para un campo de viento 3D muestreado.

La Figura 2 representa las diferentes etapas del método de adquisición y modelización de acuerdo con la invención:

1. Mallado (MA) del espacio aguas arriba de dicho sensor LiDAR, el mallado comprende puntos de estimación (PE) y puntos de medición (PM).

2. Medición (MES) de la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medición (PM).
3. Estimación (EST) de la amplitud y la dirección del viento en cualquier instante (t) para el conjunto de puntos de estimación (PE).
4. Reconstrucción (MOD 3D) del campo de viento incidente en tres dimensiones (3D) y en tiempo real sobre el conjunto de puntos discretizados.

La Figura 1 muestra un aerogenerador 1 equipado con un sensor LiDAR 2. El sensor LiDAR 2 se utiliza para medir la velocidad del viento a una distancia determinada en un punto de medición PM. Conociendo de antemano la medición del viento, se puede obtener mucha información.

Hay varios tipos de sensores LiDAR, por ejemplo, los sensores LiDAR de escaneo, LiDAR continuo o LiDAR pulsado. En el contexto de la invención, se utiliza preferentemente el LiDAR pulsado. Sin embargo, se pueden utilizar otras tecnologías LiDAR sin salirse del campo de la invención. Como se puede ver en la Figura 1, que es un ejemplo de una forma de realización, el LiDAR utilizado tiene 5 haces o ejes de medición (b0, b1, b2, b3, b4). De forma no restrictiva, el método de adquisición y modelización también funciona con un LiDAR de tres o más haces. El sensor LiDAR pulsado de 5 haces se monta en la góndola 3 de un aerogenerador 1.

De forma convencional, un aerogenerador 1 se utiliza para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica. Para la conversión del viento en energía eléctrica, consta de los siguientes elementos:

- un mástil 4 que permite colocar un rotor (no representado) a una altura suficiente para permitir su movimiento (necesario para los aerogeneradores de eje horizontal) o colocar este rotor a una altura que le permita ser impulsado por un viento más fuerte y regular que a nivel del suelo 6. El mástil 4 suele albergar algunos de los componentes eléctricos y electrónicos (modulador, control, caja de cambios, generador...);
- una góndola 3 montada en la parte superior del mástil 4, que alberga componentes mecánicos, neumáticos, algunos eléctricos y electrónicos (no mostrados), necesarios para el funcionamiento de la máquina. La góndola 3 puede girar para orientar la máquina en la dirección correcta;
- el rotor, unido a la góndola, que comprende varias palas 7 (normalmente tres) y el morro del aerogenerador. El rotor se impulsa mediante la energía eólica, y se conecta mediante un eje mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de caja de cambios y eje mecánico) a una máquina eléctrica (generador eléctrico...) (no mostrada) que convierte la energía recogida en energía eléctrica. El rotor se equipa potencialmente con sistemas de control como por ejemplo palas de ángulo variable o frenos aerodinámicos;
- una transmisión, compuesta de dos ejes (eje mecánico del rotor y eje mecánico de la máquina eléctrica) conectados por una transmisión (caja de cambios) (no mostrada).

En la descripción presentada a continuación, el método de adquisición y modelización descrito es teórico y funciona independientemente del aerogenerador 1. Sin embargo, los distintos ejemplos y desarrollos se dan en el caso de un LiDAR montado en la góndola 3 del aerogenerador 1 de forma que se realicen las distintas etapas del método de adquisición y modelización mostradas en la Figura 2 a una determinada altura respecto al suelo 6.

[0045] En este apartado se describen las distintas etapas del método de adquisición y modelización de acuerdo con la invención:

### **1. Mallado (MA) del espacio aguas arriba de dicho sensor LiDAR**

En esta primera etapa, el espacio aguas arriba del sensor LiDAR se define de acuerdo con un mallado según se puede ver en las figuras 1, 3 y 4. En esta etapa se define un sistema de coordenadas en el que el LiDAR realiza las mediciones. El sistema de coordenadas definido es el triedro directo mostrado en las figuras 1 y 3. Los orígenes x-y de este sistema están al nivel del posicionamiento del LiDAR en la góndola 3, y el origen z está al nivel del suelo 6.

El eje x apunta horizontalmente en la dirección del viento, el eje z apunta verticalmente hacia arriba, y el eje y es perpendicular para formar un sistema de coordenadas tridimensional directo (de acuerdo con la regla de la mano derecha).

En esta etapa, el mallado del espacio comprende un conjunto de puntos discretizados colocados aguas arriba que definen un mallado tridimensional. Para cada distancia fija x, el plano y - z se divide en celdas no superpuestas, según se puede ver en la Figura 3. El mallado incluye puntos de medición (PM) y puntos de estimación (PE) de la velocidad del viento.

En relación con este mallado del espacio, también se definen variables subyacentes, denominadas variables de optimización, que son necesarias para la etapa de estimación que se describe a continuación. Para permitir una

implementación inteligente y eficiente del algoritmo de optimización descrito a continuación, todas las variables de optimización se reúnen en un vector ordenado, denotado  $\omega$ . El orden determinado para estas variables de optimización es un elemento de ingeniería crucial para la viabilidad y el rendimiento de un algoritmo de codificación para este método.

5 Se define un vector  $\omega$  para cada punto del espacio discretizado y se compone de todas las componentes  $v_x$  de los puntos del espacio (PE) donde se estima el viento, seguido respectivamente de las componentes  $v_y$  y  $v_z$ . La estimación de la velocidad del viento en  $n$  puntos implica la construcción de un vector  $\omega$  de tamaño  $3n$ , con  $W_1$  a  $W_n$  que contienen todas las  $v_x$ ,  $W_{n+1}$  a  $W_{2n}$  que contienen todas las  $v_y$ , y  $W_{2n+1}$  a  $W_{3n}$  que contienen todas las  $v_z$ .

10 El siguiente ejemplo se da para las componentes  $v_x$  de la velocidad del viento, entendiéndose que el método es idéntico para  $v_y$  y  $v_z$ . Como se hizo en la etapa inicial, y según se puede ver en la Figura 3, el espacio se discretiza en  $x$ ,  $y$  y  $z$  con  $n_x$  puntos en  $x$ ,  $n_y$  puntos en  $y$  y  $n_z$  puntos en  $z$ .

