

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 710 336**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 7/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.05.2012** **E 12290166 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.10.2018** **EP 2535571**

54 Título: **Procedimiento para optimizar la potencia recuperada por una turbina eólica reduciendo el impacto mecánico sobre la estructura**

30 Prioridad:

**17.06.2011 FR 1101879**

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

**24.04.2019**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**CHAUVIN, JONATHAN y**  
**CREFF, YANN**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 710 336 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 para optimizar la potencia recuperada por una turbina eólica reduciendo el impacto mecánico sobre la estructura

5 La presente invención se refiere al campo de las energías renovables y más particularmente al control de las turbinas eólicas.

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

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

20 - Una góndola montada en la parte superior de la torre, que cubija los 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, compuesto por varias palas (en general tres) y el buje de la turbina eólica, fijado a la góndola. El rotor es impulsado por la energía del viento, se une mediante un árbol mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de caja de engranajes y de árbol mecánico) a la máquina eléctrica (generador eléctrico...) que convierte la energía recogida en energía eléctrica.

En el caso de la turbina eólica marina, se distingue el caso en el que la turbina eólica se apoya sobre el fondo marino (turbina eólica apoyada o fundada) y el caso en el que la turbina eólica está soportada por una plataforma que flota sobre el mar y que está anclada con el fondo (turbina eólica flotante).

30 La perspectiva de aumento de la producción de energía eólica necesita el desarrollo de herramientas de producción eficaces, y herramientas de control avanzado para mejorar los rendimientos de las máquinas. Las turbinas eólicas se conciben para producir electricidad a un precio tan bajo como sea posible. En consecuencia, las turbinas eólicas se construyen en general de manera que alcancen su máximo rendimiento a aproximadamente 15 m/s. Es de hecho inútil concebir turbinas eólicas que maximicen su rendimiento a velocidades del viento aún más elevadas, al ser estas poco frecuentes. En caso de velocidades del viento superiores a 15 m/s, es necesario perder una parte de la energía suplementaria contenida en el viento con el fin de evitar cualquier daño a la turbina eólica. Todas las turbinas eólicas se conciben por tanto con un sistema de regulación de la potencia.

40 Los controladores lineales se han utilizado ampliamente para la regulación de potencia mediante el control del ángulo de inclinación de las palas (orientación de las palas). Se conocen técnicas que utilizan unos controladores PI y PID, unas técnicas de control LQ y LQG, unas estrategias basadas sobre controles lineales robustos.

45 No obstante, los rendimientos de estos controladores lineales están limitados por las características fuertemente no lineales de la turbina eólica. Las primeras estrategias basadas sobre controles no lineales se han utilizado en: Boukhezzer B., Lupu L., Siguerdidjane H., Hand M. "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines" Renewable Energy, 32 (2007) 1273-1287.

50 Los documentos EP2 112 376 A2 y US 2006/0033338 A1 divulgan unas estrategias de control alternativas de las turbinas eólicas.

Sin embargo, ninguno de estos controladores permite tener en cuenta el impacto mecánico (fatiga y momento extremo) sobre la estructura.

55 El objeto de la invención se refiere a un procedimiento para optimizar la producción de energía eléctrica de una turbina eólica de eje horizontal, efectuando un control no lineal de la orientación de las palas teniendo en cuenta las dinámicas del sistema, mientras se minimiza el impacto mecánico sobre la estructura. El impacto se minimiza modificando el ángulo de inclinación de las palas de manera que la fuerza aerodinámica aplicada a la góndola conduzca a una velocidad nula de la cima de la torre. El procedimiento se basa principalmente en un modelo físico de la fuerza aerodinámica.

60 El procedimiento según la invención

65 De manera general, la invención se refiere a un procedimiento para optimizar la producción de energía eléctrica de una turbina eólica de eje horizontal, incluyendo dicha turbina eólica una torre que soporta una góndola provista de un rotor sobre el que se fijan unas palas, en la que se controla un ángulo de inclinación de dichas palas. El procedimiento incluye las siguientes etapas:

- a) se determina un primer ángulo de inclinación de las palas que permite optimizar la potencia recuperada, por medio de las etapas i, ii, iii y iv;
- b) se elige un modelo de fuerza aerodinámica para modelizar una fuerza aerodinámica producida sobre la góndola en función de una velocidad del viento, de un ángulo de inclinación y de una velocidad del rotor;
- 5 c) se determina la fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas están orientadas con dicho primer ángulo;
- d) se determina un valor de consigna de fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas están orientadas con dicho primer ángulo, disminuyendo dicha fuerza aerodinámica determinada en la etapa c) por un término definido de manera que se disminuyan unas variaciones de velocidad de la cima de dicha torre;
- 10 e) se determina un segundo ángulo de inclinación de las palas que permite obtener dicho valor de consigna de fuerza aerodinámica invirtiendo dicho modelo de fuerza aerodinámica y utilizando una medida de la velocidad del viento, una medida de la velocidad del rotor y dicho valor de consigna de la fuerza aerodinámica; y
- f) se orientan las palas según dicho segundo ángulo.
- 15 Según la invención, el término definido de manera que disminuyan unas variaciones de velocidad de la cima de la torre es proporcional a una desviación entre unos valores reales de posiciones y de velocidades de la torre y unos valores de referencia de posiciones y de velocidades de la torre, siendo un valor de referencia de posición función de la fuerza aerodinámica determinada en la etapa c), y siendo un valor de referencia de velocidad un valor nulo.
- 20 Según la invención, el modelo de fuerza aerodinámica en función de la velocidad del viento  $V_w$ , de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  y de la velocidad del rotor  $\Omega_r$  puede escribirse:

$$F_{aero} = 0,5 \rho \Pi R_b^2 c_t \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

25 Siendo:

- $R_b$ : radio del rotor;
- $\rho$ : densidad del aire;
- 30 -  $c_t$ : parámetro procedente de la cartografía.

