

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 589 384**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.05.2011 PCT/DK2011/050183**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.12.2011 WO11150931**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.05.2011 E 11723238 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.06.2016 EP 2577055**

54 Título: **Método de operación de una turbina eólica con salida de potencia mejorada**

30 Prioridad:

02.06.2010 US 350581 P
02.06.2010 DK 201070236

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

14.11.2016

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

ABDALLAH, IMAD;
MIRANDA, ERIK CARL LEHNSKOV y
ZAIB, ALI

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 589 384 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de operación de una turbina eólica con salida de potencia mejorada

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método de operación de una turbina eólica, en particular una turbina eólica de paso regulado. Más particularmente, el método de la presente invención proporciona una producción de energía anual mejorada de la turbina en tanto que reduce el riesgo de entrada en pérdida de las palas del rotor, y reduce el riesgo de daños a la turbina eólica.

Antecedentes de la invención

15 Cuando se opera una turbina eólica con paso controlado, se controla el ángulo de paso de las palas para maximizar el coeficiente de potencia del rotor, C_P , sin exceder el coeficiente de potencia nominal, $C_{P, nom}$. Por ello, a velocidades de viento relativamente bajas, la zona denominada de "carga parcial", el ángulo de paso se controla de tal manera que el coeficiente de potencia sea tan alto como sea posible, y a velocidades de viento más altas, la zona denominada de "plena carga", el ángulo de paso se controla de tal manera que el coeficiente de potencia se limite al coeficiente de potencia nominal, $C_{P, nom}$. Con este fin se usan curvas teóricas para el cálculo del ángulo de paso que se va a aplicar en las circunstancias dadas. Dichas curvas podrían, por ejemplo, especificar el ángulo de paso 20 óptimo en función de la relación de velocidad de punta, λ , siendo el ángulo de paso óptimo en este contexto el ángulo de paso que proporciona el coeficiente de potencia, C_P , más alto posible. La relación de velocidad de punta, λ , es la relación entre la velocidad de punta de la pala y la velocidad del viento.

25 En algunos regímenes de viento, en particular a velocidades del viento justamente por debajo de la velocidad del viento en la que se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P, nom}$, existe el riesgo de que las palas del rotor entren en pérdida y el flujo de aire sobre las palas se separe de las palas, si la turbina se opera de acuerdo con las curvas de "paso óptimo" descritas anteriormente, por ejemplo en el caso de turbulencia o fuerte cizalladura del viento. Dado que esto es muy indeseable, debe seleccionarse un control del ángulo de paso más precavido, al menos en esta zona del viento. Adicionalmente, el control precavido del ángulo de paso se realiza de tal manera que impide la entrada en pérdida de las palas así como cargas excesivas sobre diversos componentes de la turbina eólica, incluso en un "escenario del peor caso". Como consecuencia, la turbina eólica se opera de una manera subóptima, y la producción de potencia de la turbina eólica se reduce en comparación con una producción de potencia máxima teórica.

35 En el documento de Zhang, X., et al., "Intelligent control for large-scale variable speed variable pitch wind turbines", Journal of Control Theory and Applications 3 (2004) 305-311, se divulga un método para la operación de una turbina eólica. El sistema de control propuesto consiste en dos bucles: un bucle interior para la regulación del par del generador usando control difuso adaptativo basado en una variable universal para maximizar la captura de potencia con velocidad del viento por debajo de la nominal; un bucle del rotor exterior para controlar el ángulo de paso y mantener la potencia nominal usando un control de máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LS-SVM, del inglés "least square support vector machine"). Las entradas al controlador del bucle del rotor son la potencia de salida del generador, la velocidad de rotación del eje, ω , y la velocidad del viento efectiva estimada, V_w . La variable de control de salida es el ángulo de paso de referencia, β_{ref} , de las palas del rotor.

45 El documento WO2010/057737 describe un método para el control de una turbina eólica en donde se selecciona una curva óptima de paso respecto a la velocidad de rotación de entre el grupo de dichas curvas. El documento US2008/001409 describe una turbina eólica con un controlador de autoaprendizaje que se configura para optimizar el parámetro de orientación de la turbina eólica. El documento US4339666 describe un control del ángulo de paso de pala para un generador de turbina eólica que establece una potencia óptima o señal de referencia de par que, cuando las condiciones de operación así lo garantizan, no está limitado por el par nominal o niveles de potencia de los diversos componentes del generador de la turbina. El documento US 2009/295159 describe un método de control de turbina eólica que se usa de modo que la turbina eólica puede conseguir coeficientes de potencia más altos. El documento US2010/040468 describe un método para el control de una turbina eólica en donde la turbina eólica se opera por encima de un límite predeterminado de velocidad del viento de desconexión.

Descripción de la invención

60 Es un objeto de realizaciones de la invención proporcionar un método para la operación de una turbina eólica en el que se incremente la producción de energía anual en comparación con los métodos de operación de la técnica anterior, sin incrementar el riesgo de entrada en pérdida de las palas.

65 Es un objeto adicional de realizaciones de la invención proporcionar un método para la operación de una turbina eólica en el que se incremente la producción de energía anual en comparación con los métodos de operación de la técnica anterior, sin incrementar el riesgo de sobrecarga sobre uno o más componentes de la turbina eólica.

De acuerdo con la invención se proporciona un método para la operación de una turbina eólica, de acuerdo con la reivindicación 1.

5 De acuerdo con la presente invención, se proporciona inicialmente una curva que define el ángulo de paso óptimo. La curva puede ser "óptima" en el sentido de que define el ángulo de paso que, en las circunstancias dadas, por ejemplo condiciones del viento, proporciona la salida de potencia o coeficiente de potencia, C_P , más alto posible, para la turbina eólica. Alternativa o adicionalmente, la curva puede ser óptima con respecto a otros factores o condiciones, tales como la dirección y/o turbulencia del viento. Por ejemplo, en algunos emplazamientos puede conocerse que se presentan turbulencias más altas cuando el viento procede de una dirección que cuando procede de una dirección opuesta. En este caso, pueden seleccionarse varias curvas, dependiendo de una medición de la dirección del viento.

