

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 975 158**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.07.2017 PCT/EP2017/000799**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.01.2018 WO18007011**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.07.2017 E 17739869 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.03.2024 EP 3482070**

54 Título: **Control anticipativo multivariable de turbinas eólicas basado en Lidar**

30 Prioridad:

**06.07.2016 DE 102016212362**

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

**03.07.2024**

73 Titular/es:

**UNIVERSITÄT STUTTGART (100.0%)  
Keplerstraße 7  
70174 Stuttgart, DE**

72 Inventor/es:

**SCHLIPF, DAVID;  
FÜRST, HOLGER;  
HAIZMANN, FLORIAN y  
RAACH, STEFFEN**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 975 158 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

Control anticipativo multivariable de turbinas eólicas basado en Lidar

## 5 Breve compendio

Los avances actuales en la tecnología lidar ofrecen la posibilidad de incluir información sobre la previsión del viento en el diseño del control. El control de cabeceo colectivo asistido por lidar es un enfoque sencillo pero prometedor para reducir la variación de velocidad del rotor y las cargas estructurales en el funcionamiento a plena carga. Este trabajo amplía este enfoque a la transición entre las operaciones a carga parcial y a plena carga. Se presenta un controlador multivariable, que proporciona una actualización sencilla para la tasa de par del generador y el ángulo de cabeceo mínimo basado en una inversión no lineal del sistema. Las señales anticipativas de la tasa de par del generador y del ángulo de cabeceo mínimo pueden combinarse con controladores de realimentación convencionales y con el controlador anticipativo de cabeceo colectivo para el funcionamiento a plena carga. Esto facilita la aplicación modular en turbinas eólicas comerciales. Las simulaciones con un modelo aeroelástico completo de turbina eólica y un simulador lidar muestran una mejora de la regulación de la velocidad del rotor y una reducción significativa de las cargas de la torre, mientras que solo disminuye ligeramente la potencia. Además, se esbozan posibilidades de transformar la reducción de la carga en un aumento de energía.

## 20 Antecedentes

Lidar es una tecnología topográfica conocida por los expertos en la técnica que mide la distancia iluminando un objetivo con una luz láser. Lidar es el acrónimo de Light Detection And Ranging (detección y medición de distancias por luz), y se creó originalmente como voz compuesta de "light" (luz) y "radar" (radar). Lidar se utiliza popularmente como tecnología para hacer mapas de alta resolución, con aplicaciones en geodesia, geomática, arqueología, geografía, geología, geomorfología, sismología, silvicultura, física atmosférica, mapeo láser aerotransportado (ALSM) y altimetría láser. Lo que se conoce como Lidar a veces se denomina simplemente exploración láser o exploración 3D, con aplicaciones terrestres, aerotransportadas y móviles.

30 Lidar utiliza luz ultravioleta, visible o infrarroja cercana para obtener imágenes de los objetos. Puede apuntar a una amplia gama de materiales, incluidos objetos no metálicos, rocas, lluvia, compuestos químicos, aerosoles, nubes e incluso moléculas individuales. Un haz láser estrecho puede mapear características físicas con resoluciones muy altas; por ejemplo, un avión puede mapear el terreno con una resolución de 30 cm o superior.

35 Lidar se ha utilizado ampliamente en la investigación atmosférica y la meteorología. Los instrumentos lidar instalados en aeronaves y satélites realizan tareas de topografía y mapeo, un ejemplo reciente es el Lidar Experimental de Investigación Aerotransportada Avanzada del Servicio Geológico de Estados Unidos. La NASA ha identificado el lidar como una tecnología clave para permitir el aterrizaje autónomo de precisión y seguro de futuros vehículos robóticos y tripulados de alunizaje.

40 Las longitudes de onda varían en función del objetivo: desde unos 10 micrómetros hasta UV (aproximadamente 250 nm). Normalmente, la luz se refleja mediante retrodispersión. Para las distintas aplicaciones lidar se utilizan diferentes tipos de retrodispersión: la más común es la dispersión Rayleigh, la dispersión Mie, la dispersión Raman y la fluorescencia. En función de los distintos tipos de retrodispersión, lidar puede denominarse Lidar Rayleigh, Lidar Mie, Lidar Raman, Lidar de fluorescencia Na/Fe/K, etc. Las combinaciones adecuadas de longitudes de onda pueden permitir el mapeo remoto de contenidos atmosféricos mediante la identificación de cambios dependientes de la longitud de onda en la intensidad de la señal devuelta.

50 El control asistido por Lidar se ha convertido en un importante tema de investigación en la comunidad de control de turbinas eólicas. Durante las pruebas de campo iniciales, el control anticipativo de cabeceo ha sido capaz de reducir la variación de velocidad del rotor y las cargas estructurales durante el funcionamiento a plena carga en varias pruebas de campo. Durante el funcionamiento con carga parcial, el control de par asistido por lidar muestra solo un beneficio marginal en la producción de energía, mientras que tiene un impacto negativo en las cargas estructurales. El control predictivo de modelos no lineales (NMPC) que utiliza solo el cabeceo colectivo proporciona un rendimiento similar al control anticipativo de cabeceo colectivo durante el funcionamiento a plena carga, pero muestra un rendimiento mejorado en la transición entre el funcionamiento a carga parcial y a plena carga utilizando adicionalmente el par del generador. Aunque el NMPC es cada vez más eficaz desde el punto de vista computacional, la sustitución del controlador de realimentación lo hace menos atractivo para los fabricantes de turbinas eólicas. El enfoque basado en la planicidad permite calcular la acción de control basándose en las trayectorias de la velocidad del rotor y el movimiento de la torre y también muestra un mejor rendimiento del control en la región de transición, pero es difícil de ajustar. En este trabajo se propone una alternativa, que puede aplicarse más fácilmente y sigue mostrando mejoras significativas.

65 David Schlipf *et al.*: "Flatness-based Feedforward Control of Wind Turbines Using Lidar" (Actas del 19º Congreso Mundial de la Federación Internacional de Control Automático; Ciudad del Cabo, Sudáfrica, vol. 47, n.º 3, 29 de agosto de 2014, páginas 5820-5825, XP055414282, Red Hook, NY; ISSN: 1474-6670, DOI: 10.3182/20140824-6-

5 ZA-1003.00443; ISBN: 978-1-123-47890-7) describe un enfoque anticipativo basado en la planicidad, que permite calcular la acción de control a partir de trayectorias de la velocidad del rotor y del movimiento de la torre utilizando mediciones del viento. Las trayectorias se planifican en línea considerando las restricciones de los actuadores para regular la velocidad del rotor y minimizar los movimientos de la torre. Las señales anticipativas de actualización del cabeceo colectivo y del par del generador pueden combinarse con controladores de realimentación convencionales.

10 Aho, Jacob *et al.*: "Optimal trajectory tracking control for wind turbines during operating region transition" (Conferencia Americana de Control (ACC) del 2015, IEEE, 17 de junio de 2013, páginas 1424-1429, XP032476119, ISSN: 0743-1619, DOI: 10.1109/ACC.2013.6580036) describe el uso de mediciones de la velocidad del viento previas para programar, optimizar y seguir una trayectoria deseada de los estados y entradas de la turbina eólica durante las transiciones de región entre el funcionamiento por debajo de la clasificación y por encima de la clasificación. El objetivo de este sistema de control es reducir la carga estructural sobre los componentes de la turbina a través de transiciones de región más suaves. Las mediciones previas de la velocidad del viento se utilizan para generar una trayectoria inicial deseada de la turbina. Esta trayectoria se optimiza encontrando una trayectoria de regulación que se encuentre en el colector de trayectorias de la turbina y que esté próxima a la trayectoria deseada en un sentido  $L_2$  ponderado. A continuación, la trayectoria de regulación se utiliza como referencia para un controlador óptimo cuadrático lineal variable en el tiempo.

20 El documento US 2015/147175 A1 describe una instalación de energía eólica que comprende una carcasa, un rotor, una primera y/o segunda unidad de medición de tecnología de microondas y/o tecnología de radar para emitir microondas y/u ondas de radar y para detectar las reflexiones de las microondas y/u ondas de radar para adquirir datos del viento y/o datos o información meteorológica con respecto a un campo de viento delante y/o detrás de la instalación de energía eólica, y medios de control de la instalación de energía eólica, que controlan el funcionamiento de la instalación de energía eólica en función de los datos detectados por la unidad de medición primera y/o segunda.

30 De este modo, basándose en el nivel tecnológico actual, existe la necesidad de mejorar el control de la velocidad de una turbina eólica en una transición entre una carga parcial y una carga completa, para aumentar el rendimiento energético y reducir las cargas estructurales. Sin embargo, hasta ahora, el problema identificado se resolvía utilizando únicamente un controlador de realimentación en la transición, es decir, el controlador solo era capaz de reaccionar a la variación de las señales de la turbina, como la velocidad del generador. Hasta ahora, un controlador anticipativo basado en Lidar para turbinas eólicas solo se ha utilizado para el contrapar del generador durante la carga parcial o para el ángulo colectivo de las palas durante la carga completa. Hasta la fecha no existe ningún controlador anticipativo basado en Lidar para la transición entre carga parcial y plena carga.