Se puede añadir al término correspondiente a la velocidad del viento del modelo de fuerza aerodinámica, un término proporcional a la torsión de la torre.

35 Según la invención, se puede determinar el primer ángulo de inclinación de las palas que permite optimizar la potencia recuperada, realizando las siguientes etapas:

- a) se elige un modelo de par aerodinámico para modelizar el par aerodinámico producido sobre la góndola en función de una velocidad del viento  $V_w$ , de dicho ángulo de inclinación y de una velocidad del rotor  $\Omega_r$ .
- b) se determina un valor de consigna del par aerodinámico por medio de dicho modelo;
- 45 c) se determina dicho primer ángulo de inclinación de las palas que permite obtener dicho valor de consigna de par aerodinámico invirtiendo dicho modelo de par aerodinámico y utilizando una medida de la velocidad del viento, una medida de la velocidad del rotor y dicho valor de consigna del par aerodinámico;

El modelo de par aerodinámico puede escribirse:

$$T_{aero} = 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

50 Siendo:

- $R_b$ : radio del rotor;
- 55 -  $\rho$ : densidad del aire;
- $c_q$ : parámetro procedente de la cartografía.

60

Se puede añadir al término correspondiente a la velocidad del viento de dicho modelo de par aerodinámico, un término proporcional a la torsión de la torre.

5 Surgirán otras características y ventajas del procedimiento según la invención, con la lectura de la descripción en el presente documento a continuación de ejemplos no limitativos de realizaciones, con referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

Presentación sucinta de las figuras

- 10 - La figura 1 ilustra un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_q$ .
- La figura 2 ilustra un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_t$ .
- 15 - La figura 3 ilustra un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_p$ .
- La figura 4 representa el encadenamiento de las etapas del procedimiento según la invención.
- La figura 5 ilustra un ejemplo de calibración del par eléctrico  $T_e$  en función de la medida de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ .

20 Descripción detallada del procedimiento

En el transcurso de la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

25 *Variables controladas:*

- $\theta$  el ángulo de inclinación de las palas en grados (también llamado paso).
- $T_e$  el par de la máquina eléctrica en N·m.

30 *Variables medidas, indicadas por MED(-):*

- $V_w$  la velocidad del viento en m/s. Esa velocidad es el resultado de la medida a partir de un anemómetro o resultado de una estimación.
- 35 •  $\Omega_r$  la velocidad del rotor en rad/s.
- $T_{aero}$  el par aerodinámico (la fuerza de rotación aplicada al rotor bajo el efecto del viento)
- 40 •  $x_t$  el desplazamiento de la torre con relación a su equilibrio. Esta posición corresponde al desplazamiento horizontal de la cima de la torre, en metros, con relación a su posición de equilibrio sin viento ni oleaje.
- $x_p$  el desplazamiento de la plataforma con relación a su equilibrio. Esta posición corresponde al desplazamiento del punto de conexión entre la plataforma y la torre, en metros, con relación a su posición de equilibrio sin viento ni oleaje. Si no se considera más que el caso terrestre, esta variable se supondrá constante e igual a 0.

45 El procedimiento según la invención, para optimizar la producción de energía eléctrica de una turbina eólica, incluye las siguientes etapas:

- 50 1) se determina un primer ángulo de inclinación de las palas que permite maximizar la potencia recuperada y un par de recuperación de la máquina eléctrica;
- 2) se elige un modelo de fuerza aerodinámica para modelizar la fuerza aerodinámica producida sobre la góndola en función de la velocidad del viento  $V_w$ , del ángulo de inclinación y de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ .
- 55 3) se determina la fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas se orientan con este primer ángulo;
- 4) se determina un valor de consigna de fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas se orientan con este primer ángulo, disminuyendo la fuerza aerodinámica determinada en la etapa c) por un término definido de manera que se disminuyan las variaciones de velocidad de la torre;
- 60 5) se determina un segundo ángulo de inclinación de las palas que permite obtener el valor de consigna de fuerza aerodinámica invirtiendo el modelo de fuerza aerodinámica y utilizando una medida de velocidad del viento, una medida de velocidad del rotor y el valor de consigna de la fuerza aerodinámica;
- 65

6) se orientan las palas según este segundo ángulo.

1. Determinación del paso que permite maximizar la potencia recuperada

5 Un objetivo del procedimiento según la invención es maximizar la producción de energía de una turbina eólica de eje horizontal (hélice perpendicular al viento), implantada sobre tierra (“terrestre”) o en el mar (“marina”), mientras se limitan los momentos extremos y la fatiga de la estructura mecánica.