En esta configuración tenemos:

15 
$$n = n_x n_y n_z$$

La componente de la velocidad del viento  $v_x$  está definida por  $v_{i,j,k}$ , cuya coordenada es  $(x_i, y_j, z_k)$ . El índice  $l$  de  $W_l$ , donde se encuentra la estimación correspondiente, se obtiene de la siguiente manera:

20 
$$l = (n_x - i)n_y n_z + (k - 1)n_y + j$$

Por ejemplo, si  $i = n_x$ ,  $k = 1$  y  $j = 1$ , entonces

25 
$$l = (n_x - i)n_y n_z + (k - 1)n_y + j = 1$$

Esto corresponde a la esquina superior izquierda del dominio de estimación, a la distancia más lejana aguas arriba del plano del rotor, según se ilustra en la Figura 4.

30 **2. Medición (MES) de la amplitud y dirección del viento en diferentes puntos de medición**

En una segunda etapa, el sensor LiDAR realiza una medición  $m(t)$  relativa a la velocidad del viento en un punto de medición (PM) situado aguas arriba del aerogenerador 1. Esta medida  $m(t)$  corresponde a la señal recibida por el sensor procedente del punto de medición (PM) en respuesta a la señal emitida por el sensor LiDAR. En efecto, debido a la interferometría y al efecto Doppler, una parte de la señal láser emitida por el sensor LiDAR es reflejada por las moléculas de aire en el punto de medición y también por los aerosoles (polvo y micropartículas en suspensión). El punto de medición está definido por las características del sensor LiDAR, especialmente la distancia focal, así como su orientación. Esta medición, que depende de la velocidad del viento, es un tiempo y depende de la orientación del sensor LiDAR.

40 Para el caso estudiado de LiDAR pulsado, las mediciones se obtienen de forma sucesiva de acuerdo con el mallado definido en la etapa anterior, empezando por el haz longitudinal b0, luego el haz oblicuo b1, hasta el haz b4. Una característica interesante de este sistema es que permite medir la proyección de la velocidad del viento a varias distancias de forma simultánea para un haz determinado. De este modo, es posible obtener, por ejemplo, 10 distancias sucesivas entre 50 m y 400 m, con una frecuencia de muestreo de 0,25 Hz o 1 Hz. Por supuesto, es posible limitarlo a dos mediciones, que son suficientes para reconstruir un modelo tridimensional. En cada tiempo de muestreo, sólo se actualizan las mediciones del haz de corriente seleccionado.

50 En un caso particular, de acuerdo con la Figura 4, las mediciones se realizan a siete distancias y en particular a  $x = [50 \ 80 \ 120 \ 160 \ 200 \ 240 \ 280]$  m para los cinco haces. De este modo, para cada  $x$  fija, el plano  $y$ - $z$  se divide en celdas como sigue:

- Los cuatro primeros puntos (PM) corresponden a las coordenadas  $y$ - $z$  de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 280$ m.
- Los cuatro segundos puntos (PM1) corresponden a las coordenadas  $y$ - $z$  de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 240$ m.
- Los cuatro terceros puntos (PM2) corresponden a las coordenadas  $y$ - $z$  de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 200$ m.

- Los cuatro cuartos puntos (PM3) corresponden a las coordenadas y-z de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 160\text{m}$ .
- Los cuatro quintos puntos (PM4) corresponden a las coordenadas y-z de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 120\text{m}$ .
- 5    – Los cuatro sextos puntos (PM5) corresponden a las coordenadas y-z de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 80\text{m}$ .
- Los cuatro séptimos puntos (PM6) corresponden a las coordenadas y-z de los puntos de medición de los haces 1, 2, 3, 4 a la distancia  $x = 50\text{m}$ .

10 El punto central (PM7) corresponde a las coordenadas y-z de los puntos de medición del haz 0 para todas las distancias.

Las mediciones LiDAR  $m(k)$  para los haces  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  a la distancia  $x$  metros, y en el instante  $k$  están dadas por la fórmula  $m_j, x(k)$ , con  $j = 0, 1, 2, 3, 4$ .

15 Por ejemplo,  $m_{0,50}(1)$  es la medición LiDAR para el haz  $j = 0$  a la distancia  $x = 50$  metros y en el instante  $k = 1$ . En el contexto de la invención, la medición LiDAR viene dada entonces por una fórmula del tipo:

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

20 donde  $v_{j,x}(k)$ ,  $v_{j,y}(k)$ ,  $v_{j,z}(k)$  son valores de la velocidad del viento proyectados en un sistema de referencia dado en el instante inicial  $(k)$ , y  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ , con  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  son coeficientes de medición, que vienen dados como,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\varphi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\varphi_j) \end{cases}$$

25 donde  $\theta_j, \varphi_j$ , con  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  son el cenit y el acimut, respectivamente, del eje de medición en un sistema de coordenadas esféricas.

30 La ventaja de definir la ecuación de medición LiDAR en el sistema de referencia previamente definido, con la selección de discretización espacial elegida, es que se puede utilizar directamente, ya que las coordenadas del punto de medición coinciden con un punto concreto del espacio discretizado.

**3. Estimación (EST) de la amplitud y de la dirección del viento en cualquier instante (t) sobre el conjunto de puntos discretizados**

35 Esta etapa consiste en obtener un valor del viento sobre los puntos de estimación (PE) del mallado.

Para ello, la estimación se lleva a cabo mediante una optimización que utiliza un método de mínimos cuadrados recursivos ponderados de una función de coste que utiliza los datos LiDAR medidos  $m(k)$ , pero también datos sobre la coherencia espacial de la velocidad del viento, datos sobre la variación temporal de la velocidad del viento, así como datos que califican la calidad de las mediciones LiDAR  $m(k)$ . Esto se explica a continuación.

40 Tener en cuenta la coherencia temporal permite cuantificar el "parecido" de la estimación del campo de viento en una fecha  $t$ , con la estimación del campo de viento en una fecha anterior ( $t-1, t-2, \dots$ ).