35 En general, el control de realimentación para turbinas eólicas solo puede reaccionar una vez que las variaciones del campo de viento entrante ya han afectado a la estructura de la turbina. Del mismo modo, los actuales controladores anticipativos basados en Lidar no pueden utilizarse en la transición entre carga parcial y plena carga.

40 La invención se define mediante las reivindicaciones independientes, mientras que las realizaciones preferidas constituyen el objeto de las reivindicaciones dependientes. La presente invención pretende mejorar el control de la velocidad del rotor, reducir las cargas estructurales y aumentar el rendimiento energético en la transición.

45 Esto se consigue mediante un sistema de control para una turbina eólica y un método de control para controlar una turbina eólica de la invención según las reivindicaciones 1 y 9, respectivamente, en particular mediante el control anticipativo simultáneo del ángulo colectivo de las palas y el contrapar del generador, y la separación en regiones de frecuencia. Las realizaciones preferidas están contenidas en las reivindicaciones dependientes.

50 El experto en la técnica conoce que las turbinas eólicas extraen energía del viento. En el ámbito de esta aplicación, se entiende que aguas abajo de una turbina eólica hay una estela procedente de la turbina eólica, en donde la velocidad del viento se reduce y/o pueden producirse turbulencias en el viento. A medida que el flujo avanza aguas abajo, se produce una propagación de la estela y ésta se recupera hacia condiciones de corriente libre. El efecto estela es la influencia agregada en la producción de energía del parque eólico, que resulta de los cambios en la velocidad del viento causados por el impacto de las turbinas entre sí. Es importante tener en cuenta los efectos de estela de los parques eólicos próximos y el posible impacto de los parques eólicos que se construyan en el futuro.

55 En otras palabras, una estela es el resultado de la extracción de energía de una turbina eólica (convertidor de potencia) y se produce detrás de la misma. En una estela se reducen las velocidades y aumenta la intensidad de la turbulencia. En cuanto a efectos (empíricos) en una estela, puede observarse el déficit de velocidad, el decaimiento de la estela, el redireccionamiento de la estela y el serpeo de la estela.

60 Según los conocimientos del experto en la técnica, el par del generador se calcula como una función tabulada de la velocidad filtrada del generador, incorporando cinco regiones de control: 1, 1 1/2, 2, 2 1/2 y 3. La región 1 es una región de control antes de la velocidad de corte del viento, en donde el par del generador es cero y no se extrae energía del viento; en su lugar, el viento se utiliza para acelerar el rotor para el arranque. La región 2 es una región de control para optimizar la captura de energía. En este caso, el par del generador es proporcional al cuadrado de la

5 velocidad filtrada del generador para mantener una relación punta-velocidad constante (óptima). En la región 3, la energía del generador se mantiene constante para que el par del generador sea inversamente proporcional a la velocidad filtrada del generador. La región 1 1/2, una región de arranque, es una transición lineal entre las regiones 1 y 2. Esta región se utiliza para poner un límite inferior a la velocidad del generador con el fin de limitar la gama de velocidades de funcionamiento de la turbina eólica. La región 2 1/2 es una transición lineal entre las regiones 2 y 3 con una pendiente de par correspondiente a la pendiente de una máquina de inducción. La región 2 1/2 suele ser necesaria (como en cualquier turbina de 5 MW) para limitar la velocidad de punta (y, por tanto, las emisiones de ruido) a potencia nominal.

10 Los términos “anticipativa” y “anticipativo” se consideran equivalentes en este texto y pueden utilizarse y leerse indistintamente.

Breve descripción de la Invención

15 Un aspecto de la solicitud se refiere a un sistema de control para una turbina eólica que incluye

- un controlador anticipativo que tiene una velocidad efectiva del viento en el rotor de la turbina eólica como parámetro de entrada y tiene una pluralidad de parámetros de salida.
- un controlador de realimentación en el que un parámetro de entrada se basa en la velocidad del rotor o del generador de la turbina eólica y que tiene al menos un parámetro de salida, y

20 en donde

- un parámetro de salida del controlador anticipativo se proporciona al controlador de realimentación como parámetro de entrada y
- otro parámetro de salida del controlador anticipativo se utiliza como parámetro de control anticipativo para controlar la turbina eólica y
- un parámetro de salida del controlador de realimentación se utiliza como parámetro de control de realimentación para controlar la turbina eólica.

25 Ventajosamente, el sistema descrito en la presente solicitud es menos complejo y complicado, en particular menos intensivo desde el punto de vista computacional que los sistemas y métodos conocidos convencionalmente. También, ventajosamente, el sistema descrito en la presente solicitud combina eficazmente las señales anticipativas de la tasa de par del generador y el ángulo de cabeceo mínimo con los controladores de realimentación convencionales y el controlador anticipativo de cabeceo colectivo para el funcionamiento a plena carga. También ventajosamente, el ángulo de cabeceo (medio) pueda ajustarse en el funcionamiento con carga parcial, lo que da lugar a una mayor producción de energía del parque eólico.

30 En otras palabras, la presente solicitud se refiere a un controlador anticipativo asistido por lidar que preferiblemente es un componente y/o está abarcado por el sistema reivindicado, en el que el controlador ordena el cabeceo colectivo de las palas y el par del generador durante la transición entre el funcionamiento a carga parcial y el funcionamiento a plena carga.

35 Ventajosamente, el sistema prevé y/o permite una combinación directa con controladores anticipativos lidar de operación a plena carga.

Además, ventajosamente, el sistema prevé y/o permite la incorporación directa de cualquier controlador de realimentación comercial.

40 El sistema permite aprovechar las ventajas de la información de detección remota en términos de mayor rendimiento energético o reducción de la carga estructural.

45 Ventajosamente, el sistema es independiente del sistema de medición (no específico para un fabricante o tipo de sistema) y/o independiente del tipo de turbina.

50 Preferiblemente, el controlador se utiliza en la región 2,5 de una turbina eólica. Ventajosamente, se proporciona un enfoque que es tanto sencillo como altamente aplicable para las turbinas eólicas.

55 El término “velocidad efectiva del viento en el rotor” se conoce bien por los expertos en la técnica. Como se define, por ejemplo, en “Lidar-Assisted Control Concepts for Wind Turbines” (tesis de David Schlipf, que se incluye como referencia en su totalidad), la velocidad efectiva del viento en el rotor es una velocidad escalar del viento que provoca el mismo efecto dinámico, o uno comparable, en la turbina eólica que un campo de viento turbulento no uniforme (campo vectorial 3D definido en el disco del rotor). Puede calcularse como el promedio sobre el disco del rotor con o sin ponderación.

60 Además, preferiblemente,

- uno más parámetros de salida del controlador anticipativo se proporcionan al controlador de realimentación como parámetro(s) de entrada y
- uno más parámetros de salida adicionales del controlador anticipativo se utilizan como parámetro(s) de control anticipativo para controlar la turbina eólica y
- uno o más parámetros de salida del controlador de realimentación se utilizan como parámetros de control de realimentación para controlar la turbina eólica.

Según la invención, el parámetro de control anticipativo de la turbina eólica es el control del ángulo de cabeceo de las palas del rotor de la turbina eólica.

Ventajosamente, debido a la aplicación del ángulo de cabeceo de las palas del rotor, el controlador puede implementarse fácilmente en sistemas convencionales y puede utilizarse en la región 2,5. Además, ventajosamente, debido a la aplicación del ángulo de cabeceo de las palas del rotor, el controlador puede utilizarse fácilmente en combinación con un controlador convencional en la región 3 que se basa únicamente en el control del ángulo de cabeceo.

Además, ventajosamente, en comparación con un rotor convencional en la región 2,5, que se basa únicamente en el control del par, el controlador según la presente solicitud permite aumentar la ganancia de energía que puede obtener la turbina eólica.

Según la invención, el parámetro de control de realimentación de la turbina eólica es el control del par del generador de energía de la turbina eólica.

Ventajosamente, debido a la aplicación del par, el controlador puede implementarse fácilmente en sistemas convencionales y puede utilizarse en la región 2,5. Además, ventajosamente, debido a la aplicación del par, el controlador puede utilizarse fácilmente en combinación con un controlador convencional en la región 2 que se basa únicamente en el par.

Según una realización del sistema de control, el parámetro de salida del controlador anticipativo que se proporciona al controlador de realimentación como parámetro de entrada es una tasa de par del generador actualizada.

Según una realización del sistema de control, el parámetro de salida del controlador anticipativo que se utiliza como parámetro de control anticipativo de la turbina eólica es un ángulo de cabeceo actualizado de las palas del rotor.

Según una realización del sistema de control, la velocidad efectiva del viento en el rotor se obtiene utilizando un dispositivo Lidar.

Según una realización del sistema de control, los parámetros de salida del controlador anticipativo se calculan basándose en el parámetro de entrada y suponiendo que no se desea ninguna dinámica para un rotor y un movimiento de la torre de la turbina eólica.

Según una realización del sistema de control, los parámetros de salida del controlador anticipativo se calculan de manera que se compensa el impacto de la velocidad efectiva del viento en el rotor y el movimiento de la torre.