15 En el presente contexto el término "paso" debería interpretarse como el giro medio de una pala de turbina eólica alrededor del eje que se extiende a lo largo de una dirección longitudinal de la pala de la turbina eólica.

La curva define el ángulo de paso óptimo en función de la relación de velocidad de punta para las palas de la turbina eólica o en función de la velocidad del viento. En consecuencia, la curva puede ser ventajosamente una curva de "paso óptimo" tal como se ha descrito anteriormente.

20 La curva puede seleccionarse en base a datos específicos del emplazamiento, tales como la altura de la posición de la turbina eólica, clima, dirección del viento predominante, condiciones de estela del viento medias, condiciones de turbulencia medias, etc.

25 A continuación, parte de la curva de ángulo de paso óptimo se modifica aplicando una tolerancia de seguridad. La tolerancia de seguridad se aplica para impedir la entrada en pérdida de las palas, y/o que uno o más componentes de la turbina eólica se sobrecarguen, en caso de ráfagas o fuerte cizalladura del viento. La tolerancia de seguridad se diseña normalmente de tal manera que incluso pueda manejarse un "escenario del peor caso". Tal como se ha descrito anteriormente, la tolerancia de seguridad provocará por lo tanto que la turbina eólica opere de una manera subóptima, al menos en algunas zonas de relaciones de velocidad de punta o velocidad del viento. Se obtiene de ese modo una curva modificada del ángulo de paso de seguridad.

35 Solo se modifica una parte de la curva de ángulo de paso óptima. En el caso de que solo se modifique una parte de la curva, la tolerancia de seguridad puede aplicarse solamente a las relaciones de velocidad de punta y/o ángulos de paso en donde es sabido que hay un alto riesgo de que las palas entren en pérdida y/o que se provoque sobrecarga a la turbina eólica.

40 La turbina eólica es operada entonces de acuerdo con la curva de ángulo de paso de seguridad modificada. De ese modo al riesgo de que las palas entren en pérdida y/o de sobrecarga de la turbina eólica se elimina o al menos se reduce considerablemente. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, debe esperarse que la turbina eólica se opere de una forma subóptima, es decir la producción de energía puede ser más baja que la máxima producción de energía posible.

45 Mientras se opera la turbina eólica de acuerdo con la curva modificada de ángulo de paso de seguridad, se miden uno o más parámetros que proporcionan información en relación a las condiciones del viento y/o carga sobre uno o más componentes de la turbina eólica. El(los) parámetro(s) puede(n) incluir, por ejemplo, parámetros en relación a cargas, tales como cargas de fatiga, sobre las palas, cojinetes y/o construcción de la torre, velocidad del viento, cizalladura del viento, turbulencia, dirección del viento, etc.

50 El(los) parámetro(s) puede(n) medirse directamente. Sin embargo, como alternativa, pueden medirse indirectamente uno o más parámetros en el sentido de que se estiman o calculan a partir de mediciones de uno o más parámetros que no proporcionan directamente información en relación a las condiciones del viento y/o cargas. Por ejemplo, las cargas sobre la construcción de la torre pueden estimarse o calcularse en base a mediciones de la amplitud y/o frecuencia de las oscilaciones de la torre medidas.

55 Basándose en los parámetros medidos se ajusta la tolerancia de seguridad. De ese modo, se obtiene una curva ajustada del ángulo de paso. Finalmente, se opera la turbina eólica de acuerdo con la curva ajustada del ángulo de paso.

60 Los parámetros medidos representan condiciones reales en el exterior y/o interior de la turbina eólica. Dado que la tolerancia de seguridad se ajusta basándose en los parámetros medidos, estas condiciones reales se tienen en cuenta cuando se define la tolerancia de seguridad final. Por ello, si los parámetros medidos indican que no es inminente un "escenario del peor caso", la tolerancia de seguridad puede reducirse, permitiendo de ese modo que la turbina eólica se opere más próxima a la curva de paso óptimo, obteniendo de ese modo un coeficiente de potencia, C_P , que esté más próximo al coeficiente de potencia máxima, $C_{P, \text{máx}}$, e incrementando la producción de energía de la turbina eólica. Por otro lado, en caso de que los parámetros medidos indiquen que hay un muy alto riesgo de que las palas entren en pérdida y/o de cargas excesivas sobre uno o más componentes de la turbina eólica, puede

mantenerse la tolerancia de seguridad, o incluso incrementarse, asegurando de ese modo que se evita la entrada en pérdida de las palas así como cargas excesivas. De ese modo, la tolerancia de seguridad se actualiza dinámicamente basándose en las condiciones de operación reales.

- 5 En consecuencia, la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad permite que la turbina eólica sea operada tan próxima al coeficiente de potencia máxima, $C_{P, \text{máx}}$, como lo permitan las condiciones reales. De ese modo, la producción de potencia de la turbina eólica, y por ello la producción de energía anual, PEA, se incrementa.

- 10 Debería tomarse nota de que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad debería realizarse mediante el cambio real de la tolerancia de seguridad y el cálculo o generación de una nueva curva de paso. Sin embargo, en la práctica pueden estar disponibles un cierto número de curvas de paso previamente generadas, y la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad puede realizarse simplemente mediante la selección de otra de las curvas previamente generadas, la que sea más adecuada en las circunstancias dadas indicadas por los parámetros medidos.

- 15 La etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad puede comprender:

- calcular un coeficiente de potencia estimado, $C_{P, \text{Est}}$,
- comparar el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, \text{Est}}$, con un coeficiente de potencia de referencia $C_{P, \text{Ref}}$, y
- ajustar la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación.

