

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 953 717**

51 Int. Cl.:

G01P 5/26 (2006.01)

G01S 17/58 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.02.2020** **E 20158646 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.06.2023** **EP 3712621**

54 Título: **Procedimiento de predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor para un aerogenerador equipado de un sensor de teledetección por láser**

30 Prioridad:

18.03.2019 FR 1902739

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

15.11.2023

73 Titular/es:

IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)

1 & 4 avenue de Bois-Préau

92852 Rueil-Malmaison Cedex, FR

72 Inventor/es:

GUILLEMIN, FABRICE y

NGUYEN, HOAI-NAM

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 953 717 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 predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor para un aerogenerador equipado de un sensor de teledetección por láser

5 Campo técnico

La presente invención se refiere al campo de las energías renovables, y se refiere más particularmente a la medida del recurso de los aerogeneradores, el viento, con objetivos de predicción del viento, de control (orientación, regulación de par y velocidad) y/o de diagnóstico y/o de monitorización del aerogenerador.

10

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

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

25 - un rotor, fijado a la góndola, que comprende varias palas (normalmente tres) y el morro del aerogenerador. El rotor es movido por la energía del viento, está conectado por un árbol mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de caja de cambios y árbol mecánico) a una máquina eléctrica (generador eléctrico, etc.) que convierte la energía recogida en energía eléctrica. El rotor está potencialmente equipado 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) unidos por una transmisión (caja de cambios).

Desde principios de los años 90, la energía eólica ha experimentado un renovado interés, particularmente en la Unión Europea, en la que la tasa de crecimiento anual es de alrededor de 20%. Este crecimiento se atribuye a la posibilidad inherente de producir electricidad sin emisiones de carbono. Para respaldar este crecimiento, el rendimiento de los aerogeneradores debe ser mejorado. La perspectiva de aumentar la producción de energía eólica requiere el desarrollo de herramientas de producción eficientes, y de herramientas de control avanzadas para mejorar los rendimientos de las máquinas. Los aerogeneradores están diseñados para producir electricidad al precio más bajo posible. Por lo tanto, los aerogeneradores se construyen generalmente de tal manera que alcanzan su máximo rendimiento para una velocidad del viento de alrededor de 15 m/s. No es necesario diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a velocidades de viento más altas, siendo estas poco frecuentes. En caso de velocidades del viento superiores a 15 m/s, es necesario perder parte de la energía adicional contenida en el viento a fin de evitar cualquier daño al aerogenerador. Por lo tanto, todos los aerogeneradores están diseñados con un sistema de regulación de potencia.

35

40

45

Para esta regulación de potencia, se diseñan controladores para aerogeneradores de velocidad variable. Los objetivos de los controladores son maximizar la potencia eléctrica recolectada, minimizar las fluctuaciones de velocidad del rotor y minimizar la fatiga y los momentos extremos de la estructura (palas, mástil y plataforma).

50 Técnica anterior

Para optimizar el control, es importante conocer la velocidad del viento a nivel del rotor del aerogenerador. Para ello se han desarrollado diferentes técnicas.

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

60 Según una segunda técnica, se puede utilizar un sensor LIDAR (acrónimo de la expresión en inglés "light Detection and Range" que se puede traducir por teledetección por Láser). La LIDAR es una tecnología de teledetección o medida óptica basada en el análisis de las propiedades de un haz enviado hacia su emisor. Este método se utiliza en particular para determinar la distancia a un objeto por medio de un láser a impulsos. A diferencia del radar basado en un principio similar, el sensor LIDAR utiliza luz visible o infrarroja en lugar de ondas de radio. La distancia a un objeto o a una superficie se obtiene midiendo el plazo entre el impulso y la detección de la señal reflejada.

65

En el campo de los aerogeneradores, el sensor LIDAR se anuncia como un sensor indispensable para el buen funcionamiento de los grandes aerogeneradores, muy especialmente a medida que aumentan su tamaño y potencia (hoy en día 5 MW, próximamente 12 MW en offshore). Este sensor permite la medida a distancia del viento, permitiendo calibrar inicialmente los aerogeneradores para que puedan proporcionar una máxima potencia (optimización de la curva de potencia). Para esta etapa de calibración, el sensor puede posicionarse en el suelo y orientarse verticalmente (perfilador), lo que permite medir la velocidad del viento y su dirección, así como el gradiente de viento según las altitudes. Esta aplicación es muy particularmente 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.

Una segunda aplicación es la colocación de este sensor en la góndola del aerogenerador, para medir el campo de viento en la parte delantera del aerogenerador mientras está orientado casi horizontalmente. A priori, la medida del campo de viento en la parte delantera del aerogenerador permite conocer de antemano la turbulencia que encontrará el aerogenerador unos instantes más tarde. Sin embargo, las técnicas actuales de control y monitorización de un aerogenerador no permiten tomar en cuenta una medida realizada por un sensor LIDAR estimando con precisión la velocidad del viento a nivel del rotor, es decir, en el plano del rotor. Tal aplicación se describe en particular en la solicitud de patente FR 3013777 (US 2015145253).

Además, los controladores avanzados de aerogeneradores pueden complementarse con un control "feedforward" (que se puede traducir como acción anticipatoria), que se basa en medidas predictivas del viento proporcionadas por los sensores LIDAR, a fin de regular la velocidad del rotor y reducir las cargas estructurales en el aerogenerador. La eficacia del control anticipativo depende ampliamente de la precisión con la que se puede medir o estimar la predicción del viento.

Se ha estudiado el potencial de uso de sensores LIDAR para estimar la velocidad del viento en el plano del rotor. En general, para extrapolar la velocidad del viento desde la distancia de medida más cercana del sensor LIDAR, por ejemplo 50 m, hasta el plano del rotor, se aplica la hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor (TFH). La principal ventaja de usar TFH es su simplicidad. Sin embargo, TFH podría no ser lo suficientemente preciso en la práctica. Cuando se usa TFH para la estimación de la velocidad del viento, no se ha tenido en consideración la evolución del viento, que se ve afectado por las condiciones del sitio, los efectos de obstrucción del aerogenerador y la naturaleza física siempre cambiante del viento. Esto da como resultado una diferencia importante entre la velocidad del viento estimada en el plano del rotor y la velocidad real del viento que golpea el rotor (véase los documentos Eric Simley, Lucy Y Pao, Pieter Gebraad, y Matthew Churchfield. "Investigation of the impact of the upstream induction zone on lidar measurement accuracy for wind turbine control applications using large-eddy simulation". En: Journal of Physics: Conference Series. Vol. 524. 1. Publicación IOP. 2014, p. 012003, y Eric Simley, Lucy Pao, Neil Kelley, Bonnie Jonkman, y Rod Frehlich. "Lidar wind speed measurements of evolving wind field". En: 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012, p. 656).

Para superar los inconvenientes de usar TFH para la estimación de la velocidad del viento, se considera un enfoque en el documento Ashim Giyanani, WAAM Bierbooms y GJW van Bussel. "Estimation of rotor effective wind speeds using autoregressive models on Lidar data". En: Journal of Physics: Conference Series. Vol. 753. 7. Publicación IOP. 2016, p. 072018. La idea principal consiste en modelar el flujo del campo de viento como un modelo exógeno de promedio móvil autorregresivo. Este modelo está entrenado en medidas pasadas, lo que permite predecir velocidades del viento futuras en el plano del rotor. Sin embargo, no está claro cómo se determinan los parámetros del modelo. Además, el modelo es estático, en el sentido de que una vez identificado, no cambia, independientemente de las condiciones del viento. Concretamente, este método difícilmente puede implementarse en la práctica.

El documento EP 3273055 A1 describe un sistema y un método para controlar un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR, pudiendo el sistema y el método tomar en cuenta los efectos de inducción.

El documento US 2014/167415 A1 se refiere a un método y a un sistema de control de un aerogenerador, pudiendo el sistema y el método ser capaces de tomar en cuenta un retraso temporal.

Sumario de la invención

Con el fin de predecir el viento de manera precisa (sin la hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor), la presente invención se refiere a un procedimiento para predecir la velocidad del viento en el plano del rotor, teniendo en cuenta un factor de inducción, que se usa en un modelo de evolución del viento implementado por medio de un filtro de Kalman. El factor de inducción y el modelo de evolución del viento permiten tomar en cuenta en la predicción los efectos sobre el viento relacionados a la obstrucción del aerogenerador. Así, la predicción del viento a nivel del rotor es precisa.

La invención también se refiere a un procedimiento para controlar un aerogenerador, un producto de programa informático, un sensor LIDAR, y un aerogenerador, utilizando estos objetos la predicción del viento determinada por el procedimiento según la invención.