Según una realización del sistema de control, el cambio en el tiempo de la velocidad deseada del rotor se reduce, preferiblemente igual a cero y/o el cambio en el tiempo del desplazamiento de adelante a atrás de la torre de la turbina eólica se reduce, preferiblemente igual a cero y/o en el que la aceleración del desplazamiento de adelante a atrás de la torre de la turbina eólica se reduce, preferiblemente igual a cero.

Según una realización del sistema de control, el sistema de control se utiliza para controlar la turbina eólica en una transición de un funcionamiento de optimización aerodinámica a un funcionamiento a plena carga.

Según una realización del sistema de control, el sistema de control se limita a controlar la turbina eólica en una transición de un funcionamiento de optimización aerodinámica a un funcionamiento a plena carga.

Según la invención,

- el controlador de realimentación tiene exactamente un parámetro de salida y en el que
- un controlador de realimentación tiene exactamente dos parámetros de salida.

En una realización, el controlador de realimentación puede tener dos o más parámetros de salida, como par y/o ángulo de cabeceo de las palas del rotor. Sin embargo, cuando se aplica en la región 2,5 solo se utiliza un parámetro, en concreto el par. En otras palabras, en tal situación solo se emite un parámetro, en concreto, el par.

Un aspecto de la invención se refiere a una turbina eólica que incluye un sistema de control según la invención, un generador de energía y una pluralidad de palas del rotor.

5 Un aspecto de la invención se refiere a un método de control para controlar una turbina eólica que incluye las siguientes etapas

- obtener una velocidad efectiva del viento en el rotor de la turbina eólica y proporcionar la velocidad efectiva del viento en el rotor como parámetro de entrada a un controlador anticipativo;
- 10 - proporcionar, mediante el controlador anticipativo, un parámetro de salida denominado parámetro de control anticipativo para controlar la turbina eólica;
- proporcionar, mediante el controlador anticipativo, otro parámetro de salida denominado parámetro de entrada anticipativo como parámetro de entrada de un controlador de realimentación;
- 15 - proporcionar mediante el controlador de realimentación un parámetro de salida denominado parámetro de control de realimentación para controlar la turbina eólica, en donde dicho parámetro de control de realimentación se basa al menos en dicho parámetro de entrada anticipativo y en la velocidad del rotor o una velocidad del generador de un generador de energía de la turbina eólica.

20 Según una realización, una o más de las etapas se llevan a cabo repetidamente. Específicamente, una o más de las etapas se llevan a cabo de forma iterativa. Según una realización preferida, uno de los resultados de una o más de las etapas del método se utiliza como entrada de una o más de las etapas restantes del método. Debido a esta realimentación de parámetros y/o valores, de forma iterativa, el método permite proporcionar un control mejorado de la turbina eólica.

25 Breve descripción de las figuras

- La figura 1 ilustra los grados de libertad del modelo no lineal reducido.
- La figura 2 ilustra una revisión del diseño del controlador de realimentación con un escalón de velocidad del viento, que muestra el comportamiento deseado en gris y el modelo de simulación completo en negro.
- La figura 3 muestra un bucle de control con realimentación y anticipación multivariable.
- 30 La figura 4 ilustra el ángulo de cabeceo y el par del generador necesarios para mantener la turbina eólica en su estado estacionario para desviaciones de velocidad del viento superiores a 12 m/s.
- La figura 5 muestra la reacción a una pequeña ráfaga a 12 m/s con una previsión de viento perfecta, para el controlador de realimentación únicamente (gris) y con anticipación adicional (negro).
- 35 La figura 6 muestra la reacción a un campo de viento turbulento. El fotograma superior muestra la velocidad efectiva del viento en el rotor (gris) y su estimación lidar (negro). Los fotogramas restantes muestran solo el controlador de realimentación (gris) y con anticipación adicional (negro) utilizando mediciones lidar simuladas.
- La figura 7 muestra las densidades espectrales de energía para la simulación de 1 hora: solo controlador de realimentación (gris) y con anticipación adicional (negro). Las frecuencias de esquina de los filtros utilizados se muestran en rojo.
- 40 La figura 8 muestra el coeficiente de energía a 12 m/s y velocidad nominal del rotor. Cambiando el ángulo de cabeceo mínimo de 0 grados (gris) a -1 grado (negro), el coeficiente de energía puede aumentar de 0,4668 a 0,4699 (0,66 %).

45 Descripción detallada de la Invención

I. Modelización de la turbina eólica

50 En este estudio se utiliza para las simulaciones un modelo completo de una turbina de referencia de 5MW. Para el diseño del controlador se utiliza una versión reducida de la misma turbina.

A. Modelo de simulación completo

Las simulaciones se realizan con la herramienta de simulación aeroelástica FAST. En FAST, la estructura de una turbina eólica terrestre se modela mediante un sistema multicuerpo flexible, que experimenta fuerzas externas procedentes de la aerodinámica. El modelo estructural representa la dinámica de partes flexibles como la torre, las palas y el tren de transmisión. En las simulaciones están habilitados los 15 grados de libertad (DOF) siguientes: modos primero y segundo en relación a aleta y modo primero en relación a borde de tres palas, modos primero y segundo de flexión de lado a lado y de adelante a atrás de la torre, movimiento del rotor y flexibilidad del tren de transmisión. En el subsistema aerodinámico pueden cargarse dos tipos diferentes de archivos de entrada de viento. 60 Las series temporales coherentes de las características del viento, como la velocidad, la dirección y las cizalladuras, se utilizan para los cálculos de cargas extremas de la Sección IV-A. Las simulaciones de fatiga de la Sección IV-B se realizan con un campo de viento tridimensional turbulento sobre el disco del rotor generado con TurbSim. En ambos casos, las fuerzas aerodinámicas a lo largo de las palas se calculan iterativamente aplicando la teoría del momento del elemento de pala y se transfieren al modelo estructural. Las herramientas de simulación descritas han demostrado tener una precisión fiable que justifica su aplicación como modelo de simulación completo en este trabajo. 65

B. Diseño de controlador reducido

5 El modelo aeroelástico no es útil para el diseño de controladores debido a su complejidad y al cálculo iterativo de la aerodinámica. En este caso, se utiliza el modelo SLOW (turbina eólica de bajo orden simplificada) del enfoque basado en la planicidad con algunos cambios menores. Al igual que el modelo de simulación completo, SLOW consta de un módulo servoelástico y aerodinámico reducido, véase la figura 1.

10 En la parte servoelástica, solo se consideran el primer modo de flexión de la torre de adelante a atrás y el movimiento de rotación:

$$J\dot{\Omega} + \frac{M_G}{i_{GB}} = M_a \quad (1a)$$

$$m\ddot{x}_T + c\dot{x}_T + k(x_T - x_{0T}) = F_a \quad (1b)$$

15 La ecuación (1a) modela la dinámica del rotor, en donde  $\Omega$  es la velocidad del rotor,  $M_a$  es el par aerodinámico y  $M_G$  el par del generador. Además,  $i_{GB}$  es la relación de transmisión y  $J$  es la suma global de los momentos de inercia del rotor y del buje alrededor del eje de rotación. La ecuación (1 b) describe la dinámica de adelante a atrás de la torre, donde en donde  $F_a$  es el empuje aerodinámico,  $x_T$  el desplazamiento de adelante a atrás superior de la torre,  $x_{0T}$  el desplazamiento de adelante a atrás superior de la torre estático, y  $m$ ,  $c$ , y  $k$  son la masa modal equivalente de la torre, el amortiguamiento estructural y la rigidez a la flexión, respectivamente.

20 En la parte aerodinámica, el par aerodinámico y el empuje que actúan sobre el rotor con el radio  $R$  son

$$M_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{c_p(\lambda, 0)}{\lambda} v_{rel}^2 \quad (2a)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 c_T(\lambda, 0) v_{rel}^2 \quad (2b)$$

25 en donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $\lambda$  la relación punta-velocidad, definida como

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v_{rel}} \quad (3)$$

30 y  $c_p$  y  $c_T$  son los coeficientes efectivos de potencia y empuje, respectivamente. Para obtener estos coeficientes se utilizan tablas de consulta bidimensionales, que se calculan previamente a partir de simulaciones en estado estacionario con el modelo de simulación completo. La velocidad relativa del viento  $v_{rel}$  se utiliza para modelar el amortiguamiento aerodinámico y se define como la superposición de la velocidad superior de la torre  $\dot{x}_T$  y la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_0$ :

$$v_{rel} = (v_0 - \dot{x}_T) \quad (4)$$

II. Simulación de mediciones Lidar

40 Para el control asistido por lidar del cabeceo colectivo y del par del generador, es necesaria una previsión de la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_0$ . La tecnología lidar actual ofrece la posibilidad de medir la velocidad de los aerosoles delante de la turbina mediante luz retrodispersada. Debido a las limitaciones de las mediciones lidar, solo puede proporcionarse la estimación lidar de la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_{0L}$ . En este caso, el mismo campo de viento genérico aplicado a la simulación aeroelástica se explora con un simulador lidar. La trayectoria de exploración se optimiza para proporcionar el mejor ancho de banda de coherencia para las mediciones en la turbina eólica NREL 5MW basándose en trabajos conocidos.

