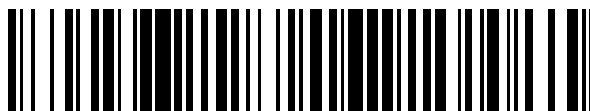


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 768 178**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2014** **E 14306720 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.10.2019** **EP 2876302**

54 Título: **Procedimiento de control y supervisión de una turbina eólica por medio de una estimación de la velocidad del viento utilizando un sensor LIDAR**

30 Prioridad:

25.11.2013 FR 1361600

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

22.06.2020

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 avenue de Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**BAYON, BENOÎT y
CHAUVIN, JONATHAN**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 768 178 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

Procedimiento de control y supervisión de una turbina eólica por medio de una estimación de la velocidad del viento utilizando un sensor LIDAR

5 La presente invención se refiere al campo de las energías renovables y se refiere más particularmente a la medición del recurso de las turbinas eólicas, el viento, para fines de control de las turbinas eólicas (orientación, regulación de par y de la velocidad).

10 Una turbina eólica permite transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica. Para la conversión del viento en energía eléctrica, se compone de los siguientes elementos:

15 - un mástil que permite colocar un rotor a una altura suficiente para permitir su movimiento (necesario para las turbinas eólicas de eje horizontal) o para colocar este rotor a una altura que le permita ser impulsado por un viento más fuerte y regular que a nivel del suelo. El mástil alberga generalmente una parte de los componentes eléctricos y electrónicos (modulador, control, multiplicador, generador, ...);

20 - una góndola montada en la parte superior del mástil, que alberga los componentes mecánicos, neumáticos, algunos componentes eléctricos y electrónicos, necesarios para el funcionamiento de la máquina. La góndola se puede girar para orientar la máquina en la dirección correcta;

25 - un rotor, fijado a la góndola, que comprende varias palas (normalmente tres) y la nariz de la turbina eólica. El rotor es impulsado por la energía del viento, y está conectado por un árbol mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de engranajes de cambio variable de velocidades y árbol mecánico) a una máquina eléctrica (generador eléctrico...) que convierte la energía recogida en energía eléctrica. El rotor está potencialmente dotado de sistemas de control tales como palas de ángulo variable o frenos aerodinámicos;

30 - una transmisión, compuesta por dos ejes (árbol mecánico del rotor y árbol mecánico de la máquina eléctrica) conectados por una transmisión (engranaje de cambio variable de velocidades).

Desde principios de los años 90, la energía eólica ha experimentado un resurgimiento de interés, en particular en la Unión Europea, donde la tasa de crecimiento anual es de aproximadamente del 20 %. Este crecimiento se atribuye a la posibilidad inherente de la generación de electricidad sin emisiones de carbono. Con el fin de sostener este crecimiento, el rendimiento de las turbinas eólicas debe seguir mejorando. La perspectiva de aumento de producción de energía eólica requiere el desarrollo de herramientas de producción eficaces y de herramientas de control avanzado para mejorar los rendimientos de las máquinas. Las turbinas eólicas están diseñadas para producir electricidad al menor precio posible. Por consiguiente, las turbinas eólicas se construyen generalmente para alcanzar su máximo rendimiento a velocidades de viento de aproximadamente 15 m/s. No es necesario diseñar las turbinas eólicas para maximizar su rendimiento a velocidades de viento más elevadas, ya que estas son poco frecuentes. A velocidades de viento superiores a 15 m/s, es necesario perder una parte de la energía adicional contenida en el viento a fin de evitar daños en la turbina eólica. Por lo tanto, todas las turbinas eólicas están diseñadas con un sistema de regulación de potencia.

45 Para esta regulación de potencia, los controladores están diseñados para turbinas eólicas de velocidad variable. Los objetivos de los controladores son maximizar la potencia eléctrica recuperada, minimizar las fluctuaciones en la velocidad del rotor y minimizar la fatiga y los momentos extremos en la estructura (palas, mástil y plataforma).

Para optimizar el control, es importante conocer la velocidad del viento en el rotor de la turbina eólica. Para ello, se han desarrollado diferentes técnicas.

50 Según una primera técnica, el uso de un anemómetro permite estimar la velocidad del viento en un punto, pero esta tecnología imprecisa no permite medir todo el campo de viento ni conocer los componentes tridimensionales de la velocidad del viento.

55 Según una segunda técnica, se puede utilizar un sensor LIDAR (acrónimo de la expresión anglófona "light detection and ranging") (que puede ser traducido por teledetección por láser). El LIDAR es una tecnología de teledetección o de medición óptica basada en el análisis de las propiedades de un haz devuelto a su emisor. Este procedimiento se utiliza en concreto para determinar la distancia a un objeto mediante un láser de impulsos. A diferencia del radar basado en un principio similar, el LIDAR utiliza luz visible o infrarroja en lugar de ondas de radio. La distancia a un objeto o a superficie viene dada por la medición del retardo entre el impulso y la detección de la señal reflejada.

60 En el campo de las turbinas eólicas, el sensor LIDAR se está anunciando como un sensor indispensable para el correcto funcionamiento de las grandes turbinas eólicas, especialmente a medida que aumenta su tamaño y potencia. (Hoy en día 5 MW, pronto 10 MW). Este sensor permite la medición remota del viento, permitiendo inicialmente calibrar las turbinas eólicas para que puedan proporcionar la máxima potencia (optimización de la curva de potencia). Para esta etapa de calibración, el sensor puede ser colocado en el suelo y orientado verticalmente (perfilar), lo que permite

medir la velocidad del viento y su dirección, así como el gradiente de viento según la altitud. Esta aplicación es especialmente crítica ya que permite conocer el recurso productor de energía. Esto es importante para los proyectos eólicos, ya que condiciona la fiabilidad financiera del proyecto.

5 Una segunda aplicación es la colocación de este sensor en la góndola de la turbina eólica, para medir el campo de viento frente a la turbina eólica mientras se orienta casi horizontalmente. A priori, la medición del campo de viento frente a la turbina eólica permite conocer de antemano la turbulencia que la turbina eólica encontrará unos momentos después. Sin embargo, las técnicas actuales de control y supervisión de una turbina eléctrica no permiten tener en cuenta una medición realizada por un sensor LIDAR mediante la estimación precisa de la velocidad del viento en el rotor.

Los documentos EP2581761 A1 y "A spectral model for evaluating the effect of wind evolution on wind turbine preview control" de Laks Jason y col., 2013 ACC, IEEE, 17 de junio de 2013, muestran técnicas de estimación del viento basadas en un sensor LIDAR.

El objeto de la invención se refiere a un procedimiento para controlar y/o supervisar una turbina eólica, el control y/o la supervisión teniendo en cuenta una estimación de la velocidad del viento en el rotor obtenida mediante un estimador y un sensor LIDAR. El estimador de viento en el rotor se construye a partir de una representación del viento, un modelo del sensor LIDAR y un modelo de propagación del viento. La invención permite conocer y estimar de antemano los componentes tridimensionales del viento en el rotor.

El procedimiento según la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control y/o supervisión de una turbina eólica según la reivindicación 1, equipada con un sensor LIDAR que realiza una medición relativa al viento en un punto situado aguas arriba de dicha turbina eólica. Para el procedimiento, se realizan las siguientes etapas:

- a) se adquiere una señal correspondiente a dicha medición de dicho sensor LIDAR;
- b) se construye un estimador de viento en el rotor de la turbina eólica mediante una representación del viento, un modelo de dicho sensor LIDAR, y un modelo de propagación del viento, estando dicho estimador de viento en el rotor que conecta la señal del sensor a la velocidad del viento en el rotor;
- c) se estima la velocidad del viento en el rotor de dicha turbina eólica aplicando dicho estimador de viento en el rotor a dicha señal adquirida; y
- d) se controla y/o supervisa dicha turbina eólica mediante dicha velocidad de viento estimada.

Según una realización de la invención, se controla dicha turbina eólica mediante el control del ángulo de inclinación de las palas de dicha turbina eólica y/o del par eléctrico de recuperación de un generador de dicha turbina eólica.

Según una realización de la invención, se lleva a cabo la supervisión del par eléctrico de recuperación de un generador de dicha turbina eólica en función de la velocidad de viento estimada.

La representación del viento es un modelo de frecuencia, expresado en la forma de un espectro de Von Karman.

Preferentemente, la representación del viento es conocida previamente o determinada en tiempo real o determinada arbitrariamente.

Ventajosamente, dicho modelo de dicho sensor LIDAR depende de al menos un ángulo de medición (θ, ϕ) de dicho sensor LIDAR y una característica volumétrica de dicho sensor LIDAR.

Procedimiento según la afirmación 5, en el que dicho modelo de dicho sensor LIDAR $M(v)$ se escribe en el dominio de la frecuencia por una relación de la forma:

$$M(v) = e^{2i\pi v \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}} L(v) \begin{bmatrix} W_x(v) \\ W_y(v) \\ W_z(v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \cos(\phi) \text{sen}(\theta) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) \text{ y } \bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\bar{w})^2 \Gamma^2},$$

siendo $L(v)$ la transformada de Fourier de la función

$$\tau = \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}},$$

l_0 la distancia focal de dicho sensor LIDAR, l la distancia de medición, θ y ϕ los ángulos de orientación de

dicho sensor LIDAR, w la velocidad media del viento, Γ la constante de Rayleigh, K un factor de regulación, y W_x, W_y, W_z los componentes de la velocidad del viento en dicho punto de medición.