La presente invención se refiere a un procedimiento para predecir la velocidad del viento en el plano del rotor de un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR, en el que se implementan las siguientes etapas:

- 5 a) se mide la velocidad del viento en al menos un plano de medida distante de dicho aerogenerador por medio de dicho sensor LIDAR;
- b) se determina un factor de inducción de viento, representando dicho factor de inducción de viento un coeficiente de ralentización de viento entre dicho plano de medida y dicho plano de dicho rotor;
- 10 c) se determina un índice de retraso entre dicho plano de medida y dicho plano del rotor de dicho aerogenerador por medio de dicho factor de inducción y de dicha medida de la velocidad del viento en dicho plano de medida;
- 15 d) se construye un modelo de evolución del viento entre dicho plano de medida y dicho plano de dicho rotor, relacionando dicho modelo de evolución del viento la velocidad del viento en dicho plano de dicho rotor en un instante predeterminado, con la velocidad del viento medida en dicho plano de medida en varios instantes anteriores de dicho instante predeterminado, por medio de dicho factor de inducción, determinándose dichos instantes anteriores por medio de dicho índice de retraso;
- 20 e) se determina dicha predicción de la velocidad del viento en dicho plano de rotor mediante dicho modelo de evolución del viento y un filtro de Kalman, preferentemente un filtro de Kalman adaptativo.

Según una realización de la invención, se determina un factor de inducción del viento implementando las siguientes etapas:

- 25 i) se mide la velocidad del viento en al menos tres planos de medida distantes de dicho aerogenerador por medio de dicho sensor LIDAR;
- ii) se determina al menos dos factores de inducción del viento entre dos de dichos planos de medida por medio de dichas medidas de la velocidad del viento en dichos planos de medida y un filtro de Kalman lineal; y
- 30 iii) se determina dicho factor de inducción del viento entre un plano de medida y dicho plano del rotor de dicho aerogenerador mediante dichos factores de inducción entre dos planos de medida determinados y mediante un filtro de Kalman lineal.

35 Según una realización, dicha etapa de medir la velocidad del viento comprende una subetapa de reconstruir el campo de viento en dicho plano de medida, siendo utilizado este campo de viento reconstruido en las otras etapas del procedimiento como medida de la velocidad del viento en dicho plano de medida.

40 Según un aspecto, se determina el índice de retraso k_{d0} mediante una ecuación:

$$k_{d0} = \frac{2x_1}{(U_{x1} + U_0)T_s}$$

con

$$45 \quad U_0 = a_{0,x1} U_{x1}$$

con x_1 la distancia entre dicho plano de medida y dicho plano del rotor, T_s el período de muestreo de la medida, U_{x1} la velocidad promedia del viento medido en dicho plano de medida, U_0 la velocidad promedia del viento en dicho plano del rotor, y $a_{0,x1}$ dicho factor de inducción entre dicho plano de medida y dicho plano de rotor.

50 Según una característica, dicho modelo de evolución del viento se escribe:

$$u_0(k+p) = \tilde{U}_{x1}(k - k_{d0} + p)^T \mathbf{r}(k|k)$$

55 con

$$\tilde{U}_{x1}(k - k_{d0} + p) = [\tilde{u}_{x1}(k - k_{d0} + p) \quad \tilde{u}_{x1}(k - k_{d0} + p - 1) \quad \tilde{u}_{x1}(k - k_{d0} + p + 1) \quad \dots \quad \dots \quad \tilde{u}_{x1}(k - k_{d0} + p + N_d)]^T$$

60 y

$$\tilde{u}_{x_1}(k) = a_{0,x_1} u_{x_1}(k)$$

5 con u_0 el viento en el plano del rotor k el tiempo discretizado, p la etapa de tiempo futuro, k_{d0} el índice de retraso, r el vector de estado determinado por el filtro de Kalman, x_1 el plano de medida, N_d el orden de dicho modelo de evolución del viento, u_{x_1} la velocidad del viento medida en dicho plano de medida, y a_{0,x_1} dicho factor de inducción entre dicho plano de medida y dicho plano de rotor.

Ventajosamente, el orden del modelo de evolución del viento N_d vale 2.

10 Además, la invención se refiere a un procedimiento para controlar un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR, en el que se implementan las siguientes etapas:

15 a) se determina dicha predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor de dicho aerogenerador mediante el procedimiento según una de las características anteriores;

b) se controla dicho aerogenerador en función de dicha velocidad del viento a nivel del plano del rotor.

20 La invención también se refiere a un producto de programa informático que comprende instrucciones de código dispuestas para implementar las etapas de un procedimiento según una de las características anteriores, cuando el programa se ejecuta en una unidad de procesamiento de dicho sensor LIDAR.

25 La invención también se refiere a un sensor LIDAR adaptado para medir la velocidad del viento en al menos un plano de medida (PM) distante de un aerogenerador que comprende una unidad de procesamiento que lleva a cabo las etapas b) a e) de un procedimiento según una de las características anteriores.

Además, la invención se refiere a un aerogenerador que comprende un sensor LIDAR según una de las características anteriores, estando situado dicho sensor LIDAR preferentemente en la góndola de dicho aerogenerador o en el morro del aerogenerador.

30 Otras características y ventajas del procedimiento según la invención aparecerán con la lectura de la siguiente descripción de ejemplos de realización no limitativos, con referencia a las figuras anexas y descritas a continuación.

Lista de las figuras

35 La figura 1 ilustra un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR según una realización de la invención.

La figura 2 ilustra las etapas del procedimiento para predecir la velocidad del viento en el plano del rotor según una realización de la invención.

40 La figura 3 ilustra las etapas del procedimiento de predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor según una segunda realización de la invención.

45 La figura 4 ilustra una curva comparativa con respecto a un viento de referencia para un ejemplo de predicción a 0s del viento en el plano del rotor para un procedimiento según la técnica anterior, y para el procedimiento de predicción según una realización de la invención.

La figura 5 ilustra una curva comparativa con respecto a un viento de referencia para un ejemplo de predicción a 1s del viento en el plano del rotor para un procedimiento según una realización de la invención.

50 La figura 6 ilustra una curva comparativa respecto a un viento de referencia para un ejemplo de predicción a 2s del viento en el plano del rotor para un procedimiento según una realización de la invención.

Descripción de realizaciones

55 La presente invención se refiere a un procedimiento para predecir la velocidad del viento en el plano del rotor de un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR. El procedimiento permite la predicción de la velocidad del viento ya que permite determinar para al menos un instante futuro la velocidad del viento en el plano del rotor del aerogenerador.

60 Según la invención, el sensor LIDAR permite medir la velocidad del viento en al menos un plano de medida aguas arriba del aerogenerador. Existen varios tipos de sensores LIDAR, por ejemplo los sensores LIDAR escaneados, LIDAR continuos, o LIDAR pulsados. En el contexto de la invención, se utiliza preferentemente un LIDAR pulsado. Sin embargo, las otras tecnologías LIDAR pueden usarse quedándose al mismo tiempo dentro del ámbito de la invención.

65 El sensor LIDAR permite una medida rápida. Por lo tanto, el uso de tal sensor permite una determinación rápida en continuo de la predicción de la velocidad del viento. Por ejemplo, el índice de muestreo del sensor LIDAR puede estar

comprendido entre 1 y 5 Hz (incluso más en el futuro), y puede valer 4 Hz. Además, el sensor LIDAR permite obtener informaciones relativas al viento aguas arriba del aerogenerador, estas informaciones están relacionadas al viento que llegará al aerogenerador. Por lo tanto, el sensor LIDAR se puede utilizar para la predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor del aerogenerador.

5 La figura 1 representa, de manera esquemática y no limitativa, un aerogenerador 1 de eje horizontal equipado con un sensor LIDAR 2 para el procedimiento según una realización de la invención. El sensor LIDAR 2 se usa para medir la velocidad del viento a una distancia dada en una pluralidad de planos de medida PM (sólo se representan dos planos de medida). Conocer la medida del viento de antemano permite a priori dar muchas informaciones. Esta figura se representan también los ejes x, y, y z. El punto de referencia de esta marca es el centro del rotor. La dirección x es la dirección longitudinal, que corresponde a la dirección del eje del rotor, aguas arriba del aerogenerador, esta dirección también corresponde a la dirección de medida del sensor LIDAR 2. La dirección y, perpendicular a la dirección x, es la dirección lateral situada en un plano horizontal (las direcciones x, y forman un plano horizontal). La dirección z es la dirección vertical (que corresponde sustancialmente a la dirección del mástil 4) dirigida hacia arriba, el eje z es perpendicular a los ejes x e y. El plano del rotor está indicado por el rectángulo en líneas de puntos PR, está definido por las direcciones y, z para un valor de x nulo. Los planos de medida PM son planos formados por las direcciones y, z a una distancia del plano del rotor PR (para un valor de x no nulo). Los planos de medida PM son paralelos al plano del rotor PR.