- 20 De acuerdo con esta realización, los parámetros medidos se usan para calcular un coeficiente de potencia estimado $C_{P, \text{Est}}$. De ese modo, se obtiene una medición de la potencia real que se está produciendo por la turbina eólica. El coeficiente de potencia estimado, $C_{P, \text{Est}}$, se compara entonces con un coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, \text{Ref}}$. El coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, \text{Ref}}$, puede ser ventajosamente un coeficiente de potencia óptimo, $C_{P, \text{opt}}$, en cuyo caso puede obtenerse mediante la medición de la relación de la velocidad de punta de la turbina eólica y consultando una curva de C_P óptima. La comparación puede dar como resultado, por ejemplo, una señal de error que indique cómo de próximo está el coeficiente de potencia real al coeficiente de potencia de referencia. Finalmente, la tolerancia de seguridad se ajusta basándose en la etapa de comparación.

- 30 La etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación puede realizarse en una manera que se espere disminuya la diferencia entre el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, \text{Est}}$, y el coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, \text{Ref}}$. De acuerdo con esta realización, el ajuste de la tolerancia de seguridad lleva al coeficiente de potencia real más próximo al valor de referencia.

- 35 Alternativa o adicionalmente, la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación puede comprender la reducción de la tolerancia de seguridad en el caso de que el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, \text{Est}}$, sea más pequeño que el coeficiente de potencia de referencia $C_{P, \text{Ref}}$. El caso de que el coeficiente de potencia estimado $C_{P, \text{Est}}$, sea más pequeño que el coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, \text{Ref}}$, es una indicación de que las condiciones de operación reales permiten que la turbina eólica sea operada en una forma más agresiva que la que está siendo operada actualmente. Es posible por lo tanto reducir la tolerancia de seguridad, seleccionando de ese modo una estrategia de operación más agresiva e incrementando la producción de potencia, sin riesgo de que las palas entren en pérdida y/o de que la turbina eólica, o uno o más componentes de la turbina eólica, se sobrecarguen.

- 45 La etapa de medición de uno o más parámetros puede comprender la medición de una amplitud de un control de paso individual y/o cíclico de las palas de la turbina eólica, y la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad puede realizarse basándose en dicha amplitud medida. Los ángulos de paso de las palas de la turbina eólica pueden controlarse a veces de una forma individual y/o cíclica. Esto puede ser, por ejemplo, para tener en cuenta que las condiciones del viento experimentadas por una pala varían dependiendo de la posición angular de la pala cuando gira junto con el rotor. Dichas variaciones son, por ejemplo, debidas a un cizalladura del viento y paso de la torre. Cuando dichos ajustes cíclicos a los ángulos de paso se usan en el control de la operación de la turbina eólica, se requiere normalmente un margen de seguridad relativamente grande sobre la regulación del paso para impedir la entrada en pérdida de las palas y/o que la turbina eólica se sobrecargue. En consecuencia, la contribución a la tolerancia de seguridad que puede tener en cuenta los procesos de ajustes cíclicos puede constituir una fracción relativamente grande de la tolerancia de seguridad total. Es por lo tanto muy relevante investigar cómo de grande es en realidad la amplitud de las variaciones cíclicas de los ángulos de paso, y para ajustar la tolerancia de seguridad de acuerdo con esta investigación. Por ello, si se obtiene que la amplitud de las variaciones cíclicas es mucho más pequeña que un "escenario del peor caso", la tolerancia de seguridad puede reducirse con seguridad.

- 60 La etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad puede comprender las etapas de comparación de la amplitud medida con una amplitud permitida máxima y reducir la tolerancia de seguridad en caso de que la amplitud medida sea más pequeña que la amplitud permitida máxima. De acuerdo con esta realización, la amplitud permitida máxima puede ser ventajosamente una amplitud que se espera bajo las peores condiciones posibles. En este caso la tolerancia de seguridad se reduce, de acuerdo con la presente realización, si se establece que las condiciones de operación reales son menos severas que las del "escenario del peor caso". Como una alternativa, la amplitud permitida máxima puede ser una amplitud que se espera bajo condiciones que se han asumido cuando se

seleccionó la curva de paso óptima y se aplicó la tolerancia de seguridad. Si se obtiene que la amplitud real es más pequeña que esto, indica que las condiciones reales son menos severas que las esperadas, y la tolerancia de seguridad puede reducirse en consecuencia.

5 La etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad puede comprender:

- estimar una carga sobre uno o más componentes de la turbina eólica basándose en uno o más de los parámetros medidos, y
- mantener o incrementar la tolerancia de seguridad en caso de que la carga estimada supere un valor de umbral predefinido.

De acuerdo con la presente realización, al menos algunos de los parámetros medidos se usan para la estimación de una carga sobre uno o más de los componentes de la turbina eólica. Si se obtiene que la carga estimada es mayor que la esperada y/o que hay un riesgo de sobrecarga sobre uno o más componentes de la turbina eólica, no es seguro reducir la tolerancia de seguridad. Por lo tanto, se mantiene la tolerancia de seguridad original, o puede incluso incrementarse la tolerancia de seguridad.

La etapa de estimación de una carga puede comprender, por ejemplo, la estimación de un nivel de fatiga de la pala. Como una alternativa, puede estimarse la carga sobre la torre, cojinetes, tren de accionamiento, etc.

Como una alternativa a las cargas, pueden medirse o estimarse otros parámetros y usarse como una base para la determinación de si incrementar, mantener o disminuir la tolerancia de seguridad. Por ejemplo, puede detectarse una disminución o incremento en la potencia y/o en el coeficiente de potencia estimado, C_P , y la tolerancia de seguridad puede reducirse o incrementarse de acuerdo con ello. O pueden medirse uno o más parámetros que indiquen una entrada en pérdida repentina de las palas, y la tolerancia de seguridad puede incrementarse en consecuencia.