45 La hipótesis de turbulencia congelada de Taylor, que asume que el campo de viento turbulento se mueve sin verse afectado por la velocidad promedio del viento, se utiliza en la simulación de las mediciones, así como para la estimación de la velocidad del viento. En este caso, todas las mediciones se condensan en la estimación lidar de la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_{0L}$ .

III. Diseño del controlador

En esta sección se diseña el controlador de realimentación para la región de transición. A continuación, se analizan las ventajas y desventajas del enfoque basado en planicidad. Finalmente, se deriva el controlador anticipativo multivariable asistido por lidar para los casos de previsión perfecta y realista del viento.

5

A. Controlador de realimentación

En este trabajo, solo se considera la transición (normalmente denominada “región 2,5”) entre el funcionamiento de optimalidad aerodinámica (“región 2”) y el funcionamiento a plena carga (“región 3”). El controlador de realimentación de referencia para la turbina eólica de referencia 5MW abandona la región 2 a 10,3 m/s y  $\Omega = 11,7$  rpm y, a continuación, ajusta el par del generador  $M_G$  linealmente con el aumento de la velocidad de rotación hasta alcanzar la región 3 en 11,3 m/s y  $\Omega_{nominal} = 12,1$  rpm.

10

Sin embargo, las turbinas eólicas comerciales suelen utilizar un controlador de par PI. Las ventajas son que la turbina puede funcionar con optimalidad aerodinámica en un rango mayor y que el comportamiento en bucle cerrado puede ajustarse. La transición a la región 2 suele realizarse ajustando el límite inferior del controlador PI de par mediante una realimentación de estado óptima de la región 2. Normalmente, es necesario incluir un término de error de par o potencia en el controlador PI de cabeceo además del error de velocidad para tener una transición suave a la región 3 y evitar que el cabeceo actúe durante velocidades de viento bajas.

15

20

Para este trabajo, se diseña un controlador de realimentación del par del generador (FB) utilizando el método de conformación de bucle cerrado del diseño del controlador de cabeceo colectivo. El movimiento del rotor (1a) se linealiza a 12 m/s y se eligen las ganancias proporcional e integral, de forma que el bucle cerrado de la velocidad del viento  $v_0$  a la velocidad del generador  $\Omega_G = \Omega/i_{GB}$  tenga un amortiguamiento de 0,7 y una frecuencia natural de 0,6 rad/s. La respuesta del modelo de simulación completo a un escalón de velocidad del viento de 12 m/s a 12, m/s se aproxima al comportamiento deseado, véase la figura 2. Las desviaciones se deben al filtro de par del generador y a la dinámica despreciada en el planteamiento de diseño.

25

30

La potencia nominal se aumenta a 8 MW para disponer de una región 2,5 lo suficientemente amplia (que ahora oscila entre 10,6 m/s y 13,6 m/s) para probar el controlador de realimentación y anticipativo diseñado. La industria ha aumentado la potencia nominal de turbinas eólicas del mismo tamaño manteniendo el mismo rotor y la misma velocidad del rotor, por lo que parece un escenario realista. El Senvion 6.2M126, con una potencia nominal de 6,2 MW, se basa en 5 M de 5 MW. La potencia nominal del Enercon E-126 se ha aumentado de 6 MW a 7,6 MW. Puede encontrarse más información en las páginas web de las empresas.

35

El controlador de realimentación de cabeceo no se tiene más en cuenta en este documento, ya que todas las simulaciones se realizan solo en la región 2,5, en donde el ángulo de cabeceo está limitado a  $\theta_{min} = 0$  grados.

40

La figura 3 muestra el bucle de control global.

B. Ventajas e inconvenientes del enfoque basado en planicidad

Ya se ha presentado un controlador anticipativo basado en planicidad. Basándose en la previsión de la velocidad del viento y teniendo en cuenta las restricciones del sistema, se diseñan continuamente trayectorias de la velocidad del rotor y de los movimientos de la torre durante el funcionamiento y, con un modelo inverso de la turbina eólica, se traducen en trayectorias para el ángulo de cabeceo y el par del generador. Las trayectorias se planifican para minimizar los movimientos de la torre durante la transición entre las operaciones a carga parcial y a plena carga. Este enfoque presenta las siguientes ventajas:

45

50

- + El controlador anticipativo no es lineal y puede utilizarse en todas las regiones sin programación.
- + El movimiento del rotor y la torre se reducen directamente mediante una anticipación del ángulo de cabeceo y el par del generador.
- + Puede combinarse con un controlador de realimentación convencional.
- + Todas las señales anticipativas tienen media cero y pueden ponerse a cero si se detectan problemas con la previsión del viento.
- + Es menos costoso computacionalmente en comparación con NMPC.

55

Sin embargo, también hay desventajas en comparación con el controlador anticipativo de cabeceo colectivo utilizado en la literatura conocida:

60

- La planificación de la trayectoria para el movimiento del rotor y la torre es difícil de ajustar.
- Las trayectorias del ángulo de cabeceo y del par del generador no se diseñan directamente y pueden dar lugar a entradas extremas.
- El concepto general es bastante complicado.

65

El controlador anticipativo presentado en las siguientes subsecciones carece de estas desventajas, pero abandona la primera ventaja al linealizar y simplificar el enfoque basado en planicidad para la región 2.5. Las demás ventajas pueden mantenerse.

5 C. Ampliación multivariable basada en cálculos simplificados

La extensión multivariable basada en cálculos simplificados (MESCAL) se deriva en tres etapas principales:

- 10 1) Cálculo de acciones de control.  
2) Acciones de linealización y control.  
3) Combinación con realimentación.

15 En la primer etapa, el modelo inverso del controlador basado en planicidad se utiliza para calcular el par del generador y el ángulo de cabeceo deseados para mitigar el efecto de los cambios en la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_0$  al movimiento del rotor y la torre para un punto de funcionamiento determinado. A diferencia del controlador anticipativo basado en planicidad, no se diseña ninguna dinámica para el movimiento del rotor y la torre ( $\dot{\Omega}_d = \dot{x}_{T,d} = \ddot{x}_{T,d} = 0$ ). Con la velocidad deseada del rotor  $\Omega_d = \Omega_{nominal}$  y utilizando (3), la relación de velocidad de punta deseada  $\lambda_d$  es

20 
$$\lambda_d = \frac{\Omega_d R}{v_0} \quad (5)$$

Con el desplazamiento deseado superior de la torre  $X_{T,d}$  y utilizando (1b) y (2b), el coeficiente de empuje deseado es

25 
$$c_{T,d} = \frac{2F_{a,d}}{\rho\pi R^2 v_0^2} \quad \text{con} \quad F_{a,d} = k(x_{T,d} - x_{0T}) \quad (6)$$

Utilizando un inverso de  $\theta(\lambda, c_T)$  la tabla de consulta  $c_T(\lambda, 0)$ , se obtiene el ángulo de cabeceo deseado.

30 
$$\theta_d = \theta(\lambda_d, c_{T,d}) \quad (7)$$

Por último, el par deseado del generador  $M_{G,d}$  puede obtenerse utilizando (1a) y (2a):

35 
$$M_{G,d} = i_{GB} \frac{1}{2} \rho\pi R^3 \frac{c_P(\lambda_d, \theta_d)}{\lambda_d} v_0^2 \quad (8)$$

Si el par del generador y el ángulo de cabeceo del modelo SLOW siguen los valores deseados  $M_{G,d}$  y  $\theta_d$ , los movimientos del rotor y de la torre no se ven afectados por los cambios de velocidad del viento  $v_0$ . Para visualizar la acción de control, se calculan  $M_{G,d}$  y  $\theta_d$  para el punto de funcionamiento en  $v_{op} = 12$  m/s y para velocidades del viento con  $\pm 0,5$  m/s y se representan en la figura 4.

40 En la segunda etapa,  $M_{G,d}$  y  $\theta_d$  se aproximan mediante funciones lineales en  $v_0$  con coeficientes de regresión  $a_G, b_G, a_P,$  y  $b_P$ :

$$M_{G,d} \approx a_G + b_G(v_0 - v_{op}) \quad (9a)$$

$$\theta_d \approx a_P + b_P(v_0 - v_{op}) \quad (9b)$$

45 En la tercera etapa, las acciones anticipativas se combinan con el controlador de realimentación en la región 2,5 como se muestra en la figura 3. Se añade una actualización de tasa de par del generador al término integral del controlador de realimentación de par similar a la actualización de la tasa de cabeceo colectivo utilizada en la literatura conocida:

50 
$$\dot{M}_{G,FF} = b_G \dot{v}_0 \quad (10)$$

Realizar lo mismo para el ángulo de cabeceo no tendría el efecto deseado, ya que el integrador del controlador PI de cabeceo tendrá valores negativos en la región 2,5. Por tanto, se utiliza una anticipación actualizada al ángulo de cabeceo mínimo  $\theta_{\min}$ :

$$\Delta\theta_{FF} = b_p(v_0 - \bar{v}_0) \quad (11)$$

En donde  $\bar{v}_0$  es un valor con filtro de paso bajo de  $v_0$  para tener en cuenta los cambios de velocidad del viento y evitar una acción de cabeceo excesiva en la región 2,5. En este caso, se utiliza un filtro lineal de primer orden con una frecuencia de corte de  $f_{on} = 0,01$  Hz. El filtro permite movimientos lentos de la torre y, por tanto, cumple una función similar a la planificación de la trayectoria de la torre del controlador basado en planicidad. Sin embargo, la siguiente sección mostrará que el ajuste de  $f_{on}$  es más intuitivo comparado con la planificación de la trayectoria. Se utiliza un filtro de paso bajo en lugar de un filtro de paso alto, ya que  $\bar{v}_0$  puede calcularse a partir de la previsión del viento antes de desplazarla en el tiempo y así se consigue un menor retardo de fase. Adicionalmente, en un trabajo futuro  $\bar{v}_0$  puede usarse para ajustar el ángulo mínimo de cabeceo  $\theta_{\min}$ , como se propone en la literatura conocida y para programar  $b_p$ , si fuera necesario.