45 La implementación de la minimización por mínimos cuadrados recursivos ponderados de la función de coste, incorporando la coherencia temporal, corresponde a la implementación de un filtro de Kalman extendido.

$$\omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

50 La ventaja de este enfoque es la capacidad de considerar una actualización de la estimación del campo de viento en una fecha  $t$ , incluso si las mediciones adquiridas en la fecha  $t$  no son válidas o fiables. Para ello, se basa en la estimación del campo de viento obtenida en una fecha anterior ( $t-1, t-2$ , etc.). De este modo, por extensión, la reconstrucción del campo de viento es consistente a la no disponibilidad de datos del dispositivo de adquisición, durante un periodo de tiempo limitado debido al límite de coherencia temporal de la estimación. Una implementación directa de esta solución es la creación de una zona de memoria tampón, comúnmente llamada "buffer", que contiene

las últimas mediciones válidas de cada haz, a cada distancia del LiDAR. Este búfer es entonces la fuente de datos de entrada para el algoritmo de reconstrucción.

Por ejemplo, para un dispositivo pulsado de 4 haces, adquiriendo sobre 10 distancias, el buffer tendrá 4\*10 lugares, donde se almacenarán las últimas 40 mediciones radiales válidas adquiridas. De este modo, indicadores como por ejemplo la media espacial de la velocidad del viento a una distancia determinada se estabilizarán y serán fiables gracias a la disponibilidad, en cada fecha de adquisición, de todas las mediciones, ya sean actuales, diferidas o estimadas. En efecto, se ha comprobado que el hecho de no considerar todos los haces para establecer un indicador espacial del viento conduce a valores erróneos para los promedios espaciales, en particular cuando el viento está sometido a cizallamientos, o cuando el dispositivo de adquisición está desalineado con respecto a la dirección del viento predominante.

También es necesario incluir un indicador de datación u obsolescencia de los datos almacenados, para poder determinar su relevancia como fuente de información para actualizar la estimación del campo de viento. Esta relevancia depende de la coherencia temporal del fenómeno estimado, es decir, del campo de viento que se propaga hacia el aerogenerador donde se posiciona el LiDAR. La coherencia temporal del viento puede ser un parámetro de ajuste, o derivarse de un modelo de viento.

El funcionamiento consistente del enfoque descrito en la patente requiere la provisión de un índice o intervalo de confianza, que acompañe a la estimación del campo de viento y sus cantidades descriptivas asociadas, en cada instante. Las magnitudes descriptivas del campo de viento pueden ser, por ejemplo: las cizalladuras horizontales y verticales de la amplitud y la dirección, la velocidad y la dirección medias en cada distancia de medición, la intensidad de la turbulencia...

Este intervalo de confianza se construye a partir de una ecuación que tiene en cuenta:

- El número de medidas válidas en la fecha de adquisición actual
- La datación de las últimas mediciones válidas, si las últimas adquisiciones obtenidas no son todas fiables
- El intervalo de confianza intrínseco al algoritmo de reconstrucción. Este intervalo de confianza depende de la varianza deducida del proceso de estimación. En el caso de una implementación del filtro Kalman, podrían ser los valores de la matriz de covarianza del proceso modelizado.

Estas consideraciones permiten sintetizar de forma consistente y fiable una incertidumbre a asociar a la reconstrucción del campo de viento, que integra la disponibilidad y la obsolescencia de las medidas con el índice de confianza intrínseco del estimador.

Esta incertidumbre se puede proporcionar con la medición, y se puede equiparar a la desviación estándar global de la estimación. Esta cantidad es una información muy relevante para explotar la reconstrucción en un contexto de diagnóstico en tiempo real, o para el control asistido por LiDAR de un aerogenerador.

### **3.1 Diferencias espaciales**

Estas subsecciones tienen como objetivo definir los datos de coherencia espacial del viento en el contexto de la invención y más concretamente en el contexto de un LiDAR montado en la góndola 3 de un aerogenerador 1.

En esta etapa se consideran las componentes de la velocidad del viento en los ejes x, y y z del sistema de referencia previamente definido.

En esta etapa de estimación, se asume que la velocidad del viento cambia relativamente poco en el espacio, y que el viento tiene una fuerte coherencia espacial en un pequeño volumen de espacio. La siguiente exposición se hace en este caso para las componentes  $v_x$ , es decir, para las primeras n variables de  $\omega$  con un dominio de estimación mostrado en la Figura 4 (El enfoque es similar para las componentes  $v_y$  y  $v_z$ ) y tomando  $n_x = n_y = n_z = 3$ .

#### **3.1.1 Diferencia longitudinal**

La diferencia longitudinal corresponde al cambio de  $v_x$  a lo largo del eje x y este cambia suavemente de acuerdo con la invención. En este caso la derivada parcial  $dv_x/dx$  es relativamente pequeña. En otras palabras,

$$\begin{cases} \omega_1 - \omega_{10} \approx 0 \\ \omega_2 - \omega_{11} \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{18} - \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

La ecuación anterior se puede escribir en una forma vectorial compacta como:

5 
$$C_{xl}\omega \approx 0$$

donde

$$C_{xl} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & +1 & \dots & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & +1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$$

10 Obsérvese que cada fila de  $C_{xl}$  contiene un +1 y un -1.

De manera similar, la variación de  $v_y$  y  $v_z$  a lo largo del eje longitudinal se puede calcular como:

15 
$$\begin{cases} C_{yl}\omega \approx 0, \\ C_{zl}\omega \approx 0 \end{cases}$$

donde  $C_{yl}$ ,  $C_{zl}$  son, matrices de coeficientes, que contienen sólo un +1 y un -1 en cada fila. [0081] Definiendo:

20 
$$C_l = \begin{bmatrix} C_{xl} \\ C_{yl} \\ C_{zl} \end{bmatrix}$$

obtenemos la ecuación:

25 
$$C_l\omega \approx 0$$

que caracteriza la variación de la velocidad del viento para el dominio de estimación a lo largo del eje longitudinal.