10 Para maximizar la producción de energía de la turbina eólica se busca el ángulo de inclinación de las palas, llamado “paso” e indicado por  $\theta$ , que permite maximizar la potencia recuperada  $P_{aero}$  en función de la velocidad del viento  $V_w$ . La orientación de las palas es el ángulo entre las palas y una referencia tal como el suelo (plano horizontal, perpendicular a la torre de la turbina eólica).

15 Según un modelo de realización, para definir este ángulo, se utiliza un modelo de la potencia recuperable. Esta potencia  $P_{aero}$  puede escribirse:

$$P_{aero} = T_{aero} * \Omega_r$$

Siendo:

20

- $T_{aero}$  el par aerodinámico (fuerza de rotación aplicada al rotor bajo el efecto del viento)
- $\Omega_r$  la velocidad del rotor en rad/s.

Se busca por tanto el ángulo  $\theta$  que permite maximizar  $P_{aero}$ . Para hacer esto, se realizan las siguientes etapas:

25

- i- se genera una consigna de par eléctrico  $T_e^{sp}$  en función de una medida de la velocidad del rotor;
- ii- se genera una consigna de velocidad del rotor, consigna  $\Omega_r^{sp}$  en función de la medida de la velocidad del viento  $V_w$ , por medio de cartografías;
- iii- se genera una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  para seguir esta consigna de velocidad del rotor;
- 30 iiiii- se determina la posición del paso  $\theta$  que permite realizar este par aerodinámico y garantizar la regulación de la velocidad del rotor;

i- Generación de una consigna de par eléctrico  $T_e^{sp}$

35 Se determina esta consigna en función de la medida de la velocidad del rotor. Este par se determina para optimizar la recuperación de energía bajo la limitación de la potencia máxima, por medio de una cartografía. Un ejemplo de la cartografía de ese tipo se proporciona en la figura 5, en la que se representa  $T_e$  en función de  $\Omega_r$ .

ii- Generación de una consigna de velocidad del rotor  $\Omega_r^{sp}$

40

Se determina en un primer tiempo una consigna de velocidad del rotor  $\Omega_r^{sp}$ . Esta consigna se obtiene por medio de cartografías que son función de la velocidad del viento.

45 Según la invención, se modeliza el par aerodinámico  $T_{aero}$  mediante un modelo que describe la potencia del viento contenida en un cilindro, multiplicada por un factor que describe el hecho de que una turbina eólica no permite recuperar más que una parte de esta potencia. Se modeliza de ese modo el par aerodinámico en función de la velocidad del viento  $V_w$ , del paso  $\theta$  y de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ . Un modelo de ese tipo puede escribirse así en régimen estabilizado:

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 \quad (1)$$

50

Siendo:

- $R_b$ : radio del rotor;
- 55 -  $\rho$ : densidad del aire;
- $c_q$ : cartografía a calibrar.

Un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_q$  se representa en la figura 1. Esta cartografía indica el valor del parámetro  $c_q$  en función de la relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$ , para diferentes pasos (una curva para cada  $\theta$ ). Este tipo de

cartografías es bien conocido por los especialistas. La relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$  se indica como TSR en las figuras 1 a 3.

De ese modo, para determinar la velocidad del rotor de consigna  $\Omega_r^{sp}$  en función del viento, se optimiza la potencia aerodinámica recuperada para cada velocidad de viento.

5

$$\Omega_r^{sp} = \arg \left( \max_{\Omega_r} \left\{ 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 * \Omega_r \right\} \right)$$

iii - Generación de una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$

10 El objetivo es generar una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  que permita realizar la velocidad del rotor de consigna  $\Omega_r^{sp}$ . Para ello, se utiliza un modelo de la dinámica del rotor.

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{aero} - T_l(\Omega_r) - NT_e$$

15 Siendo:

- $J_r$ : inercia del rotor;
- $T_l(\Omega_r)$ : par de rozamiento y de la carga sobre el rotor (se utiliza clásicamente un polinomio de segundo orden);
- $N$ : relación de la caja entre el eje del rotor y el eje de la máquina eléctrica.

20

De ese modo, la estrategia de control utilizada es una estrategia de control dinámico que anticipa la variación de consigna y que la corrige con dos términos, un término proporcional y un término integral. La estrategia se escribe

$$T_{aero}^{sp} = T_l(\Omega_r) + NT_e(\Omega_r) + J_r \frac{d\Omega_r^{sp}}{dt} - k_p(\Omega_r - \Omega_r^{sp}) - k_i \int (\Omega_r - \Omega_r^{sp})$$

25

en la que  $k_p$  y  $k_i$  son dos parámetros reales a calibrar para garantizar la convergencia de la velocidad hacia su consigna.

iiii - Determinación de una posición de paso  $\theta$

30

A partir de esta consigna de par, se determina un ángulo de inclinación  $\theta$  de las palas para satisfacer esta demanda de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$ . Para ello, se utiliza el modelo de par aerodinámico (ecuación 1), con la medida de la velocidad del viento  $V_w$ , la medida del régimen del rotor  $\Omega_r^{sp}$  y el par de consigna  $T_{aero}^{sp}$ . invirtiendo el modelo (mediante un algoritmo de Newton por ejemplo), se obtiene una consigna de paso  $\bar{\theta}$ .

35

$$\bar{\theta} = \arg \left( \min_{\theta} \left( T_{aero}^{sp} - 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 \right)^2 \right)$$

De ese modo, con esta ley de control, se garantiza la convergencia hacia la velocidad del rotor de referencia, permitiendo maximizar la potencia recuperada.