El controlador anticipativo podría derivarse directamente de un modelo linealizado con un resultado similar. En este caso, se señala la relación con el controlador basado en planicidad.

#### D. Ajuste para previsión de viento realista

Utilizando un sistema lidar, la velocidad efectiva del viento en el rotor  $v_0$  no puede medirse perfectamente, como se analiza en la sección II. Mientras que en trabajos conocidos la coherencia de la medición se incluye directamente en el diseño del control, en este caso se utiliza un prefiltro además del controlador. En trabajos anteriores se demostró que la función de transferencia entre  $V_{OL}$  y  $v_0$  es el prefiltro óptimo para que la estimación del lidar elimine todas las frecuencias no correlacionadas. Se ajusta a la función de transferencia un filtro de paso bajo de primer orden con una frecuencia de corte de  $f_{off} = 0,134$  Hz.

#### IV. Resultados de la simulación

En esta sección, el controlador anticipativo multivariable se evalúa mediante simulaciones, primero utilizando la previsión de viento perfecto y después utilizando mediciones lidar simuladas.

##### A. Simulaciones con previsión de viento perfecto

En un primer estudio de simulación, el controlador anticipativo se prueba asumiendo una previsión de viento perfecta para verificar que los objetivos del diseño (menor movimiento del rotor y de la torre) pueden alcanzarse para el modelo de simulación completo.

Por tanto, el modelo aeroelástico completo se ve perturbado por una ráfaga coherente a 12 m/s similar a los trabajos conocidos, pero solo con una amplitud de 1 m/s (mínima a máxima) para mantenerse dentro de la región 2,5. El controlador anticipativo propuesto puede conseguir una cancelación casi perfecta del efecto de  $v_0$  a  $\Omega$  y  $x_T$ , véase la figura 5. El sobreimpulso de la velocidad del rotor (desviación de  $\Omega_{\text{nominal}} = 12,1$  rpm) puede reducirse en un 95,9 % y el momento de flexión de adelante a atrás máximo de la base de la torre  $M_{yT}$  en un 10,9 % en comparación con el controlador de realimentación, véase la tabla I.

Tabla I

Valores máximos de simulación con previsión de viento perfecto

	FB	FB+FF	$\frac{FB+FF}{FB}$ [%]
$\Delta\Omega$ [rpm]	0,203	0,008	4,1
$M_{yT}$ [rpm]	79,4	70,7	89,1

El controlador anticipativo propuesto demuestra una buena robustez frente a las incertidumbres del modelo. Aunque el controlador se ha diseñado con un modelo no lineal con solo dos DOF (movimiento del rotor y de la torre) y aerodinámica estática, es capaz de anular casi perfectamente el efecto del viento sobre la velocidad del rotor y el desplazamiento de la torre para un modelo aeroelástico completo con 15 DOF. Así pues, los resultados son coherentes con los objetivos de control.

B. Simulaciones utilizando mediciones Lidar simuladas

En un segundo estudio de simulación, se examina la robustez frente a los errores de medición del viento del sistema lidar simulado. Para esta investigación, se genera con TurbSim un campo de viento turbulento con una velocidad media del viento de  $\bar{u} = 12$  m/s, una intensidad de turbulencia muy baja (7 %) y una duración superior a 1 h. La turbulencia baja se elige para que permanezca en la región 2,5, lo que ayuda a aislar y comprender mejor el beneficio del controlador anticipativo propuesto.

La figura 6 ilustra un periodo representativo de 5 minutos de la simulación. En la parte superior de la figura puede observarse el desplazamiento temporal y una buena concordancia entre la velocidad efectiva del viento en el rotor a partir del campo de viento y su estimación lidar. Debido a las limitaciones de las mediciones lidar y a que la previsión no es exacta, no puede esperarse un rendimiento perfecto similar al de la sección anterior. Sin embargo, con esta previsión de viento más realista, las variaciones en la velocidad del rotor  $\Omega$  y el desplazamiento superior de la torre  $x_T$ , se siguen reduciendo significativamente. El efecto del controlador anticipativo multivariable en el dominio de la frecuencia es visible en las densidades espectrales de potencia (PSD) en la figura 7. El controlador anticipativo multivariable puede reducir significativamente la influencia de la perturbación del viento en la velocidad del rotor a bajas frecuencias, principalmente por la actualización de la tasa de par del generador. Dado que el filtro adaptativo tiene una frecuencia de corte en  $f_{off} = 0,134$  Hz, la mejora se minimiza a partir de esta frecuencia y no se consigue ninguna reducción en la frecuencia propia amortiguada de la torre (0,322 Hz) y la frecuencia 3P (tres veces por revolución) (0,601 Hz). Además, el espectro del par del generador se reduce a bajas frecuencias. Este efecto es similar al del controlador anticipativo de cabeceo colectivo, en donde se necesita menos acción de cabeceo para reducir la variación de velocidad del rotor. El momento de flexión de adelante a atrás de la base de la torre también se ve significativamente reducido para frecuencias bajas hasta  $f_{off}$ . Sin embargo, la reducción comienza en  $f_{on} = 0,01$  Hz, ya que por (11) y el filtro de paso bajo utilizado, las acciones de cabeceo por debajo de esta frecuencia se ven obstaculizadas.

Por último, la tabla II resume los resultados de la simulación de 1 h a 12 m/s. Se consigue reducir en más de un 55 % la desviación típica de la velocidad del rotor. Para el cálculo de las cargas equivalentes al daño (DEL), se utiliza un número de referencia de ciclos  $2 \times 10^6$ . Además, se asume un exponente de Wöhler de 4 para el cálculo de la carga de fatiga del momento de flexión de adelante a atrás de la base de la torre  $M_{vT}$ , y del par del eje de baja velocidad  $M_{LSS}$ . Para  $M_{oop1}$ , el momento de flexión de la raíz de la pala fuera del plano de la pala 1, se aplica un exponente de Wöhler de 10. Además de la reducción de carga en la base de la torre (15 %), se consiguen reducciones adicionales de carga en el eje y en la raíz de la pala (6 % y 5 %, respectivamente). Teniendo en cuenta la baja intensidad de las turbulencias, la reducción de la carga es prometedora.

Tabla II

Resultados de la simulación de 1 h con viento turbulento

	FB	FB+FF	$\frac{FB + FF}{FB}$ [%]
STD ( $\Omega$ ) [rpm]	0,0345	0,0154	44,6
DEL( $M_{vT}$ ) [MNm]	24	20,2	84,3
DEL( $M_{LSS}$ ) [MNm]	2,64	2,47	93,7
DEL( $M_{oop1}$ ) [MNm]	5,76	5,50	95,4
STD ( $\theta$ ) [grado/d]	0	0,0702	$\infty$
EP [MWh]	5,663	5,655	99,9

Las mejoras vienen acompañadas de algunos empeoramientos. El aumento de la actividad de cabeceo (representado por la desviación típica de la tasa de cabeceo) se considera irrelevante, ya que en funcionamiento a plena carga, la tasa de cabeceo es más de diez veces mayor. Sin embargo, la pérdida de producción de energía (EP) del 0,14 % no es insignificante. Sin embargo, el uso tanto de la anticipación multivariable como de los ajustes del ángulo de cabeceo mínimo podría dar lugar a una reducción de la carga y a un aumento de la producción de energía. La figura 8 muestra el coeficiente de potencia  $c_p$  a  $v_0 = 12$  m/s y  $\Omega = \Omega_{nominal}$  (lo que da como resultado  $\lambda = 6,65$ ). Cambiando el ángulo de cabeceo mínimo  $\theta_{min}$  de 0 grados a -1 grado, el coeficiente de potencia puede incrementarse en un 0,66 %. El ángulo de cabeceo mínimo óptimo cambia con la velocidad media del viento y el beneficio aumenta más cerca de la región 3. Así pues, cabe esperar que las mediciones lidar puedan utilizarse para ajustar  $\theta_{min}$  y aumentar la producción de energía incluso por encima de las pérdidas anteriormente mencionadas.

