

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 665 559**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.12.2014 E 14196336 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.01.2018 EP 2881581**

54 Título: **Sistema y método de control de aerogenerador**

30 Prioridad:

04.12.2013 ES 201331773

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

26.04.2018

73 Titular/es:

**ACCIONA WINDPOWER S.A. (100.0%)
Avenida Ciudad de la Innovacion, 5
31621 Sarriguren, Navarra, ES**

72 Inventor/es:

**RUIZ ALDAMA, ALFONSO;
OTAMENDI CLARAMUNT, DIEGO;
ARLABÁN GABEIRAS, TERESA;
FERNÁNDEZ GARCÍA DE ITURROSPE, ANA;
GONZÁLEZ MURUA, ALEJANDRO;
GARCÍA SAYÉS, JOSÉ MIGUEL y
NÚÑEZ POLO, MIGUEL**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 665 559 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

Sistema y método de control de aerogenerador

5 **OBJETO DE LA INVENCION**

La presente invención se enmarca en el campo de la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica.

10 El objeto de la invención consiste en un método de control de aerogeneradores que comprende manipular el mismo en función de un ángulo de paso de pala que proporciona la máxima captura de energía, previo cálculo del mismo en distintas condiciones.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15 Hoy en día es habitual el empleo de energías renovables para la generación eléctrica, siendo de entre ellas la energía eólica una de las más eficientes. La energía eólica permite generar electricidad a partir del viento mediante aerogeneradores. Dichos aerogeneradores constan básicamente de una torre, una góndola que alberga el generador eléctrico, un rotor formado a su vez por al menos dos palas, y un tren de potencia que transmite potencia del rotor hacia el generador eléctrico. El tren de potencia puede comprender una multiplicadora con un eje de baja velocidad conectado al rotor y un eje de alta velocidad conectado al generador eléctrico.

20 En aerogeneradores multimegawatio, existe una tendencia hacia rotores mayores, que proporcionan energía a un coste menor. En dichas configuraciones existe una importancia creciente del sistema de control. Dicho sistema permite maximizar la producción de energía a la par que limita las cargas mecánicas producidas por el viento. Para ello, el sistema de control actúa sobre el ángulo de paso de pala –ángulo de paso de pala- y sobre el par demandado al generador.

25 Por una parte, el ángulo de paso de pala se controla mediante actuadores dispuestos en la raíz de cada pala, que hacen girar la pala en torno a su eje longitudinal. Dicha actuación consigue variar el comportamiento aerodinámico de la pala. Por otra parte, el sistema de control regula el par demandado al generador desde el convertidor.

El control de par en función de la velocidad del generador eléctrico Ω incluye diferentes zonas de control:

- una primera zona de control (a velocidades de viento bajas) en que el par se regula para mantener la velocidad de giro constante;
- 35 • conforme la velocidad de viento aumenta, se entra en una zona de control en que la demanda de par eléctrico T se realiza de modo que se mantiene el ratio entre la velocidad de punta de pala y la velocidad de viento en la altura de buje (conocido por su término en inglés *Tip Speed Ratio* (TSR)) en un valor óptimo que maximiza la captura de potencia aerodinámica del viento;
- 40 • una vez se alcanza la velocidad de giro máxima, el par se regula para mantener la velocidad de giro constante en dicho valor máximo hasta alcanzar la potencia nominal del aerogenerador. Esto sucede a una velocidad de viento a la que se denominará en adelante velocidad de viento nominal.

El control de paso de pala incluye también diferentes zonas de control:

- 45 • Una zona de control por debajo de la velocidad de viento nominal, i.e. por debajo de potencia nominal, en la que se aplica una consigna de paso de pala que sirve para maximizar la captura de energía del viento para cada velocidad de viento incidente. Habitualmente, como señal de viento incidente se emplea una velocidad de viento media calculada a partir de medidas realizadas a la altura del buje por un anemómetro situado ahí. En función del valor que toma dicha velocidad de viento media, en esta zona de control se calcula y aplica una única consigna de ángulo de paso de pala para las tres palas.
- 50 • Una zona de control por encima de la velocidad de viento nominal en que se regula el ángulo de pitch con objeto de mantener la potencia constante (habitualmente en un valor igual a la potencia nominal).

El ángulo de paso de pala para cada velocidad de viento incidente se aplica a las tres palas conjuntamente.

55 Sin embargo, en la zona de control por debajo de la velocidad de viento nominal, el hecho de que el ángulo de paso de pala se calcule en función de la velocidad de viento media (o una señal indicativa de la misma como la potencia y/o el ángulo de paso de pala) hace que no se tengan en cuenta efectos como la cortadura del viento (*cortadura*), inclinación de flujo (*upflow*) o desalineamiento de la *nacelle* con respecto a la dirección del viento; efectos que son en gran medida independientes de la velocidad de viento media. Esto propicia que el ángulo de paso de pala calculado en función de la velocidad de viento media no sea siempre el óptimo desde el punto de vista de la producción.

65 Con el fin de incrementar la producción en regímenes de viento por debajo de la velocidad de viento nominal, el documento EP2556249 describe un método de control consistente en controlar la actuación de las palas (ángulo de paso de pala o elementos de control alternativos) para maximizar de manera independiente el par motriz de cada

pala por debajo de la velocidad de viento nominal. El controlador calcula de manera independiente las consignas de paso de pala para cada una de las palas de manera que se maximice el par motriz de cada una de ellas cuando se determina que la velocidad del viento o la fuerza que actúa sobre las palas está por debajo de la velocidad de viento nominal con el fin de incrementar la producción en dicho régimen de viento. Para implementar dicho método de control es necesario conocer el par motriz de cada pala, para lo cual son necesarios sensores de cargas individuales por pala, cuya fiabilidad y precisión es crítica para conseguir maximizar dicha producción, pudiendo llegar incluso al daño de las palas si proveen una mala medida. Además, si dichos sensores se dañan, habría que esperar hasta la reparación para continuar llevando a cabo el método de control descrito.

Adicionalmente, se conoce a partir del documento EP1666723 un dispositivo de control de ángulo de paso de pala. Este dispositivo incluye: una unidad de memoria en la cual se almacenan, en asociación unos con otros, parámetros predeterminados que afectan a la fluctuación de carga de las palas, ángulos de azimut, y valores comando de ángulo de paso; una unidad de detección de ángulo de azimut, que detecta el ángulo de azimut de cada una de las palas; una unidad detectora de parámetros, que detecta los parámetros predeterminados; una unidad receptora de valores comando que recibe valores comando de ángulo de paso para cada pala desde la unidad de memoria, siendo los valores comando de ángulo de paso seleccionados en base al ángulo de azimut de cada pala detectado por la unidad detectora de ángulo de azimut y los parámetros predeterminados detectados por la unidad detectora de parámetros; y una unidad generadora de valores comando de control de ángulo de paso que genera valores comando de control de ángulo de paso para controlar individualmente el ángulo de paso de cada pala en base a los valores comando de ángulo de paso y de un valor comando de ángulo de paso común.