Según un aspecto de la invención, dicha respuesta de frecuencia de dicho estimador de viento en el rotor $F(\nu)$

5

se escribe por una relación de la forma: $F(\nu) = e^{-2i\pi\nu \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}} W_l(\nu) M_R(\nu) (M_R(\nu) M_R^T(\nu) + \alpha^2)^{-1}$ siendo

$$M_R(\nu) = L(\nu) \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(\nu) \\ W_y(\nu) \\ W_z(\nu) \end{bmatrix},$$

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) \quad y$$

10 $W_l(\nu) = [W_x(\nu) \ 0 \ 0]$, $L(\nu)$ la transformada de Fourier de la función

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\bar{a}\bar{w})^2 \Gamma^2}, \quad \tau = \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}},$$

15 l_0 la distancia focal de dicho sensor LIDAR, l la distancia de medición, θ y ϕ los ángulos de orientación de dicho sensor LIDAR, w la velocidad media del viento, Γ la constante de Rayleigh, K un factor de regulación, y W_x, W_y, W_z los componentes de la velocidad del viento en dicho punto de medición y a un parámetro de regularización.

15

Además, dicho estimador de viento en el rotor puede ser construido utilizando un procedimiento de ventana aplicado a dicha respuesta de frecuencia de dicho estimador de viento en el rotor.

Según la invención, se construye dicho modelo de propagación del viento según al menos una de las hipótesis:

20

- el vector del viento es el mismo en los planos verticales perpendiculares a la dirección del viento,
- la turbulencia del viento se propaga a la velocidad media del viento.

La invención se refiere además a una turbina eólica, en concreto a una turbina eólica instalada en el mar, equipada con un sensor LIDAR cuyo punto de medición está situado aguas arriba de dicha turbina eólica. Dicha turbina eólica comprende medios de control que implementan el procedimiento de control de la turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

25

Ventajosamente, dicho sensor LIDAR se dispone en la góndola de dicha turbina eólica.

30

Presentación breve de las figuras

Otras características y ventajas del procedimiento según la invención se pondrán de manifiesto con la lectura de la siguiente descripción de ejemplos no limitativos de realizaciones, con referencia a las figuras anexas y descritas a continuación.

35

La figura 1 ilustra una turbina eólica equipada con un sensor LIDAR según la invención.

La figura 2 ilustra las diferentes etapas del procedimiento según la invención.

La figura 3 ilustra un ejemplo de representación de viento.

40

La figura 4 ilustra las características tridimensionales de la medición del sensor LIDAR.

La figura 5 ilustra una respuesta de impulso del LIDAR bajo la hipótesis de turbulencia congelada de Taylor, para un LIDAR que apunta en la dirección opuesta al vector medio del viento, para tres distancias focales de medición.

Las figuras 6a a 6g ilustran las diferentes etapas del procedimiento de ventana para un ejemplo.

Las figuras 7a a 7d ilustran las etapas del procedimiento según la invención para un ejemplo.

45

Descripción detallada de la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control y/o supervisión de una turbina eólica de eje horizontal en tierra o en el mar ("offshore"), en el que la turbina eólica es controlada y/o supervisada en función de una estimación de la velocidad del viento en el rotor, siendo la turbina eólica equipada con un sensor LIDAR para llevar a cabo esta estimación.

50

Notaciones

Durante la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

- x, y, z: direcciones del punto de referencia tridimensional, siendo z el eje vertical y x la dirección principal del viento.
- w: vector de la velocidad del viento, siendo w_x, w_y, w_z los componentes del viento en el punto de referencia tridimensional, w la velocidad media del viento y W_x, W_y, W_z el espectro de los componentes del vector de velocidad.
- L_v : longitud de onda.
- σ_x : factor de escala.
- l_0 : distancia focal de dicho sensor LIDAR.
- \vec{l} : vector del eje del sensor LIDAR, se trata del vector que conecta el sensor LIDAR y el punto de medición

$$\vec{l} = \frac{\vec{OP}_M}{\|\vec{OP}_M\|}$$

con O el origen (ubicación del sensor LIDAR), y P_M el punto de medición, y se señala l la distancia de medición del LIDAR.

- θ y φ : ángulos de orientación de dicho sensor LIDAR. Estos ángulos se explican en la figura 4: el ángulo θ es el ángulo formado por la proyección del eje (A) del LIDAR en el plano (y, z), y φ es el ángulo formado por la proyección del eje (A) del LIDAR en un plano constituido por el eje x y la proyección del eje (A) del LIDAR en el plano (y, z).
- Γ : constante de Rayleigh, que se puede estimar en 1570.
- K: factor de regulación.
- $m(t)$: medición del sensor LIDAR.
- α : parámetro de ajuste del estimador que puede ser visto como la confianza en la medición, o la desviación típica del ruido de medición. Este parámetro también se denomina parámetro de regulación.
- τ : retardo representativo del tiempo de propagación del vector del viento entre el punto de medición y el plano del rotor.

La invención se refiere a un procedimiento de estimación del viento en el rotor de una turbina eólica equipada con un sensor LIDAR. El sensor LIDAR realiza una medición relativa al viento en un punto de medición, situado delante de la turbina eólica. La figura 2 representa las diferentes etapas del procedimiento según la invención:

1. Adquisición de la señal de medición (MES)
2. Construcción del estimador de viento en el rotor (EST)
3. Construcción del viento en el rotor (w_{est})
4. Control y/o supervisión de la turbina eólica (CON)

El procedimiento según la invención permite reconstruir el viento en el plano del rotor a partir de la medición del sensor LIDAR en un plano de medición. Esta representación puede servir para regular o inspeccionar la turbina eólica.

1. Adquisición de la señal de medición (MES)

El sensor LIDAR realiza una medición relativa a la velocidad del viento en un punto de medición situado aguas arriba de la turbina eólica (frente al rotor de la turbina eólica). Esta medición corresponde a la señal recibida por el sensor procedente del punto de medición en respuesta a la señal emitida por el sensor LIDAR. De hecho, por interferometría y 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, en concreto la distancia focal, así como su por su orientación. Esta medición, dependiente de la velocidad del tiempo, es un tiempo y depende de la orientación del sensor LIDAR. Esta medición se adquiere a fin de ser explotada con el fin de determinar la velocidad del viento en el rotor.

La figura 1 representa una turbina eólica 1 equipada con un sensor LIDAR 2 adaptada al procedimiento según la invención. Un sensor LIDAR 2 se utiliza para medir la velocidad del viento a una distancia dada en un punto de medición PM. Montado, por ejemplo, en la góndola de la turbina eólica 1, que se supone que está alineada con la dirección del viento, este sensor 2 mide el viento inminente, es decir, el viento que a priori se encontrará la turbina eólica. Conocer de antemano la medición del viento permite a priori proporcionar mucha información.

La figura 1 permite en concreto describir el procedimiento de medición: el sensor LIDAR 2 mide el viento en el plano de medición AM, situado delante de la turbina eólica 1, una determinada característica de medición. La proyección del punto de medición PM sobre el plano del rotor AR se indica como PR. La parte derecha de la figura ilustra un ejemplo de la representación del viento en la dirección horizontal en función de la altura.

Hay varios tipos de sensores LIDAR, por ejemplo, los sensores LIDAR escaneado o LIDAR pulsado.

2. Construcción del estimador de viento en el rotor (EST)

Durante esta etapa, se construye un estimador de viento en el rotor. El estimador de viento permite estimar la velocidad del viento (sus tres componentes) en el rotor mediante la señal del sensor LIDAR. Según la invención, el estimador de viento en el rotor se construye mediante una representación del viento, un modelo del sensor LIDAR y un modelo de propagación del viento. Este estimador es un objeto filtrante de respuesta a impulsos finitos, que acepta como entrada la medición bruta del LIDAR en el punto PM y devuelve como salida la estimación de viento en el punto PR del plano del rotor.

2.1 Representación del viento (REP W)

El viento instantáneo se define en un lugar dado como un vector compuesto por tres componentes $w_x(t)$, $w_y(t)$, $w_z(t)$. Por consiguiente, el vector de viento en un instante dado (t) y en un punto dado (x,y,z) está representado por una relación del tipo:

$$\vec{w}(x, y, z, t) = w_x(x, y, z, t)\vec{x} + w_y(x, y, z, t)\vec{y} + w_z(x, y, z, t)\vec{z}$$

Según la invención, el tipo de representación del viento utilizado puede ser conocido previamente, determinado en tiempo real o determinado arbitrariamente.

Según una realización de la invención, los tres componentes de la velocidad $w_x(t)$, $w_y(t)$, $w_z(t)$ pueden ser definidos por sus respectivos espectros W_x , W_y , W_z . Se supone que este espectro es conocido o identificado. Puede estar disponible en forma analítica, o bien en forma de cuadro o vector de datos. Por ejemplo, el espectro de Von Karman puede utilizarse para el componente x, aunque el procedimiento propuesto permite adaptarse a cualquier espectro. Según este ejemplo, se puede indicar:

$$W_x(v) = \frac{0.475\sigma_x^2 \frac{L_v}{\bar{w}}}{\left(1 + \left(2\pi v \frac{L_v}{\bar{w}}\right)^2\right)^{5/6}}$$

L_v es un parámetro llamado longitud de onda, σ_x un factor de escala que caracteriza el tamaño de la turbulencia y \bar{w} es la velocidad media del viento. Este espectro y sus parámetros pueden variar de un lugar a otro, día a día. El procedimiento según la invención permite tener en cuenta cualquier espectro. La figura 3 es un ejemplo de representación de la velocidad del viento w_x a lo largo del eje x en función del tiempo t, obtenido por el espectro de Von Karman.

2.2 Modelo de propagación del viento (MOD PRO)

Para tener en cuenta la distancia entre el punto de medición (PM) en el que se realiza una medición relativa al viento y el plano del rotor (AR) para el que se desea conocer la velocidad del viento, se modela la propagación del viento a lo largo de esta distancia.