40

2 - Determinación de la fuerza aerodinámica resultante de esta posición de paso

Otro objetivo de la invención es maximizar la producción de energía mientras se limitan los momentos extremos y la fatiga de la estructura mecánica. Para hacer esto, se controla la orientación de las palas, es decir que se modifica la consigna  $\bar{\theta}$  del ángulo  $\theta$  de manera que se obtenga un compromiso entre la potencia recuperada y la fatiga de la estructura. El impacto se minimiza modificando el ángulo de inclinación de las palas de manera que la fuerza aerodinámica aplicada a la góndola conduzca a una velocidad nula de la parte alta de la torre. El procedimiento se basa principalmente en un modelo físico de la fuerza aerodinámica.

45

50 En un primer tiempo, se elige un modelo físico de fuerza aerodinámica para modelizar la fuerza aerodinámica producida sobre la góndola en función de la velocidad del viento  $V_w$ , del ángulo de orientación  $\theta$  y de la velocidad del

rotor  $\Omega_r$ . Un modelo de ese tipo puede escribirse así:

$$F_{aero} = 0,5 \rho \Pi R_b^2 c_t \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 \quad (2)$$

5 Siendo:

- $R_b$ : radio del rotor;
- $\rho$ : densidad del aire;
- $c_t$ : cartografía a calibrar.

10 Un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_t$  se representa en la figura 2. Esta cartografía indica el valor del parámetro  $c_t$  en función de la relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$ , para diferentes pasos (una curva para cada  $\theta$ ). Este tipo de cartografías es bien conocido por los especialistas.

15 Esta fuerza es la que hace moverse la góndola y la que influye en la dinámica de la torre (y de la plataforma si la turbina eólica está implantada en mar sobre una plataforma). Utilizando esta función con el paso determinado en la etapa anterior ( $\bar{\theta}$ ), se obtiene una fuerza aerodinámica que se indica por  $\bar{F}$ .

20 3 - Determinación de un valor de consigna de fuerza aerodinámica  $F_{aero}^{sp}$

En el transcurso de esta etapa, se determina un valor de consigna de fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas están orientadas con dicho primer ángulo, disminuyendo dicha fuerza aerodinámica determinada en la etapa c) por un término proporcional definido de manera que disminuyan las variaciones de velocidad de dicha torre (y de la plataforma si la turbina eólica está implantada en el mar sobre una plataforma).

25 Esta consigna tiene por objetivo disminuir la fatiga y los momentos extremos de la estructura. Se busca modificar esta fuerza aerodinámica con el fin de minimizar el impacto sobre la estructura y por tanto aumentar su vida útil. Para ello, se busca disminuir las variaciones de velocidad de la torre y de la plataforma. De este modo, se busca compensar la fuerza aerodinámica con unos términos proporcionales a la desviación entre los valores reales de las posiciones y velocidades de la plataforma y de la torre y sus valores de referencia. Se denomina valor de referencia al valor teórico que se desea obtener: velocidades de la torre y de la plataforma nulas, y posición de la torre y de la plataforma función de  $\bar{F}$  y de la fuerza impuesta sobre el mar ( $F_{hidro}$ ).

35 La dinámica de la estructura mecánica, es decir de la torre (y de la plataforma si la turbina eólica está implantada en el mar) puede escribirse en la forma de dos sistemas de segundo orden relacionados:

$$\begin{cases} m_t \ddot{x}_t + k_t (\dot{x}_t - r\dot{x}_p) + c_t (x_t - rx_p) = F_{aero} \\ m_p \ddot{x}_p + k_p \dot{x}_p + c_p x_p - k_t (\dot{x}_t - r\dot{x}_p) - c_t (x_t - rx_p) = F_{hidro} \end{cases} \quad (3)$$

Teniendo:

- 40 -  $m_t$  y  $m_p$  son las masas del conjunto torre más góndola y de la plataforma respectivamente;
- $k_t$  y  $k_p$  son las amortiguaciones estructurales de la torre y de la plataforma;
- $c_t$  y  $c_p$  son las rigideces de la torre y de la plataforma;
- 45 -  $F_{hidro}$  es la fuerza hidrodinámica aplicada sobre la estructura.

Un ejemplo de cartografía del parámetro  $c_p$  se representa en la figura 3. Esta cartografía indica el valor del parámetro  $c_p$  en función de la relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$ , para diferentes pasos (una curva para cada  $\theta$ ). Este tipo de cartografías es bien conocido por los especialistas.

Se define el estado del sistema por X y su estado de referencia por Xref

50

$$X = \begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ x_p \\ \dot{x}_p \end{bmatrix} \quad y \quad X_{ref} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{F}}{c_t} + r \frac{(F_{hidro} - \bar{F})}{c_p} \\ 0 \\ \frac{(F_{hidro} + \bar{F})}{c_p} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Siendo  $r$ , un parámetro que corresponde a la relación de tamaño entre la torre y la estructura flotante. Esto representa la posición del centro de gravedad.

De ese modo, la estrategia de control buscará generar una fuerza aerodinámica diferente de  $\bar{F}$  para minimizar la fatiga y los momentos extremos de la estructura. Se obtiene por tanto la consigna siguiente:

$$F_{aero}^{sp} = \bar{F} - [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4](X - X_{ref})$$

Siendo  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  unos parámetros de calibración a determinar. Para ello, se puede utilizar la técnica de la colocación del polo o la técnica de la síntesis LQR.