Además, es conocido del documento DE29715249U1 otro dispositivo para ajustar un ángulo de pala de rotor.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

El objeto de la invención es un método y un sistema de control para un aerogenerador que permite maximizar la producción y reducir las cargas de una manera robusta y sencilla con respecto a las propuestas del estado de la técnica anteriormente citadas. Para ello, el sistema y método de control de aerogenerador aquí descritos permiten modificar el ángulo de paso de pala de cada pala según una consigna calculada teniendo exclusivamente en cuenta para ello información de la posición de cada pala y de la distribución de viento.

En concreto, es un objeto de la invención un método de control de un aerogenerador de acuerdo con la reivindicación 1.

El efecto sobre cada pala de fenómenos que afectan a la distribución de viento en el área barrida por el rotor (como la cortadura del viento, el upflow o el desalineamiento) depende en gran medida de su posición acimutal (ángulo de giro con respecto al eje de rotor), i.e. las palas no experimentan las mismas condiciones de viento en todas ellas. Mediante el método de control descrito, el ángulo de paso de cada pala se calcula teniendo en cuenta la posición acimutal de cada pala de manera que permite maximizar producción y reducir cargas sin empleo de sensores de cargas de palas, una vez caracterizada la distribución de viento en el área barrida por el rotor.

Para la determinación de la posición acimutal de cada pala se emplea un sensor de posición acimutal de rotor, consistente en un detector de paso del rotor por un cero, i.e. origen de la referencia y relacionado con la posición de una de las palas y un contador de paso por posiciones intermedias que dan un ángulo incremental con respecto a dicho origen. Cada pala en un rotor de 3 palas está desfasada 120°, por lo que con la determinación de la posición acimutal del rotor, se determina la posición acimutal de una de las palas y en relación con esta última la posición acimutal de las otras dos palas.

El método de la invención comprende obtener al menos un valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor (este valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor comprende al menos un valor relacionado con al menos una variable seleccionada de entre el grupo consistente en: cortadura, dirección de viento, inclinación de flujo del viento y velocidad de viento) y determinar para cada pala un valor de ángulo acimutal referido a la correspondiente posición acimutal del rotor, para posteriormente calcular para cada pala una consigna de ángulo de paso de pala variable según una función periódica que establece un ángulo de paso de pala en función de la posición acimutal de la pala, donde la función periódica tiene un periodo sustancialmente igual al de rotación del rotor y una fase dependiente de al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor, y con ello poder hacer llegar a los actuadores la consigna de ángulo paso de pala adecuada.

Cabe destacar que el objeto de la invención contempla distintas posibilidades relacionadas con el valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor; éste puede ser un valor dependiente de la dirección de viento y estar caracterizado en función de sectores de dirección de viento, de manera que sus valores se implementan en el controlador en forma de tabla en función de la dirección del viento o puede ser un valor característico del emplazamiento o un valor estimado a partir de valores históricos y en función de al menos uno de los siguientes:

dirección, velocidad e intensidad de turbulencia de viento, temperatura, época del año y hora del día.

En un aspecto de la invención, el método comprende calcular un ángulo de paso de pala que proporciona la máxima captura de energía por debajo de un determinado valor umbral de producción en función del valor de, entre otros, cortadura del viento, upflow o desalineamiento de la góndola y de la posición de cada pala. De esta manera el método contempla que cuando se tiene que el aerogenerador opera por debajo de dicho valor umbral de producción es decir la señal indicativa del nivel de producción es menor que dicho umbral, se procede a determinar, a partir del valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor, una posición acimutal de pala en la cual un valor de velocidad de viento es máximo; teniendo la función periódica un valor mínimo cuando la pala se encuentra en dicha posición acimutal.

Por otro lado, cuando se tiene que el aerogenerador opera por encima o en un valor de producción igual o mayor a dicho valor umbral de producción es decir la señal indicativa del nivel de producción es mayor o igual, la función periódica tiene un valor máximo cuando la pala se encuentra en la posición acimutal en la cual el valor de velocidad de viento es máximo.

De este modo se consigue aumentar la energía producida sin penalizar la vida a fatiga de la máquina, pues en una zona de producción de carga parcial se incorpora un movimiento cíclico de pitch en un sentido para aumentar la producción mientras que en la zona de producción nominal, el movimiento cíclico de pitch tiene un sentido opuesto y se reducen las cargas.

Dicho valor umbral de producción delimita la transición entre una zona de producción parcial y una zona de producción nominal, y puede estar definido por un valor umbral de producción (P_{NOM}) o un valor umbral de velocidad de viento (U_{rated}).

Sin embargo, es ventajoso incluir un segundo umbral por debajo de la zona de producción nominal que marque la zona por debajo de la cual se controla el ángulo de paso de pala para proporcionar la mayor captura de energía, mientras que sea a partir de potencia nominal que se controle el ángulo de paso de pala para reducir cargas.

Para ubicar el valor adecuado de la función periódica (máximo o mínimo dependiendo de la zona de producción en la que esté operando el aerogenerador) en la posición acimutal en la cual el viento es máximo, se determina la fase de la citada función periódica. La fase por tanto es dependiente de la zona de producción en la que se encuentre operando el aerogenerador y puede adoptar uno entre los siguientes:

- un valor predeterminado, que es tal que la función periódica alcanza su valor mínimo cuando la pala está en una posición sustancialmente vertical con su punta hacia arriba si el aerogenerador está operando en una zona de producción parcial y tal que la función periódica alcanza su valor máximo cuando la pala está en una posición sustancialmente vertical con su punta hacia arriba;
- un valor dependiente del valor indicativo de la distribución de la velocidad de viento en el área barrida por el rotor (cortadura o windshear),
- un valor dependiente del valor indicativo de la desorientación de la nacelle con respecto a la dirección de viento, y
- un valor dependiente del valor indicativo de la inclinación de flujo de viento (upflow).

La magnitud de los fenómenos que definen la distribución de viento en el área barrida por el rotor se puede medir, calcular o estimar en base a medidas de calibración del emplazamiento. Incluso, en un aspecto de la invención, se contempla que la magnitud de dichos fenómenos esté caracterizada y sea predeterminada en función del sector de dirección de viento.

El valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor se puede obtener de distintas maneras. Así, el método aquí descrito contempla su obtención a partir de la medida de al menos un sensor, preferiblemente anemómetros dispuestos a distintas alturas, que pueden estar dispuestos en el aerogenerador o en un mástil meteorológico en una ubicación cercana al aerogenerador, dicho valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor puede comprender un valor relacionado con la cortadura del viento o el upflow.