Según una realización de la invención, el modelo de propagación del viento se construye a partir de al menos una de las siguientes hipótesis:

- Consistencia de la unidad de viento

La hipótesis de coherencia unitaria significa que el vector del viento es el mismo en los planos verticales perpendiculares a la dirección del viento.

$$w_x(x, y, z, t) = w_x(x, 0, 0, t), w_y(x, y, z, t) = w_y(x, 0, 0, t), w_z(x, y, z, t) = w_z(x, 0, 0, t)$$

- Hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor

La hipótesis de la turbulencia congelada significa que la turbulencia se propaga a la velocidad media del viento.

$$\vec{w}(x + dx, y, z, t) = \vec{w}(x, y, z, t - \frac{dx}{\bar{w}})$$

Estas dos hipótesis constituyen aproximaciones buenas para las escalas locales que están consideradas para el procedimiento según la invención.

5 2.3 Modelo de sensor LIDAR (MOD LIDAR)

La medición del sensor LIDAR se caracteriza por dos funciones. La figura 4 representa las características tridimensionales de la medición del sensor LIDAR. La primera función corresponde al eje de medición y puede ser indicada:

10

$$\vec{l} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}$$

La segunda característica corresponde a una característica espacial (o de volumen) del LIDAR. La medición $m(t)$ puede ser expresada por una relación de la forma:

15

$$m(t) = \int_0^{+\infty} \left(\vec{l}(\phi, \theta) \cdot \vec{w}(l \text{sen}(\phi), l \cos(\phi) \cos(\theta), l \cos(\phi) \text{sen}(\theta), t) \right) f(l, l_0) dl$$

$f(l, l_0)$ es la característica espacial, l_0 es la distancia focal y puede depender de la configuración del sensor LIDAR. El modelo expresado anteriormente es adaptable al tipo de sensor LIDAR (escaneado o pulsado) utilizado mediante la función f .

20

Por ejemplo, en el caso del LIDAR escaneado, esta característica espacial puede escribirse como una relación de la forma:

$$f(l, l_0) = \frac{K}{l^2 + \left(1 - \frac{l}{l_0}\right)^2 \Gamma},$$

25

en la que Γ es la constante de Rayleigh (1570), y K es un factor de regulación.

Bajo las hipótesis propuestas, la ecuación de medición del sensor LIDAR puede ponerse en forma de un producto de convolución, que admite una respuesta de frecuencia.

30

Por medio de la aplicación de la hipótesis de Taylor, se puede escribir:

$$m(t) = \int_0^{+\infty} \left(\vec{l}(\phi, \theta) \cdot \vec{w}\left(0, l \cos(\phi) \cos(\theta), l \cos(\phi) \text{sen}(\theta), t + \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) \right) f(l, l_0) dl$$

35

Por medio de elección de una coherencia unitaria, se puede escribir:

$$m(t) = \int_0^{+\infty} \left(\vec{l}(\phi, \theta) \cdot \vec{w}\left(t + \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) \right) f(l, l_0) dl$$

40 Luego, por medio del desarrollo del producto escalar:

$$m(t) = \begin{cases} \text{sen}(\phi) \int_0^{+\infty} \bar{w}_x \left(t + \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}} \right) f(l, l_0) dl \\ \cos(\phi) \cos(\theta) \int_0^{+\infty} \bar{w}_y \left(t + \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}} \right) f(l, l_0) dl \\ \cos(\phi) \text{sen}(\theta) \int_0^{+\infty} \bar{w}_y \left(t + \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}} \right) f(l, l_0) dl \end{cases}$$

Se plantea el cambio de las siguientes variables:

$$\tau = \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}, l = \frac{\bar{w} \tau}{\text{sen}(\phi)}, \bar{f}(\tau) = \frac{K}{\left(\frac{\bar{w}}{\text{sen}(\phi)} \right)^2 + \left(1 + \frac{\bar{w}}{l_0 \text{sen}(\phi)} \right)^2 \Gamma},$$

5

Se enfrenta entonces ante una ecuación del tipo:

$$m(t) = \begin{cases} \text{sen}(\phi) \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{w}_x (t + \tau) \bar{f}(\tau) dl \\ \cos(\phi) \cos(\theta) \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{w}_y (t + \tau) \bar{f}(\tau) dl \\ \cos(\phi) \text{sen}(\theta) \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{w}_y (t + \tau) \bar{f}(\tau) dl \end{cases}$$

10

Esta es la ecuación de un producto de convolución de un sistema cuya respuesta de impulso está definida por $f(\tau)$. La figura 5 ilustra un ejemplo de respuesta V a un impulso en función del tiempo para un sensor LIDAR con diferentes longitudes focales l_0 . Las abscisas están dadas por $t=l/\text{velocidad media}$

15 Por lo tanto, el sensor LIDAR se puede considerar, bajo estas hipótesis, como un sistema de convolución cuya respuesta de impulso es la siguiente:

$$\bar{f}(\tau) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\bar{w})^2 + (l_0 \text{sen}(\phi) + \bar{w})^2 \Gamma},$$

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\tau - l_0 \text{sen}(\phi))^2 + (\bar{w})^2 \Gamma^2}$$

20 o incluso

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\bar{w})^2 \Gamma^2}$$

Esto puede ser aproximado por considerando el orden de la constante Γ . La respuesta de frecuencia del sistema puede, por lo tanto, escribirse de la siguiente forma

$$e^{2i\pi\nu \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}} L(\nu) \text{ en la que } L(\nu) \text{ es la transformada de Fourier de la función } \bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right).$$

25

Estas etapas son sistemáticas, y dependen sólo de la velocidad media del viento y de la característica del volumen. En la práctica, se puede obtener muy fácilmente un vector de valor correspondiente a la función $L(\nu)$.

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}\right)$$

Si la función no es simétrica alrededor de l_0 , como en el caso del sensor LIDAR escaneado, ésta sigue siendo una buena aproximación. En el caso del sensor LIDAR pulsado, la función es simétrica. Dado que la función es simétrica, la respuesta de frecuencia $L(\nu)$ es real.

5 Por consiguiente, el modelo (la medición) del sensor LIDAR, bajo las hipótesis mencionadas, puede escribirse en el dominio de la frecuencia como sigue:

$$M(\nu) = e^{2i\pi\nu \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}} L(\nu) \begin{bmatrix} \sin(\phi) & \cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(\nu) \\ W_y(\nu) \\ W_z(\nu) \end{bmatrix}$$

10 2.4 Construcción del estimador de viento

Los modelos del sensor LIDAR, de propagación del viento y la representación del viento sirven como entrada para la construcción del estimador de viento en el rotor.

15 El procedimiento de reconstrucción se lleva a cabo en dos tiempos. En el primer tiempo, se calcula la respuesta de frecuencia óptima del estimador. En un segundo tiempo, se calcula la respuesta de impulso de un sistema de convolución con esta respuesta de frecuencia.

20 Según la invención, se desea estimar al menos un componente de la velocidad del viento en el rotor, en concreto el componente longitudinal en el plano del rotor. Alternativamente, el estimador permite estimar los tres componentes de la velocidad del viento. Para ello, se busca minimizar un error de estimación $e(t)$, que se define como la diferencia entre la estimación de la velocidad en el plano del rotor y la velocidad real en este plano. Así, el espectro del error de estimación $E(\nu)$ puede escribirse como:

$$E(\nu) = \begin{bmatrix} 1 & -F(\nu) e^{2i\pi\nu \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}} L(\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(\nu) \\ W_y(\nu) \\ W_z(\nu) \end{bmatrix}$$

También se plantean las siguientes notaciones:

$$30 W_l(\nu) = \begin{bmatrix} W_x(\nu) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M(\nu) = e^{2i\pi\nu \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}} L(\nu) \begin{bmatrix} \sin(\phi) & \cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(\nu) \\ W_y(\nu) \\ W_z(\nu) \end{bmatrix} = e^{2i\pi\nu \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}} M_R(\nu)$$

35 La solución que minimiza la densidad espectral de potencia del error de estimación se escribe de la siguiente manera

$$F(\nu) = W_l(\nu) M^*(\nu) (M(\nu) M^*(\nu) + \alpha^2)^{-1}$$

$$(M(\nu) M^*(\nu) + \alpha^2)^{-1} = (M_R(\nu) M_R^T(\nu) + \alpha^2)^{-1}$$

Se puede observar en esta forma que los términos $W_l(\nu)$ y son términos reales. Así, la respuesta de frecuencia del estimador de viento $F(\nu)$ en el rotor puede escribirse como:

$$40 F(\nu) = e^{-2i\pi\nu \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}} W_l(\nu) M_R(\nu) (M_R(\nu) M_R^T(\nu) + \alpha^2)^{-1}$$

Para construir el estimador de viento en el rotor mediante esta respuesta de frecuencia, se pueden utilizar varios procedimientos, en concreto un procedimiento de ventana, en particular utilizando una ventana de Hanning. Para este procedimiento, se desarrolla una técnica que permite crear un filtro causal que presenta una característica de frecuencia de la siguiente forma:

$$F(\nu) = e^{-2i\pi\nu\tau} S(\nu)$$

La creación del estimador se realiza en dos etapas:

- en un primer tiempo, se calcula la respuesta de impulso del filtro no causal del filtro continuo que tiene la respuesta de frecuencia $S(\nu)$.
- la respuesta de impulso es entonces desplazada en el tiempo para obtener la respuesta de impulso del filtro que presenta la característica deseada. Las muestras se seleccionan entonces a una frecuencia de muestreo dada, en una ventana dada. La aproximación obtenida es entonces de calidad.