V. Conclusiones y perspectiva

Este artículo presenta un controlador anticipativo multivariable para turbinas eólicas que utiliza lidar. El controlador anticipativo está diseñado para ayudar a los controladores de realimentación convencionales para el par del generador y el ángulo de cabeceo colectivo en la transición entre las operaciones de carga parcial a plena carga. El diseño se basa en un enfoque basado en planicidad presentado en trabajos anteriores, pero se simplifica mediante

una linealización y se ajusta para evitar grandes acciones de cabeceo causadas por grandes cambios en la velocidad media del viento. Además, se diseña un controlador del par del generador PI para la turbina eólica de referencia de 5 MW. La región de transición se amplía aumentando la potencia nominal a 8 MW con el fin de disponer de un rango suficientemente grande para probar el concepto.

5 Las simulaciones con un modelo aeroelástico completo y viento coherente muestran que el controlador combinado de realimentación-anticipativo sigue los objetivos de diseño y es capaz de mantener constantes la velocidad del rotor y el movimiento de la torre suponiendo una previsión de viento perfecto. En las simulaciones con viento turbulento y un simulador lidar se consigue una prometedora reducción de la carga. La producción de energía también disminuye ligeramente, pero se esbozan posibilidades para evitar la pérdida o incluso mejorar la producción de energía.

10 La invención también puede aplicarse para lo siguiente:

- 15 - Diseño de un controlador de realimentación completo que incluye un amortiguador de torre y tren de transmisión para la turbina eólica de 8 MW.
- Diseñar una estrategia para activar y desactivar sin problemas el controlador anticipativo multivariable .al entrar y salir de la región 2,5 y combinarlo con el controlador anticipativo de cabeceo colectivo.
- Incluir el ajuste del ángulo de cabeceo mínimo en base a las mediciones lidar, tal como se propone en la literatura conocida.
- 20 - Probar el controlador multivariable propuesto en un análisis de carga detallado con un mayor nivel de turbulencia.
- Determinar el efecto global del concepto sobre la producción de energía y la reducción de la carga.

**REIVINDICACIONES**

1. Sistema de control para una turbina eólica que incluye

- 5           - un controlador anticipativo que tiene como parámetro de entrada una velocidad efectiva del viento en el rotor de la turbina eólica y que tiene exactamente dos parámetros de salida  
- un controlador de realimentación en el que un parámetro de entrada se basa en la velocidad del rotor o la velocidad del generador de la turbina eólica y que tiene exactamente un parámetro de salida, y

10       en el que

- un parámetro de salida del controlador anticipativo se proporciona al controlador de realimentación como parámetro de entrada y  
15       - otro parámetro de salida del controlador anticipativo se utiliza como parámetro de control anticipativo para controlar la turbina eólica, en el que el parámetro de control anticipativo de la turbina eólica controla el ángulo de cabeceo de las palas del rotor de la turbina eólica, y  
- un parámetro de salida del controlador de realimentación se utiliza como parámetro de control de realimentación para controlar la turbina eólica, en el que el parámetro de control de realimentación de la turbina eólica controla el par del generador de energía de la turbina eólica.

20       2. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que el parámetro de salida del controlador anticipativo que se proporciona al controlador de realimentación como parámetro de entrada es una tasa de par del generador actualizada.

25       3. Sistema de control según una o más de las reivindicaciones anteriores, en el que el parámetro de salida del controlador anticipativo que se utiliza como parámetro de control anticipativo de la turbina eólica es un ángulo de cabeceo actualizado de las palas del rotor.

30       4. Sistema de control según una o más de las reivindicaciones anteriores, en el que la velocidad efectiva del viento en el rotor se obtiene utilizando un dispositivo Lidar.

35       5. Sistema de control según una o más de las reivindicaciones anteriores, en el que los parámetros de salida del controlador anticipativo se calculan basándose en el parámetro de entrada y asumiendo que no se desea ninguna dinámica para un movimiento de la torre o rotor de la turbina eólica,

          en el que el cambio en el tiempo de la velocidad deseada del rotor es igual a cero y el cambio en el tiempo del desplazamiento de adelante a atrás de la torre de la turbina eólica es igual a cero y en el que la aceleración del desplazamiento de adelante a atrás de la torre de la turbina eólica es igual a cero.

40       6. Sistema de control según una o más de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de control se utiliza para controlar la turbina eólica en una transición de un funcionamiento de optimización aerodinámica a un funcionamiento a plena carga.

45       7. Sistema de control según una o más de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de control está limitado para controlar la turbina eólica en una transición de un funcionamiento de optimización aerodinámica a un funcionamiento a plena carga.

50       8. Turbina eólica que incluye un sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, un generador de energía y una pluralidad de palas del rotor.

9. Método de control para controlar una turbina eólica que comprende las etapas siguientes

- 55       - obtener una velocidad efectiva del viento en el rotor de la turbina eólica y proporcionar la velocidad efectiva del viento en el rotor como parámetro de entrada a un controlador anticipativo, en el que el controlador anticipativo tiene exactamente dos parámetros de salida;  
- proporcionar, mediante el controlador anticipativo, un parámetro de salida denominado parámetro de control anticipativo para controlar la turbina eólica, en el que el parámetro de control anticipativo de la turbina eólica controla el ángulo de cabeceo de las palas del rotor de la turbina eólica;  
- proporcionar, mediante el controlador anticipativo, otro parámetro de salida denominado parámetro de  
60       entrada anticipativo como parámetro de entrada de un controlador de realimentación, en el que el controlador de realimentación tiene exactamente un parámetro de salida;  
- proporcionar por el controlador de realimentación un parámetro de salida denominado parámetro de control de realimentación para controlar la turbina eólica, en el que el parámetro de control de realimentación de la turbina eólica controla el par del generador de energía de la turbina eólica, en el que dicho parámetro de control de realimentación se basa en dicho parámetro de entrada anticipativo y en la velocidad del rotor o en la velocidad del generador de un generador de energía de la turbina eólica.

