

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 714 085**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2014** **E 14200075 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.11.2018** **EP 2886854**

54 Título: **Método de control de aerogenerador**

30 Prioridad:

**23.12.2013 ES 201331903**

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

**27.05.2019**

73 Titular/es:

**NORDEX ENERGY SPAIN, S.A.U. (100.0%)  
Poligono Industrial Barasoain Parcela 2  
31395 Barasoain (Navarra), ES**

72 Inventor/es:

**LABORDA RUBIO, JOSE LUIS;  
GARCÍA BARACE, ALBERTO;  
ARLABÁN GABEIRAS, TERESA;  
ARÍSTEGUI LANTERO, JOSE LUIS;  
GONZÁLEZ MURUA, ALEJANDRO;  
GARCÍA SAYÉS, JOSÉ MIGUEL y  
NÚÑEZ POLO, MIGUEL**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

**ES 2 714 085 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 control de aerogenerador

5 La presente invención se refiere al campo técnico de las energías renovables, más concretamente a la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica.

El objeto de la invención va dirigido a un método de control de aerogeneradores que permite gestionar de manera eficiente su funcionamiento en situaciones de anomalías como puede ser la desalineación.

10

### ESTADO DE LA TÉCNICA

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 que conecta 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 de mercado hacia rotores mayores, que proporcionan energía a un coste menor. En dichas configuraciones existe una importancia creciente del sistema de control. Dicho sistema maximiza 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 pitch- y sobre el par demandado al generador.

25

Por una parte, el ángulo de pitch se controla mediante un conjunto de actuadores que hacen girar la pala en torno a su eje longitudinal. Dicha actuación consigue variar el par aerodinámico, bien para obtener la máxima potencia posible del viento en unas condiciones meteorológicas, bien para limitar las cargas mecánicas producidas sobre el aerogenerador.

30

Por otra parte, el sistema de control modula el par demandado al generador desde el convertidor. La modulación del par también se realiza con el doble objetivo de obtener la máxima potencia posible del viento en unas condiciones meteorológicas dadas, y para limitar las cargas mecánicas producidas sobre el aerogenerador.

35

Debido a la naturaleza tridimensional y estocástica del viento –a lo largo del área barrida por el rotor, el viento es un vector no uniforme en el espacio y aleatorio-, las cargas experimentadas por cada pala y como consecuencia de ello por la turbina eólica, son variables en el tiempo. Un ejemplo de esta variabilidad se observa en función de la altura respecto a la superficie terrestre, produciéndose el fenómeno conocido como cortadura (*wind shear*). Otro ejemplo es la variabilidad de la dirección del viento, que obliga a considerar la actuación de un sistema que orienta la nacelle para mantener el rotor correctamente orientado. Se trata del sistema de yaw.

40

El sistema de yaw no actúa continuamente. Únicamente orienta el rotor hacia la dirección del viento cuando un sistema que comprende una veleta detecta que la desorientación supera cierto valor umbral durante tiempo determinado. En el transcurso del tiempo en que el rotor permanece desorientado, pueden darse situaciones en que la desorientación provoque que al menos una pala entre en pérdida, produciéndose aerodinámicas elevadas sobre el rotor, y perdiéndose la capacidad de control mediante la regulación del paso de pala. La presente invención está concebida para atajar este problema.

45

En el estado de la técnica actual, lo habitual es lo siguiente:

50

- Cuando se detecta una desorientación el sistema de control actúa con el sistema de orientación de la góndola para corregirla. Sin embargo, el control de yaw, se realiza en base a señales medias de desorientación que tienen que superar un umbral durante un tiempo determinado (no breve) para evitar la sobreactuación con el sistema de yaw. Además, el sistema de yaw es un sistema de actuación lenta (del orden de unos pocos grados por segundo), que hace que, si el cambio en la dirección del viento es grande y rápido, pase bastante tiempo hasta que se corrige. Por ejemplo, para un error de 90° a una velocidad habitual del sistema de orientación de yaw de 2°/s, se tardaría en orientar correctamente la máquina unos 45 s. Esto provoca que las cargas aumenten hasta que se corrige la orientación. Este es el estado de la técnica que se toma como el estado de la técnica más cercano para plantear la invención.