Breve descripción de los dibujos

La invención se describirá ahora con detalle adicional con referencia a los dibujos adjuntos en los que

La Fig. 1 es un gráfico que muestra un ángulo de paso óptimo en función de la relación de velocidad de punta, λ ,

la Fig. 2 es un gráfico que muestra el coeficiente de potencia óptimo, $C_{P, opt}$, en función de la relación de velocidad de punta, λ ,

la Fig. 3 es un gráfico de comparación del ángulo de paso óptimo en función de la relación de velocidad de punta, λ , durante la operación de una turbina eólica de acuerdo con una estrategia de control de la técnica anterior y una estrategia de control de acuerdo con una realización de la invención, respectivamente,

la Fig. 4 es un gráfico de comparación del coeficiente de potencia óptimo, $C_{P, opt}$, en función de la relación de velocidad de punta, λ , durante la operación de una turbina eólica de acuerdo con una estrategia de control de la técnica anterior y una estrategia de control de acuerdo con una realización de la invención, respectivamente, y

la Fig. 5 es un diagrama de flujo que ilustra un método de acuerdo con una realización de la invención.

Descripción detallada de los dibujos

La Fig. 1 es un gráfico que muestra un ángulo de paso de una pala de rotor de turbina eólica en función de la relación de la velocidad de punta, $\lambda=R\omega/v_W$, en la que R es el radio del rotor de la turbina eólica, ω es la velocidad de rotación del rotor de la turbina eólica y v_W es la velocidad del viento. La curva mostrada en la Fig. 1 se determina teóricamente de tal manera que para una relación de velocidad de punta, λ , dada se selecciona el ángulo de paso que optimiza el coeficiente de potencia, C_P . De ese modo, la curva se genera en una manera que tiene en consideración solo el maximizado de la producción de potencia. De ese modo, otros parámetros relevantes, tales como cargas, riesgo de entrada en pérdida, etc., no se han tenido en consideración durante la generación de la curva. En consecuencia, si el ángulo de paso se controla siempre a lo largo de la curva mostrada en la Fig. 1, el coeficiente de potencia del rotor, C_P , será óptimo, dando como resultado una producción de potencia óptima de la turbina eólica.

A bajas velocidades del viento, es decir con relación de velocidad de punta alta, el ángulo de paso se controla para maximizar el coeficiente de potencia del rotor, C_P . Esta zona es a veces denominada como la "zona de carga parcial". Cuando se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P nom}$, a velocidades del viento más altas (relación de velocidad de punta más baja), el ángulo de paso se controla para limitar el coeficiente de potencia, C_P , al coeficiente de potencia nominal, $C_{P nom}$. Esta zona se denomina a veces como "zona de plena carga". Es claro a partir de la Fig. 1 que el ángulo de paso es en general significativamente mayor en la zona de plena carga que en la zona de carga parcial.

A velocidades del viento en la zona en la que se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P\text{ nom}}$, el ángulo de paso óptimo es muy bajo. Los ángulos de paso bajos en esta zona incrementan el riesgo de que la pala de la turbina eólica entre en pérdida si se presenta una alta turbulencia. Adicionalmente, hay un riesgo de que se apliquen cargas excesivas a algunos componentes de la turbina eólica, tales como palas, cojinetes, tren de accionamiento y/o torre en el caso de alta turbulencia o cizalladura del viento. Dichas cargas excesivas pueden reducir la vida útil esperada de la turbina eólica o de uno o más componentes de la turbina eólica. Para impedir la entrada en pérdida de las palas, y para evitar cargas excesivas sobre componentes de la turbina eólica, el ángulo de paso no se controla normalmente de acuerdo con la curva de paso óptimo mostrada en la Fig. 1, sino más bien de acuerdo con una curva modificada en la que se añade una "zona de tolerancia", al menos en la zona en la que se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P\text{ nom}}$. De ese modo se selecciona un ángulo de paso que es mayor que el ángulo de paso óptimo, al menos en dicha zona, y la turbina eólica se opera por lo tanto de una forma subóptima.

La Fig. 2 es un gráfico que muestra en el coeficiente de potencia óptimo, $C_{P\text{ opt}}$, en función de la relación de velocidad de punta, λ . La curva mostrada en la Fig. 2 ilustra el coeficiente de potencia máxima obtenible, C_P , para una relación de velocidad de punta, λ , dada. La curva de la Fig. 2 se obtiene si el ángulo de paso de la turbina eólica se opera de acuerdo con la curva mostrada en la Fig. 1.

Como se ha descrito anteriormente, el ángulo de paso no se opera normalmente precisamente de acuerdo con la curva mostrada en la Fig. 1 por razones de seguridad. En su lugar se añade una zona de tolerancia o margen de seguridad, en al menos la zona en la que se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P\text{ nom}}$, provocando la zona de tolerancia o margen de seguridad que el ángulo de paso aplicado sea mayor que el ángulo de paso óptimo, disminuyendo de ese modo la salida de potencia de la turbina eólica. La zona de tolerancia o margen de seguridad se selecciona de tal manera que no haya riesgo de que las palas entren en pérdida o que los componentes de la turbina eólica experimenten cargas excesivas, incluso si pudieran ocurrir las condiciones peores posibles, en términos de turbulencia, ráfagas y/o cizalladura del viento. Esto tiene la consecuencia de que la turbina eólica es operada la mayor parte del tiempo de una manera subóptima sin ningún peligro real de que las palas entren en pérdida o de que la vida útil de la turbina eólica quede afectada, debido a que las peores condiciones posibles solo ocurren muy raramente. Sin embargo, por razones de seguridad, debe asegurarse que cuando suceden las peores condiciones posibles, las palas no entran en pérdida.

De acuerdo con la presente invención se examinan y evalúan las condiciones reales del viento, y en el caso de que se revele que la severidad de las condiciones del viento reales están lejos de las peores condiciones posibles, entonces se reducen los criterios de seguridad, la zona de tolerancia o margen de seguridad se reduce, y el ángulo de paso se controla para que esté más próximo a la curva de paso óptima mostrada en la Fig. 1. Si, por otro lado, se revela que la severidad de las condiciones de viento reales están próximas a las peores condiciones posibles, entonces se mantiene la zona de tolerancia o margen de seguridad originales. Adicionalmente, en el caso de que se revele que la severidad de las condiciones de viento reales son peores que las esperadas y tenidas en cuenta para la zona de tolerancia o margen de seguridad, entonces puede incrementarse la zona de tolerancia o margen de seguridad, reduciendo de ese modo el riesgo de que las palas entren en pérdida o de que se apliquen cargas excesivas a los componentes de la turbina eólica.