10. Método de control según la reivindicación 9, en el que una o más de las etapas se llevan a cabo repetidamente.

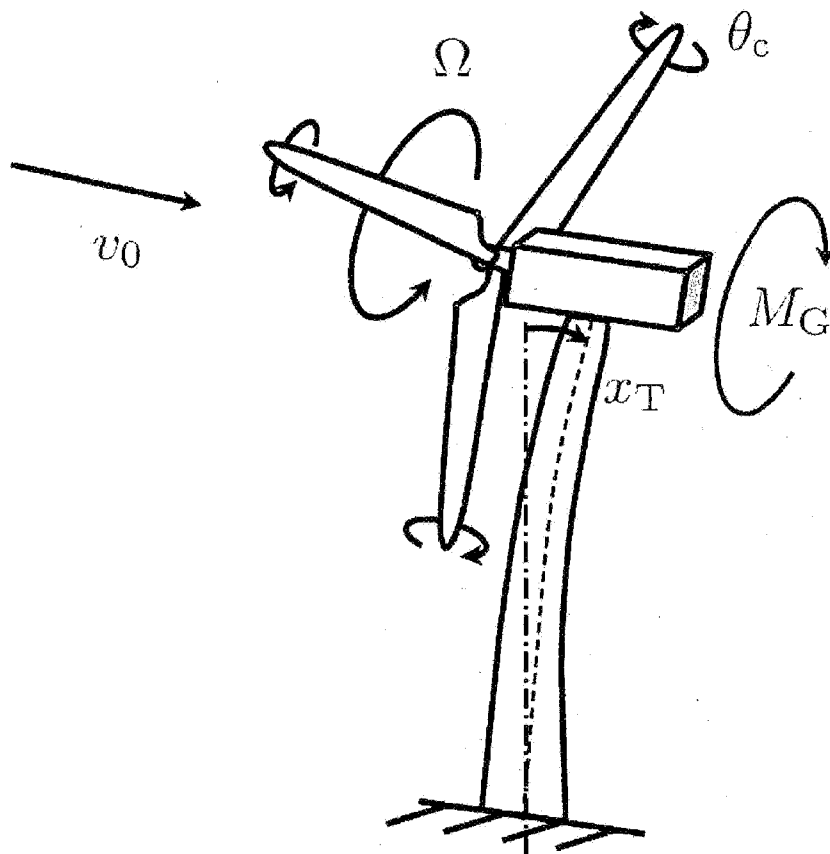


Fig. 1

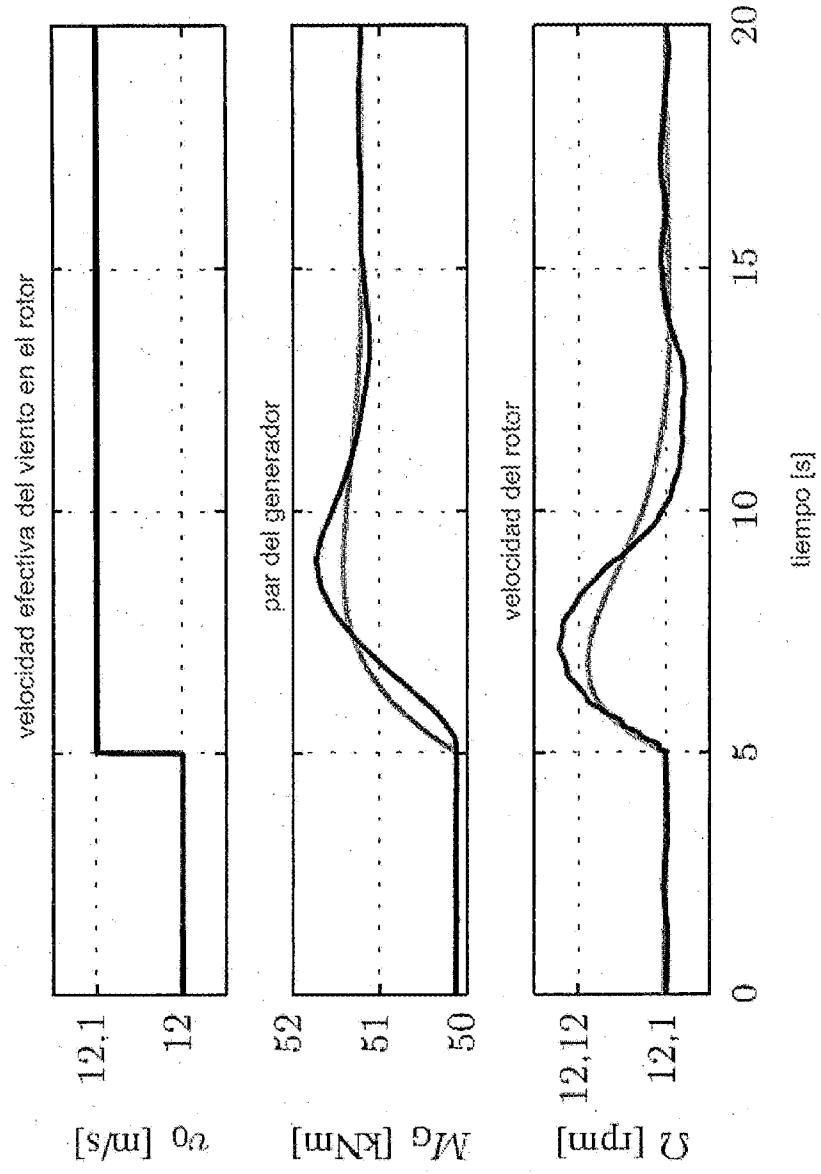


Fig. 2

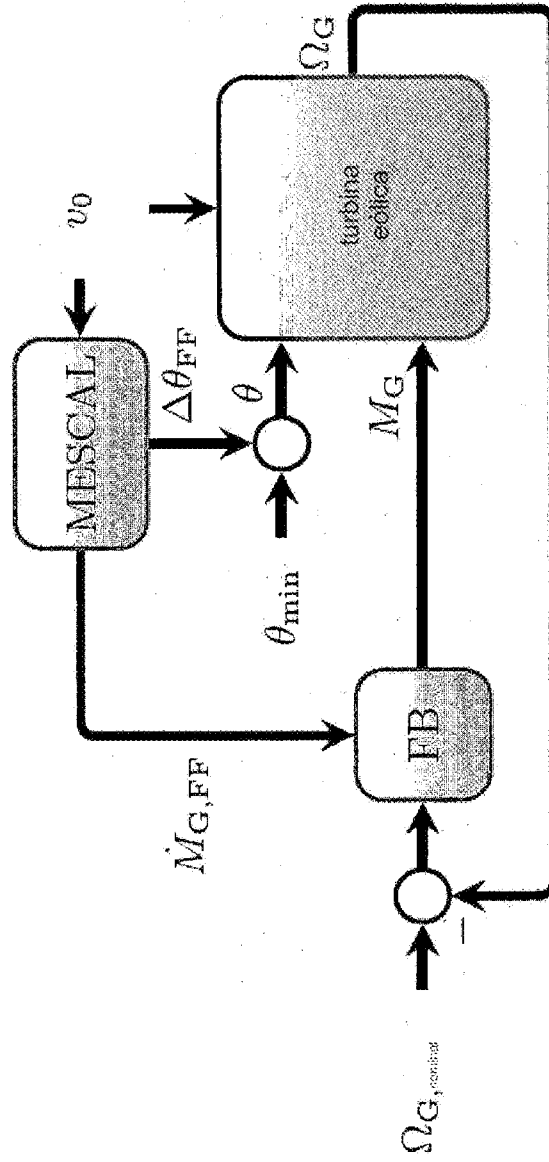