Las figuras 6a a 6g ilustran las diferentes etapas del procedimiento de ventana para un ejemplo. Para este ejemplo, se define un filtro para el que se desea la siguiente respuesta de frecuencia: 1 entre 0 y 2 Hz y 4-5 Hz, 0 en otras partes, el retardo deseado es de 5 s. La figura 6a ilustra esta respuesta deseada.

Por lo tanto, la primera etapa consiste en calcular la respuesta de impulso que presenta la respuesta de frecuencia presentada en la figura 6b.

Para ello, se define un vector de frecuencia de la forma: $[0, 1*Fs/N, 2*Fs/N, \dots, (n-1)*Fs/N]$, siendo Fs la frecuencia de muestreo, y N el número de muestras.

Para estas frecuencias, se define la respuesta de frecuencia del filtro:

$$[S(0), S(Fs/N), S(2Fs/N), \dots, S((N-1)Fs/N)]$$

La respuesta deseada es la respuesta de un filtro discreto, simétrico alrededor del eje.

Por lo tanto, se define el siguiente vector:

$$[S(0) + S((N-1)Fs/N), S(Fs/N) + S((N-2)Fs/N), \dots, S((N-1)Fs/N) + S(Fs/N)]$$

Por aplicación de la transformada inversa discreta de Fourier, se obtiene después de la reorganización la respuesta de impulso ID ilustrada en la figura 6b.

Esta respuesta de impulso contiene N muestras, y se muestrea a una frecuencia de muestreo de Fs . El estimador con esta respuesta de impulso es un filtro discreto, no causal, con la respuesta de frecuencia $S(\nu)$. La respuesta de frecuencia deseada es del tipo $F(\nu) = e^{\Lambda 2i\pi\nu\tau} S(\nu)$. La parte $e^{\Lambda 2i\pi\nu\tau}$ es un retardo de tiempo τ . La respuesta de impulso del filtro con la respuesta de frecuencia deseada puede por lo tanto ser obtenida después de un simple desfase. La figura 6c representa la respuesta de impulso RET deseada obtenida por el desfase del ID. Esta figura ilustra la respuesta de impulso ideal ID así como la respuesta de impulso obtenida después de un retardo RET por una traslación T .

La siguiente etapa consiste en aproximar esta respuesta de impulso mediante una ventana. Se pueden utilizar varios tipos de ventana: en general, la ventana de Hanning ofrece una excelente aproximación.

La ventana de Hanning está definida por:

$$H(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi(t - \frac{Ta}{2})}{Ta}\right), & t \in [-Ta, Ta] \\ 0 & \text{en otra parte} \end{cases}$$

La respuesta de impulso se multiplica por $H(t, \tau)$, o τ que corresponde al retardo deseado. El parámetro Ta permite elegir la calidad de la aproximación, y está comprendido entre 0 y τ .

La figura 6d muestra cómo la ventana permite seleccionar un intervalo. Esta figura indica la ventana FE y la respuesta de impulso ideal ID, en función del tiempo.

La aplicación de estas etapas permite obtener un vector. Los valores de este vector deben ser regularizados de manera que su suma sea igual a $S(0)$, la respuesta del estimador de viento a frecuencia cero. Después de la regularización, los valores de este vector dan los coeficientes de un filtro FIR discreto a la frecuencia de muestreo F_s . La figura 6e ilustra la respuesta de frecuencia del filtro FIR en función del tiempo.

Si se observa la respuesta de frecuencia de este filtro observando su respuesta de frecuencia M y su fase P en función de la frecuencia f , como las presentadas en las figuras 6f y 6g respectivamente, se puede ver que la fase corresponde perfectamente al retardo deseado (la curva obtenida se superpone sustancialmente a la curva deseada), y que la amplitud es una buena aproximación de las especificaciones.

La construcción del estimador es, por lo tanto, un procedimiento muy genérico que permite implementar un estimador (filtro) cuya respuesta en frecuencia es conocida, que presenta una forma similar a la forma de solución del problema de filtrado óptimo. La contribución es la combinación de la modelación, la conformación del problema del estimador y su solución, y el uso del procedimiento de ventana para implementar el filtro.

La carácter genérico es proporcionado por el hecho de que el procedimiento funciona independientemente de la característica del sensor LIDAR, independientemente de la representación del viento. Siempre se puede encontrar e implementar una solución mediante el procedimiento de ventana. Así, el estimador de viento en el rotor es válido para todas las representaciones de viento y todos los modelos del sensor LIDAR.

Otro punto importante es que todos los cálculos son eficaces en el sentido de la complejidad algorítmica, es decir, son rápidos (el tiempo de cálculo no es importante). Este procedimiento permite crear un objeto de filtro, que puede ser fácilmente implementado. Es este objeto el que asegurará la reconstrucción del viento en el rotor.

3. Construcción del viento en el rotor (W_{est})

Durante esta etapa, la velocidad del viento en el rotor se estima mediante la medición adquirida y el estimador de viento del rotor. Para ello se aplica el estimador construido a la señal adquirida en el punto de medición.

Preferentemente, la estimación se refiere a los tres componentes de la velocidad del viento en el rotor. Alternativamente, la estimación de la velocidad del viento se refiere al menos a un componente de la velocidad del viento, en particular al componente longitudinal de la velocidad del viento.

Dado que el tiempo de cálculo es pequeño en relación con la aplicación, es posible determinar con antelación la velocidad del viento en el rotor.

4. Control y/o supervisión de la turbina eólica (CON)

En función de la velocidad estimada del viento w en el rotor, la turbina eólica puede ser controlada para optimizar la energía recuperada. Según la invención, se puede controlar el ángulo de inclinación de las palas y/o el par eléctrico de recuperación del generador de la turbina eólica en función de la velocidad del viento. Se pueden utilizar otros tipos de dispositivo de regulación.

Según una realización de la invención, el ángulo de inclinación de las palas y/o el par eléctrico de recuperación están determinados mediante mapas de la turbina eólica en función de la velocidad del viento en el rotor. Por ejemplo, se puede aplicar el procedimiento de control descrito en la solicitud de patente FR 2976630 A1 (US 2012-0321463).

El control de la turbina eólica permite optimizar la energía recuperada. Además, mediante este control, el LIDAR permite reducir las cargas sobre la estructura, cuyas palas y mástil representan el 54 % del coste. Por consiguiente, el uso de un sensor LIDAR permite la optimización de la estructura de la turbina eólica, reduciendo así los costes y el mantenimiento.

Además, la estimación del viento en el rotor puede utilizarse para la supervisión de la turbina eólica. Por ejemplo, puede utilizarse para la supervisión en tiempo real de la turbina eólica o para el diagnóstico de un fallo en la misma. Según una realización de la invención, la supervisión del par eléctrico de recuperación de un generador de dicha turbina eólica se lleva a cabo en función de la velocidad de viento estimada.

Alternativamente, la estimación de la velocidad del viento en el rotor puede utilizarse en conjunto para el control y la supervisión de la turbina eólica.

La invención también se refiere a una turbina eólica, en concreto una turbina eólica instalada en el mar equipada con un sensor LIDAR. Según una realización de la invención, el sensor LIDAR puede disponerse en la góndola de la turbina eólica. El sensor LIDAR está dirigido de tal manera que realiza una medición de viento aguas arriba de la turbina eólica. La turbina eólica comprende medios de control, por ejemplo el control del ángulo de paso, para implementar el procedimiento según la invención.

Ejemplo de aplicación

En esta sección, se detalla a modo de ejemplo las etapas de creación del estimador que permite la reconstrucción del viento en el plano del rotor.

5

- Espectro del viento

Se supone que este espectro es conocido o identificado. Puede estar disponible en forma analítica, o bien en forma de cuadro o vector de datos. Para este ejemplo, el espectro del viento se expresa según el espectro de Von Karman.

10

- Característica de frecuencia del sensor LIDAR.

La característica del sensor LIDAR se da en forma de una función de la distancia focal l_0 . La función es una integral en el eje: es una integral ponderada del producto escalar del vector de viento en un punto del eje sobre el eje al que apunta el LIDAR. En el caso de un sensor LIDAR escaneado, la función de ponderación es

15

$$f(l, l_0) = \frac{K}{l^2 + \left(1 - \frac{l}{l_0}\right)^2 \Gamma}$$

La característica de frecuencia del sensor LIDAR se puede obtener en dos etapas:

$$\tau = \frac{l \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}$$

la primera pasa por el cambio de la variable $\tau = \frac{l \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}$, después por el reajuste de la característica alrededor de

$$\frac{l_0 \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}$$

La respuesta de frecuencia puede entonces caracterizarse por una solución analítica, o numérica por medio de la transformada de Fourier discreta. Se dispone entonces la respuesta de frecuencia del sensor LIDAR:

20

$$e^{2i\pi v \frac{l_0 \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}} L(v)$$

- Construcción del estimador de viento

Entonces se puede calcular la respuesta óptima del estimador de viento dada por:

25

$$F(v) = e^{-2i\pi v \frac{l_0 \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}} W_l(v) M_R(v) (M_R(v) M_R^T(v) + \alpha^2)^{-1}$$

$$W_l(v) = \begin{bmatrix} W_x(v) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_R(v) = L(v) \begin{bmatrix} \operatorname{sen}(\phi) & \cos(\phi) \operatorname{sen}(\theta) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(v) \\ W_y(v) \\ W_z(v) \end{bmatrix}$$

30

Para ello, se implementa el procedimiento de ventana para crear el filtro que presenta la respuesta de frecuencia .

$$F(v) = e^{-2i\pi v \frac{l_0 \operatorname{sen}(\phi)}{\bar{w}}} W_l(v) M_R(v) (M_R(v) M_R^T(v) + \alpha^2)^{-1}$$

Así se obtiene la respuesta de frecuencia como se ilustra en las figuras 7a y 7b. En la figura 7a, se observa que para la amplitud M la curva del punto de consigna CONS está casi superpuesta a la curva estimada EST. En la Fig. 7b relativa a la fase P, se observa que las curvas de la consigna CONS y la estimación EST están bastante cercanas.