Así por ejemplo, la cortadura del viento o perfil de cortadura puede medirse mediante dos o más anemómetros dispuestos a distintas alturas en la torre, además del anemómetro de la nacelle que suele montarse en los aerogeneradores, a una altura en la que sus medidas no se ven afectadas por el rotor. Asimismo, el valor del upflow puede medirse mediante veletas que midan también la componente vertical de la velocidad del viento o mediante varios anemómetros montados en el buje del rotor.

Otra alternativa para evaluar la magnitud de efectos como cortadura del viento, upflow o desalineamiento es mediante sensores colocados en la raíz de las palas, los cuales proporcionan señales indicativas de las cargas inducidas por el viento en las palas. En base al análisis de estas señales a lo largo de las diversas posiciones acimutales de las palas, puede obtenerse una estimación de la magnitud de los efectos a analizar.

Alternativamente, y para evitar montar más sensores en el aerogenerador, se puede medir la magnitud de estos fenómenos en un punto del parque (mástil meteorológico) y extrapolar estos valores a la posición de cada aerogenerador del parque mediante una función que relacione los valores de las medidas del mástil con los valores en cada máquina.

5 Otra posibilidad es la de emplear valores estimados de dichos fenómenos, obtenidos por ejemplo, en el paso previo a la construcción del parque, en el que se caracteriza el emplazamiento determinando los valores característicos de la distribución de viento en el área barrida por el rotor. Entre otros, los parámetros considerados son: velocidad y dirección de viento, intensidad de turbulencia, temperatura y densidad, cortadura del viento, upflow, etc. En base a estas mediciones, se pueden estimar los valores medios de cortadura del viento y upflow previamente a la instalación del aerogenerador, incorporando dichos valores característicos en el controlador. La estimación se puede afinar teniendo en cuenta la dependencia de estos efectos de otros parámetros como dirección de viento, velocidad de viento, intensidad de turbulencia, temperatura, época del año y hora del día, etc.

15 En el caso de que no se dispongan de medias representativas del campo de viento durante el funcionamiento de la máquina, pueden emplearse las estimaciones así calculadas para, en base a ellas, calcular la fase y la amplitud de la función periódica que permite el cálculo de las consignas de los ángulos de paso de pala que maximicen la producción de energía y/ o minimicen las cargas, según cuál sea el nivel de producción del aerogenerador.

20 La desorientación de la nacelle con respecto a la dirección del viento puede medirse con la veleta que se monta habitualmente en la nacelle.

25 La consigna de ángulo de paso de pala calculada según el método descrito permite aumentar la producción en la zona de producción parcia (i.e. por debajo de la velocidad de U_{rated}) incluso sin empleo de un sensor de cargas de pala, al ser dependiente de una función periódica de frecuencia 1P (i.e. periodo igual al de giro del rotor), una amplitud calculada en función de la distribución de velocidad de viento en el área barrida por el rotor, y una fase dependiente de la distribución de velocidad de viento en el área barrida por el rotor y tal que el mínimo de la función periódica se encuentra en la posición acimutal en la que la pala experimenta más viento o la posición acimutal en la cual el valor de velocidad de viento es máximo. El cálculo de la consigna de paso de pala no requiere ser independiente para cada pala, ya que, si bien la consigna es diferente en cada instante para cada pala, ésta se calcula con una función periódica dependiente de la posición acimutal pero que es común para todas las palas (los parámetros característicos de la función, i.e. amplitud y fase son iguales para todas ellas). Esto simplifica el cálculo y aplicación de las consignas de paso de pala.

35 Si bien la presente invención en su realización preferida va dirigida a la optimización de los ángulos de paso de pala de las palas de un aerogenerador para maximizar la energía eléctrica producida por debajo de potencia nominal en distintas condiciones de viento, cortadura del viento, upflow, etc., se puede emplear la misma estrategia para reducir las cargas por encima de potencia nominal, compensando de este modo el aumento de cargas producido por debajo de potencia nominal.

40 A partir de todo lo anterior, se propone asimismo en la presente invención un sistema para un aerogenerador para llevar a cabo el método de la invención; es decir:

- Determinar los valores de cortadura del viento, upflow y/o desalineamiento. Ya sea en base a medidas instantáneas o en base a estimaciones.

45 - Medir la Potencia eléctrica generada y/o la velocidad de viento para determinar si la potencia generada es o bien menor que un valor umbral de producción menor (aproximadamente un 80%) o bien mayor o igual que la potencia nominal P_{NOM} o la velocidad de viento mayor o menor/igual que un umbral de valor menor o menor/igual que U_{rated}.

50 - En base a lo anterior y a los valores de los parámetros que definen el campo de viento en el rotor (velocidad, cortadura del viento, upflow y desalineamiento) y a la configuración de la máquina (velocidad de giro,) calcular un ángulo de paso de pala óptimo que maximiza la captura de energía.

- Dicho ángulo de paso de pala óptimo comprende un término de paso de pala colectivo (común a todas las palas en todo su recorrido acimutal) en función de los parámetros que definen el campo de viento en el rotor, tal que se maximiza la captura de energía y un término de paso de pala individual que maximiza la captura de energía en cada posición acimutal.

55 - Enviar a los actuadores de paso de pala la consigna de ángulo de paso de pala correspondiente a cada posición acimutal.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

60 Figura 1.- Muestra un diagrama de bloques representativo de la implementación del método en la unidad de control del aerogenerador.

Figura 2.- Muestra una representación gráfica del efecto "windshear" o cortadura.

65

Figura 3.- Muestra una tabla donde se aprecia la relación entre la dirección de viento con el valor específico de cortadura y los correspondientes parámetros de la función periódica, fase y amplitud.

5 Figura 4- Muestra una representación de un aerogenerador visto en planta, donde se aprecian diferentes sectores de dirección de viento para los cuales se tiene caracterizado el valor característico de la cortadura.

10 Figura 5.- Muestra una gráfica donde se muestra una curva de potencia en la que se aprecian las dos zonas de acción del método en función de los umbrales.

Figura 6.- Muestra una gráfica donde se aprecia la relación entre la amplitud de la función periódica con la velocidad de viento para distintos valores de cortadura.

15 Figuras 7a y 7b.- La figura 7a muestra una función periódica que sigue el ángulo de paso de pala en función de la posición acimutal mientras que la figura 7b muestra la relación de cada pala marcando una referencia.