20 Clásicamente, un aerogenerador 1 permite transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica. Para la conversión del viento en energía eléctrica, consta de los siguientes elementos:

25 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 movido por un viento más fuerte y regular que a nivel del suelo 6. El mástil 4 alberga generalmente una parte de los componentes eléctricos y electrónicos (modulador, control, multiplicador, generador, etc.);

30 una góndola 3 montada en la parte superior del mástil 4, que alberga componentes mecánicos, neumáticos, ciertos componentes eléctricos y electrónicos (no representados), necesarios para el funcionamiento de la máquina. La góndola 3 puede girar para orientar la máquina en la dirección correcta;

35 el rotor, fijado a la góndola, que comprende varias palas 7 (generalmente tres) y el morro del aerogenerador. El rotor es movido por la energía del viento, está conectado por un árbol mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de caja de cambios y árbol mecánico) a una máquina eléctrica (generador eléctrico, etc.) (no representados) que convierte la energía recolectada en energía eléctrica. El rotor está potencialmente equipado con sistemas de control tales como palas de ángulo variable o frenos aerodinámicos;

40 una transmisión, compuesta por dos ejes (árbol mecánico del rotor y árbol mecánico de la máquina eléctrica) conectados por una transmisión (caja de cambios) (no representados).

45 Como se ve en la figura 1, que es una realización ejemplar de un sensor LIDAR pulsado, el sensor LIDAR 2 utilizado comprende cuatro haces o ejes de medidas (b1, b2, b3, b4). De manera no limitativa, el procedimiento según la invención también funciona con un sensor LIDAR que comprende cualquier número de haces. El sensor LIDAR realiza una medida puntual en cada punto de intersección de un plano de medida PM y de un haz (b1, b2, b3, b4). Estos puntos de medida están representados por círculos negros en la figura 1. El procesamiento de las medidas en estos puntos de medida permite determinar la velocidad del viento en los planos de medida de PM. Para ello, se puede aplicar en particular el procedimiento de modelización del viento descrito en la solicitud de patente francesa FR 3068139 (WO2018/234409).

50 Preferiblemente, el sensor LIDAR 2 se puede montar en la góndola 3 del aerogenerador 1.

Según la invención, el procedimiento de predicción del viento comprende las siguientes etapas:

- 55 1) Medir del viento
- 2) Determinar un factor de inducción
- 3) Determinar un índice de retraso
- 60 4) Construir un modelo de evolución del viento
- 5) Determinar la predicción de la velocidad del viento

Estas etapas se llevan a cabo en tiempo real.

65

La figura 2 ilustra, esquemáticamente y de manera no limitativa, las etapas del procedimiento de predicción según una realización de la invención. La primera etapa es una etapa de medida (MES) de la velocidad del viento u_x en al menos un plano de medida mediante el sensor LIDAR. La segunda etapa (IND) utiliza las medidas u_x para determinar el factor de inducción a_{PR} entre el plano de medida y el plano del rotor. La tercera etapa (RET) utiliza el factor de inducción a_{PR} y las medidas u_x para determinar un índice de retraso k_d . La cuarta etapa es una etapa de construcción de un modelo de evolución del viento (MOD) a partir de las medidas u_x , del factor de inducción a_{PR} , y del índice de retraso k_d . Después, se aplica un filtro de Kalman (KAL), en particular un filtro de Kalman adaptativo, al modelo de evolución del viento (MOD) para obtener una predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor u_0 .

La figura 3 ilustra, esquemáticamente y de forma no limitativa, las etapas del procedimiento de predicción según una segunda realización de la invención. La primera etapa es una etapa de medida (MES) de la velocidad del viento en al menos un plano de medida por medio del sensor LIDAR. En comparación con la realización de la figura 1, se añade una etapa de reconstrucción (REC) del viento a partir de las medidas antes de determinar la velocidad del viento u_x en el plano de medida. La tercera etapa (IND) utiliza las medidas reconstruidas u_x para determinar un factor de inducción a_{PR} entre el plano de medida y el plano del rotor. La cuarta etapa (RET) utiliza el factor de inducción a_{PR} y las medidas reconstruidas u_x para determinar un índice de retraso k_d . La quinta etapa es una etapa de construcción de un modelo de evolución del viento (MOD) a partir de las medidas reconstruidas u_x , del factor de inducción a_{PR} , y del índice de retraso k_d . Después, se aplica un filtro de Kalman (KAL), en particular un filtro de Kalman adaptativo, al modelo de evolución del viento, para obtener una predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor u_0 .

1) Medida de la velocidad del viento

Durante esta etapa, se mide, en continuo, la velocidad del viento en al menos un plano de medida distante del aerogenerador por medio del sensor LIDAR. Así, la velocidad del viento puede conocerse aguas arriba del aerogenerador en al menos un plano de medida. Para esta etapa, se consideran los tres componentes del viento (longitudinal, lateral y vertical), así como las variaciones de la velocidad del viento en el plano de medida (por ejemplo, la velocidad del viento aumenta con la altitud).

Según una realización de la invención, se puede llevar a cabo la medida de la velocidad del viento en al menos tres planos de medida, para facilitar la determinación del factor de inducción (véase la etapa 2)). Preferiblemente, se puede llevar a cabo la medida de la velocidad del viento en cuatro planos de medida, de manera a aumentar la precisión del conocimiento del viento aguas arriba del aerogenerador y por lo tanto la precisión de la estimación del factor de inducción del viento a nivel del plano del rotor.

Según una realización de la invención, los planos de medida pueden estar separados por una distancia longitudinal (según el eje x de la figura 1) comprendida preferentemente entre 50 y 400 m del plano del rotor. Así, es posible determinar la evolución de la velocidad del viento a lo largo de una gran distancia aguas arriba del aerogenerador, lo que también permite aumentar la precisión de la estimación de la predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor.

Alternativamente, los planos de medida pueden estar más próximos o más separados que el intervalo preferido.

Según un ejemplo de realización no limitativo, el sensor LIDAR puede realizar medidas para diez planos de medida, en particular se pueden ubicar respectivamente a distancias de 50, 70, 90, 100, 110, 120, 140, 160, 180 y 200 m del plano del rotor.

Según una realización de la invención que corresponde a la realización de la figura 3, la etapa de medir el viento puede comprender una etapa de reconstrucción del viento, a fin de interpretar las medidas en bruto del sensor LIDAR. Se pueden implementar diferentes métodos de reconstrucción del viento. A modo de ejemplo no limitativo, es posible implementar el procedimiento de reconstrucción del viento descrito en la solicitud de patente FR 3068139 (WO2018/234409), de la cual se recuerdan las etapas principales:

- Mallas el espacio situado aguas arriba de dicho sensor LIDAR, la malla comprende puntos de estimación y puntos de medida;
- Medir la amplitud y la dirección del viento en los diferentes puntos de medida;
- Estimar la amplitud y la dirección del viento en cualquier momento para el conjunto de los puntos de estimación mediante un método de mínimos cuadrados recursivos de una función de coste; y
- Reconstruir el campo de viento incidente en tres dimensiones y en tiempo real sobre el conjunto de los puntos discretizados.

2) Determinación de un factor de inducción

Durante esta etapa, se determina un factor de inducción del viento entre un plano de medida y el plano del rotor. El factor de inducción es un coeficiente de ralentización del viento en la zona de inducción del aerogenerador (es decir, aguas arriba del aerogenerador). En efecto, el viento es ralentizado en la zona aguas arriba del aerogenerador por la presencia del aerogenerador y su funcionamiento: dicho de otra manera, la potencia sustraída por el aerogenerador al viento provoca una ralentización del viento aguas arriba del aerogenerador. Así, el factor de inducción es representativo de un fenómeno físico y da una indicación relativa al recurso del aerogenerador. El factor de inducción se calcula entre dos planos aguas arriba del aerogenerador, por definición, corresponde a la relación de velocidades entre estos planos. Anotando a el factor de inducción, u la velocidad del viento, y d1 y d2 las respectivas distancias de los dos planos considerados con respecto al plano del rotor, el factor de inducción entre los planos situados a las distancias d1 y d2 del plano del rotor se puede escribir:

[Math 1]

$$a_{d1,d2} = \frac{u_{d1}}{u_{d2}}$$

Cuando uno de los planos considerados es el plano del rotor, se anota d1=0.