**3.1.2 Diferencia lateral**

30 La diferencia lateral es el cambio de  $v_x$  a lo largo del eje y. De manera similar, como el viento cambia suavemente, la derivada parcial  $dv_x/dy$  es relativamente pequeña. En otras palabras,

$$\begin{cases} \omega_1 - \omega_2 \approx 0 \\ \omega_2 - \omega_3 \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{26} - \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

35 La ecuación anterior se puede escribir en una forma vectorial compacta como

$$C_{xl}\omega \approx 0$$

donde

$$C_{xt} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & +1 & -1 \end{bmatrix}$$

5 Cada fila de  $C_{xt}$  contiene un +1 y un -1.

De manera similar, el cambio de  $v_y$  y  $v_z$  a lo largo del eje lateral se puede calcular como,

$$\begin{cases} C_{yt}\omega \approx 0, \\ C_{zt}\omega \approx 0 \end{cases}$$

10

donde  $C_{yt}$ ,  $C_{zt}$  son matrices de coeficientes que contienen sólo un +1 y un -1 para cada fila.

Definiendo:

$$C_t = \begin{bmatrix} C_{xt} \\ C_{yt} \\ C_{zt} \end{bmatrix}$$

15

Es evidente que la ecuación:

$$C_t\omega \approx 0$$

20

caracteriza la variación de la velocidad del viento para el dominio de estimación a lo largo del eje lateral.

**3.1.3 Diferencia vertical**

25

El perfil vertical de la velocidad del viento viene dado por una ley de potencia que permite obtener una descripción mucho más precisa de la componente de la velocidad del viento  $v_x$  a diferentes alturas.

30

El perfil vertical de la velocidad del viento describe la evolución de la velocidad longitudinal del viento en función de la altitud relativa al suelo. La ley de potencia ("power law") del perfil de velocidad del viento se utiliza generalmente para estimar la velocidad longitudinal del viento  $v_l$  a una altitud sobre el suelo  $z$ , dada la velocidad longitudinal del viento  $v_{lr}$  a una altitud de referencia  $z_r$ , utilizando la ecuación,

$$v_l = v_{lr} \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

35

donde alfa es el exponente de la ley de potencia, que se especifica generalmente en términos de estabilidad.

El valor constante alfa = 1/7 es comúnmente usado, en coherencia con una hipótesis de cizalladura de viento relativamente baja. Sin embargo, hay que tener en cuenta que considerar constante a alfa es ignorar la rugosidad de la superficie del suelo, las interacciones del viento con posibles obstáculos y la estabilidad de la atmósfera.

40

Utilizando esta ley de potencia tenemos una diferencia vertical del viento dada por:

$$\begin{cases} \omega_1 - \left( \frac{z_1}{z_4} \right)^\alpha \omega_4 \approx 0 \\ \omega_2 - \left( \frac{z_2}{z_5} \right)^\alpha \omega_5 \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{24} - \left( \frac{z_{24}}{z_{27}} \right)^\alpha \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

donde  $z_j$  es la altura de  $\omega$ ,  $\alpha$  es el exponente de la ley de potencia, que se asume como 1/7. La ecuación anterior se puede escribir en una forma vectorial compacta como:

$$C_{xv}\omega \approx 0$$

5

Donde

$$C_{xv} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_1}{z_4}\right)^\alpha & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_2}{z_5}\right)^\alpha & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_{24}}{z_{27}}\right)^\alpha \end{bmatrix}$$

10 De manera similar, la variación de  $v_y$  y  $v_z$  a lo largo del eje vertical se puede cuantificar como

$$\begin{cases} C_{yv}\omega \approx 0, \\ C_{zv}\omega \approx 0 \end{cases}$$

15 Sin embargo, dado que la ley de potencia del perfil del viento sólo se aplica a la velocidad del viento longitudinal,  $C_{yv}$ ,  $C_{zv}$  sólo contienen un +1 y un -1 para cada fila.

Definiendo:

$$C_v = \begin{bmatrix} C_{xv} \\ C_{yv} \\ C_{zv} \end{bmatrix}$$

20

Obtenemos la ecuación:

$$C_v\omega \approx 0$$

25 que caracteriza la variación de la velocidad del viento para el dominio de estimación a lo largo del eje vertical.

Por último, utilizando:

$$C_l\omega \approx 0$$

30

y

$$C_t\omega \approx 0$$

35 tenemos:

$$\begin{cases} C_l\omega \approx 0, \\ C_t\omega \approx 0, \\ C_v\omega \approx 0 \end{cases}$$

o equivalentemente,

40

$$C_s\omega \approx 0$$

que es la ecuación que caracteriza la variación de la velocidad total del viento a lo largo de los ejes x, y y z. **[0096]** Con:

45

$$C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

**3.2 Mediciones LiDAR**

5 Para fines computacionales, es importante reescribir la ecuación de medición en forma de vector  $w$ . En el ejemplo anterior de un LiDAR de cinco haces y para siete mediciones por haz, tenemos  $j = 0, 1, 2, 3, 4$ , y  $x = [50, 80, 120, 160, 200, 240, 280]$ ,

$$\begin{cases} v_{j,x} = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]\omega = C_{j,xx}\omega \\ v_{j,y} = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]\omega = C_{j,xy}\omega \\ v_{j,z} = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]\omega = C_{j,xz}\omega \end{cases}$$

10 Combinando con:

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

15 obtenemos, donde

$$m_{j,x} = C_{j,x}\omega$$

Donde

20

$$C_{j,x} = [a_j \ b_j \ c_j] \begin{bmatrix} C_{j,xx} \\ C_{j,xy} \\ C_{j,xz} \end{bmatrix}$$

que se puede reescribir en una forma vectorial compacta:

25

$$C_m \omega = m_m$$

donde

$$m_m = \begin{bmatrix} m_{0,50} \\ m_{1,50} \\ \vdots \\ m_{4,280} \end{bmatrix}, \quad C_m = \begin{bmatrix} C_{0,50} \\ C_{1,50} \\ \vdots \\ C_{4,280} \end{bmatrix}$$

30

Para tener en cuenta el ruido de las mediciones, se puede introducir un modelo más realista para las mediciones LiDAR como sigue,

35

$$C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

donde  $\epsilon_m$  describe el ruido de las mediciones.