20 Figuras 8a y 8b.- Muestra unas gráficas de casos específicos del ángulo de paso de pala donde la figura 8a muestra una situación en que la potencia es menor que la potencia nominal mientras que la figura 8b muestra una situación en que la potencia es mayor o igual que la potencia nominal.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

25 Se describe a continuación un modo de realización preferente del método de control de un aerogenerador que comprende varias palas dotadas a su vez de respectivos actuadores configurados para variar un ángulo de paso de cada pala y una unidad de control, configurada para calcular para cada pala una consigna de paso de pala. El método propuesto comprende los siguientes pasos:

- obtener al menos un valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor,
- determinar una posición acimutal para cada pala,
- 30 • calcular para cada pala una consigna de ángulo de paso de pala $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ variable según una función periódica que establece un ángulo de paso de pala en función de la posición acimutal de la pala $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ donde la función periódica tiene un periodo sustancialmente igual al de rotación del rotor y una fase φ dependiente de al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor, y
- 35 • hacer llegar a los actuadores la consigna de ángulo paso de pala.

40 En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la implementación del método en la unidad de control del aerogenerador. Las consignas de ángulo de paso de pala enviadas a cada pala $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ se obtienen a partir de una función periódica dependiente de la posición acimutal de la pala $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, donde la función periódica calculada en el bloque de cálculo de consignas individuales de pala y tiene un periodo sustancialmente igual al de rotación del rotor y una fase φ dependiente de al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor.

45 En una posible realización preferida de la invención, previamente a la instalación del aerogenerador se procede a caracterizar el emplazamiento tomando diversas medidas representativas de las características del viento en esa posición para obtener una caracterización precisa de la distribución de velocidad de viento en el área barrida por el rotor. Entre estas características, se toman valores indicativos de perfil de cortadura (en adelante cortadura) y/o upflow. En una realización preferente se toma la cortadura α como único valor indicativo de la distribución de velocidad de viento.

50 El valor de cortadura α es la variación en estado estacionario de la velocidad media de viento con la altura y depende, entre otros factores, de la rugosidad del terreno tal y como se representa de manera esquemática en la figura 2. Existen diversos modelos que relacionan la velocidad de viento a una determinada altura $V(h)$, con la velocidad de viento a una altura de referencia (normalmente la altura del buje) $V(h_0)$. El modelo exponencial representado gráficamente en la figura 2 caracteriza el perfil de cortadura en función del exponente de cortadura α .

$$V(h) = V(h_0) \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

Así, en una realización preferente, como valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor se toma el exponente de la función de cortadura α . Como este valor puede depender de la dirección y/o de la velocidad del viento (pues la rugosidad del terreno puede variar dependiendo de la dirección del viento por ser dependiente de

aspectos geográficos), en una realización se obtienen distintos valores de α asociados a distintos sectores angulares de dirección de viento y/o velocidades de viento para caracterizar la cortadura en función de la dirección. De esta forma, el paso de obtener al menos un valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor, comprende medir la dirección del viento y/o velocidad de viento y hallar para dichos valores el valor correspondiente del exponente de la función de cortadura. La relación entre los valores de dirección del viento y/o velocidad de viento y la función de cortadura se implementa en el controlador del aerogenerador en forma de tabla en una realización preferente (tal y como se aprecia en las figuras 3 y 4).

En una posible realización preferida más sencilla, se asume un valor del exponente α como constante independientemente de la dirección del viento. Dicho valor oscila dentro del rango de valores típicos que está entre 0.1 para emplazamientos poco rugosos y 0.5 para emplazamientos de más rugosidad.

Alternativamente, se disponen sensores que permiten obtener la distribución de velocidad de viento a partir de medidas de la velocidad de viento a distintas alturas. Por ejemplo, se pueden disponer anemómetros a distintas alturas que permitan obtener una estimación en tiempo real del valor de α .

A partir de ese valor de cortadura α , un sistema de control del aerogenerador calcula una consigna de ángulo de paso de pala variable según una función periódica que establece el ángulo de paso de pala en función de su posición acimutal θ donde un periodo de la función se calcula a partir de la velocidad de giro del rotor y una fase φ de la función se calcula a partir de la cortadura α ; a continuación el sistema envía a los actuadores la consigna de pitch.

La función que establece la consigna de ángulo de paso de cada pala será de la siguiente forma, teniendo una componente común para todas las consignas de pala (β_{med}) y una componente definida por la función periódica:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \beta_{med} + A \times \text{seno}(\theta_1 + \varphi) \\ \beta_2 &= \beta_{med} + A \times \text{seno}(\theta_2 + \varphi) = \beta_{med} + A \times \text{seno}(\theta_1 + 120 + \varphi) \\ \beta_3 &= \beta_{med} + A \times \text{seno}(\theta_3 + \varphi) = \beta_{med} + A \times \text{seno}(\theta_2 + 240 + \varphi)\end{aligned}$$

Donde:

β_1 es la consigna de ángulo de paso de pala para la pala 1

β_{med} es la componente del ángulo de paso de pala que es común a todas las palas e independiente de la posición acimutal de cada pala.

A es la amplitud de la función periódica

θ_1 es el ángulo de azimut de la pala 1

φ es la fase de la función periódica

De manera que la función periódica es única para todas las palas (en el sentido de que de los valores que la caracterizan: amplitud y fase son iguales) y difiere en cada instante para cada pala debido a que la posición de cada una de ellas está desfasada 120°.

La componente del ángulo de paso de pala que es común a todas ellas e independiente de la posición acimutal β_{med} es calculada por un regulador de velocidad de giro del aerogenerador, tal y como se indica en la figura 1 y corresponde al ángulo de pala requerido para mantener la velocidad de giro ω igual a la velocidad de giro de referencia ω_{ref} en estado estacionario.

En una realización, el al menos un valor predeterminado de la distribución de viento (i.e. el valor de cortadura α) en el área barrida por el rotor es diferente para diferentes sectores de dirección de viento. En este caso, en la etapa de calibración de emplazamiento se caracteriza el valor de cortadura de manera que en la unidad de control del aerogenerador se incorpora una tabla que relaciona el valor del exponente de cortadura α en función de la dirección, se calcula la dirección del viento a partir de la orientación de la máquina y de la señal de la veleta y para la dirección medida se obtiene el valor característico de α a partir de los datos de calibración del emplazamiento. En la figura 4 se puede observar una figura con diferentes sectores de viento en los que se tiene caracterizado el valor de la cortadura. Además, en la figura 3 se muestra una tabla en la que se indica el valor de cortadura α para diferentes sectores de viento, además de la amplitud de la función de dicho valor de cortadura.

En dicha figura se ven 4 sectores de orientación de la máquina para los que la cortadura está caracterizada y varía.

Según dicha realización, se obtiene la dirección de viento a partir de las medidas de los sensores correspondientes, se compara la dirección de viento con los sectores de orientación, y se toma el valor de cortadura del sector de orientación dentro del cual está incluida la dirección de viento. En zonas intermedias entre dichos sectores se emplean valores interpolados entre los valores de cortadura correspondientes. A partir de dicha cortadura α se obtiene la fase φ y la amplitud de la función A de la función periódica.