Para esta etapa, se puede determinar el factor de inducción mediante cualquier método. A modo de ejemplo no limitativo, es posible implementar el procedimiento de determinación de un factor de inducción tal como se describe en la solicitud de patente, cuyo número de presentación es FR 1871455, de la cual se describen las etapas a continuación.

El procedimiento para determinar un factor de inducción del viento entre un plano de medida y el plano del rotor de un aerogenerador comprende las siguientes etapas:

A - Medir la velocidad del viento

Esta etapa es idéntica a la etapa 1) del procedimiento de predicción según la invención, para al menos tres planos de medida. Preferiblemente, se puede llevar a cabo una única serie de medidas para las etapas 1) y 2)A.

B - Determinar los factores de inducción entre planos de medida

Durante esta etapa, se determinan, en tiempo real, al menos dos factores de inducción del viento entre dos planos de medida. En otras palabras, se determina un primer factor mínimo de inducción del viento entre un primer plano de medida y un segundo plano de medida, y un segundo factor de inducción del viento entre un tercer plano de medida y un cuarto plano de medida (como máximo uno de los tercero y cuarto planos de medida corresponde a uno de los planos de medida primero y segundo). De manera simplificada, se denominan estos factores de inducción factores de inducción entre planos de medida a continuación en la descripción.

Según la invención, se determinan los factores de inducción entre planos de medida mediante medidas de la velocidad del viento y mediante un filtro de Kalman, en particular un filtro de Kalman lineal.

Ventajosamente, para esta etapa y para la realización para la que se lleva a cabo la medida para al menos cuatro planos de medida, se puede determinar al menos tres factores de inducción del viento entre planos de medida. Así, es posible aumentar la precisión del fenómeno de ralentización del viento aguas arriba del aerogenerador y por lo tanto la precisión de la estimación del factor de inducción del viento a nivel del plano del rotor.

Según una realización de la invención, se puede determinar un factor de inducción entre planos de medida para el plano de medida más próximo al plano del rotor, de manera a tener una información relativa al campo de viento lo más próximo posible del plano del rotor.

Según una realización de la invención, se pueden determinar los factores de inducción del viento entre planos de medida, para planos de medida que tienen la misma separación. Por ejemplo, la separación puede ser de 50 m y se puede determinar un primer factor de inducción para planos de medida situados a 70 y 120 m, y un segundo factor de inducción para planos de medida situados a 90 y 140 m.

Preferiblemente, la separación entre los planos de medida utilizados para los factores de inducción del viento entre planos de medida puede ser idéntica a la distancia entre el plano del rotor y el plano de medida más cercano. Así, se simplifica el modelo del factor de inducción, lo que facilita en particular la resolución del filtro de Kalman.

Por ejemplo, combinando las variantes descritas anteriormente, si el primer plano de medida está a 50 m del plano del rotor, se puede determinar un primer factor de inducción para planos de medida situados a 50 y 100 m, un segundo factor de inducción para planos de medida situados a 70 y 120 m, y un tercer factor de inducción para planos de medida situados a 90 y 140 m.

5 Según una realización de la invención, el filtro de Kalman se puede usar mediante las distintas etapas descritas a continuación. Las etapas se describen para una realización para la cual se determina un primer factor de inducción $a_{50,100}$ para planos de medida situados a 50 y 100, un segundo factor de inducción $a_{70,120}$ para planos de medida situados a 70 y 120 m, y un tercer factor de inducción $a_{90,140}$ para planos de medida situados a 90 y 140 m.

10 A continuación, se muestran solamente cómo estimar $a_{50,100}$ en tiempo real. $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$ se obtienen exactamente de la misma manera. Ya que u_{50} , u_{100} están disponibles en tiempo real, se podría usar directamente la ecuación de definición del factor de inducción para determinar $a_{50,100}$. Sin embargo, este método tiene inconvenientes. En efecto, las informaciones sobre la desviación estándar de las velocidades del viento estimadas u_{50} , u_{100} no se usan. Por lo tanto, no se puede conocer la desviación estándar de la estimación $a_{50,100}$. Por otro lado, se podría tener un problema de estabilidad de cálculo para velocidades pequeñas, es decir cuando u_{100} está próximo de cero.

15 Se anota $a_{50,100}(k)$ como el factor de inducción en el tiempo k . Está claro que la variación $a_{50,100}(k) - a_{50,100}(k - 1)$ es relativamente baja. Por lo tanto, se puede escribir:

[Math 2]

$$a_{50,100}(k) = a_{50,100}(k - 1) + \eta(k - 1)$$

20 en la que $\eta(k - 1)$ se usa para describir la variación de $a_{50,100}(k)$ a lo largo del tiempo.

Se reescribe la primera ecuación de definición del factor de inducción como

$$u_{100}(k)a_{50,100}(k) = u_{50}(k)$$

25 Dado que las estimaciones $u_{50}(k)$, $u_{100}(k)$ contienen ruido, un modelo más realista de la ecuación anterior es:

[Math 3]

$$(u_{100}(k) + \epsilon_{100}(k))a_{50,100}(k) = u_{50}(k) + \epsilon_{50}(k)$$

30 en la que $\epsilon_{50}(k)$, $\epsilon_{100}(k)$ son los ruidos para $u_{50}(k)$, $u_{100}(k)$, respectivamente. Entonces se puede reescribir la ecuación anterior como:

[Math 4]

$$u_{100}(k)a_{50,100}(k) = u_{50}(k) + \epsilon_{50}(k) - \epsilon_{100}(k)a_{50,100}(k)$$

35 Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene la ecuación de estado siguiente:

[Math 5]

$$\begin{cases} a_{50,100}(k) &= a_{50,100}(k - 1) + \eta(k - 1), \\ u_{50}(k) &= u_{100}(k)a_{50,100}(k) + \mu(k) \end{cases}$$

[Math 6]

$$\mu(k) = \epsilon_{100}(k)a_{50,100}(k) - \epsilon_{50}(k)$$

40 Una manera de estimar el vector de estado desconocido $a_{50,100}(k)$ que puede tomar en cuenta informaciones sobre $\epsilon(k)$ y $\mu(k)$ consiste en aplicar un algoritmo de filtrado de Kalman, denominado filtro de Kalman. En la práctica, este filtro proporciona la solución al siguiente problema:

[Math 7]

$$\min_{a_{50,100}(k)} J(k)$$

45 con

[Math 8]

$$J(k) = (a_{50,100}(0) - \bar{a}_{50,100}(0))^T P_0^{-1} (a_{50,100}(0) - \bar{a}_{50,100}(0)) + \sum_{j=1}^k (\eta(j-1)^T Q^{-1} \eta(j-1) + \mu(j)^T R^{-1} \mu(j))$$

en la que P_0, Q, R son matrices de ponderación de dimensión apropiada, $\bar{a}_{50,100}(0)$ cubierto con una barra es el valor promedio del estado inicial $a_{50,100}(0)$.

5 A fin de resolver el problema de optimización, utilizando el algoritmo de filtrado de Kalman, se formulan las siguientes hipótesis. Estas hipótesis se refieren principalmente a una interpretación matemática para P_0, Q y R .

- 10 • $a_{50,100}(0)$ es un vector aleatorio no correlacionado con ruidos $\epsilon(k)$ y $\mu(k)$.
- $a_{50,100}(0)$ tiene un promedio conocido con P_0 como una matriz de covarianza, es decir

[Math 9]

$$P_0 = E[(a_{50,100}(0) - \bar{a}_{50,100}(0))(a_{50,100}(0) - \bar{a}_{50,100}(0))^T]$$

15 con $\bar{a}_{50,100}(0)$ el valor promedio del estado inicial

- $\epsilon(k)$ y $\mu(k)$ son ruidos blancos con promedio nulo y no correlacionados con matrices de covarianza Q y R , respectivamente, es decir

[Math 10]

$$\begin{aligned} E[\eta(k)\eta(j)^T] &= \begin{cases} Q, & \text{if } k = j, \\ 0, & \text{if } k \neq j \end{cases} \\ E[\mu(k)\mu(j)^T] &= \begin{cases} R, & \text{if } k = j, \\ 0, & \text{if } k \neq j \end{cases} \\ E[\eta(k)\mu(j)^T] &= 0, \text{ for all } k, j \end{aligned}$$

20 Cabe señalar que esta hipótesis también implica que Q y R son matrices simétricas positivas semidefinidas.

25 Se adoptan las siguientes notaciones,

- $\hat{a}_{50,100}(k|k-1)$ es la estimación de $a_{50,100}(k)$ dadas las medidas del tiempo $k-1$.
- $\hat{a}_{50,100}(k|k)$ es la estimación de $a_{50,100}(k)$ dadas las medidas del tiempo k
- 30 • $P(k|k-1)$ es la matriz de covarianza de $a_{50,100}(k)$ dadas las medidas del tiempo $k-1$.
- $P(k|k)$ es la matriz de covarianza de $a_{50,100}(k)$ dadas las medidas del tiempo k . Después, el algoritmo de filtrado de Kalman se puede resumir de la siguiente manera,
- 35 • Ecuación de actualización del tiempo,