**3.3 Método de mínimos cuadrados recursivos ponderados**

40 Se acepta que la velocidad del viento cambia poco no sólo en el espacio sino también en el tiempo. A continuación, se proporciona una forma de tener en cuenta esta información en el enfoque de la optimización.  $\omega(0)$  es la estimación de la velocidad del viento en el instante 0. En cada instante, el problema de optimización es el siguiente:

45

$$\min_{\omega(t)} J(t)$$

con

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

5 Hay cuatro términos en la función de coste anterior.

- El primer término penaliza el conocimiento de la velocidad inicial del viento  $\omega(0)$ .
- El segundo término penaliza la variación de la velocidad del viento en el tiempo.
- El tercer término penaliza la variación de la velocidad del viento en el espacio.

10 - El cuarto término penaliza la calidad de la medición LiDAR.

Utilizando la fórmula anterior, se puede tener una interpretación clara de las matrices de ponderación  $P_0$ ,  $Q$ ,  $R_s$  y  $R_m$ :

- Si la velocidad del viento  $\omega(t)$  en el instante  $t = 0$  es bien conocida, entonces  $\omega(0) = \hat{\omega}(0)$ , entonces  $P_0$  es pequeño. De lo contrario,  $P_0$  es grande.

15 - Si hay muchas variaciones en la velocidad del viento a lo largo del tiempo, entonces  $Q$  es grande. De lo contrario,  $Q$  es pequeño.

- Si la velocidad del viento cambia rápidamente, entonces  $R_s$  es grande. De lo contrario,  $R_s$  es pequeño.

- Si hay mucho ruido en las mediciones LiDAR, entonces  $R_m$  es grande. De lo contrario,  $R_m$  es pequeño.

En el caso de que se consideren los tres casos límite siguientes:

20 No se dispone de ninguna información sobre la velocidad inicial del viento. Por consiguiente,  $P_0$  es muy grande. De este modo, el término:

$$(\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0))$$

25 se puede despreciar en la función de coste.

No hay ninguna relación entre la velocidad del viento en el instante  $t$  y la velocidad del viento en el instante  $t-1$ . En este caso, se puede elegir que  $Q$  sea muy grande. Se puede despreciar el siguiente término:

30 
$$\sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1))$$

La variación de la velocidad del viento en el espacio es muy pequeña. En este caso, se puede tomar  $R_s$  muy pequeña. El siguiente término es importante en la función de coste:

35 
$$\sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j)$$

Definimos:

$$C = \begin{bmatrix} C_s \\ C_m \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_m \end{bmatrix}$$

40 El método de mínimos cuadrados recursivos ponderados utilizado para resolver el problema de optimización se presenta de la manera siguiente:

- Inicializamos las variables de optimización de la manera siguiente:

$$\begin{cases} \omega(0) = \hat{\omega}(0), \\ P(0) = P_0 \end{cases}$$

- 5 – En cada instante t:

- definimos:

$$y(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ y_m(t) \end{bmatrix}$$

10 donde  $\mathbf{0}$  es un vector nulo de dimensión adecuada.

- Se calcula una matriz auxiliar  $K$  de forma que

$$15 \quad K = (P(t-1) + Q)C(C^T(P(t-1) + Q)C + R)^{-1}$$

- La matriz  $P(t)$  se calcula de forma que

$$20 \quad P(t) = (I - KC)P(t-1)$$

donde  $I$  es una matriz identidad de dimensión adecuada.

- La velocidad del viento en el instante t se estima entonces como sigue:

$$25 \quad \omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

#### **4. Reconstrucción del campo de viento incidente en tres dimensiones (3D) y en tiempo real**

30 En esta etapa, un procesador integrado en el sensor LiDAR recupera todos los datos de amplitud y dirección del viento medidos y estimados durante las etapas anteriores. La recuperación de estos datos se realiza en tiempo real para cada punto de medición (PM) y punto de estimación (PE) definidos previamente. De este modo, el sensor LiDAR es capaz de reconstruir todo el campo de viento que incide sobre el LiDAR según se muestra en la Figura 5.

35 En la misma Figura 5, se muestra un campo de viento reconstruido para un tiempo de 68 segundos. En la ordenada, se muestra la altitud relativa al suelo (en m) y en la abscisa, la distancia a la góndola (en m) y las posiciones laterales relativas al LiDAR (en m).

40 La invención hace referencia en segundo lugar a un método de control y/o supervisión de un aerogenerador equipado con un sensor LiDAR como por ejemplo el descrito anteriormente y un autómata de control 10 asociado que comprende las siguientes etapas:

45 i) Una etapa de elaboración de una estrategia de control (CON) por anticipación de dicho aerogenerador 1 explotando la reconstrucción del campo de viento incidente en tres dimensiones y en tiempo real obtenida mediante el método de acuerdo con la invención,

ii) Una etapa de control (PIL) que integra la estrategia de control elaborada y que consiste, en particular, en controlar el ángulo de las palas 7 o la orientación de la góndola 3.

50 La Figura 6 representa el funcionamiento global de tal aerogenerador 1 de este tipo. El aerogenerador 1 comprende un sensor LiDAR 2 de acuerdo con la invención, y su unidad de procesamiento, un dispositivo informático que comprende una solución de software para la reconstrucción 3D del campo de viento, un autómata de control que integra la estrategia de control y un dispositivo para controlar las palas y/o la góndola del aerogenerador. En relación con la Figura 6, la invención aplicada a un aerogenerador funciona de la siguiente manera:

- 55 – En primer lugar, el LiDAR realiza la etapa de adquisición y modelización del campo de viento incidente, tal y como se ha descrito anteriormente, para reconstruir un campo de viento incidente en 3D (etapas ME, MA, EST, MOD 3D en la Figura 6),

En segundo lugar, el sistema de control automático 10 desarrolla la estrategia de control (CON) y realiza el control (PIL) los componentes del aerogenerador 1 teniendo en cuenta la estrategia de control desarrollada.