35

- Estimación de la velocidad del viento

40

La señal medida por el sensor LIDAR se pasa entonces al estimador construido para recuperar la estimación del viento en el plano del rotor. La figura 7c representa las curvas relativas a la velocidad del viento para las señales de la consigna CONS (correspondiente a la velocidad del viento real en el plano del rotor), el estimador EST (correspondiente a la velocidad del viento calculada por el estimador) y el retardo RET (correspondiente a la respuesta de impulso del filtro ideal que se ha retrasado. Este retardo corresponde al retraso de llegada del viento en el plano

del rotor). La figura 7d permite una comparación del error de velocidad para el estimador óptimo (OPT) y el retardo RET.

- 5 Puede observarse que el estimador según la invención permite estimar con exactitud la velocidad del viento en el rotor. Así, el control de la turbina eólica puede adaptarse de manera eficaz en función del viento.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control y/o supervisión de una turbina eólica equipada con un sensor LIDAR que realiza una medición relativa al viento en un punto situado aguas arriba de dicha turbina eólica, de forma que se realizan las siguientes etapas:

- a) se adquiere una señal correspondiente a dicha medición de dicho sensor LIDAR;
- b) se construye un estimador del viento en el rotor de la turbina eólica mediante una representación del viento que es un modelo de frecuencia, expresado en forma de un espectro de Von Karman, de un modelo de dicho sensor LIDAR que depende de al menos un ángulo de medición (θ, φ) de dicho sensor LIDAR y de una característica volumétrica de dicho sensor LIDAR, y de un modelo de propagación del viento, siendo dicho estimador del viento en el rotor un objeto de filtro de respuesta de impulsos finitos que conecta la señal del sensor a la velocidad del viento del rotor, llevándose la construcción de dicho estimador del viento a cabo en dos tiempos: en un primer tiempo se calcula la respuesta de frecuencia óptima del estimador, y en un segundo tiempo se calcula la respuesta de impulso de un sistema de convolución que tiene esta respuesta de frecuencia;
- c) se estima la velocidad del viento en el rotor de dicha turbina eólica aplicando dicho estimador del viento en el rotor a dicha señal adquirida; y
- d) se controla y/o supervisa dicha turbina eólica mediante dicha velocidad de viento estimada.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se controla dicha turbina eólica mediante el control del ángulo de inclinación de las palas de dicha turbina eólica y/o del par eléctrico de recuperación de un generador de dicha turbina eólica.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se lleva a cabo la supervisión del par eléctrico de recuperación de un generador de dicha turbina eólica en función de la velocidad de viento estimada.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que dicha representación del viento se conoce previamente o determina en tiempo real o determina arbitrariamente.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho modelo de dicho sensor LIDAR $M(v)$ se escribe en el dominio de la frecuencia por una relación de la forma:

$$M(v) = e^{2i\pi v \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}} L(v) \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(v) \\ W_y(v) \\ W_z(v) \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) \quad \bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \text{sen}^2(\phi)}{(\bar{w})^2 \Gamma^2},$$

siendo $L(v)$ la transformada de Fourier de la función

$$\tau = \frac{l \text{sen}(\phi)}{\bar{w}},$$

l_0 la distancia focal de dicho sensor LIDAR, l la distancia de medición, θ y φ los ángulos de orientación de dicho sensor LIDAR, \bar{w} la velocidad media del viento, Γ la constante de Rayleigh, K un factor de regulación, y W_x, W_y, W_z los componentes de la velocidad del viento en dicho punto de medición.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha respuesta de frecuencia de dicho estimador del viento en el rotor $F(v)$ se escribe por una relación de la forma:

$$F(v) = e^{-2i\pi v \frac{l_0 \text{sen}(\phi)}{\bar{w}}} W_l(v) M_R(v) \left(M_R(v) M_R^T(v) + \alpha^2 \right)^{-1} \quad \text{siendo}$$

$$M_R(v) = L(v) \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x(v) \\ W_y(v) \\ W_z(v) \end{bmatrix},$$

$$W_{\lambda}(v) = [W_x(v) \ 0 \ 0], \quad L(v) \text{ la transformada de Fourier de la función } \bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}\right) \text{ y}$$

$$\bar{f}\left(\tau - \frac{l_0 \sin(\phi)}{\bar{w}}\right) = \frac{K \sin^2(\phi)}{(\tau \bar{w})^2 \Gamma^2}, \quad \tau = \frac{l \sin(\phi)}{\bar{w}},$$

l_0 la distancia focal de dicho sensor LIDAR, l la distancia de medición, θ y ϕ los ángulos de orientación de dicho sensor LIDAR, \bar{w} la velocidad media del viento, Γ la constante de Rayleigh, K un factor de regulación, W_x, W_y, W_z los componentes de la velocidad del viento en dicho punto de medición y a un parámetro de regularización.

5
10 7. Procedimiento según la reivindicación 6, en el que se construye dicho estimador del viento en el rotor mediante un procedimiento de ventana aplicado a dicha respuesta de frecuencia de dicho estimador del viento en el rotor.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se construye dicho modelo de propagación del viento según al menos una de las siguientes hipótesis:

- 15
- el vector del viento es el mismo en los planos verticales perpendiculares a la dirección del viento,
 - la turbulencia del viento se propaga a la velocidad media del viento.

20 9. Turbina eólica, en concreto turbina eólica instalada en el mar, equipada con un sensor LIDAR cuyo punto de medición se sitúa aguas arriba de dicha turbina eólica, **caracterizada porque** dicha turbina eólica comprende medios de control que implementan el procedimiento de control de la turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

10. Turbina eólica según la reivindicación 9, para la que dicho sensor LIDAR se dispone en la góndola de dicha turbina eólica.