La Fig. 3 es un gráfico que muestra el ángulo de paso en función de la relación de velocidad de punta, λ , similar a la Fig. 1. En la Fig. 3 se muestran dos curvas. La línea continua 1 ilustra una curva de referencia, es decir una curva de paso óptimo que incluye una zona de tolerancia o margen de seguridad completo tal como se ha descrito anteriormente. Por ello, la línea continua 1 representa una estrategia de control de la técnica anterior. La línea discontinua 2 representa una estrategia de control más agresiva, en donde la zona de tolerancia o margen de seguridad se disminuye en el caso de que se revele que la severidad de las condiciones de viento reales está lejos de las peores condiciones posibles. Por ello, la línea discontinua 2 representa una estrategia de control de acuerdo con una realización de la invención.

Queda claro partir de la Fig. 3 que la estrategia de control de acuerdo con una realización de la invención permite que se seleccione un ángulo de paso más pequeño en la zona en la que se alcanza el coeficiente de potencia nominal, $C_{P\text{ nom}}$, como es el caso si el ángulo de paso se controla de acuerdo con la curva de referencia 1.

La Fig. 4 es un gráfico que muestra el coeficiente de potencia del rotor, C_P , en función de la relación de velocidad de punta, λ , similar a la Fig. 2. En la Fig. 4 se muestran dos curvas. La línea continua 3 representa el coeficiente de potencia, C_P , obtenido cuando el ángulo de paso se controla de acuerdo con la estrategia de control de referencia ilustrada por la curva 1 de la Fig. 3, y la línea discontinua 4 representa el coeficiente de potencia, C_P , obtenido cuando el ángulo de paso se controla de acuerdo con la estrategia de control de la invención ilustrada por la curva 2 de la Fig. 3. Es claro a partir de la Fig. 4 que la estrategia de control agresiva 4 da como resultado un coeficiente de potencia, C_P , significativamente más alto que la estrategia de control de referencia 3, en un intervalo más amplio de relaciones de velocidad de punta, λ . Como resultado, se obtiene un incremento significativo en la producción anual de energía de la turbina eólica, sin incrementar el riesgo de que las palas de la turbina eólica entren en pérdida o que se apliquen cargas excesivas a los componentes de la turbina eólica.

La Fig. 5 es un diagrama de flujo que ilustra un método de acuerdo con una realización de la invención. En la etapa 5 se miden un cierto número de valores de parámetros. Los valores de parámetros pueden, por ejemplo, incluir la relación de velocidad de punta, potencia de salida, ángulo de paso, error de orientación, velocidad del viento, velocidad de rotación del generador, temperatura y altura de la localización de la turbina eólica. Los valores de parámetros pueden medirse directamente. Como alternativa, uno o más valores de parámetros pueden estimarse o calcularse a partir de los valores medidos. Por ejemplo, pueden estimarse las cargas o turbulencia basándose en los parámetros medidos, y las cargas estimadas o turbulencia pueden usarse cuando se ajusta el ángulo de paso. Por ello, los parámetros medidos y/o estimados pueden usarse para el cálculo y/o estimación de magnitudes que se requieren para el ajuste del ángulo de paso, por ejemplo, C_P , cargas, turbulencia, etc.

Basándose en la relación de velocidad de punta medida, puede seleccionarse un ángulo de paso de referencia en la etapa 6. El ángulo de paso de referencia se selecciona por medio de una curva de paso de referencia que incluye una zona de tolerancia o margen de seguridad tal como se ha descrito anteriormente con referencia a la Fig. 3.

Algunos o todos de los valores de parámetros medidos se suministran a un estimador del C_P , y en la etapa 7 se calcula un valor estimado, $C_{P\ Est}$, del coeficiente del potencia del rotor, C_P , actual real, de la turbina eólica basándose en los valores de parámetros medidos, y posiblemente basándose en uno o más valores estimados. Simultáneamente, se obtiene un valor de referencia C_P basándose en la relación de velocidad de punta medida y por medio de una curva de referencia de C_P máximo. El valor C_P de referencia, $C_{P\ ref}$, y el valor C_P estimado, $C_{P\ est}$, se comparan en la etapa 8, obteniendo de ese modo una señal de error, $C_{P\ error}$.

En la etapa 9, se investiga si $C_{P\ error}$ es más pequeña que un valor de umbral. Si este no es el caso, es decir si la señal de error, $C_{P\ error}$, es mayor y positiva, se calcula una compensación del C_P , y el ángulo de paso se disminuye en la etapa 10. Así, en este caso se selecciona un ángulo de paso que es más pequeño que el ángulo de paso especificado por la curva de paso de referencia. Se calcula cuidadosamente exactamente cuánto del ángulo de paso ha de ajustarse, dependiendo del tamaño de la señal de error, $C_{P\ error}$. Adicionalmente, se debería tomar nota de que pueden tenerse en cuenta otras consideraciones cuando se ajusta el ángulo de paso. Por ejemplo, las cargas, entrada en pérdida de pala, salidas de otros controladores, etc. medidos, estimados o calculados, pueden incorporarse cuando se calcula el ajuste del paso.

En el caso de que la investigación de la etapa 9 revele que $C_{P\ error}$ es más pequeño que el valor de umbral, entonces el proceso se avanza a la etapa 11, en el que se investiga si $C_{P\ error}$ es más pequeña que cero. Si no es este el caso, es decir en el caso de que la señal de error, $C_{P\ error}$ sea igual a o próxima cero, el ángulo de paso de referencia se mantiene tal como se muestra en la etapa 12.