#### 4 - Determinación de una posición de paso que permita realizar esta fuerza aerodinámica

A partir de esta consigna de fuerza, se determina una orientación de las palas para satisfacer esta demanda de fuerza aerodinámica. Para ello, se utiliza el modelo presentado en la Ecuación 2. Se tiene un dato del viento, la medida del régimen del rotor y un par de consigna. Invertiendo el modelo (mediante un algoritmo de Newton por ejemplo), se obtiene una consigna de paso. De ese modo, se encuentra el paso que minimiza el criterio de optimización siguiente

$$\theta^{sp} = \arg \left( \min_{\theta} \left( F_{aero}^{sp} - 0,5\rho\Pi R_b^2 c_t \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) (V_w)^2 \right)^2 \right)$$

En el caso de una turbina eólica terrestre, no hay plataforma. En este caso, se considera que la plataforma es rígida y por tanto que tiene  $x_p$  constante a 0 así como la fuerza hidrodinámica. Además, en la estructura de control, se tienen necesariamente  $k_3$  y  $k_4$  nulos porque no hay necesidad de control sobre la plataforma.

#### 5 - Orientación de las palas según el paso determinado

Para optimizar la potencia eléctrica recuperada por la turbina eólica, se orientan las palas según el ángulo de inclinación calculado en la etapa anterior.

Según otro modo de realización, para mejorar la robustez con respecto a la fatiga mecánica del sistema, no se realiza la inversión del modelo de fuerza aerodinámica (ecuación 2) directamente a partir de la velocidad del viento, sino a partir de este valor al que se añade un término proporcional a la torsión de la torre  $\dot{x}_t - \dot{x}_p$  (siendo  $\dot{x}$  la derivada de  $x$  con relación al tiempo, representando  $x$  la posición de la torre con relación a una referencia). De ese modo, se encuentra el paso que minimiza el criterio de optimización siguiente:

$$\theta^{sp} = \arg \left( \min_{\theta} \left( F_{aero}^{sp} - 0,5\rho\Pi R_b^2 c_t \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w + g_f(\dot{x}_t - r\dot{x}_p)} \right) (V_w + g_f(\dot{x}_t - r\dot{x}_p))^2 \right)^2 \right)$$

Siendo:

- $r$ : un parámetro que corresponde a la relación de tamaño entre la torre y la estructura flotante. Este representa la posición del centro de gravedad;
- $g_f$ : una función monótona no decreciente (típicamente una constante igual a la identidad).

De este modo, con esta ley de control, se garantiza la convergencia hacia la velocidad del rotor de referencia mientras se tiene un segundo control sobre la fatiga del sistema anticipando al viento que llega sobre la estructura gracias al término proporcional a la torsión de la torre.

5 Igualmente, para mejorar la robustez con respecto a la fatiga mecánica del sistema, no se realiza la inversión del modelo de par aerodinámica (ecuación 1) directamente partir de la velocidad del viento, sino a partir de este valor al que se añade un término proporcional a la torsión de la torre  $\dot{x}_t - r\dot{x}_p$  (siendo  $\dot{x}$  la derivada de  $x$  con relación al tiempo, representando  $x$  la posición de la torre con relación a una referencia). De ese modo, se encuentra el paso que minimiza el criterio de optimización siguiente:

10

$$\bar{\theta} = \arg \left( \min_{\theta} \left( T_{aero}^{sp} - 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w + g_t(\dot{x}_t - r\dot{x}_p)} \right) (V_w + g_t(\dot{x}_t - r\dot{x}_p))^2 \right)^2 \right)$$

Siendo:

- 15
- $r$ : un parámetro que corresponde a la relación de tamaño entre la torre y la estructura flotante. Este representa la posición del centro de gravedad;
  - $g_t$ : una función monótona no decreciente (típicamente una constante igual a la identidad).

20 De este modo, con esta ley de control, se garantiza la convergencia hacia la velocidad del rotor de referencia mientras se tiene un control sobre la fatiga del sistema anticipando el viento que llega sobre la estructura gracias al término proporcional a la torsión de la torre.

Un ejemplo de valor para cada parámetro se presenta en la tabla que sigue:

25

$R_b$	63 m
$\rho$	1.293 kg/m <sup>3</sup> .
$J_r$	4,3785e+007 kg/m <sup>2</sup>
$N$	93
$m_t$	350000
30 $k_t$	9,3462e+004
$c_t$	2,4958e+006
$M_p$	21808000
$K_p$	2,1179e+005
$C_p$	3,2137e+005
35 $K_1$	-3,1237e-006
$K_2$	2,9282e-004
$K_3$	-2,6337e-005
$K_4$	0,1452
40 $r$	1

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para optimizar la producción de energía eléctrica de una turbina eólica de eje horizontal, incluyendo dicha turbina eólica una torre que soporta una góndola provista de un rotor sobre el que se fijan unas palas, en la que se controla un ángulo de inclinación de dichas palas caracterizado por que incluye las siguientes etapas:

a) se determina un primer ángulo de inclinación de las palas que permite maximizar la potencia recuperada, por medio de las etapas siguientes:

- i- se genera una consigna de par eléctrico  $T_e^{sp}$  de dicho rotor en función de una medida de la velocidad del rotor;
- ii- se genera una consigna de velocidad del rotor, consigna  $\Omega_r^{sp}$  en función de la medida de la velocidad del viento  $V_w$ , por medio de cartografías;
- iii- se genera una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  para seguir esta consigna de velocidad del rotor;
- iv- se determina dicho primer ángulo de inclinación que permite realizar este par aerodinámico y garantizar la regulación de la velocidad del rotor;

b) se elige un modelo de fuerza aerodinámica para modelizar una fuerza aerodinámica producida sobre la góndola en función de una velocidad del viento, de un ángulo de inclinación y de una velocidad del rotor;

c) se determina la fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas están orientadas con dicho primer ángulo;

d) se determina un valor de consigna de fuerza aerodinámica producida sobre la góndola cuando las palas están orientadas con dicho primer ángulo, disminuyendo dicha fuerza aerodinámica determinada en la etapa c) por un término definido de manera que se disminuyan unas variaciones de velocidad de la cima de dicha torre;

e) se determina un segundo ángulo de inclinación de las palas que permite obtener dicho valor de consigna de fuerza aerodinámica invirtiendo dicho modelo de fuerza aerodinámica y utilizando una medida de la velocidad del viento, una medida de la velocidad del rotor y dicho valor de consigna de la fuerza aerodinámica; y

f) se orientan las palas según dicho segundo ángulo.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho término definido de manera que disminuyan unas variaciones de velocidad de la cima de la torre es proporcional a una desviación entre unos valores reales de posiciones y de velocidades de la torre y unos valores de referencia de posiciones y de velocidades de la torre, siendo un valor de referencia de posición función de la fuerza aerodinámica determinada en la etapa c), y siendo un valor de referencia de velocidad un valor nulo.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho modelo de fuerza aerodinámica en función de la velocidad del viento  $V_w$ , de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  y de la velocidad del rotor  $\Omega_r$  se escribe:

$$F_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^2 c_t V_w^2$$

Siendo:

- $R_b$ : radio del rotor;
- $\rho$ : densidad del aire;

-  $c_t$ : parámetro procedente de la cartografía y función de  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$  y de  $\theta$ .

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que se añade al término correspondiente a la velocidad del viento de dicho modelo de fuerza aerodinámica, un término proporcional a la torsión de la torre.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina dicho primer ángulo de inclinación de las palas que permite optimizar la potencia recuperada, realizando las siguientes etapas:

a) se elige un modelo de par aerodinámico para modelizar el par aerodinámico producido sobre la góndola en función de una velocidad del viento  $V_w$ , de dicho ángulo de inclinación y de una velocidad del rotor  $\Omega_r$ .

b) se determina un valor de consigna del par aerodinámico por medio de dicho modelo;

c) se determina dicho primer ángulo de inclinación de las palas que permite obtener dicho valor de consigna de par aerodinámico invirtiendo dicho modelo de par aerodinámico y utilizando una medida de la velocidad del viento, una medida de la velocidad del rotor y dicho valor de consigna del par aerodinámico;

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que dicho modelo de par aerodinámico se describe:

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^2 c_q V_w^2$$

Siendo:

- 5     -  $R_b$ : radio del rotor;  
       -  $\rho$ : densidad del aire;

-  $c_q$ : parámetro procedente de la cartografía y función de  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$  y de  $\theta$ .

- 10    7. Procedimiento según la reivindicación 6, en el que se añade al término correspondiente a la velocidad del viento de dicho modelo de par aerodinámico, un término proporcional a la torsión de la torre.