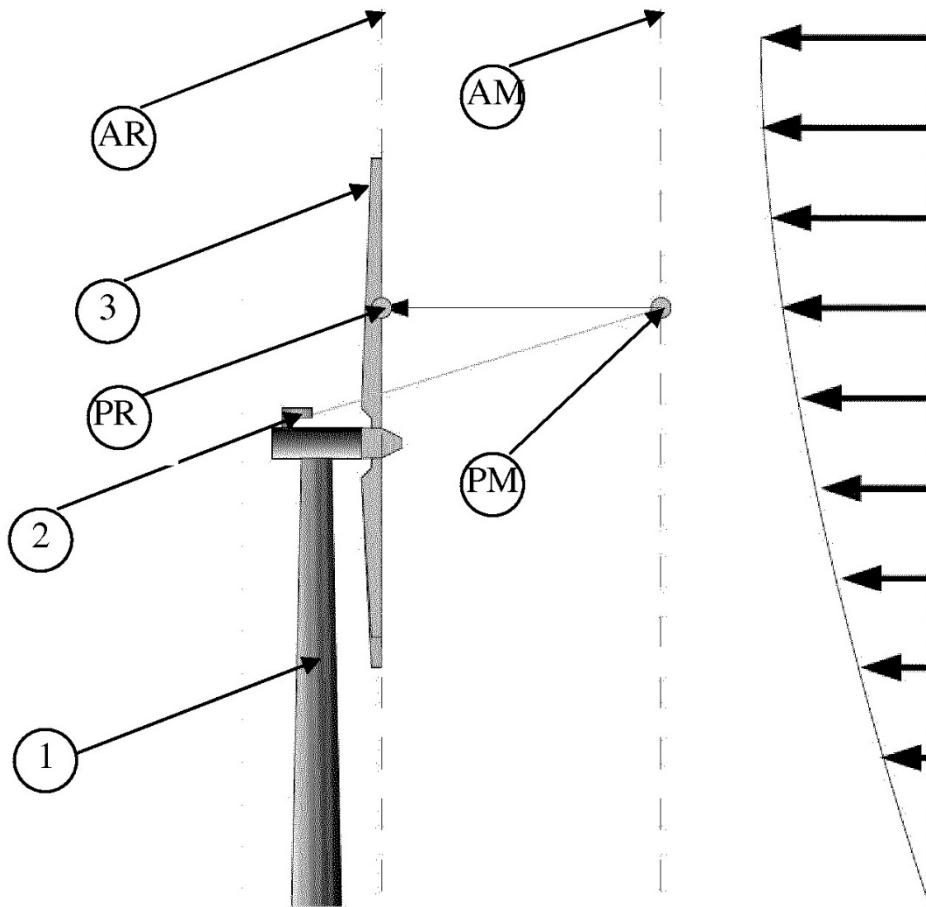


Figura 1

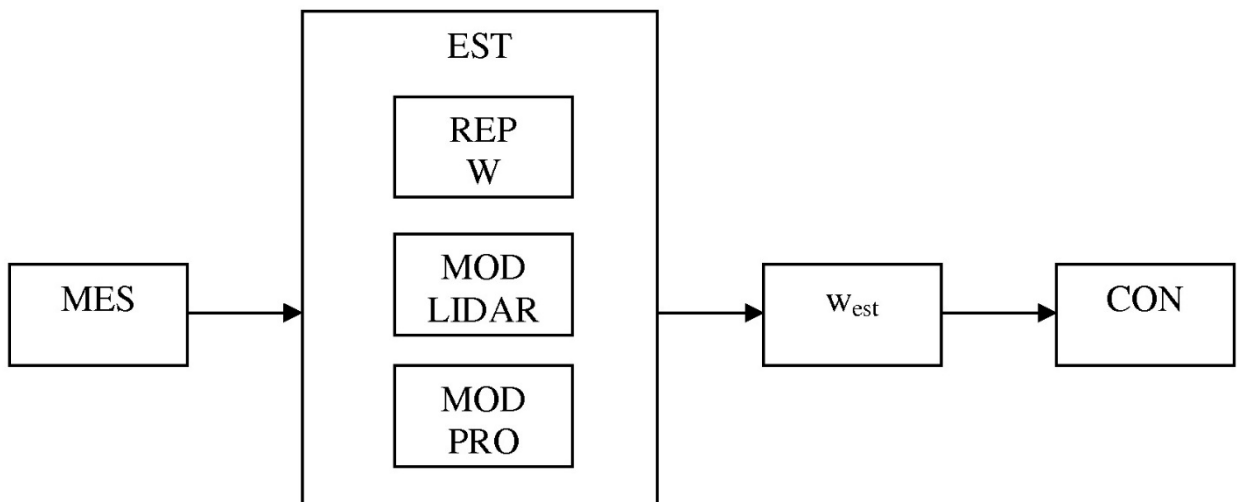


Figura 2

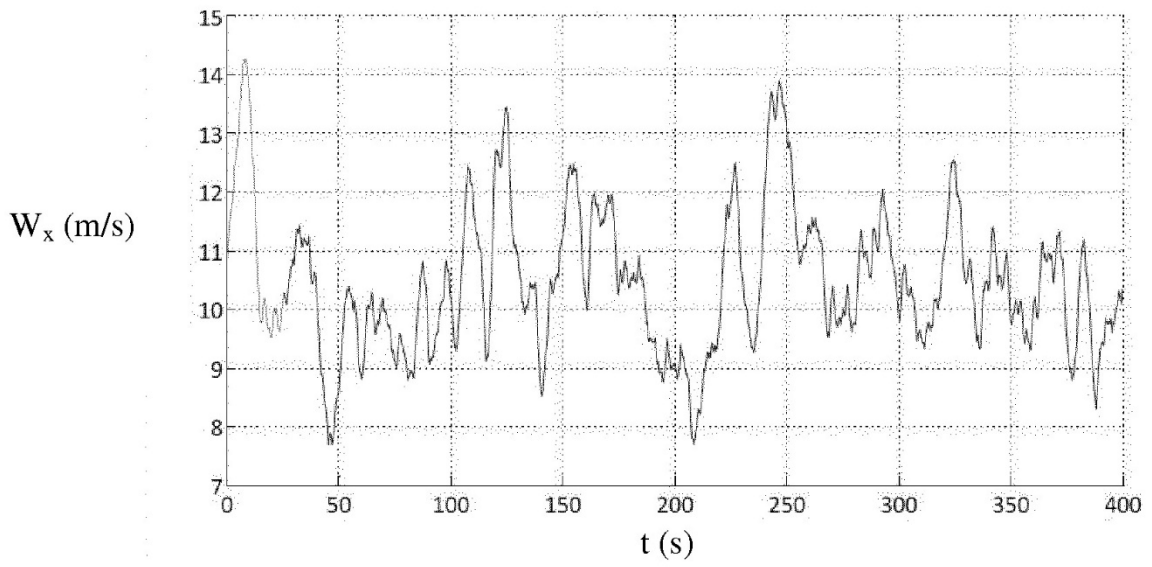


Figura 3

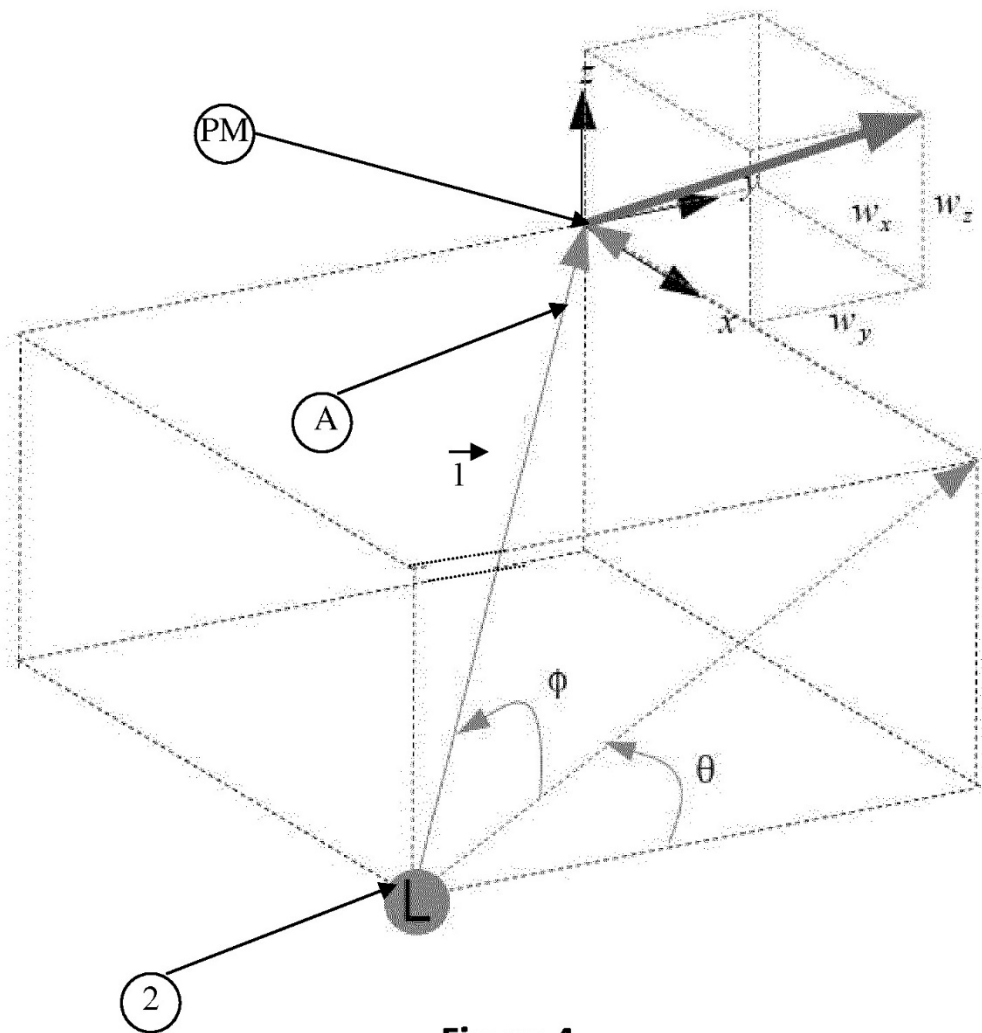


Figura 4

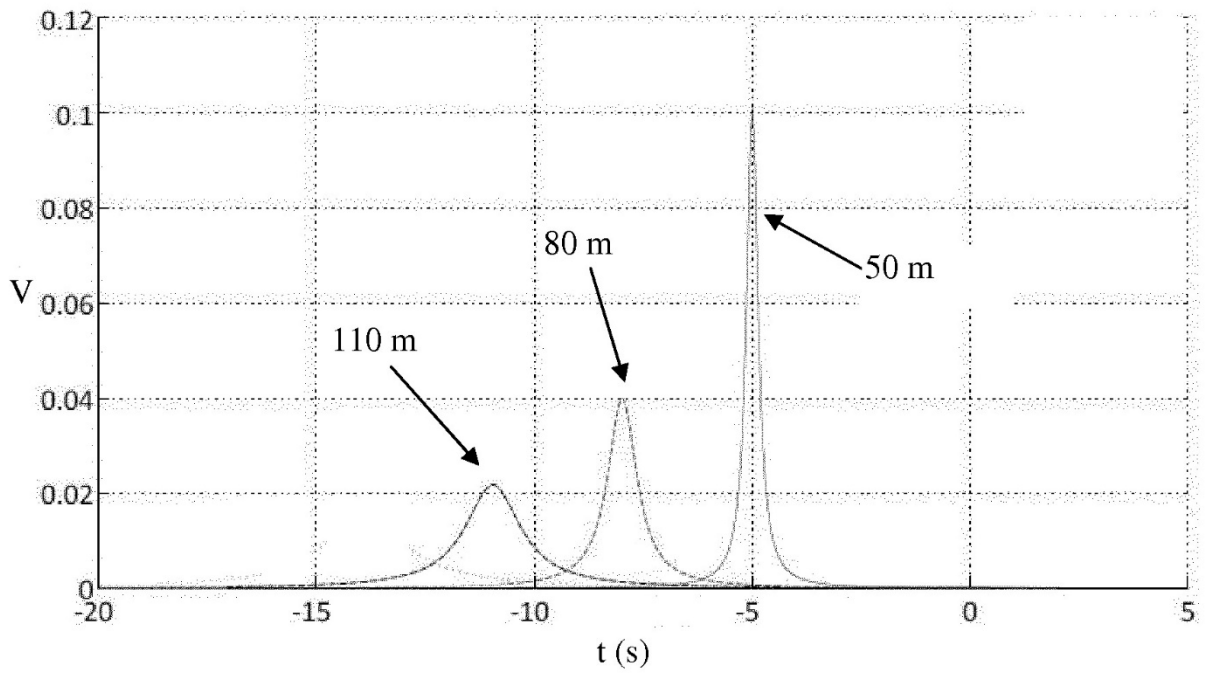


Figura 5