- 5 Este método de acuerdo con la invención permite el análisis en tiempo real del viento incidente o la detección de ráfagas, curvas de potencia e intensidades de turbulencia, que se pueden utilizar para regular o supervisar el aerogenerador con el fin de obtener una mejor alineación del aerogenerador, lo que conduce a una optimización de la producción y una minimización de las cargas y la fatiga.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de adquisición y modelización mediante un sensor LiDAR de un campo de viento incidente en un espacio situado aguas arriba de dicho sensor LiDAR caracterizado porque el método comprende:

a) una etapa de mallado (MA) del espacio situado aguas arriba de dicho sensor LiDAR en la que el mallado del espacio se realiza mediante un conjunto de puntos discretizados situados a lo largo de un mallado tridimensional predefinido que comprende un conjunto de mallas compuestas por puntos de estimación y puntos de medición (PM),

b) una etapa de medición (MES) de la amplitud y la dirección del viento en diferentes puntos de medición (PM) situados en el espacio aguas arriba y posicionados a al menos dos distancias distintas del sensor LiDAR, a lo largo de al menos tres ejes de medición,

c) una etapa de estimación (EST) de la amplitud y la dirección del viento en cualquier instante (t) en el conjunto de puntos de estimación y la estimación se realiza por medio de la optimización por un método de mínimos cuadrados recursivos ponderados de una función de coste  $J(t)$  que utiliza al menos los datos de los puntos de medición (PM), datos de coherencia espacial de la velocidad del viento, datos de coherencia temporal de la velocidad del viento, así como datos que califican la calidad de las mediciones realizadas en los puntos de medición, y dicha función de coste  $J(t)$  en cualquier instante (t) se escribe de la siguiente forma:

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

donde  $\omega$  es un vector ordenado formado por todas las componentes de la velocidad de los puntos del espacio donde se estima el viento,  $\hat{\omega}(0)$  es la estimación de la velocidad del viento en el instante 0,  $P_0$ ,  $Q$ ,  $R_s$  y  $R_m$  son matrices de ponderación de dimensión adecuada, y  $C_s$ ,  $C_m$  son matrices que tienen en cuenta la velocidad del viento y los ruidos de la medición.

d) una etapa de reconstrucción (MOD 3D), en tiempo real y en un sistema de referencia definido, del campo de viento incidente en tres dimensiones (3D) a partir de las amplitudes y las direcciones del viento estimadas y medidas para cada punto de dicho mallado (MA).

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la medición  $m$  de la amplitud y la dirección del viento en un punto de medición (PM) viene dada por una relación de la forma:

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

donde  $v_{j,x}(k)$ ,  $v_{j,y}(k)$ ,  $v_{j,z}(k)$  son valores de la velocidad del viento proyectados sobre un sistema de referencia dado en el instante inicial (k), y  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  con  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  son los coeficientes de medición, que vienen dados como,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\phi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\phi_j) \end{cases}$$

donde  $\theta_j$ ,  $\phi_j$ ,  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  son el cenit y el acimut, respectivamente, del eje de medición en un sistema de coordenadas esféricas.

3. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque las mediciones de la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medición (PM) se realizan con una frecuencia de muestreo de al menos 0,25 Hz.

4. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque las mediciones de la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medición (PM) se toman al menos a dos distancias diferentes a lo largo del eje de medición.

5. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque las mediciones de la amplitud y la dirección del viento se realizan a lo largo de al menos tres ejes de medición.

6. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la coherencia espacial de la velocidad del viento a lo largo de los ejes x, y y z de un sistema de referencia cartesiano se estima mediante una

fórmula del tipo:

$$C_s \omega \approx 0$$

5 con

$$C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

donde:

- 10
- $C_l$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje x longitudinal y
  - $C_t$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje lateral y y
  - $C_v$  caracteriza la variación de la velocidad del viento para un dominio de estimación a lo largo del eje vertical z y

15 el vector  $\omega$  es un vector ordenado compuesto por todas las componentes de la velocidad del viento en los puntos del espacio donde se estima el viento.

7. Método de acuerdo con la reivindicación anterior, caracterizado porque la coherencia espacial de la velocidad del viento a lo largo de los ejes x, y y z del sistema de referencia cartesiano se estima con las siguientes hipótesis:

- 20
- La variación de la velocidad del viento a lo largo del eje longitudinal x es pequeña y la derivada parcial  $dv_x/dx$  es relativamente pequeña a lo largo del eje longitudinal,
  - el viento cambia suavemente a lo largo del eje lateral y y la derivada parcial  $dv_x/dy$  es pequeña a lo largo del eje lateral y,
  - el viento cambia con una ley de potencia a lo largo del eje vertical z que viene dada por:

$$v_l = v_{lr} \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

25 Donde alfa es un exponente de la ley de potencia,  $v_l$  es el viento longitudinal a una altitud z sobre el suelo, y  $z_r$  una altitud de referencia.

30 8. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la calidad de las mediciones realizadas por el sensor LiDAR está representada por un modelo de la forma:

$$C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

35 Donde  $\epsilon_m$  describe el ruido de la medición.

9. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la estimación de las amplitudes y las direcciones del campo de viento en un instante (t) sobre el conjunto de puntos de estimación viene dada por la siguiente fórmula:

40

$$\omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

donde K representa una matriz auxiliar y C es una matriz definida por:

$$C = \begin{bmatrix} C_s \\ C_m \end{bmatrix}$$

45 10. Producto de programa informático caracterizado porque comprende instrucciones de código dispuestas para implementar las etapas de un método de adquisición y modelización por un sensor LiDAR de un campo de viento

incidente de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho programa se ejecuta en una unidad de procesamiento de dicho sensor LiDAR.

5 11. Sensor LiDAR caracterizado porque comprende en memoria las instrucciones de código de un producto de programa informático de acuerdo con la reivindicación anterior y dispuesto para ejecutar dicho producto de programa informático.

10 12. Aerogenerador 1 caracterizado porque dicho aerogenerador 1 comprende un sensor LiDAR 2 de acuerdo con la reivindicación anterior.

13. Aerogenerador 1 de acuerdo con la reivindicación anterior caracterizado porque dicho sensor LiDAR se dispone en la góndola de dicho aerogenerador.