55

- La curva que define el mínimo ángulo de paso de pala  $\beta_{min}$  - (ver Figura 1 que detalla el estado de la técnica: ilustrando una curva de mínimo ángulo de paso de pala como función de la velocidad del viento) - es predeterminada, i.e. para cada velocidad de viento (o potencia) se fija un ángulo de paso de pala mínimo para evitar excursiones de velocidad.

60

En la zona de regulación de velocidad en que la potencia generada es igual a la nominal PN, los transitorios en la velocidad de rotor provocados por las ráfagas de viento pueden llevar a sobrevelocidades (por ejemplo, tras un descenso de velocidad de viento que ha llevado asociado una disminución de ángulo de paso de pala, se puede producir un incremento tan rápido de viento que no dé tiempo a aumentar el ángulo de paso de pala en consecuencia). En ese caso el sistema de control del aerogenerador provoca la desconexión de la máquina de la red eléctrica. Para

65

prevenir dichas sobrevelocidades que producen la parada de la turbina, existe la posibilidad de limitar el mínimo ángulo de paso de pala alcanzado en fenómenos transitorios. Para ello, el sistema de control del estado de la técnica utiliza una curva predeterminada por la que fija un umbral mínimo que se aplica a la consigna de paso de pala en función del ángulo de paso de pala medio el ángulo de paso de pala medio (se emplea habitualmente como señal indicativa de la velocidad de viento media o potencia). De esta forma, para determinado ángulo de paso de pala medio calculado en una ventana de tiempo, no se permiten excursiones de paso de pala por debajo de cierto valor de paso de pala.

Existen casos en los que el ángulo de paso de pala mínimo (en lugar de ser predeterminado para cada velocidad de viento media o potencia o paso de pala medio) se varía teniendo en cuenta la modificación de la eficiencia aerodinámica de la pala debida, por ejemplo, a la deposición de hielo o suciedad sobre ella. Ejemplos de estas técnicas de control se encuentran en los siguientes documentos:

Así el documento US8096761 describe un método de control que, ante la presencia de hielo, modifica el valor del mínimo ángulo de paso de pala  $\beta_{min}$ . Esta patente no especifica cómo se identifica la presencia de hielo, hablándose sólo de una estimación de la pérdida de eficiencia aerodinámica. Mientras que en US4656362 se presenta un método de control que modifica el valor del mínimo ángulo de paso de pala  $\beta_{min}$  utilizando un valor relacionado con el rendimiento aerodinámico.

Adicionalmente, es conocido por el documento US2012009062 un método para mitigar cargas en aerogeneradores en eventos de error de yaw. Este método determina un error de yaw y una velocidad del aerogenerador y determina una magnitud de reducción de carga del aerogenerador basada en magnitudes del error de yaw y de la velocidad, y reduce la potencia de salida del aerogenerador basada en la magnitud de la reducción de carga.

En la actualidad las técnicas de control individual de paso de pala utilizan sensores para medir las cargas sobre las palas, a partir de las cuales se estiman las cargas sobre ejes fijos.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un método de control de aerogeneradores de acuerdo a la reivindicación 1. Más concretamente el método de control aquí descrito se hace de especial utilidad cuando se determina que existe una desalineación del aerogenerador con respecto del viento incidente, lo cual puede provocar funcionamientos no óptimos en cuanto a captura a la vez que puede incidir en anomalías en el propio aerogenerador y sus componentes.

El método de control de la presente de la invención, realiza una serie de tomas de datos y a partir de los mismos un se procede a llevar a cabo un cálculo del límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  a partir del valor de la desorientación del aerogenerador  $\varphi$ . Para ello se procede a la obtención del valor de  $\lambda$  al menos una señal indicativa de la velocidad de viento incidente en el aerogenerador o de una media del mismo, por ejemplo, una señal referida al ángulo medio de ángulo de paso de pala y un valor indicativo de la desorientación del aerogenerador  $\varphi$ .