[Math 11]

$$\begin{cases} \hat{a}_{50,100}(k|k-1) &= \hat{a}_{50,100}(k-1|k-1) \\ P(k|k-1) &= P(k-1|k-1) + Q \end{cases}$$

- 40 • Ecuación de actualización de las medidas,

[Math 12]

$$\begin{cases} K(k) &= P(k|k-1)u_{100}(k)^T (P(k|k-1) + u_{100}(k)Ru_{100}(k)^T)^{-1} \\ \hat{a}_{50,100}(k|k) &= \hat{a}_{50,100}(k|k-1) + K(k) (u_{50}(k) - u_{100}(k)\hat{x}(k|k-1)), \\ P(k|k) &= (I - K(k)) P(k|k-1) \end{cases}$$

aplicando estas etapas, se puede determinar el factor de inducción $a_{50,100}$. Se repiten estas etapas para determinar los factores de inducción $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$.

5

C - Determinación del factor de inducción entre un plano de medida y el plano del rotor

Durante esta etapa, se determina, en tiempo real, el factor de inducción del viento entre uno de los planos de medidas y el plano del rotor. Así, se puede representar la evolución del viento a nivel del rotor, tomando en cuenta los fenómenos físicos, en particular la ralentización del viento. Según la invención, se determina el factor de inducción del viento entre un plano de medida y el plano del rotor mediante los factores de inducción determinados en la etapa anterior y mediante un filtro de Kalman, en particular un filtro de Kalman lineal. De manera simplificada, se denomina este factor de inducción factor de inducción en el plano del rotor a continuación en la descripción.

10

15

Preferiblemente, se puede determinar el factor de inducción del viento entre el plano de medida más cercano al rotor y el plano del rotor.

Por ejemplo, durante esta etapa, se puede determinar el factor de inducción entre un plano de medida situado a 50 m del rotor y el plano del rotor.

20

Según una realización de la invención, el filtro de Kalman puede implementarse mediante las distintas etapas descritas a continuación. Las etapas se describen para una realización para la cual se ha determinado $a_{50,100}$, $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$ y para lo cual se determina $a_{0,50}$, es decir el factor de inducción entre un plano de medida situado a 50 m y el plano del rotor.

25

Usando $a_{50,100}$, $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$, la idea principal de estimar $a_{0,50}$ es suponer que $a_{0,50}$, $a_{50,100}$, $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$ son función de la distancia. Con este objetivo, se supone la siguiente relación

[Math 13]

$$\begin{cases} a_{0,50} &= 0x_1 + x_2, \\ a_{50,100} &= 50x_1 + x_2, \\ a_{70,120} &= 70x_1 + x_2, \\ a_{90,140} &= 90x_1 + x_2 \end{cases}$$

30

en la que x_1 , x_2 son parámetros desconocidos, que deben determinarse. Como $a_{50,100}$, $a_{70,120}$ y $a_{90,140}$ cambian lentamente a lo largo del tiempo, es también el caso para x_1 y x_2 . Por lo tanto, se puede escribir

[Math 14]

$$\begin{cases} x_1(k) &= x_1(k-1) + \zeta_1(k-1), \\ x_2(k) &= x_2(k-1) + \zeta_2(k-1) \end{cases}$$

35

en la que $\zeta_1(k)$, $\zeta_2(k)$ se utilizan para caracterizar la variación de $x_1(k)$, $x_2(k)$. Se anota

[Math 15]

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}, \zeta(k) = \begin{bmatrix} \zeta_1(k) \\ \zeta_2(k) \end{bmatrix}$$

40

Se puede escribir entonces en forma compacta:

$$x(k) = x(k-1) + \zeta(k-1)$$

Un modelo más realista que toma en cuenta los ruidos es el siguiente:

[Math 16]

$$\begin{cases} a_{50,100}(k) = [50 \ 1] x(k) + \epsilon_1(k), \\ a_{70,120}(k) = [70 \ 1] x(k) + \epsilon_2(k), \\ a_{90,140}(k) = [90 \ 1] x(k) + \epsilon_3(k), \end{cases}$$

en la que ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 son los ruidos de las estimaciones $a_{50,100}(k)$, $a_{70,120}(k)$ y $a_{90,140}(k)$. Se puede anotar entonces:

5

[Math 17]

$$y(k) = \begin{bmatrix} a_{50,100}(k) \\ a_{70,120}(k) \\ a_{90,140}(k) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 50 & 1 \\ 70 & 1 \\ 90 & 1 \end{bmatrix}, \epsilon(k) = \begin{bmatrix} \epsilon_1(k) \\ \epsilon_2(k) \\ \epsilon_3(k) \end{bmatrix}$$

Se puede entonces escribir en una forma compacta

10

$$y(k) = Cx(k) + \epsilon(k)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación de estado

[Math 18]

$$\begin{cases} x(k) = x(k-1) + \zeta(k-1) \\ y(k) = Cx(k) + \epsilon(k) \end{cases}$$

15

Como para $a_{50,100}(k)$, $a_{70,120}(k)$, $a_{90,140}(k)$, una manera de obtener $x(k)$ que toma en cuenta los ruidos $\zeta(k)$, $\epsilon(k)$ utiliza la técnica del filtro lineal de Kalman. Para ello se aplican las mismas etapas que las descritos para la etapa anterior.

Una vez estimado $x(k)$, el factor de inducción $a_{0,50}$ se puede calcular de la siguiente manera:

20

$$a_{0,50}(k) = [0 \ 1]x(k).$$

3) Determinación de un índice de retraso

25

Durante esta etapa, se determina un índice de retraso mediante las medidas de la velocidad del viento (eventualmente las medidas reconstruidas) y mediante el factor de inducción. El índice de retraso define el tiempo de retraso del viento entre el plano de medida y el plano del rotor del aerogenerador. La dependencia del índice de retraso con el factor de inducción permite tomar en cuenta los fenómenos físicos (inducción) en la determinación del retraso, lo que permite hacer la predicción del viento más representativa de las condiciones reales.

30

Según una realización de la invención, se puede determinar el índice de retraso k_{d0} mediante una ecuación:

[Math 19]

$$k_{d0} = \frac{2x_1}{(U_{x1} + U_0)T_s}$$

$$U_0 = a_{0,x1}U_{x1}$$

35

con x_1 la distancia entre dicho plano de medida y dicho plano del rotor, T_s el período de muestreo de la medida, U_{x1} la velocidad promedio del viento medida en dicho plano de medida (determinada a partir de las medidas), U_0 la velocidad promedio del viento en dicho plano del rotor, y $a_{0,x1}$ dicho factor de inducción entre dicho plano de medida y dicho plano de rotor determinado en la etapa anterior.

40

4) Construcción de un modelo de evolución del viento

Durante esta etapa, se construye un modelo de evolución del viento. Un modelo de evolución del viento traduce la evolución de la velocidad del viento entre el plano de medida y el plano del rotor del aerogenerador. El modelo de evolución del viento relaciona la velocidad del viento en el plano del rotor en un instante t_1 predeterminado (siendo t_1

un instante futuro, instante de la predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor), con la velocidad del viento medida en el plano de medida en varios instantes anteriores al instante t1, mediante el factor de inducción. Los instantes anteriores al instante t1 se determinan mediante el índice de retraso. La dependencia del modelo de evolución del viento con el factor de inducción y con el índice de retraso permite tomar en cuenta los fenómenos físicos (inducción) en la determinación de la evolución del viento, lo que permite que la predicción del viento sea más representativa de las condiciones reales. Además, la toma en cuenta de varios instantes anteriores permite tomar en cuenta un mayor número de informaciones relativas al viento de manera a mejorar la predicción.

Preferentemente, los instantes anteriores al instante t1 pueden ser instantes situados alrededor de un instante t2 que corresponde al instante t1 menos el retraso relacionado con el movimiento del viento. En otras palabras, el instante t2 se puede determinar mediante el índice de retraso k_{d0} por una fórmula del tipo:

[Math 20]

$$t2 = t1 - k_{d0} \times T_s$$

Siendo T_s el periodo de muestreo de la medida.

Los instantes anteriores tomados en cuenta en el modelo pueden ser entonces instantes t, tales que:

[Math 21]

$$t = t2 \pm n \times T_s$$

Siendo n un número entero positivo o nulo menor o igual a N_d que es el orden del modelo de la evolución del viento.