15 14. Método de control y/o monitorización de un aerogenerador 1 equipado con un sensor LiDAR 2 y un autómata de control, caracterizado porque se llevan a cabo las siguientes etapas

20 i) Una etapa de elaboración de una estrategia de control (CON) por anticipación de dicho aerogenerador explotando la reconstrucción del campo de viento incidente tridimensional y en tiempo real obtenida mediante el método de adquisición y modelización por un sensor LiDAR de un campo de viento incidente de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 10,

ii) Una etapa de control (PIL) que integra la estrategia de control elaborada y que consiste en controlar el ángulo de las palas 7 o la orientación de una góndola 3.

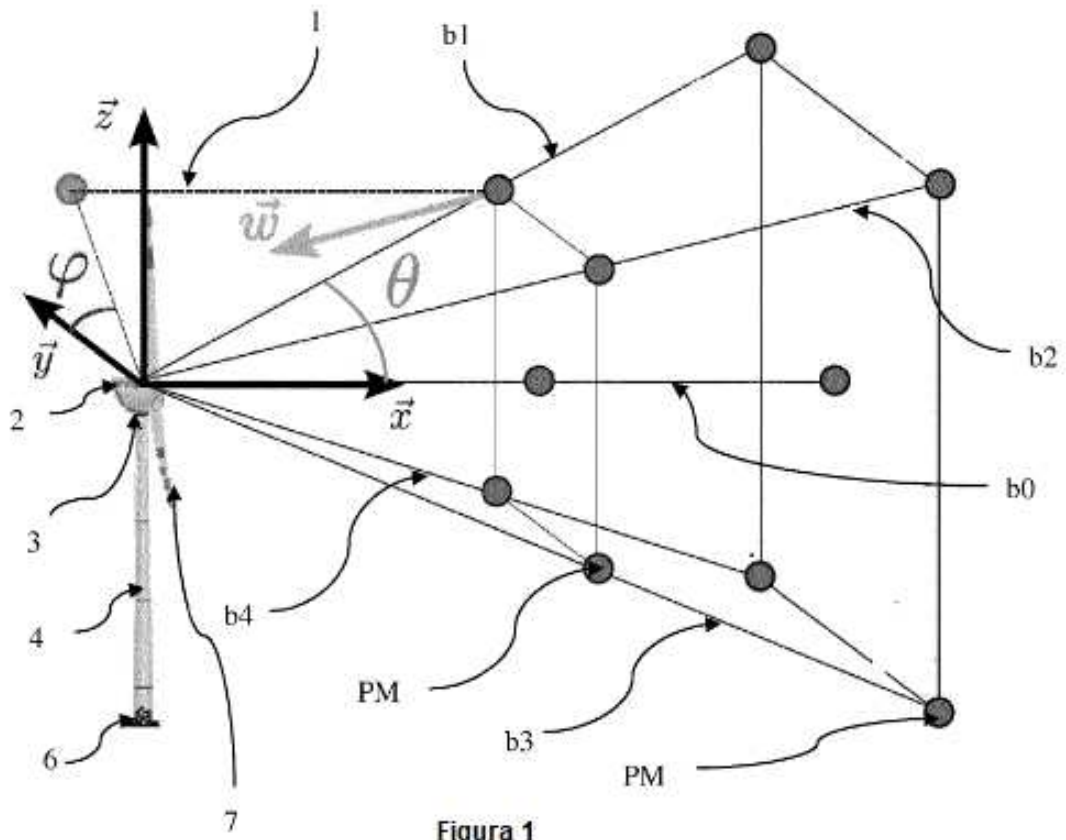


Figura 1

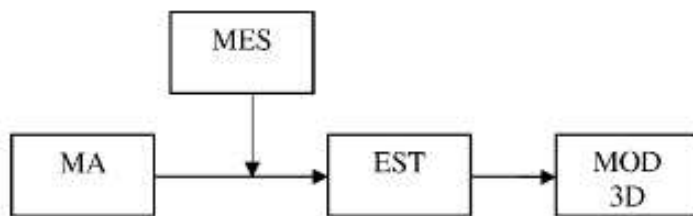


Figura 2

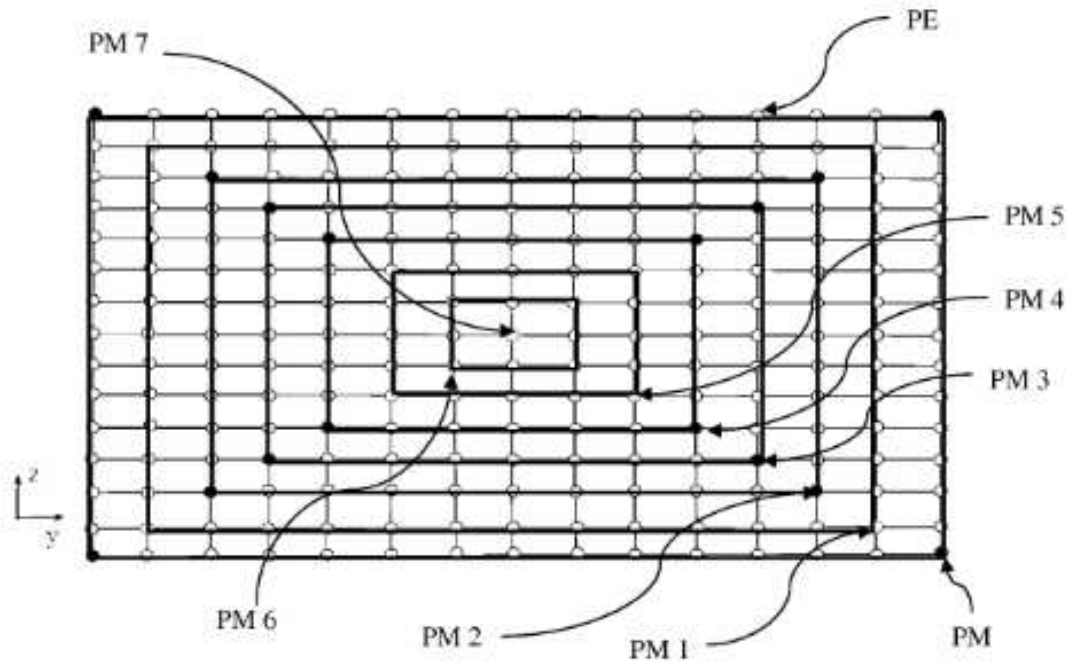


Figura 3

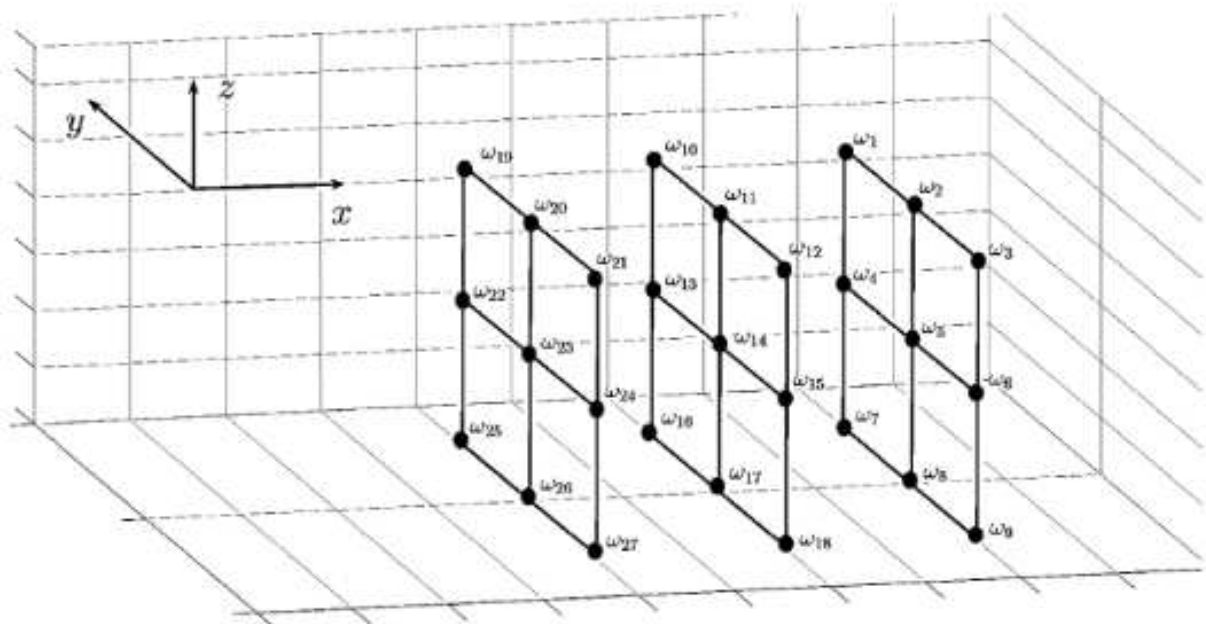


Figura 4

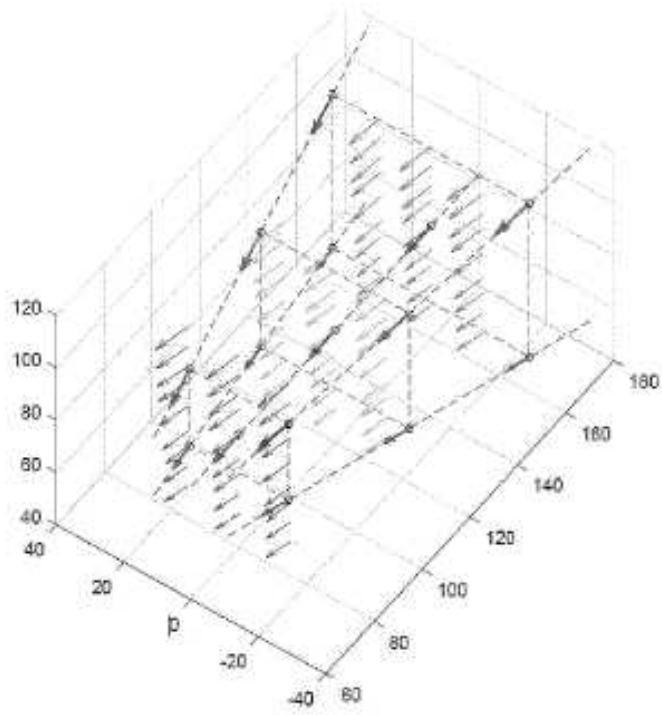


Figura 5

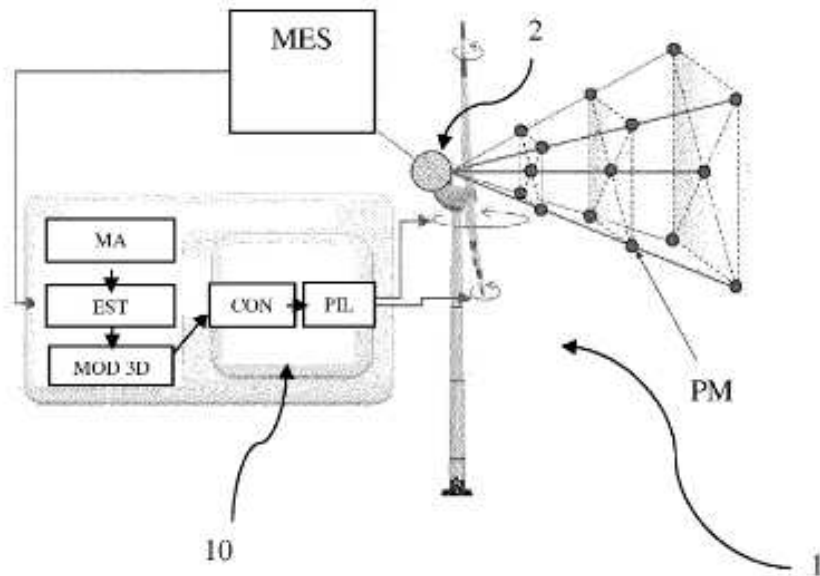


Figura 6