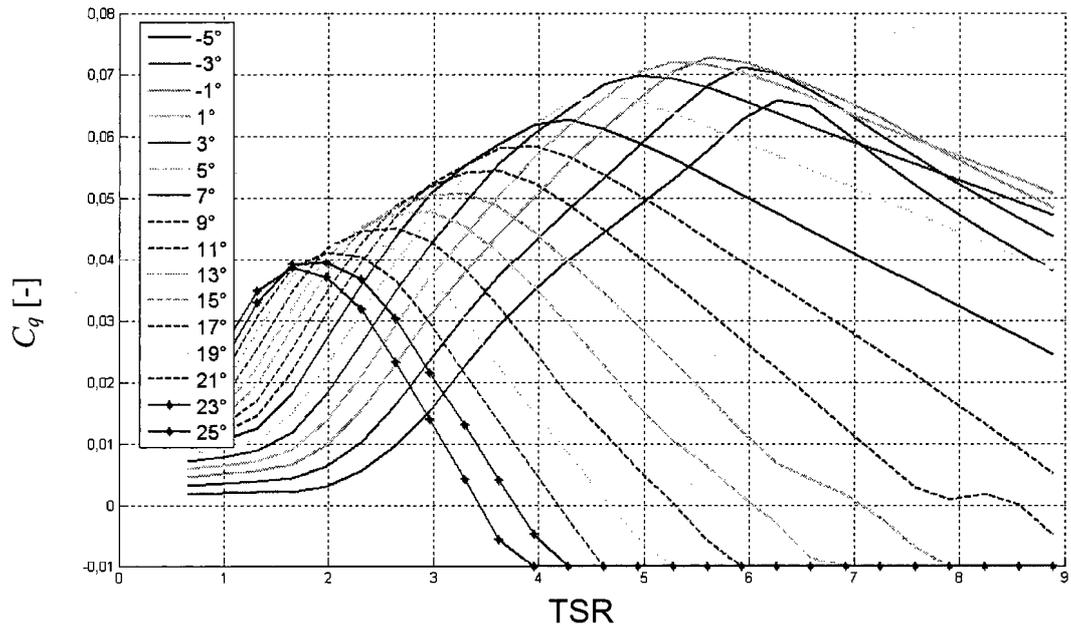


Fig. 1

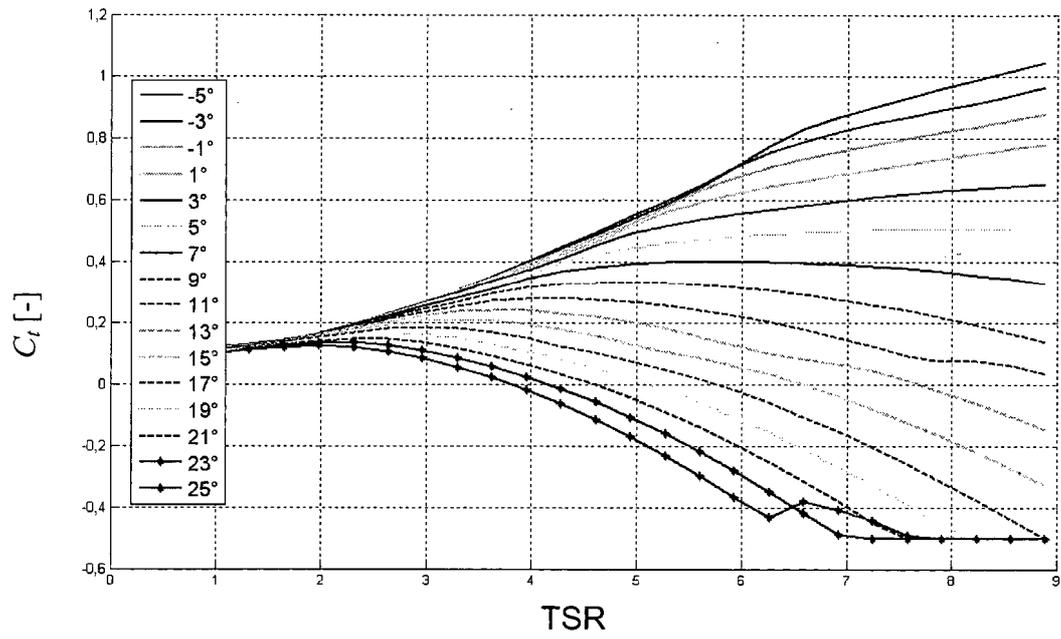


Fig. 2

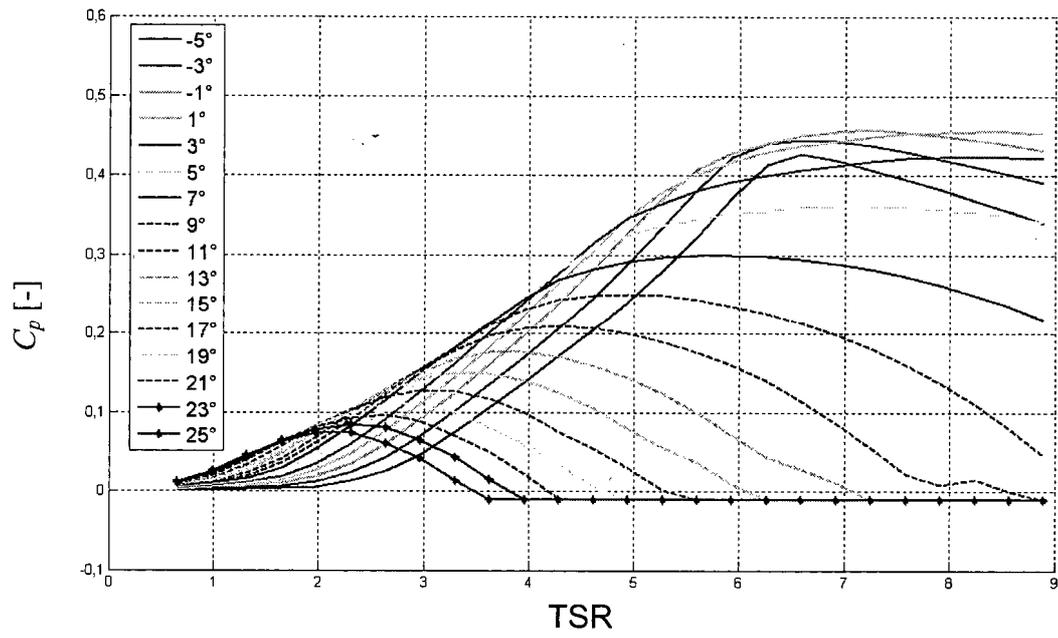