Según una realización de la invención, el modelo de evolución del viento se puede escribir:

[Math 22]

$$u_0(k+p) = \tilde{U}_{x_1}(k - k_{d0} + p)^T r(k|k)$$

$$\tilde{U}_{x_1}(k - k_{d0} + p) = [\tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p) \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p - 1) \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p + 1) \quad \dots \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p + N_d)]^T$$

$$\tilde{u}_{x_1}(k) = a_{0,x_1} u_{x_1}(k)$$

con u_0 el viento en el plano del rotor, k el tiempo discretizado, p el paso de tiempo futuro, k_{d0} el índice de retraso, r el vector de estado determinado por el filtro de Kalman (durante la etapa 5)), x_1 el plano de medida, N_d el orden del modelo de evolución del viento, u_{x_1} la velocidad del viento medida en el plano de medida (eventualmente reconstruida), y a_{0,x_1} el factor de inducción entre el plano de medida y dicho plano de rotor determinado en la etapa 2).

Preferiblemente, a fin de limitar el tiempo de cálculo, el orden del modelo de evolución del viento N_d puede tener el valor de 2

5) Determinación de la predicción de la velocidad del viento

A fin de poder aplicar el modelo de evolución del viento construido en la etapa anterior para determinar la predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor, se aplica un filtro de Kalman para determinar el vector de estado r del modelo de evolución del viento. Preferiblemente, se aplica un filtro de Kalman adaptativo.

Para esta etapa, las anotaciones $\eta(k)$, $\mu(k)$, $J(k)$, P0, Q y R son específicas de esta etapa (las mismas anotaciones se usan de manera independiente en la etapa 2)).

Según una realización de la invención, esta etapa consiste en identificar el vector r definido por los valores $r_0, r_{-1}, r_1, \dots, r_{-N_d}, r_{N_d}$. Para caracterizar la naturaleza variable de la evolución del viento, se usa el siguiente modelo: $j = -N_d, -N_d+1, \dots, 0, \dots, N_d-1, N_d$.

[Math 23]

$$r_j(k) = r_j(k-1) + \eta_j(k-1)$$

en la que $\eta_j(k-1)$ se utiliza para describir la variación de $r_j(k)$.

5 Esta ecuación se puede reescribir en forma de vector compacto como

[Math 24]

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{r}(k-1) + \boldsymbol{\eta}(k-1)$$

o

10

$$\begin{cases} \mathbf{r}(k) = [r_0(k) & r_{-1}(k) & r_1(k) & \dots & r_{-N_d}(k) & r_{N_d}(k)]^T \\ \boldsymbol{\eta}(k) = [\eta_0(k) & \eta_{-1}(k) & \eta_1(k) & \dots & \eta_{-N_d}(k) & \eta_{N_d}(k)]^T \end{cases}$$

Se puede entonces escribir:

[Math 25]

$$\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k) = u_{x_1}(k)$$

15

con

[Math 26]

$$\tilde{U}_{x_2}(k - k_d) = [\tilde{u}_{x_2}(k - k_d) \quad \tilde{u}_{x_2}(k - k_d - 1) \quad \tilde{u}_{x_2}(k - k_d + 1) \quad \dots \quad \tilde{u}_{x_2}(k - k_d + N_d)]^T$$

20

Se puede señalar que los valores de u de esta ecuación son valores estimados que contienen ruidos. Por lo tanto, un modelo más realista de esta ecuación puede ser

[Math 27]

$$(\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T + \epsilon_{x_2}(k - k_d)^T) \mathbf{r}(k) = u_{x_1}(k) + \epsilon_{x_1}(k)$$

25

en la que $\epsilon_{x_1}(k)$ y $\epsilon_{x_2}(k - k_d)$ son ruidos para $u_{x_1}(k)$ y $\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)$ respectivamente. Se puede entonces reescribir la ecuación anterior como

[Math 28]

$$\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k) = u_{x_1}(k) + \epsilon_{x_1}(k) - \epsilon_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k)$$

30

Se puede obtener entonces la ecuación de espacio de estado siguiente:

[Math 29]

$$\begin{cases} \mathbf{r}(k) & = \mathbf{r}(k-1) + \boldsymbol{\eta}(k-1) \\ \tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k) & = u_{x_1}(k) + \mu(k) \end{cases}$$

35 Con

[Math 30]

$$\mu(k) = \epsilon_{x1}(k) - \epsilon_{x2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k)$$

siendo $\mu(k)$ el ruido de medida. Conviene señalar que este ruido depende de la estimación del estado $\mathbf{r}(k)$. En otras palabras, la matriz de covarianza de las medidas es función de $\mathbf{r}(k)$.

5 Una manera de estimar el vector de estado desconocido $\mathbf{r}(k)$ que puede tomar en cuenta informaciones sobre $\eta(k)$ y $\mu(k)$ consiste en aplicar un filtro de Kalman. En la práctica, el filtro de Kalman aporta la solución al siguiente problema:

[Math 31]

$$\min_{\mathbf{r}(k)} J(k)$$

10 Con

[Math 32]

$$J(k) = (\mathbf{r}(0) - \bar{\mathbf{r}}(0))^T P_0^{-1} (\mathbf{r}(0) - \bar{\mathbf{r}}(0)) + \sum_{j=1}^k (\eta(j-1)^T Q^{-1} \eta(j-1) + \mu(j)^T R^{-1} \mu(j))$$

15 Con p_0 , Q , R que son matrices de ponderación de dimensiones apropiadas, $\bar{\mathbf{r}}(0)$ el valor promedio de $\mathbf{r}(0)$.

A fin de resolver el problema de optimización con la ayuda del filtro de Kalman, se formulan las siguientes hipótesis. Estas hipótesis se refieren principalmente a una interpretación matemática de P_0 , Q , R .

- 20
- $\mathbf{r}(0)$ es un vector aleatorio no correlacionado con los ruidos $\eta(k)$ y $\mu(k)$
 - $\mathbf{r}(0)$ tiene una media conocida $\bar{\mathbf{r}}(0)$ con P_0 como matriz de covarianza, es decir:

[Math 33]

$$P_0 = E [(\mathbf{r}(0) - \bar{\mathbf{r}}(0))(\mathbf{r}(0) - \bar{\mathbf{r}}(0))^T]$$

25 $\eta(k)$ y $\mu(k)$ son procesos de ruido blanco de media cero no correlacionados, es decir:

[Math 34]

$$\begin{aligned} E [\eta(k)\eta(j)^T] &= 0, \forall k \neq j, \\ E [\mu(k)\mu(j)^T] &= 0, \forall k \neq j, \\ E [\eta(k)\mu(j)^T] &= 0, \forall k, j \end{aligned}$$

- 30
- $\eta(k)$ tiene una matriz de covarianza Q , es decir:

[Math 35]

$$E [\eta(k)\eta(k)^T] = Q$$

Para el ruido de medida, se obtiene:

35

[Math 36]

$$E [\eta(k)\eta(k)^T] = E [(\epsilon_{x_1}(k) - \epsilon_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k))(\epsilon_{x_1}(k) - \epsilon_{x_2}(k - k_d)^T \mathbf{r}(k))^T]$$

$$E [\eta(k)\eta(k)^T] = E(\epsilon_{x_1}(k)\epsilon_{x_1}(k)^T) + \mathbf{r}(k)^T E(\epsilon_{x_2}(k - k_d)\epsilon_{x_2}(k - k_d)^T) \mathbf{r}(k)$$

$$R = E(\epsilon_{x_1}(k)\epsilon_{x_1}(k)^T) + \mathbf{r}(k)^T E(\epsilon_{x_2}(k - k_d)\epsilon_{x_2}(k - k_d)^T) \mathbf{r}(k)$$

Se puede señalar que la matriz de covarianza del ruido de medida depende del estado estimado $\mathbf{r}(k)$.

5 Se adoptan las anotaciones siguientes:

- $\mathbf{r}(k|k - 1)$ es la estimación de $\mathbf{r}(k)$ a partir del tiempo $k - 1$
- $\mathbf{r}(k|k)$ es la estimación de $\mathbf{r}(k)$ a partir de medidas del tiempo k
- $P(k|k - 1)$ es la matriz de covarianza de error de $\mathbf{r}(k)$ a partir de medidas del tiempo $k - 1$
- $P(k|k)$ es la matriz de covarianza de error de $\mathbf{r}(k)$ a partir de medidas del tiempo k .