Así, el método de control del aerogenerador comprende llevar a cabo las siguientes tareas:

- Obtener un valor característico de α tal y como se ha indicado anteriormente;
- Comparar el valor de una señal indicativa del nivel de producción con un valor umbral de producción. Se pueden emplear como señales indicativas del nivel de producción la velocidad de viento V_v o la potencia generada P , de manera que los valores umbrales de producción respectivos son un valor umbral de velocidad de viento U_{rated} y un valor umbral de producción igual al valor de potencia nominal P_{NOM} . Los valores umbrales de producción se pueden ver en la figura 5.
- Establecer un valor para la fase de la función periódica en función del resultado de la comparación entre el valor de la señal indicativa del nivel de producción con el valor umbral de producción.
- Establecer un valor de la amplitud A dependiente del valor característico de α .

En la tabla mostrada en la figura 4 se especifica además la fase φ correspondiente de la función periódica cuando el upflow es 0° para una cortadura vertical mayor que 0, dependiendo de la comparación del valor indicativo del nivel de producción (en este caso la potencia generada P) con el valor umbral de producción (en este caso el valor correspondiente a la potencia nominal P_{NOM}). Se puede ver como dicha fase φ , cuando la potencia está por debajo de la potencia nominal (i.e. zonas de producción parcial, la fase φ es 270° lo que equivale a decir que el valor mínimo del ángulo de paso de pala en una vuelta (con el ángulo medio constante en dicha vuelta) se produce cuando la pala está en vertical y hacia arriba. Esto permite lograr una mayor producción a cargas parciales sin necesidad de otros sensores que los habitualmente empleados. Sin embargo, en niveles de producción nominal (i.e. $P \geq P_{NOM}$) la fase es 90° , lo que equivale a decir que el valor máximo del ángulo de paso de pala en una vuelta (con el ángulo medio constante en dicha vuelta) se produce cuando la pala está en vertical y hacia arriba.

La amplitud de la función periódica se calcula en base al valor del exponente de cortadura α . Este valor también puede ser dependiente de la velocidad de viento incidente tal y como se puede ver en la figura 6. En dicha figura se representa la amplitud de la función periódica A en función de la velocidad del viento para diferentes valores de cortadura. Se ve asimismo, como dicha amplitud sigue una función monótona decreciente en la zona de producción parcial (por debajo de U_{rated}). De igual manera, a mayor valor de cortadura α aumenta el valor de la amplitud A para un mismo valor de velocidad de viento.

En una realización preferente, se toma exclusivamente el valor de cortadura como valor indicativo de la distribución de velocidad de viento, pues es un parámetro fácilmente caracterizable en el estudio de emplazamiento y de evolución temporal lenta.

Siendo así, la velocidad de viento máxima incidente sobre una pala se produce cuando ésta está en vertical y hacia arriba (figura 8). En este caso, la fase de la función periódica cuando la potencia está por debajo de la potencia nominal es tal que la función periódica alcanza su valor mínimo cuando la pala está en una posición sustancialmente vertical con su punta hacia arriba tal y como se muestra en la figura 8a. Sin embargo, cuando la potencia está por encima de la potencia nominal, la función periódica alcanza su valor máximo cuando la pala está en una posición sustancialmente vertical con su punta hacia arriba tal y como se muestra en la figura 8b, coincidente igualmente con la posición en la que la pala está en vertical hacia arriba.

Asimismo, el valor medio de la función se calcula en función de la velocidad de viento incidente (o de la potencia generada). Este valor también puede ser dependiente de la cortadura α .

El sistema de control aquí planteado permite aumentar la energía capturada por debajo de velocidad de viento nominal con respecto a los sistemas de control del estado de la técnica basados pitch colectivo.

Esta estrategia de control también lleva asociado un aumento de las cargas de fatiga que sufre el aerogenerador.

Para compensar este aumento de cargas por debajo de velocidad de viento nominal, cuando la velocidad de viento está por encima de la nominal y hay más energía disponible de la que puede generar la máquina, el sistema de

control desfasa 180° la función periódica, de modo que su valor máximo coincide con la posición en que la pala experimenta más viento. De este modo, se consigue reducir las cargas de fatiga por encima de P_{NOM} . En este caso, las tareas que ejecuta el método de control son:

- 5 • Evalúa si la velocidad de viento es mayor que un valor de umbral de velocidad de viento U_{rated} , o si la potencia eléctrica generada P es mayor que un valor de potencia nominal P_{NOM} .
- Obtiene el valor característico de α .
- A partir de ese valor de cortadura α , el sistema de control calcula una consigna de ángulo de paso de pala variable según una función periódica que establece el ángulo de paso de pala en función de su posición acimutal donde:
- 10 • El periodo se calcula a partir de la velocidad de giro del rotor;
- La fase φ se calcula a partir de la cortadura α , y es tal que la función alcanza su valor máximo en la posición acimutal en que la pala experimenta una mayor velocidad de viento,
- Y envía a los actuadores la consigna de pitch.

15 De manera similar a cuando se está por debajo de U_{rated} , en este caso (por encima de U_{rated}): La amplitud de la función periódica se calcula en base al valor del exponente de cortadura α . Este valor también puede ser dependiente de la velocidad de viento incidente.

20 En el caso de cortadura vertical, la fase depende del signo de α que da el sentido de la cortadura. De manera que, con α positivo, la fase de la función periódica es tal que alcanza su valor máximo cuando el ángulo de azimut es $\theta=0$, es decir, cuando la pala está en posición vertical y con su punta hacia arriba como en las figuras 3a y 3b. En este caso el valor de la fase es $\varphi = 270^\circ$.

El valor medio de la función se calcula en función de la velocidad de viento incidente (o de la potencia generada). Este valor también puede ser dependiente del valor de cortadura α .

25 Tal y como se desprende de observar las figuras 7a y 7b, en el caso en el que se determina que hay una cortadura positiva y la potencia está por debajo de la potencia nominal P_{NOM} el valor de fase es 270° por lo que el mínimo de la función periódica se da para θ igual a 0° , es decir, la pala en vertical según la figura 6b.

30 En el caso de la figura 7b donde se observa la consigna de pala en una vuelta para el caso en el que la potencia es mayor que la potencia nominal, con lo que la fase es 90° y por tanto el valor máximo de paso de pala es cuando la pala se encuentra en una posición vertical con su punta apuntando hacia arriba, es decir en una posición acimutal θ igual a 0° .