En el caso de que la investigación de la etapa 11 revele que $C_{P\ error}$ es negativo, entonces el ángulo de paso se incrementa en la etapa 13. De ese modo, en este caso, se selecciona un ángulo de paso mayor que el especificado por la curva de paso de referencia, dado que esta es una indicación de que las condiciones de viento reales son más severas que lo esperado.

El método puede comprender adicionalmente el cálculo de un valor estimado de la fatiga sobre las palas en las condiciones de operación dadas. Basándose en la fatiga estimada de las palas, puede calcularse un límite inferior para el ángulo de paso, representando el límite inferior un ángulo de paso por debajo del que debe esperarse que se apliquen cargas excesivas a las palas. De acuerdo con una realización, el ajuste del ángulo de paso descrito anteriormente, basado en la señal de error, $C_{P\ error}$, no se permite que disminuya el ángulo de paso por debajo del límite inferior calculado.

Adicionalmente, los ángulos de paso de las palas pueden controlarse en una manera individual y/o cíclica para reducir las cargas sobre las palas, cojinetes, tren de accionamiento, torre, etc., por ejemplo debido a cizalladura del viento, ráfagas o turbulencia. Esto se obtiene normalmente mediante la aplicación de una corrección al ángulo de paso de cada pala, variando la corrección cíclicamente dependiendo de la posición angular de la pala. La corrección puede calcularse basándose en los valores de parámetros medidos que representan las condiciones del viento reales en el emplazamiento de la turbina eólica. La amplitud de las correlaciones variables cíclicamente es una medida de la cizalladura del viento actual. La zona de tolerancia o margen de seguridad aplicado a la curva de paso óptima puede, entre otras cosas, establecerse basándose en la máxima amplitud esperada de las variaciones cíclicas.

La amplitud real de las variaciones cíclicas puede medirse, y esta amplitud medida puede compararse con la máxima amplitud esperada. En el caso de que la comparación revele que la amplitud real es mucho más pequeña que la máxima amplitud esperada, entonces la zona de tolerancia o margen de seguridad puede reducirse en consecuencia, permitiendo de ese modo un ángulo de paso más pequeño y una estrategia de control más agresiva.

REIVINDICACIONES

1. Un método de operación de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor que tiene un conjunto de palas de turbina eólica, estando dicho rotor montado sobre una torre, comprendiendo el método las etapas de:
- proporcionar una curva que define un ángulo de paso óptimo en función de la relación de velocidad de punta para las palas de la turbina eólica o en función de la velocidad del viento, siendo el ángulo de paso óptimo el ángulo de paso que, en las condiciones de viento dadas, proporciona la salida de potencia o coeficiente de potencia, C_{P} , más alto posible para la turbina eólica,
 - modificar solamente una parte de dicha curva de ángulo de paso óptimo mediante la aplicación de una tolerancia de seguridad, obteniendo de ese modo una curva de ángulo de paso de seguridad modificada, aplicándose la tolerancia de seguridad para impedir la entrada en pérdida de palas, y/o que uno o más componentes de la turbina eólica se sobrecarguen,
 - operar la turbina eólica de acuerdo con la curva de ángulo de paso de seguridad modificada,
 - medir uno o más parámetros que proporcionan información en relación a las condiciones del viento y/o cargas sobre uno o más componentes de la turbina eólica, durante la operación de la turbina eólica,
 - ajustar la tolerancia de seguridad, basándose en dichas mediciones, obteniendo de ese modo una curva de ángulo de paso ajustada, y
 - operar la turbina eólica de acuerdo con la curva de ángulo de paso ajustada.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad comprende:
- calcular un coeficiente de potencia estimado, $C_{P, Est}$,
 - comparar el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, Est}$, con un coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, Ref}$, y
 - ajustar la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación.
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación se realiza de una manera que se espera disminuir la diferencia entre el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, Est}$, y el coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, Ref}$.
4. Un método de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, en el que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad basándose en la etapa de comparación comprende la reducción de la tolerancia de seguridad en caso de que el coeficiente de potencia estimado, $C_{P, Est}$, sea más pequeño que el coeficiente de potencia de referencia, $C_{P, Ref}$.
5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la etapa de medición de uno o más parámetros comprende la medición de una amplitud de un control de paso individual y/o cíclico de las palas de la turbina eólica, y en el que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad se realiza basándose en dicha amplitud medida.
6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad comprende las etapas de comparar la amplitud medida con una amplitud máxima permitida y reducir la tolerancia de seguridad en el caso de que la amplitud medida sea más pequeña que la amplitud máxima permitida.
7. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la etapa de ajuste de la tolerancia de seguridad comprende:
- estimar una carga sobre uno o más componentes de la turbina eólica basándose en uno o más de los parámetros medidos, y
 - mantener o incrementar la tolerancia de seguridad en el caso de que la carga estimada exceda un valor de umbral predefinido.
8. Un método de acuerdo con la reivindicación 7, en el que la etapa de estimación de una carga comprende la estimación de un nivel de fatiga de la pala.