Fig. 3

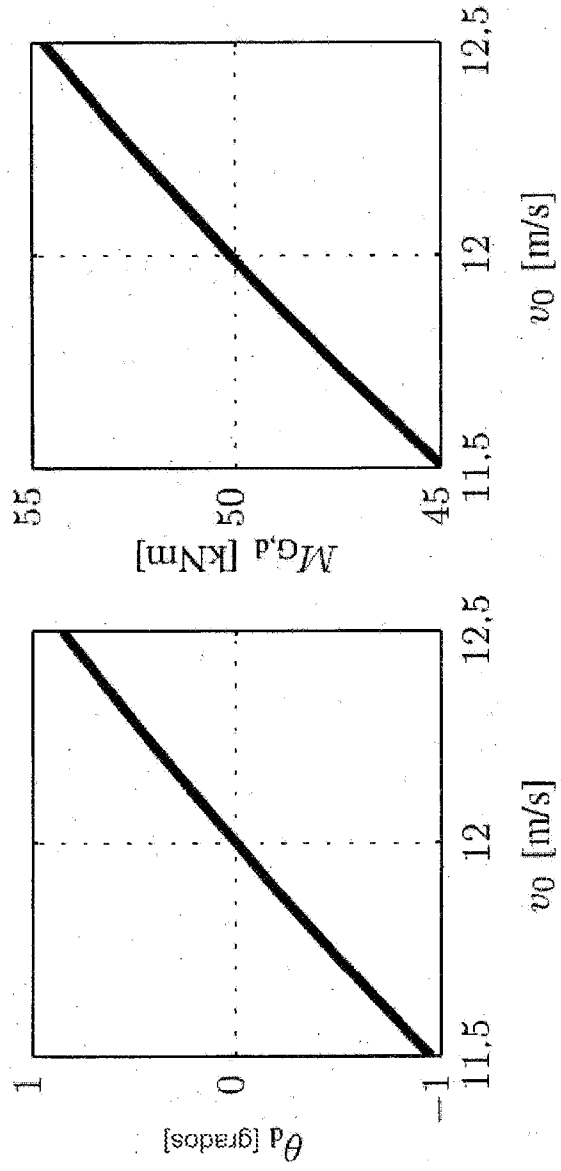


Fig. 4

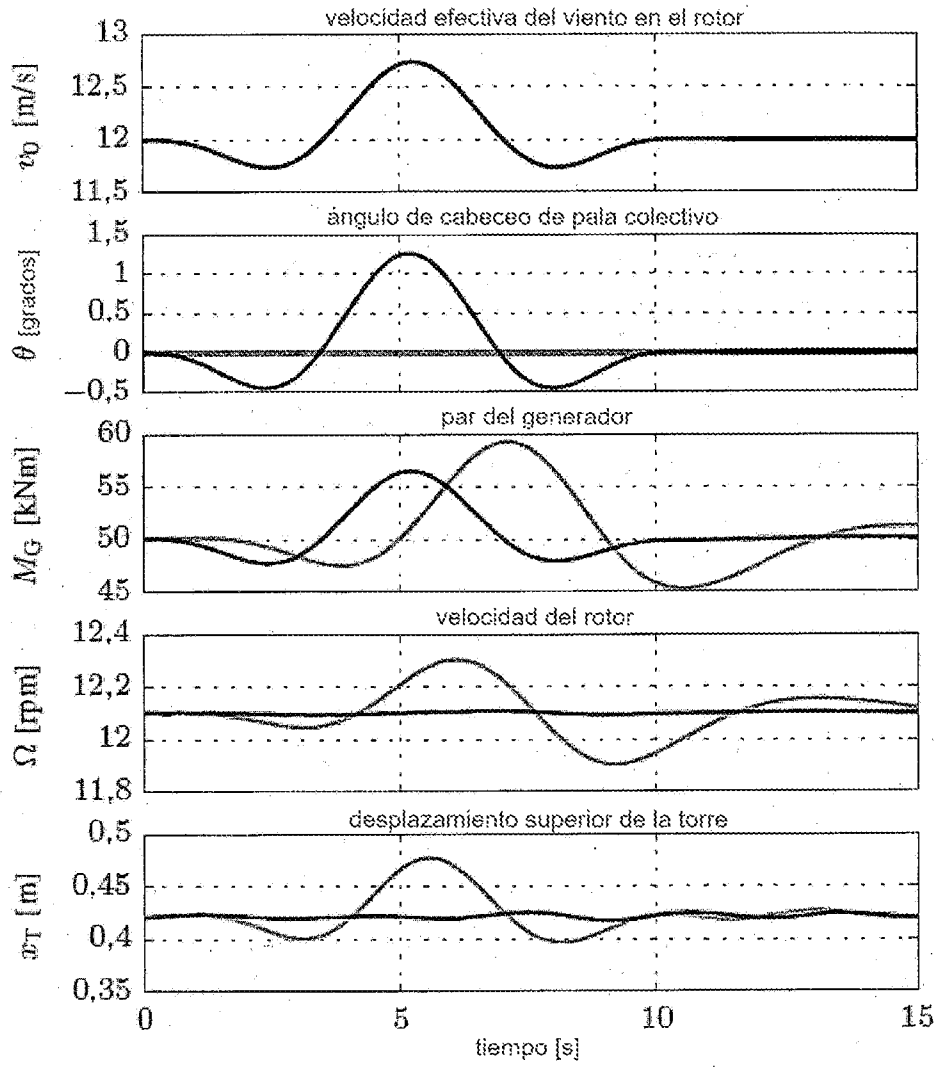


Fig. 5

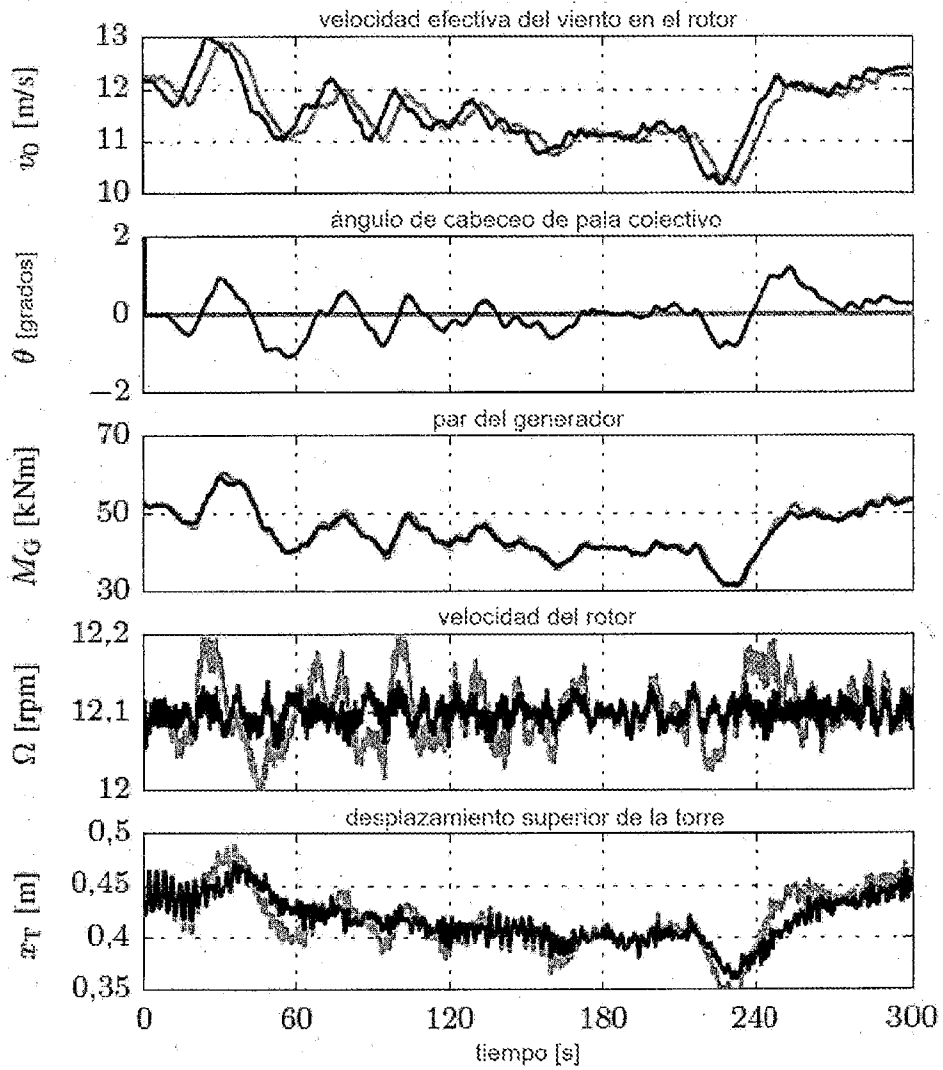


Fig. 6

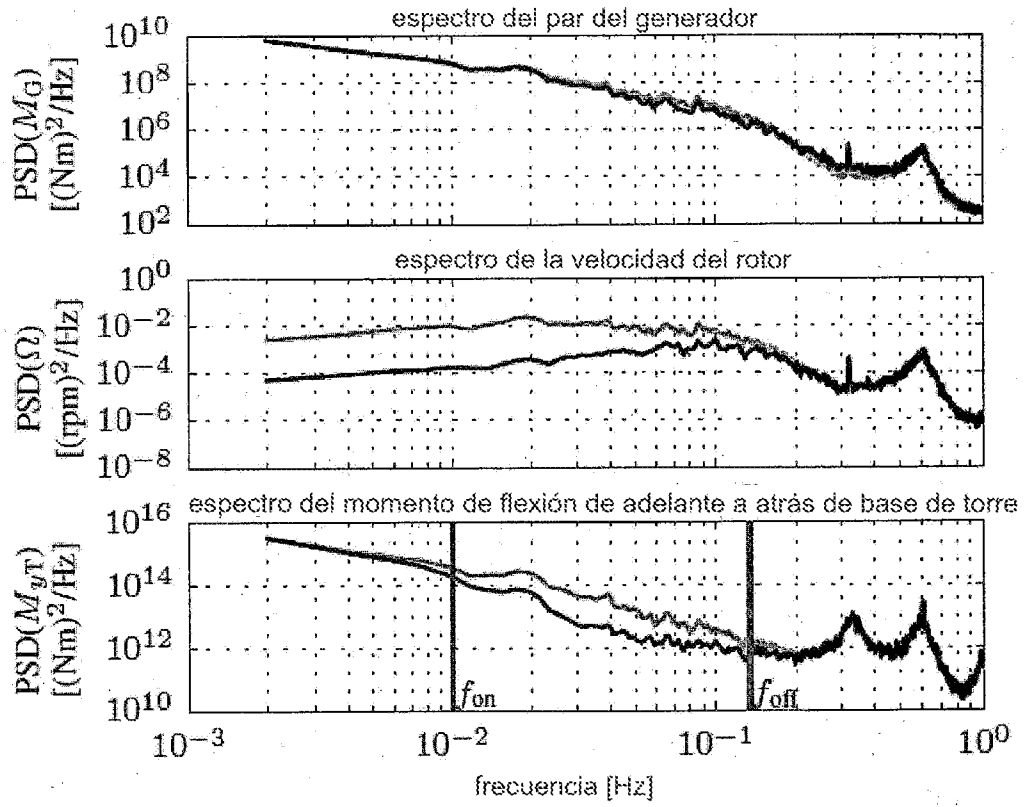


Fig. 7

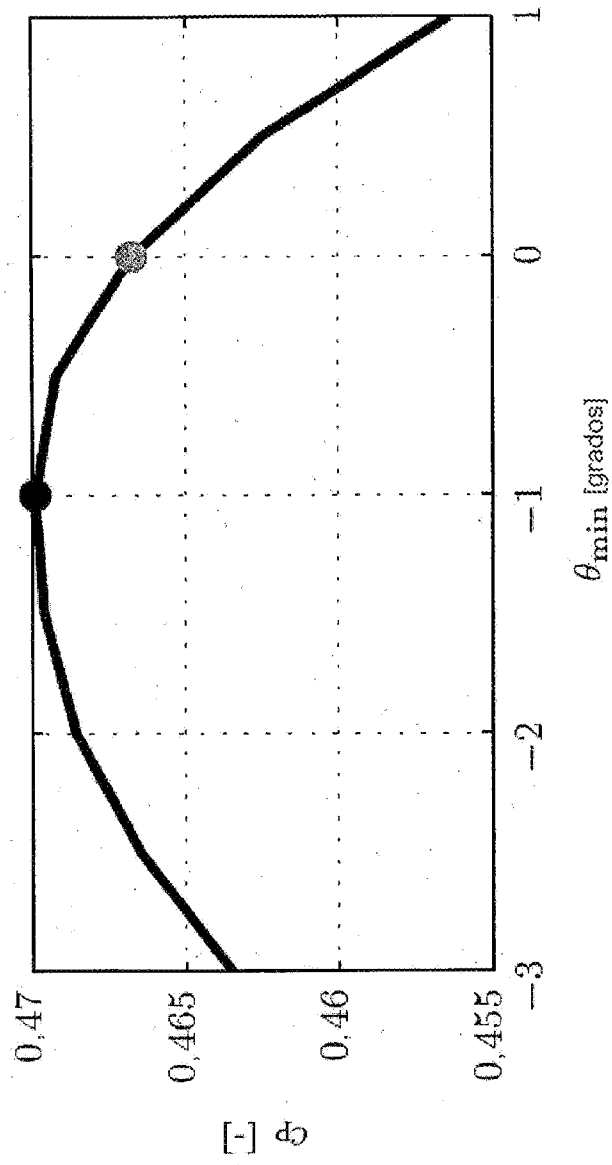


Fig. 8