15 Después, el filtro de Kalman se puede resumir de la siguiente manera:

- Predicción

[Math 37]

$$\begin{cases} \mathbf{r}(k|k - 1) &= \mathbf{r}(k - 1|k - 1), \\ P(k|k - 1) &= P(k - 1|k - 1) + Q \end{cases}$$

20

- Corrección

[Math 38]

$$\begin{cases} S(k) &= \tilde{U}_{x_2}(k - k_d)P(k|k - 1)\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T + R \\ K(k) &= P(k|k - 1)\tilde{U}_{x_2}(k - k_d)^T S(k)^{-1} \\ \mathbf{r}(k|k) &= \mathbf{r}(k|k - 1) + K(k)(w_{x_1}(k) - \tilde{U}_{x_2}(k - k_d)\mathbf{r}(k|k - 1)), \\ P(k|k) &= (I - K(k))P(k|k - 1) \end{cases}$$

25 Así, este filtro de Kalman permite determinar el vector de estado \mathbf{r} , que después se integra en el modelo de evolución del viento determinado en la etapa anterior, a fin de determinar la predicción del viento en el plano del rotor.

La presente invención también se refiere a un procedimiento para controlar un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR. Para este proceso se llevan a cabo las siguientes etapas:

30

- predecir la velocidad del viento en el plano del rotor mediante el procedimiento de predicción de la velocidad del viento según una cualquiera de las variantes descritas anteriormente;
- controlar el aerogenerador en función de la velocidad del viento a nivel del plano del rotor.

35

La predicción precisa y en tiempo real de la velocidad del viento en el plano del rotor permite un control adaptado del aerogenerador, en términos de minimizar los efectos sobre la estructura del aerogenerador y maximizar la potencia recuperada. En efecto, mediante este control, el LIDAR permite reducir las cargas sobre la estructura, de la que las palas y el mástil representan el 54% del coste. En consecuencia, el uso de un sensor LIDAR permite optimizar la estructura del aerogenerador, y por tanto reducir los costes y el mantenimiento.

40

Según una realización de la invención, se pueden controlar el ángulo de inclinación de las palas y/o el par eléctrico de recuperación del generador del aerogenerador en función de la velocidad del viento. Se pueden utilizar otros tipos de dispositivos de regulación.

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

10 Además, la invención se refiere a un producto de programa informático, que comprende instrucciones de códigos dispuestos para implementar las etapas de uno de los procedimientos descritos anteriormente (procedimiento para determinar la velocidad en el plano del rotor, procedimiento para controlar). El programa se ejecuta en una unidad de procesamiento del sensor LIDAR, o en cualquier medio análogo, vinculado al sensor LIDAR o al aerogenerador.

15 Según un aspecto, la presente invención también se refiere a un sensor LIDAR para un aerogenerador, que comprende una unidad de procesamiento configurada para implementar uno de los procedimientos descritos anteriormente (procedimiento para determinar la velocidad en el plano del rotor, procedimiento para controlar).

20 Según una implementación de la invención, el sensor LIDAR puede ser un sensor LIDAR escaneado, LIDAR continuo o LIDAR pulsado. Preferiblemente, el sensor LIDAR es un sensor LIDAR pulsado.

25 La invención también se refiere a un aerogenerador, en particular un aerogenerador offshore (en el mar) o onshore (en tierra) equipado con un sensor LIDAR tal como se describe anteriormente. Según una realización de la invención, el sensor LIDAR puede estar dispuesto en la góndola del aerogenerador o en el morro del aerogenerador. El sensor LIDAR está orientado de tal manera que puede realizar una medida del viento aguas arriba del aerogenerador (es decir antes del aerogenerador y a lo largo de su eje longitudinal, designado por el eje x en la figura 1). Según una realización, el aerogenerador puede ser conforme el aerogenerador ilustrado en la figura 1.

30 Para la realización del procedimiento de control, el aerogenerador puede comprender medios de control, por ejemplo el control del ángulo de pitch (que se puede traducir como ángulo de cabeceo) de al menos una pala del aerogenerador o del par eléctrico, para implementar el procedimiento de control según la invención.

Ejemplos

35 Las características y ventajas del procedimiento de predicción según la invención destacarán más claramente con la ayuda de los ejemplos comparativos que se dan a continuación.

40 Para estos ejemplos, se compara la velocidad del viento en el plano del rotor predicha con un procedimiento según la técnica anterior para el cual se aplica la hipótesis de turbulencia congelada de Taylor, y la velocidad del viento en el plano del rotor predicha con un procedimiento según la invención, para un aerogenerador equipado con un sensor LIDAR.

45 Para validar el procedimiento según la invención, se lleva a cabo la hipótesis de que el aerogenerador está situado en el plano de medida a 50 m: así, gracias a las medidas del sensor LIDAR, se considera una referencia que es la velocidad promedia medida del viento en el plano de medida a 50 m, y se aplican el procedimiento según la técnica anterior y el procedimiento según la invención para estimar la velocidad del viento en el plano de medida a 50 m a partir de un plano de medida distante del plano de medida a 50 m, por ejemplo un plano de medida a 100 m.

50 La figura 4 es una curva que ilustra la velocidad promediada del viento en el plano del rotor RAWS (velocidad promedia del viento en el plano del rotor en la zona formada por las palas del aerogenerador) en m/s en función del tiempo T en s. La figura 4 corresponde a una predicción en el tiempo $t=0s$ (tiempo real). Esta figura muestra la velocidad promediada del viento de referencia REF, la velocidad promedia del viento predicha con un procedimiento según la técnica anterior AA para el que se aplica la hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor, y la velocidad promediada del viento predicha con un procedimiento según la invención INV. Se observa que la velocidad del viento estimada por el procedimiento según la invención INV es más representativa de la velocidad de referencia REF que la velocidad del viento estimada por el procedimiento según la técnica anterior AA.

60 La figura 5 es una curva que ilustra la velocidad promediada del viento en el plano del rotor RAWS en m/s en función del tiempo T en s. La figura 5 corresponde a una predicción en el tiempo $t=1s$ (predicción en 1s de tiempo real). Esta figura muestra la velocidad promediada del viento de referencia REF, y la velocidad promediada del viento predicha con un procedimiento según la invención INV. Se observa que la velocidad del viento estimada por el procedimiento según la invención INV es próxima a la velocidad de referencia REF.

65 La figura 6 es una curva que ilustra la velocidad promediada del viento en el plano del rotor RAWS en m/s en función del tiempo T en s. La figura 6 corresponde a una predicción en el tiempo $t=2s$ (predicción en 2s de tiempo real). Esta figura muestra la velocidad promediada del viento de referencia REF, y la velocidad promediada del viento predicha

con un procedimiento según la invención INV. Se observa que la velocidad del viento estimada por el procedimiento según la invención INV es próxima a la velocidad de referencia REF.

5 Así, el procedimiento según la invención permite una buena precisión de la predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para predecir la velocidad del viento en el plano del rotor de un aerogenerador (1) equipado con un sensor LIDAR (2), en el que se implementan las siguientes etapas:

5 a) medir la velocidad del viento en al menos un plano de medida (PM), distante de dicha turbina (1), mediante dicho sensor LIDAR (2);

10 b) determinar un factor de inducción del viento, representando dicho factor de inducción del viento un coeficiente de ralentización del viento entre dicho plano de medida y dicho plano de dicho rotor;

15 c) determinar un índice de retraso entre dicho plano de medida (PM) y dicho plano del rotor (PR) de dicho aerogenerador (1) mediante dicho factor de inducción y de dicha medida de la velocidad del viento en dicho plano de medida;

20 d) construir un modelo de evolución del viento entre dicho plano de medida (PM) y dicho plano de dicho rotor (PR), relacionando dicho modelo de evolución del viento la velocidad del viento en dicho plano de dicho rotor (PR) en un instante predeterminado a la velocidad medida del viento en dicho plano de medida (PM) con varios instantes anteriores a dicho instante predeterminado, mediante dicho factor de inducción, determinándose dichos instantes previos mediante dicho índice de retraso;

e) determinar dicha predicción de la velocidad del viento en dicho plano del rotor mediante dicho modelo de evolución del viento y de un filtro de Kalman, preferentemente un filtro de Kalman adaptativo.

25 2. Procedimiento de predicción según la reivindicación 1, en el que se determina un factor de inducción del viento llevando a cabo las siguientes etapas:

30 i) medir la velocidad del viento en al menos tres planos de medida (PM), distantes de dicho aerogenerador mediante dicho sensor LIDAR (2);

ii) determinar al menos dos factores de inducción del viento entre dos de dichos planos de medida (PM) mediante dichas medidas de la velocidad del viento en dichos planos de medida y de un filtro de Kalman lineal; y

35 iii) determinar dicho factor de inducción del viento entre un plano de medida (PM) y dicho plano del rotor (PR) de dicho aerogenerador (1) mediante dichos factores de inducción entre dos planos de medida (PM) determinados y mediante un filtro de Kalman lineal.