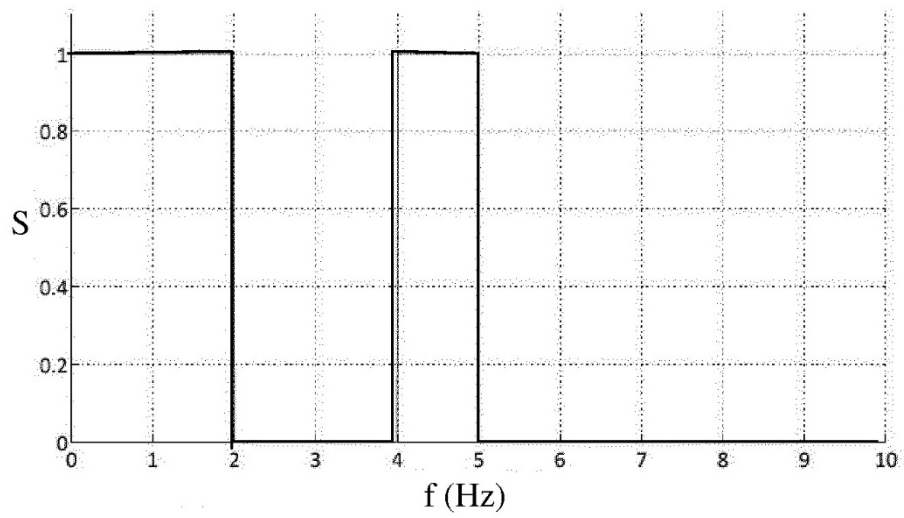


Figura 6a

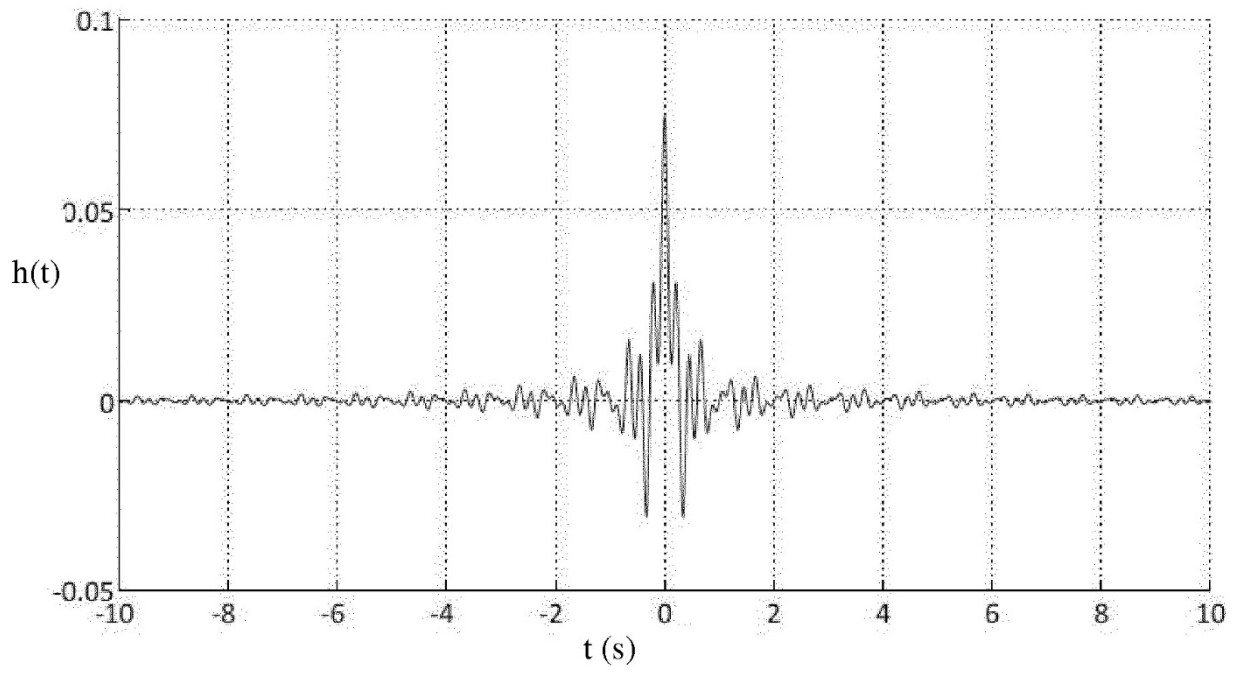


Figura 6b

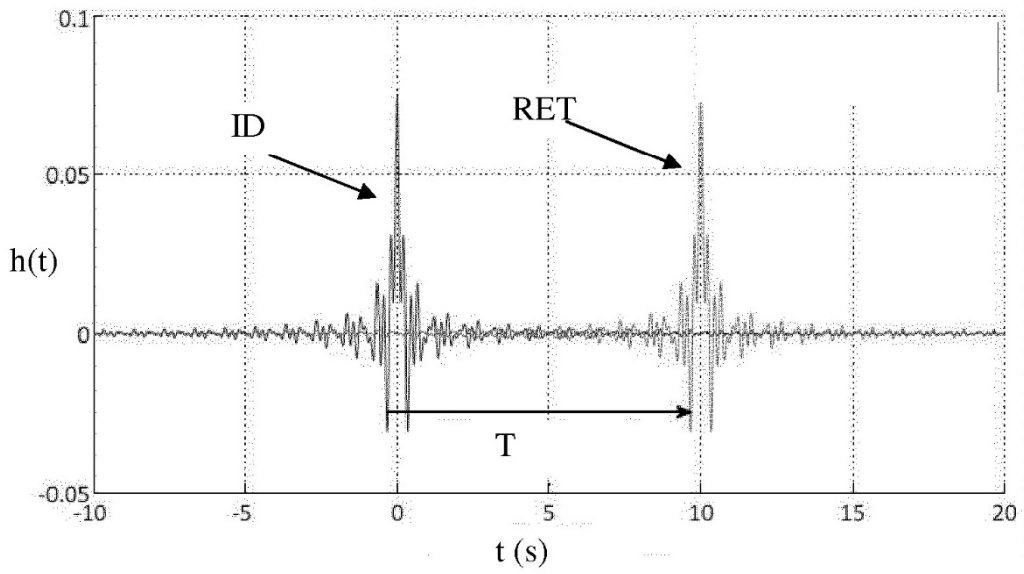


Figura 6c

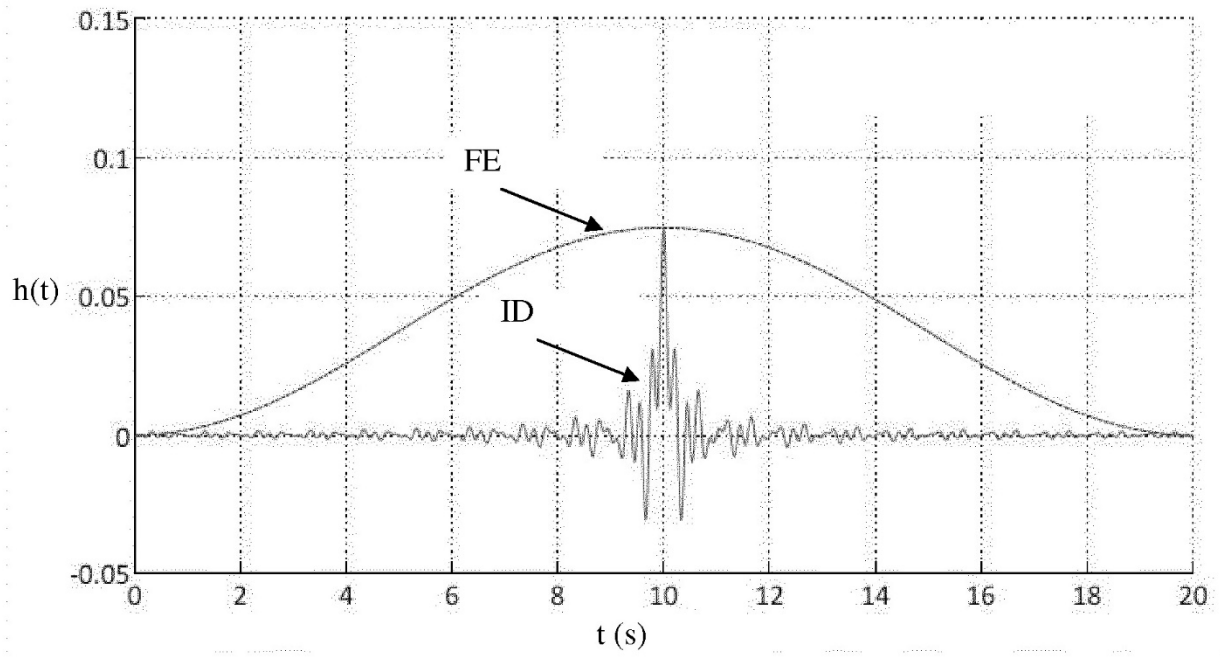


Figura 6d

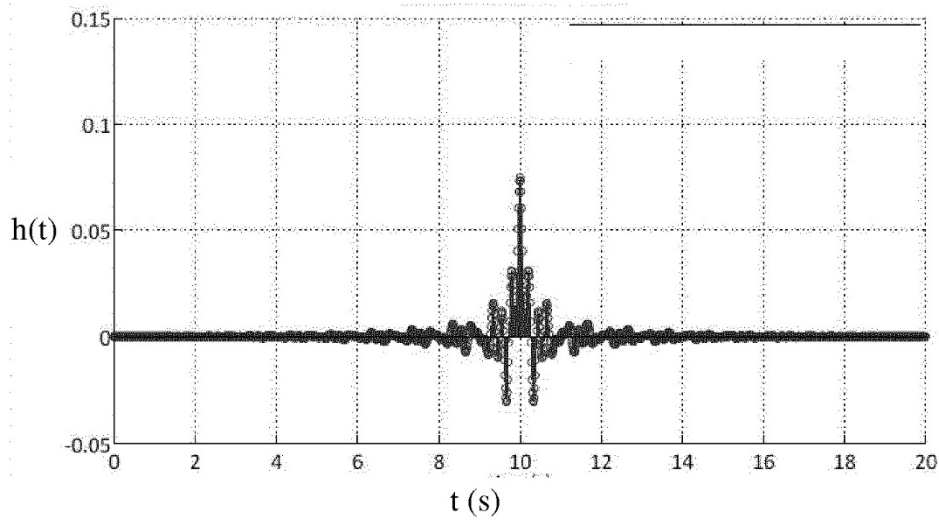


Figura 6e

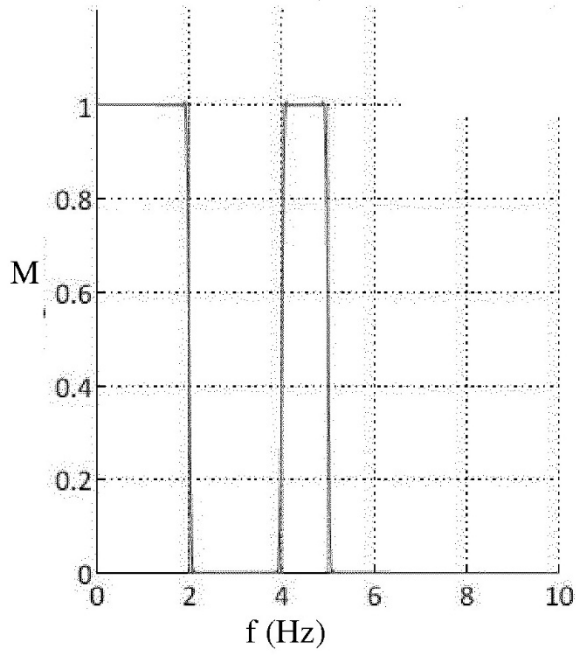