Fig. 3

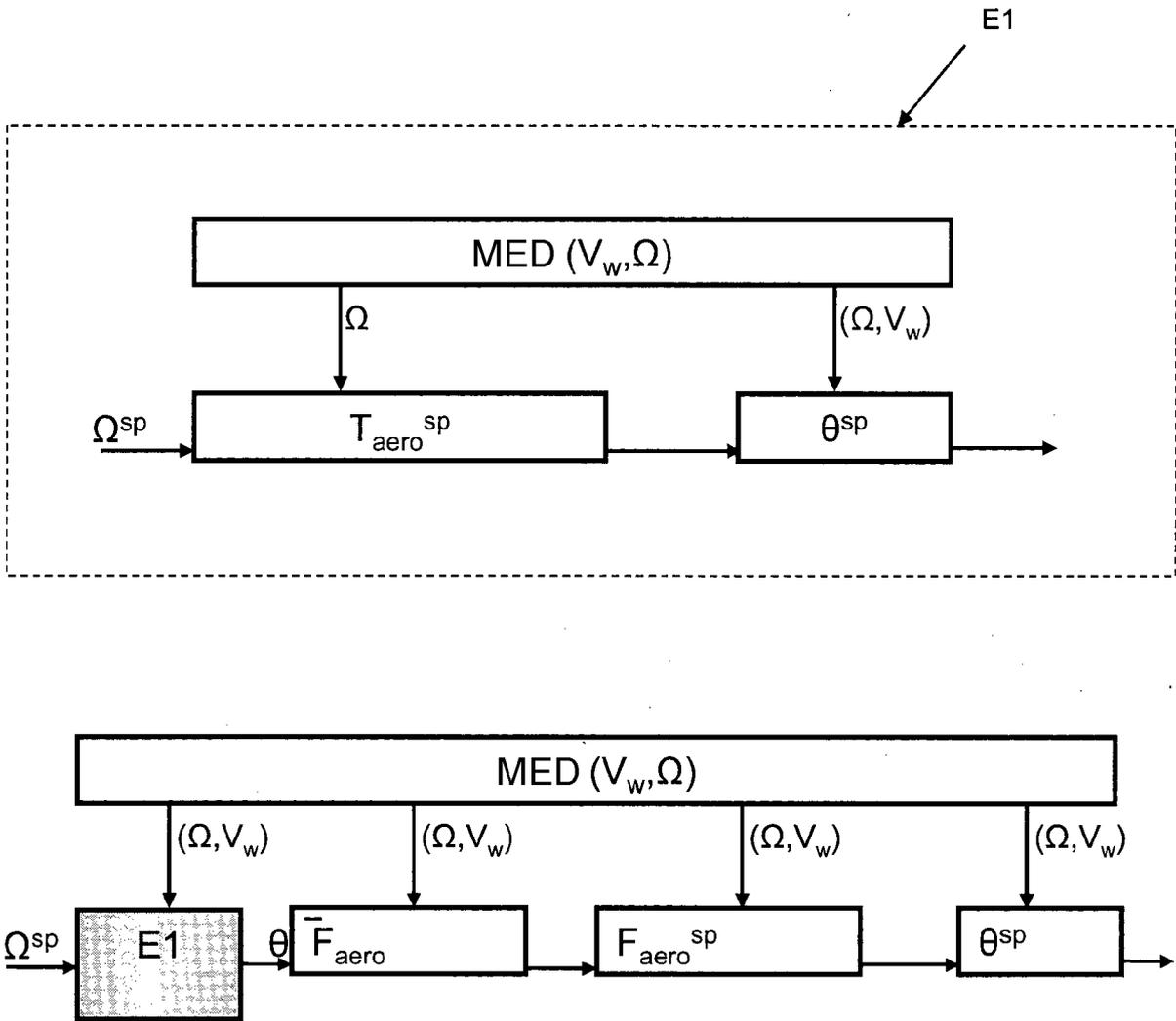
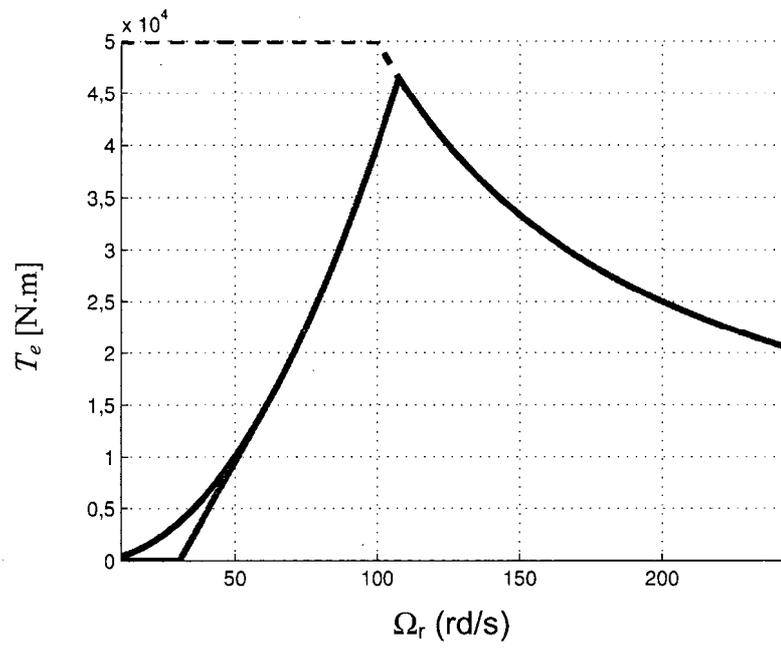


Fig. 4



**Fig. 5**