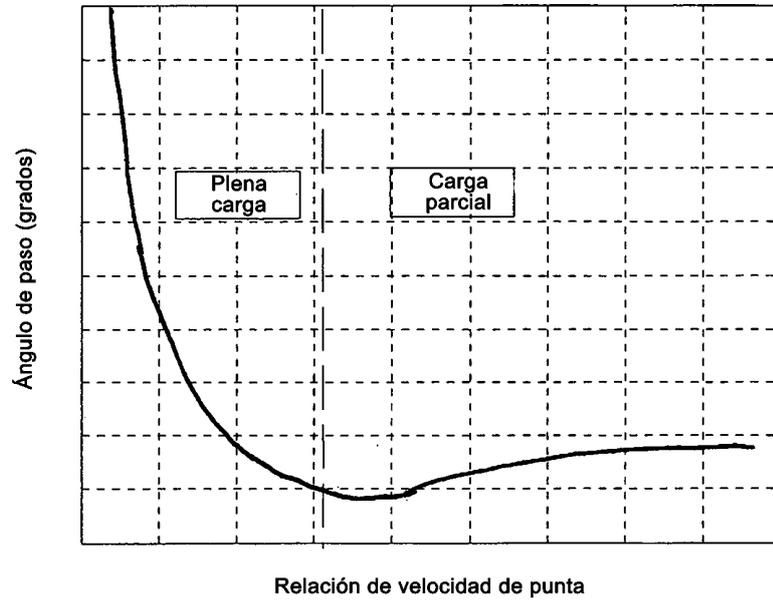


Fig. 1

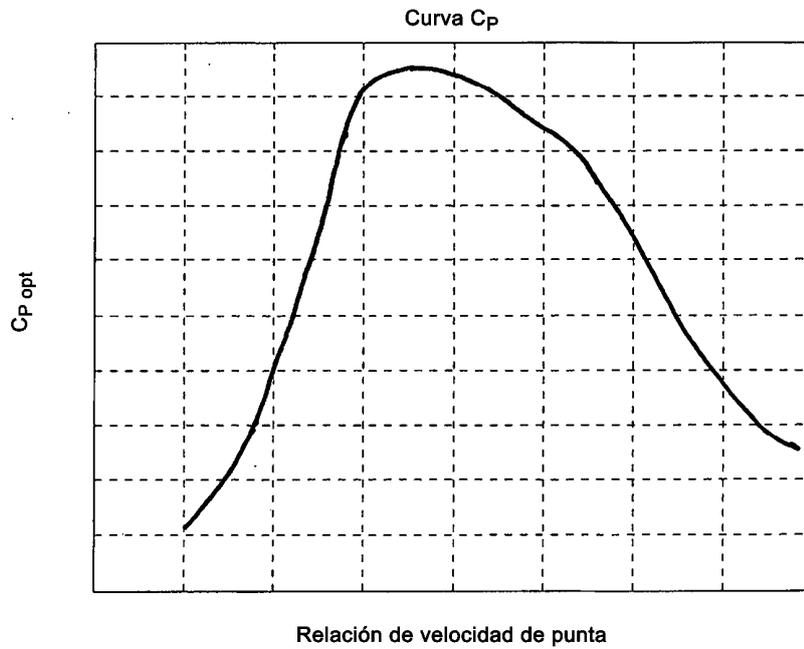


Fig. 2

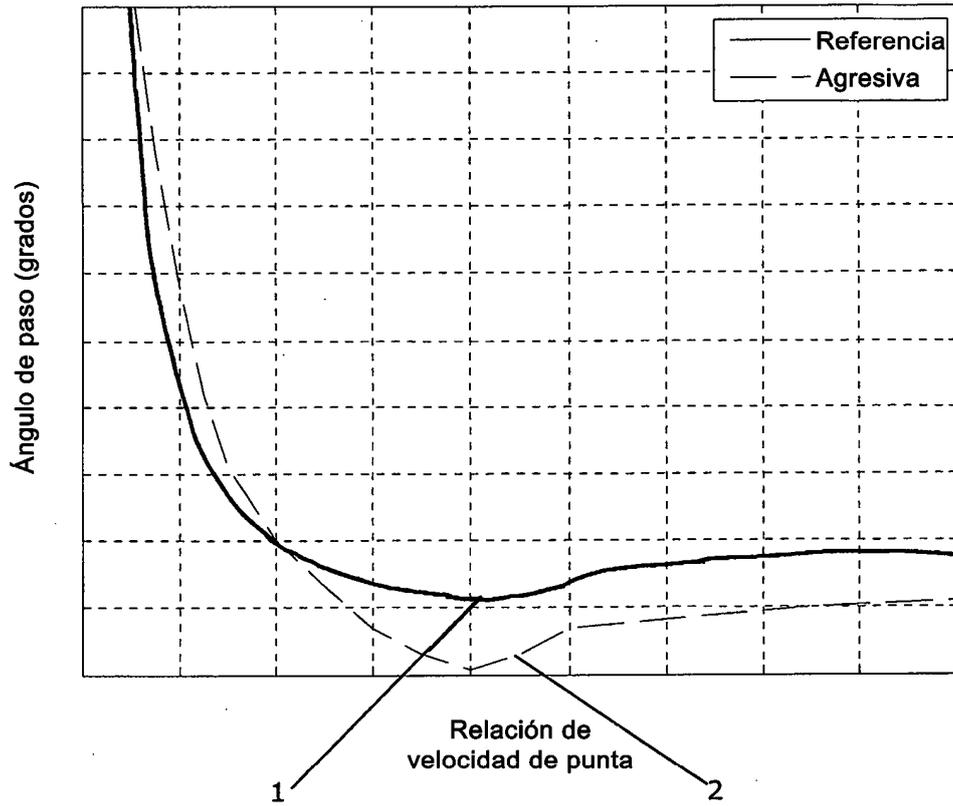