40 3. Procedimiento de predicción según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha etapa de medir la velocidad del viento comprende una subetapa de reconstrucción del campo de viento en dicho plano de medida (PM), siendo utilizado este campo de viento reconstruido en las demás etapas del procedimiento como medida de la velocidad del viento en dicho plano de medida.

45 4. Procedimiento de predicción según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina el índice de retraso k_{d0} mediante una ecuación:

$$k_{d0} = \frac{2x_1}{(u_{x_1} + u_0)T_s}$$

50 con

$$U_0 = a_{0,x_1} U_{x_1}$$

55 siendo x_1 la distancia entre dicho plano de medida (PM) y dicho plano de rotor (PR), T_s el período de muestreo para la medida, U_{x_1} la velocidad promedio del viento medida en dicho plano de medida (PM), U_0 la velocidad promedio del viento en dicho plano del rotor (PR), y a_{0,x_1} dicho factor de inducción entre dicho plano de medida (PM) y dicho plano de rotor (PR).

60 5. Procedimiento de predicción según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho modelo de evolución del viento está se escribe:

$$u_0(k+p) = \tilde{U}_{x_1}(k - k_{d0} + p)^T \mathbf{r}(k|k)$$

con

$$\tilde{U}_{x_1}(k - k_{d0} + p) = [\tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p) \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p - 1) \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p + 1) \quad \dots \quad \dots \quad \tilde{u}_{x_1}(k - k_{d0} + p + N_d)]^T$$

y

5

$$\tilde{u}_{x_1}(k) = a_{0,x_1} u_{x_1}(k)$$

siendo u_0 el viento en el plano del rotor (PR), k el tiempo discretizado, p el paso de tiempo futuro, k_{d0} el índice de retraso, r el vector de estado determinado por el filtro de Kalman, x_1 el plano de medida, N_d el orden de dicho modelo de evolución del viento, u_{x_1} la velocidad del viento medida en dicho plano de medida (PM), y a_{0,x_1} dicho factor de inducción entre dicho plano de medida (PM) y dicho plano de rotor (PR).

10

6. Procedimiento de predicción según la reivindicación 5, en el que el orden del modelo de la evolución del viento N_d tiene el valor de 2.

15

7. Procedimiento para controlar un aerogenerador (1) equipado con un sensor LIDAR (2), caracterizado por que se llevan a cabo las siguientes etapas:

20

a) determinar dicha predicción de la velocidad del viento en el plano del rotor (PR) de dicho aerogenerador (1) mediante el procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores;

b) controlar dicho aerogenerador (1) en función de dicha velocidad del viento a nivel del plano del rotor (PR).

25

8. Producto de programa informático, caracterizado por que comprende instrucciones de código dispuestas para llevar a cabo las etapas de un procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, cuando el programa se ejecuta en una unidad de procesamiento de dicho sensor LIDAR (2).

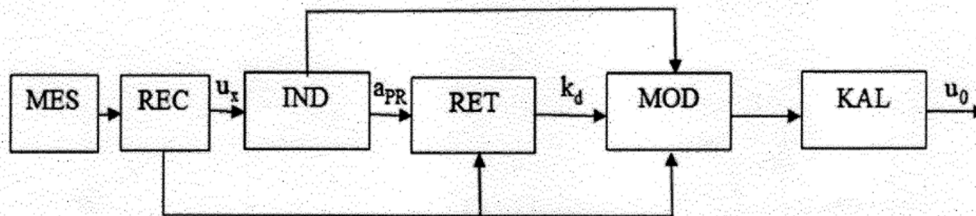
30

9. Sensor LIDAR (2) adaptado para medir la velocidad del viento en al menos un plano de medida (PM), que está distante de un aerogenerador, caracterizado por que comprende una unidad de procesamiento que lleva a cabo las etapas b) a e) de un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7.

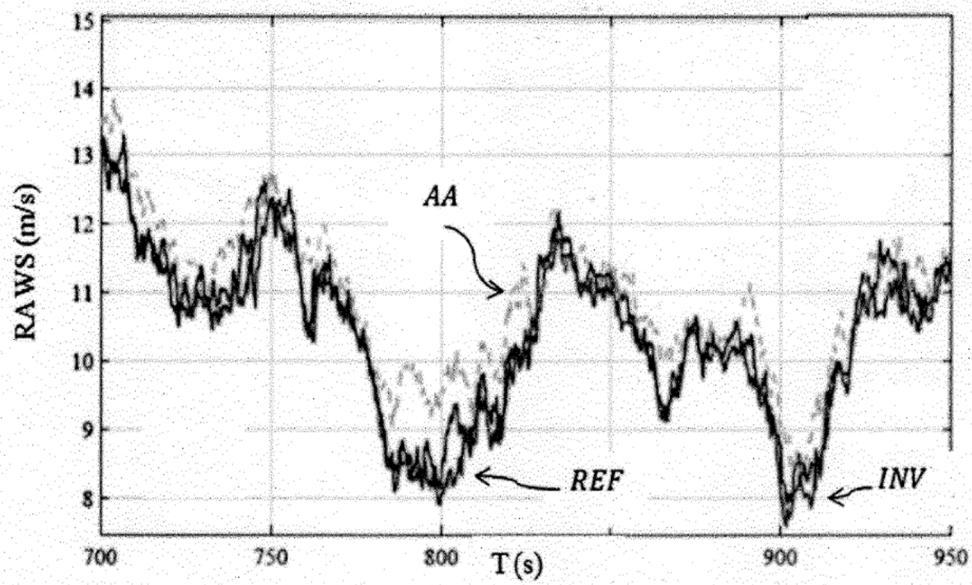
35

10. Aerogenerador (1), caracterizado por que comprende un sensor LIDAR (2) según la reivindicación 9, estando dicho sensor LIDAR (2) preferentemente colocado en la góndola de dicho aerogenerador (1) o en el morro del aerogenerador.

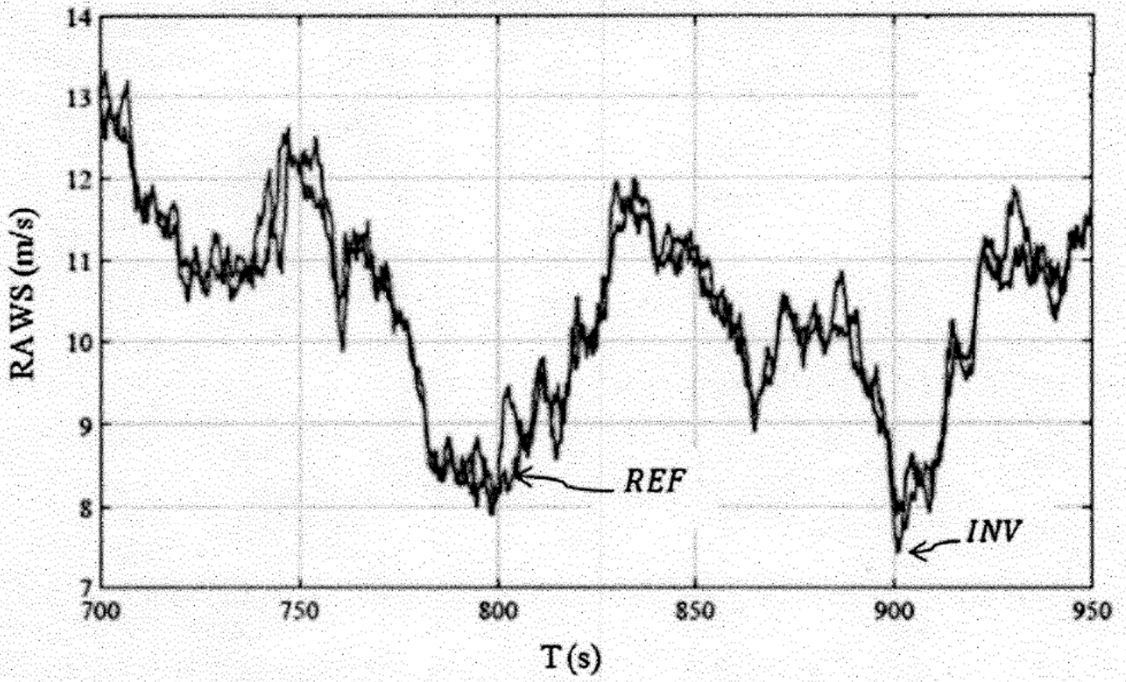
[Fig 3]



[Fig 4]



[Fig 5]



[Fig 6]