REIVINDICACIONES

1. Método de control de un aerogenerador que comprende:
- un rotor con una pluralidad de palas, las cuales comprenden a su vez respectivos actuadores configurados para variar un ángulo de paso de cada pala,
 - y una unidad de control,
- comprendiendo el método:
- obtener al menos un valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor y,
 - determinar, a partir del al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor, una posición acimutal en la cual un valor de velocidad de viento es máximo;
 - determinar una posición acimutal para cada pala,
 - calcular para cada pala una consigna de ángulo de paso de pala variable según una función periódica que establece un ángulo de paso de pala en función de la posición acimutal de la pala, donde la función periódica tiene un periodo sustancialmente igual al de rotación del rotor y una fase dependiente de al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor, y
 - hacer llegar a los actuadores la consigna de ángulo paso de pala,
- estando el método caracterizado por que, entre determinar la posición azimutal y calcular para cada pala una consigna de ángulo de paso de pala variable, el método comprende además:
- comparar una señal indicativa del nivel de producción con un valor umbral de producción, donde cuando la señal indicativa del nivel de producción es menor que el valor umbral de producción la fase de la función periódica es tal que la función tiene un valor mínimo en la posición acimutal en la cual el valor de velocidad de viento es máximo.
2. Método de control de un aerogenerador según reivindicación 1, caracterizado por que el al menos un valor indicativo de la distribución de viento en un área barrida por el rotor comprende al menos un valor relacionado con al menos una variable de entre el grupo consistente en: cortadura, dirección de viento, inclinación de flujo del viento y velocidad de viento.
3. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 2, caracterizado por que comprende comparar una señal indicativa del nivel de producción con un valor umbral de producción y donde cuando la señal indicativa del nivel de producción es mayor o igual que el valor umbral de producción la fase de la función periódica es tal que la función tiene un valor máximo en la posición acimutal en la cual el valor de velocidad de viento es máximo.
4. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 2 o 3, caracterizado porque la señal indicativa del nivel de producción es la potencia eléctrica generada P y el valor umbral de producción es un valor umbral de producción igual o menor a la potencia nominal P_{NOM} .
5. Método de control de un aerogenerador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque la fase de la función periódica tiene un valor predeterminado.
6. Método de control de un aerogenerador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque la fase de la función periódica se calcula en función del al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor.
7. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 6, caracterizado porque el valor predeterminado de la fase de la función periódica es tal que la función periódica alcanza su valor mínimo cuando la pala está en una posición sustancialmente vertical con su punta hacia arriba.
8. Método de control de un aerogenerador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque el al menos un valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor es un valor predeterminado.
9. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 8, caracterizado porque el al menos un valor de la distribución de viento en el área barrida por el rotor es diferente para diferentes sectores de dirección de viento.
10. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 8 o 9, caracterizado porque al menos un valor de la distribución de viento en el área barrida por el rotor es un valor característico del emplazamiento.
11. Método de control de un aerogenerador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque la función periódica tiene una amplitud dependiente del valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor.
12. Método de control de un aerogenerador según la reivindicación 11, caracterizado porque la amplitud de la

función periódica es dependiente de la velocidad del viento y monótona decreciente.

5 13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque el valor indicativo de la distribución de viento en el área barrida por el rotor es un valor estimado a partir de valores históricos y en función de al menos uno de los siguientes: dirección, velocidad e intensidad de turbulencia de viento, temperatura, época del año y hora del día.

10 14. Sistema de control de un aerogenerador, que comprende:
• un rotor con una pluralidad de palas, las cuales comprenden a su vez respectivos actuadores adaptados para variar un ángulo de paso de cada pala,
• y una unidad de control,
caracterizado porque la unidad de control está configurada para ejecutar el método de control descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