Figura 6f

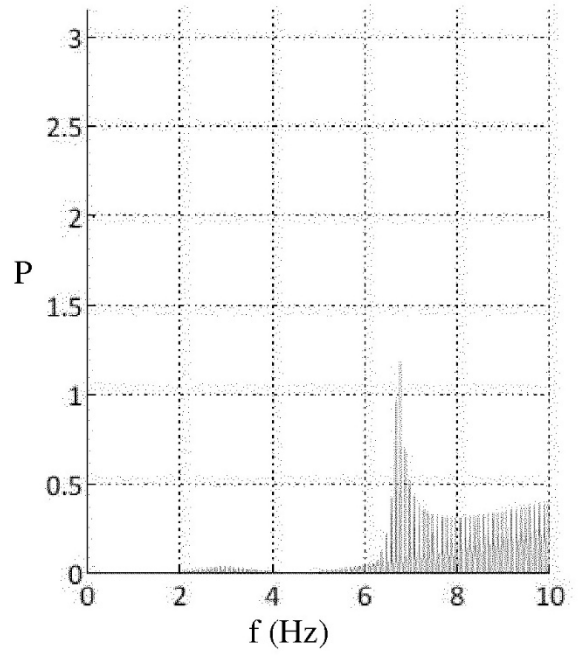


Figura 6g

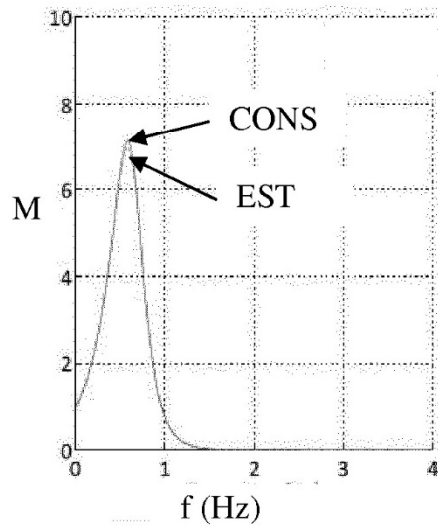


Figura 7a

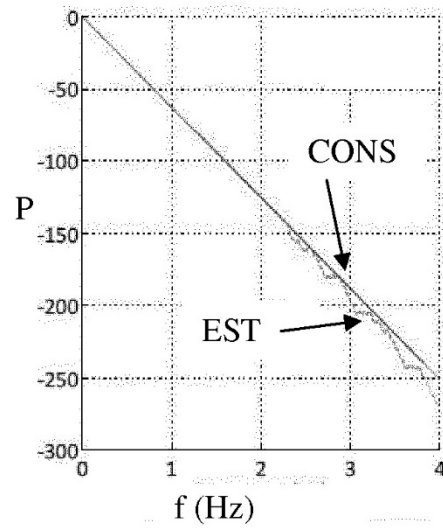


Figura 7b

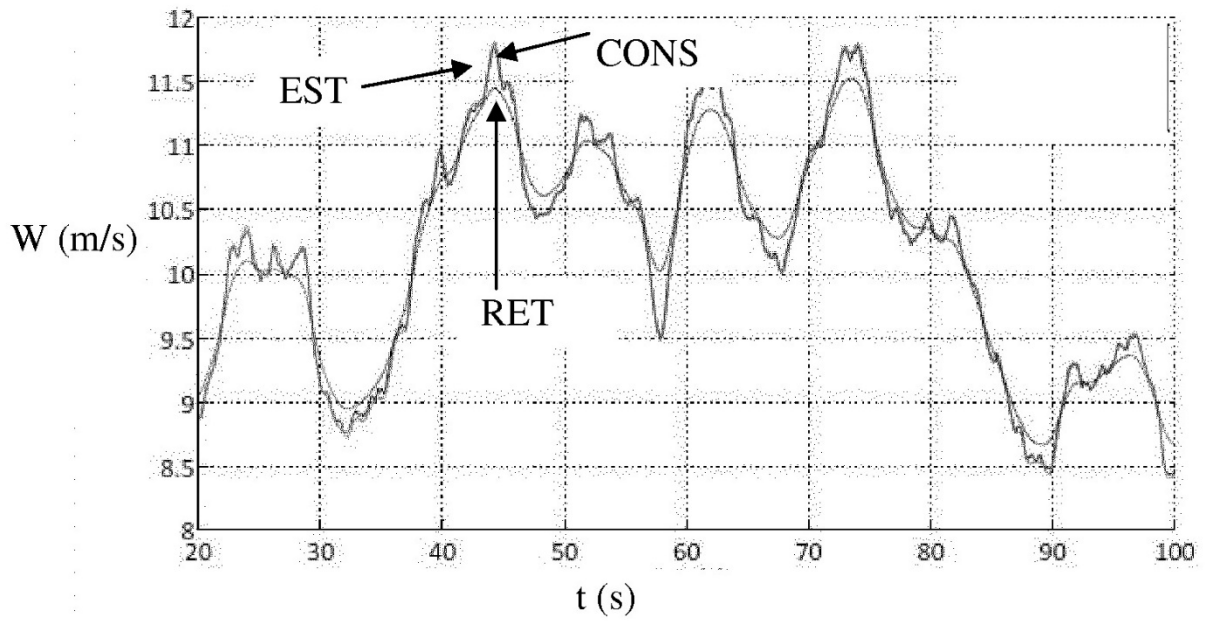


Figura 7c

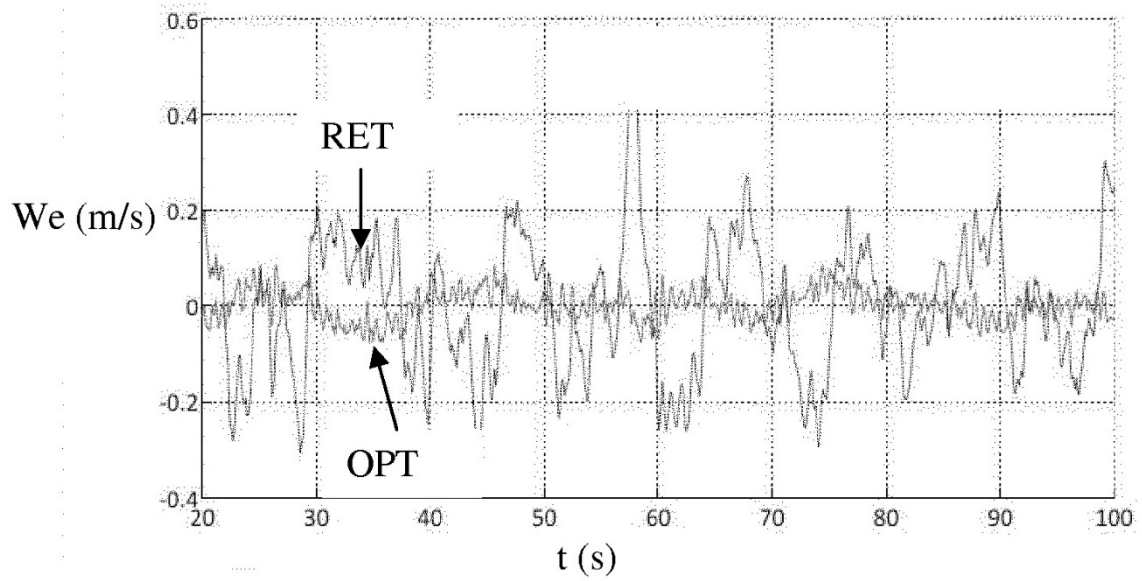


Figura 7d