Fig. 3

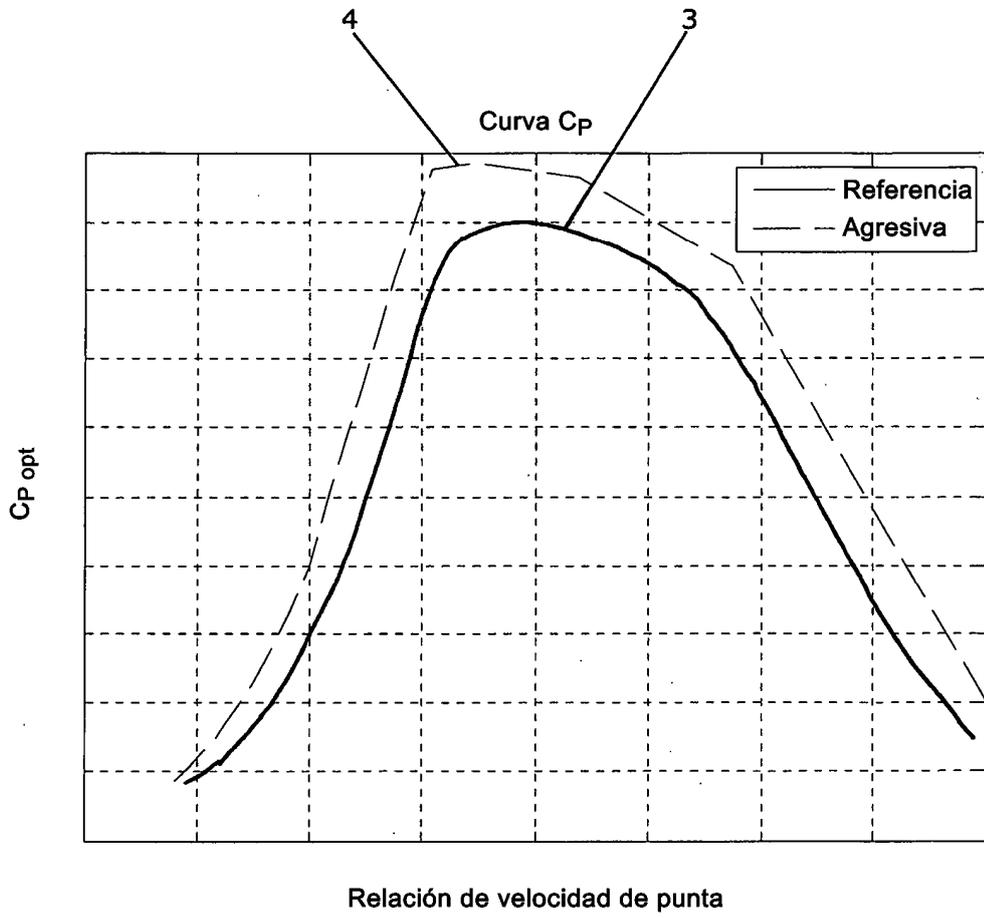


Fig. 4

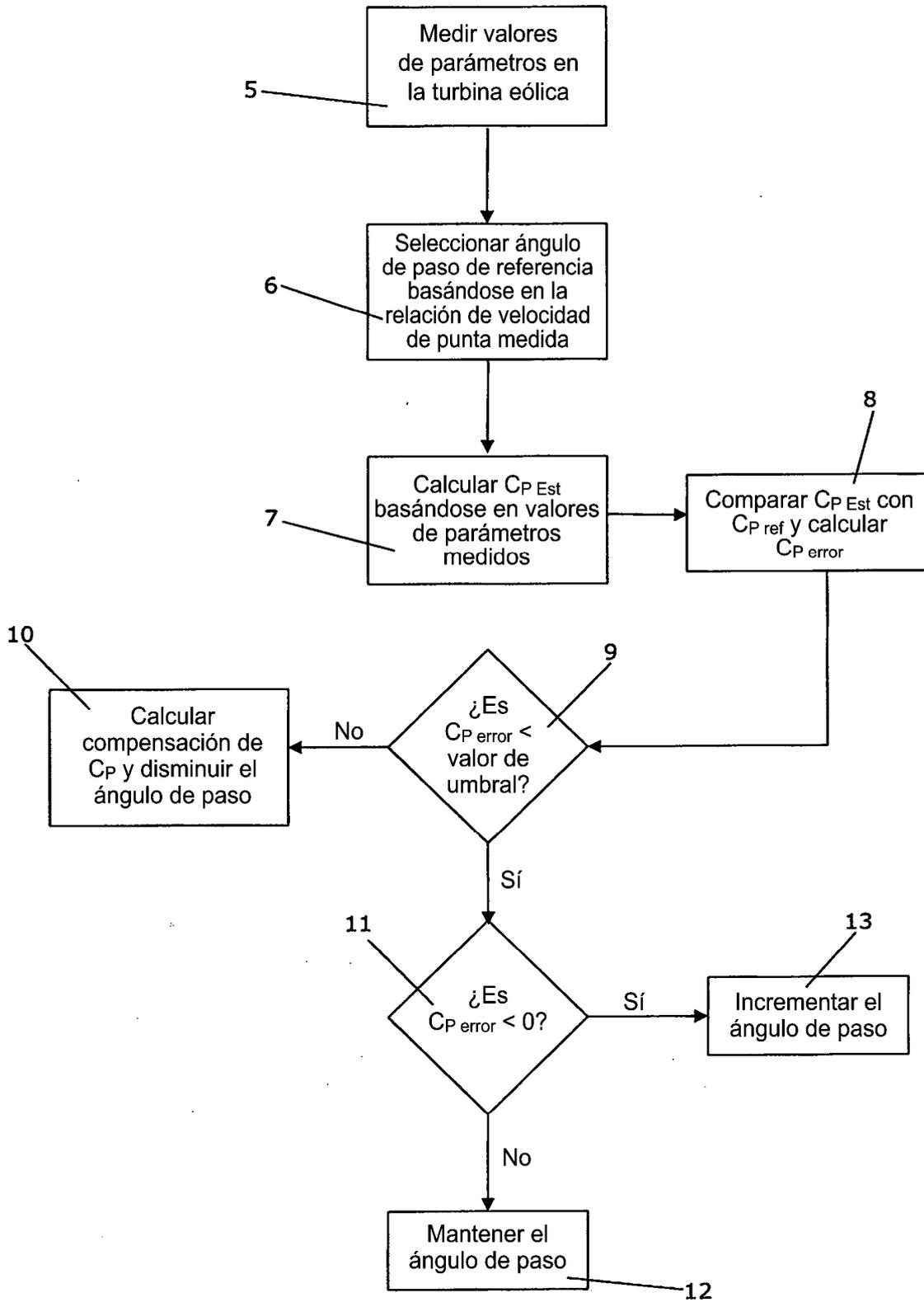


Fig. 5