15

20

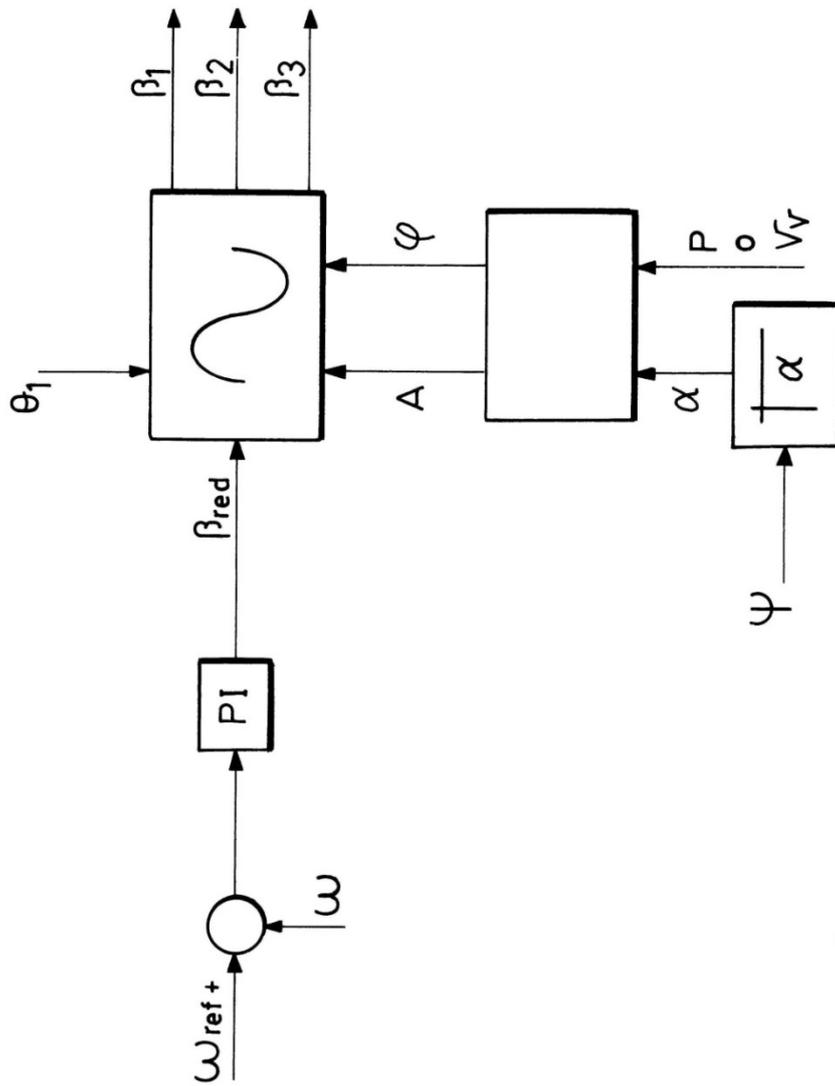


FIG.1

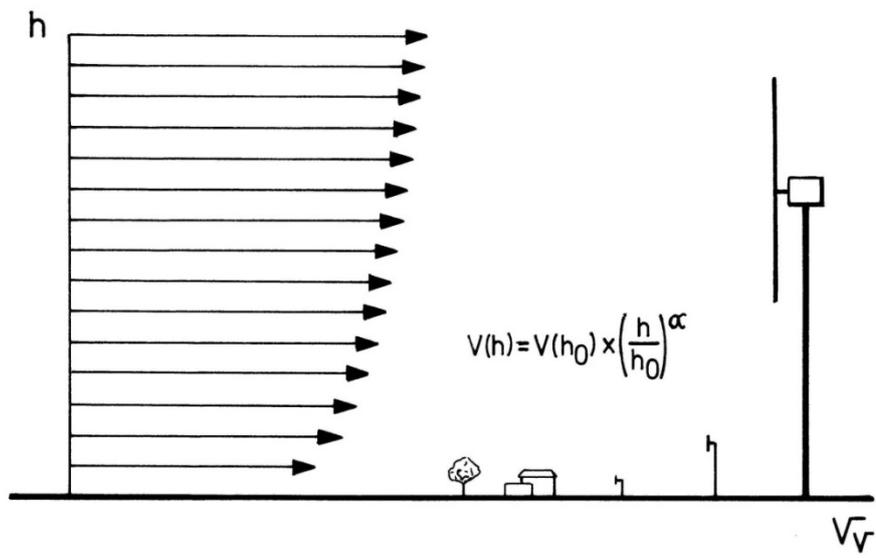


FIG.2

| | | $P \geq P_{\text{NOM}}$ | $P < P_{\text{NOM}}$ | |
|----------------------------|----------|-------------------------|----------------------|----------------|
| Dirección de viento ψ | α | φ | φ | A |
| Sector 1 | 1 | 0° | 270° | A ₁ |
| Sector 2 | 0,5 | 0° | 270° | A ₂ |
| Sector 3 | 0,2 | 0° | 270° | A ₃ |
| Sector 4 | 0,7 | 0° | 270° | A ₄ |

FIG.3

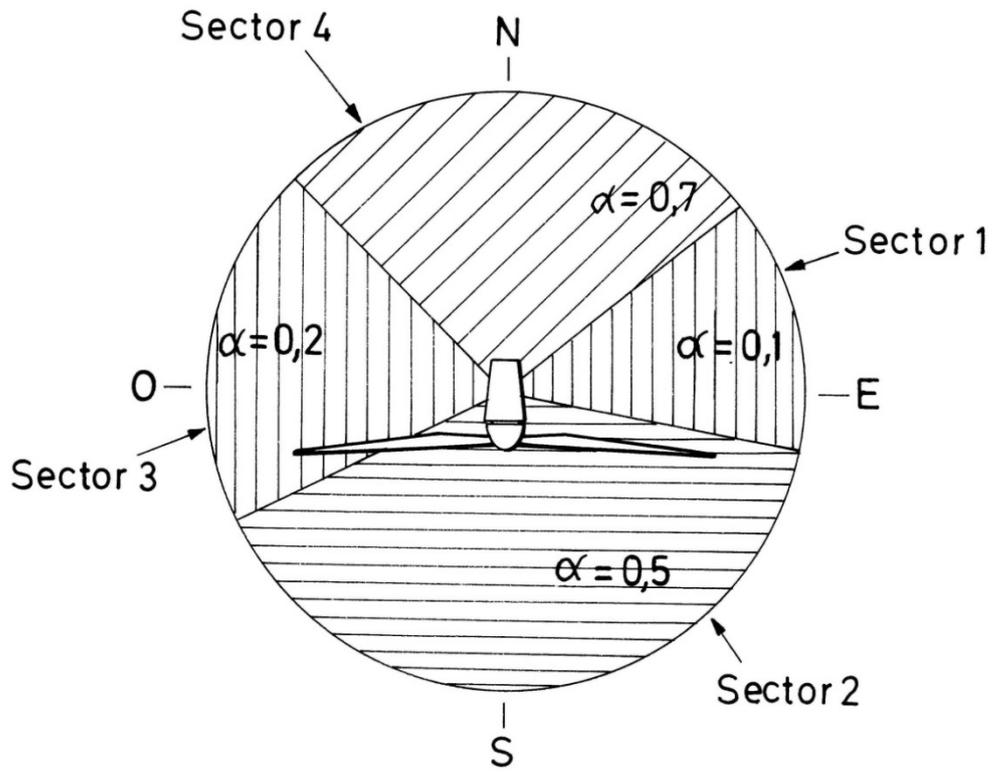


FIG.4

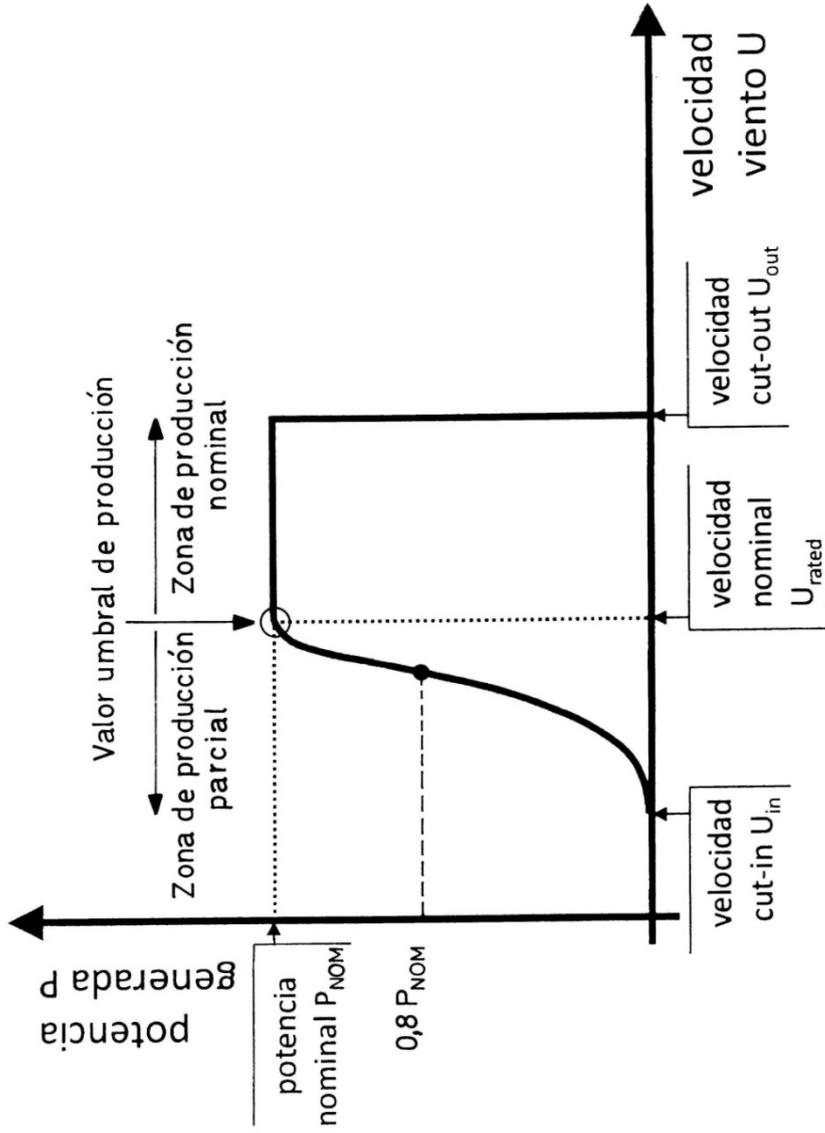


FIG.5

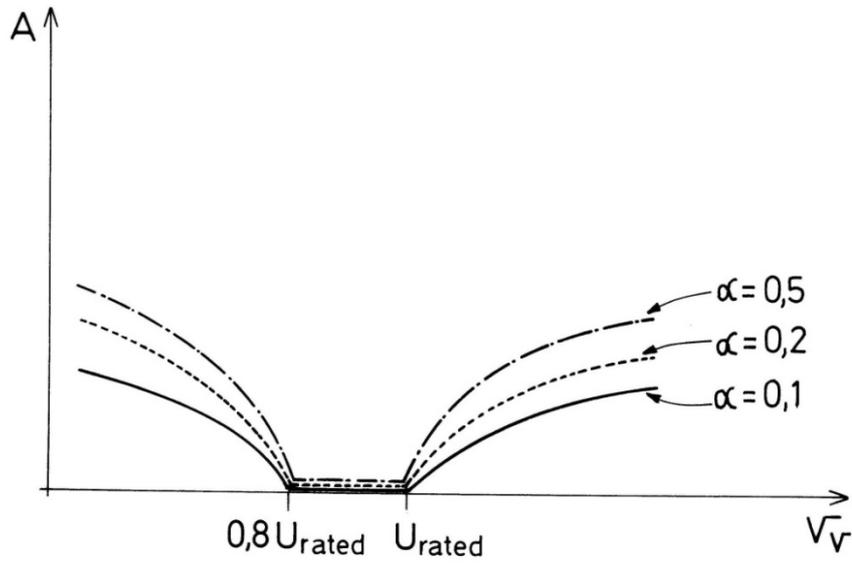


FIG.6

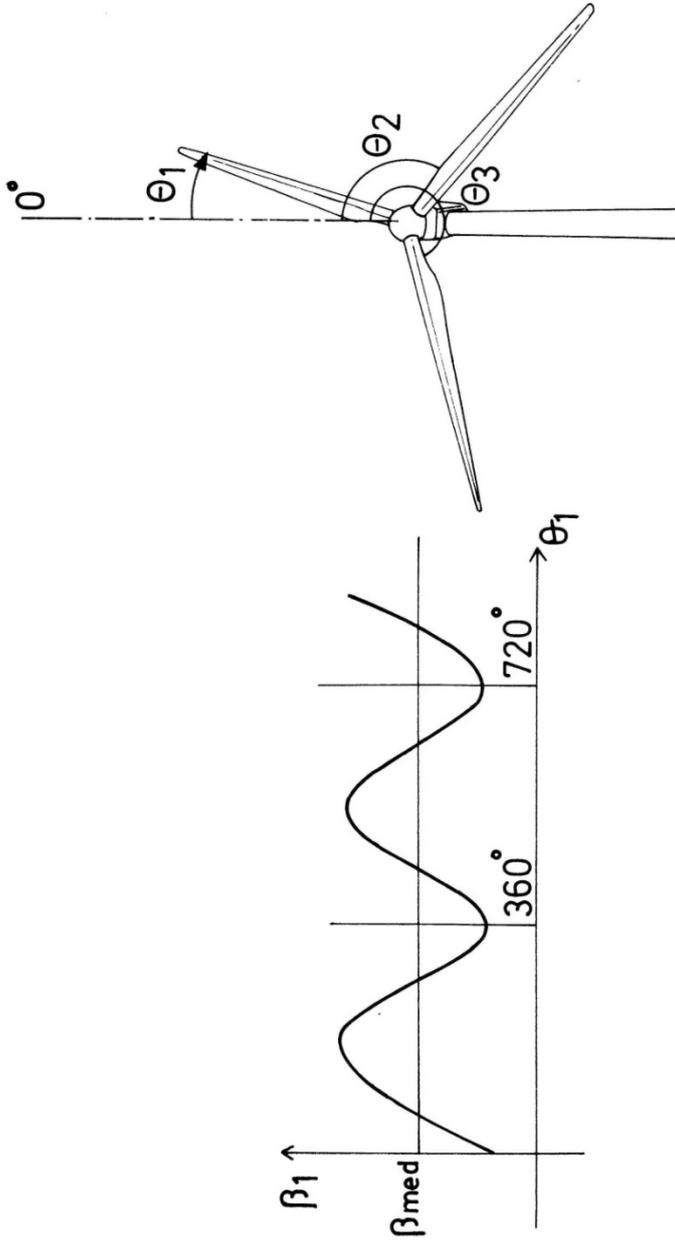


FIG. 7A

FIG. 7B

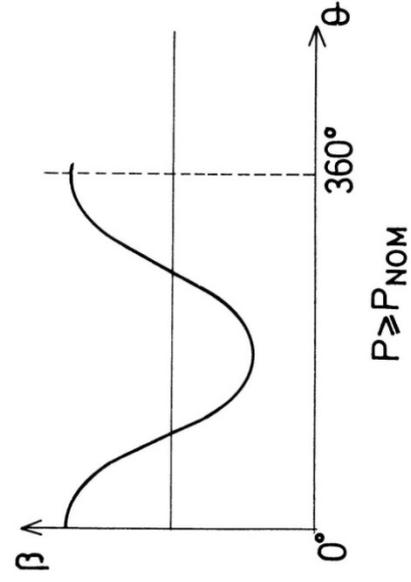


FIG.8B

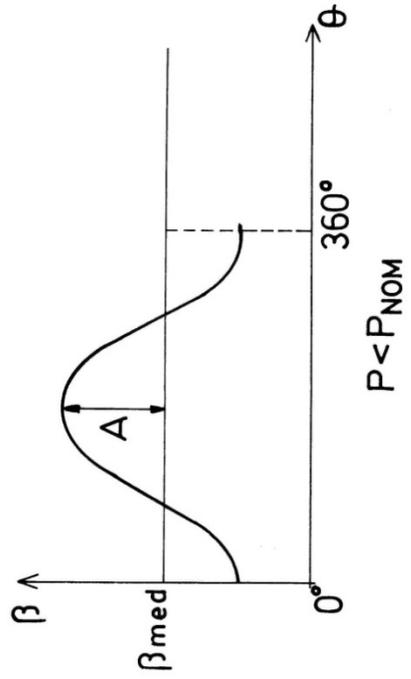


FIG.8A