Para obtener un valor del límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{min}$  a partir de dicho valor indicativo de la desorientación del aerogenerador  $\varphi$ , inicialmente se hace uso de unos cálculos que permiten obtener una correlación que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{min}$  que marca un umbral de entrada en pérdida para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento. Dicha correlación se modela en forma de tabla y se implementa en el sistema de control del aerogenerador para tener caracterizada la correlación entre el límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  que marca un umbral de entrada en pérdida y cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento  $\lambda$ . Esto permite obtener para cada valor señal indicativa de la velocidad de viento  $\lambda$  el valor límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  para evitar la operación en zona de pérdida aerodinámica.

Adicionalmente, el método aquí descrito presenta una adición de un término adicional  $\Delta\beta_{min}$  al valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{min}$  obtenido a partir de la comparación de la señal indicativa de la velocidad de viento curva o tabla que comprende una correlación que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{min}$  que marca un umbral de entrada en pérdida para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento. La adición del citado término adicional  $\Delta\beta_{min}$  se anula en el caso en el que se determina que la dirección del viento se mantiene, transcurrido un tiempo desde que se ha producido una variación rápida en el valor indicativo de la desorientación como consecuencia de un cambio rápido en la dirección del viento.

Alternativamente, se aplican constantes de tiempo distintas en un filtro para la estimación de un valor del ratio velocidad de punta de pala  $\lambda$  filtrado, empleado como señal indicativa de la velocidad de viento para la obtención del límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$ .

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Figura 1. Muestra una gráfica donde se detalla el estado de la técnica: en la cual se ilustra una curva de ángulo de paso de pala mínimo en función de velocidad de viento. Se puede ver que por debajo de velocidad de viento nominal hay una zona de carga parcial, mientras que por encima de potencia nominal velocidad del viento nominal se da una regulación de velocidad de giro con el ángulo de paso de pala.

5

Figura 2. Muestra un diagrama de bloques del sistema de control que permite implementar el método de la invención.

Figura 3. Muestra una gráfica donde se aprecian las curvas Coeficiente de potencia  $C_p$ - ángulo de paso de pala  $\beta$ ; para diferentes ratios de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .

10

Figura 4. Muestra una gráfica donde se aprecian una curva ( $\beta_{MIN}-\lambda$ ) que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{MIN}$  que marca el umbral de entrada en pérdida para cada valor de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .

15

Figura 5. Muestra una gráfica donde se aprecia una curva de potencia en función de velocidad de viento (por debajo de velocidad de viento nominal zona de producción parcial, por encima de viento nominal: zona de producción nominal o de regulación de velocidad de giro con el ángulo de paso de pala).

20

Figura 6. Muestra una gráfica donde se aprecia el  $\beta_{MIN}$  resultante en una realización que comprende sumar un valor adicional  $\Delta\beta_{MIN}$  al límite mínimo definido por la curva que marca el ángulo de paso de pala de entrada en pérdida para cada  $\lambda\beta_{MIN(i)}$ .

25

Figura 7. Muestra un diagrama donde se aprecia un detalle del bloque de cálculo del límite mínimo de ángulo de paso de pala en función de la desorientación según una realización preferente. En este caso, se suma un término adicional  $\Delta\beta_{MIN}$  al límite mínimo definido por la curva que marca el ángulo de paso de pala de entrada en pérdida para cada  $\lambda\beta_{MIN(i)}$ .

30

Figura 8. Muestra un diagrama de un detalle del bloque de cálculo del valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  en función de la desorientación según una realización alternativa en la cual en función de la desorientación se modifica la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  del filtro F1 aplicado a la medida del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  que permite la obtención de una señal filtrada  $\lambda_{med}$  empleada para la obtención de  $\beta_{MIN}$  definido por la curva que marca el ángulo de paso de pala  $\beta$  de entrada en pérdida para cada valor del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .

35

### EJEMPLO DE REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

El aerogenerador al cual va destinado el método de control objeto de la invención comprende, una serie de palas, y un sistema de control de ángulo de paso de pala  $\beta$  como el que se observa en la figura 2. Dicho sistema de control de paso de pala permite implementar el método de control objeto de la invención, en el que en función de un valor de desorientación  $\varphi$  del aerogenerador con respecto una dirección de viento incidente se calcula un valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  en un bloque de cálculo de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$ . A la vista de dicha figura 2 se aprecia que una consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta_{ref}$  puede ser calculada como suma de las aportaciones de dos reguladores tipo PI, uno empleando como señal de entrada el error de velocidad de giro de rotor ( $\omega_{ref}-\omega_{med}$ ) y el otro empleando como entrada la diferencia entre el par nominal y el par calculado en el regulador de velocidad de giro con par ( $T_{rated}-T_{med}$ ). La consigna inicial de paso de pala  $\beta_{ref}$  se acota superior e inferiormente entre unos límites de ángulo de paso de pala superior e inferior ( $\beta_{MAX}, \beta_{MIN}$ ) para la obtención de una consigna de paso de pala final  $\beta_{ref\ final}$  que se enviará a los actuadores de paso de pala. Para el cálculo del valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$ , el sistema de control emplea como información al menos un valor indicativo de desorientación  $\varphi$  del generador.

40

De esta manera y haciendo uso del sistema de control anteriormente citado o de uno similar se procede a calcular:

- Un valor indicativo de desorientación  $\varphi$  del aerogenerador a partir de al menos una señal indicativa de la dirección del viento.
- Una consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta$  en función de al menos un valor relativo a un error de velocidad de giro del rotor ( $\omega_{ref}-\omega_{med}$ ).

45

Para posteriormente proceder a modificar al menos un consigna inicial de ángulo de paso de pala si ésta es menor que el valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$ , calculado a partir del valor indicativo de la desorientación  $\varphi$ , de manera que una consigna final de paso de pala sea mayor o igual que el valor de límite inferior de ángulo de

paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  para posteriormente actuar sobre al menos una de las palas del aerogenerador en función del valor de consigna de paso de pala final.

5 Además el método de control comprende calcular el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  a partir del valor indicativo de la desorientación  $\varphi$ .

De esta manera, el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  se adecúa a las condiciones de orientación del aerogenerador, para prevenir pérdidas de sustentación excesivas y/o cargas.

10 Para poder calcular el valor de límite inferior de ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  se procede a realizar una la comparación de una señal indicativa de la velocidad de viento con una curva o tabla que comprende una correlación entre el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  y la señal indicativa de velocidad del viento la cual define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  que determina un umbral de entrada en pérdida aerodinámica para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento. Los datos que dan lugar a la tabla o la curva se pueden obtener mediante simulación de los puntos relacionados con el coeficiente de potencia  $C_p$  para cada ángulo de paso de pala  $\beta$  a diferentes velocidades de punta de pala.

15 En una posible realización se emplea un ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  como señal indicativa de viento, si bien en otras posibles realizaciones la señal indicativa de velocidad de viento puede ser tomada a partir de datos velocidad de viento instantánea, velocidad de viento media o a partir de datos relacionados con la potencia media o el ángulo de paso de pala medio. Sin embargo, el empleo del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  permite tener en cuenta no solamente los efectos de la velocidad de viento sobre el rotor, sino efectos de rotación del propio rotor, pues la influencia de la velocidad de giro del rotor sobre la sustentación del perfil (medido a través del coeficiente de potencia  $C_p$ ) es sustancial. El ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  se determina a partir de medidas de velocidad de viento – que pueden tomarse mediante medios de captura de datos de viento como anemómetros- y velocidad de giro de rotor y se calcula por medio de la siguiente fórmula, como el cociente entre velocidad lineal de la punta de la pala y la velocidad de viento según la fórmula:

$$\lambda = \left( \frac{\text{velocidad\_lineal\_punta\_pala}}{\text{velocidad\_viento}} \right)$$

30 En la figura 3 se muestran unas curvas que ilustran la relación entre el coeficiente de potencia  $C_p$  y el ángulo de paso de pala  $\beta$  para diferentes valores de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ . Se aprecia además que dichas curvas tienen respectivos valores máximos que marcan una transición entre dos zonas de operación:

- Una primera zona o zona de operación normal, para la cual se sintoniza el control del aerogenerador.
- Una segunda zona o zona de entrada en pérdida aerodinámica para la cual el control del aerogenerador no es válido. Es por ello que el control del aerogenerador incorpora el valor límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  para evitar la operación en zona de pérdida aerodinámica. Así, el cálculo de la consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta$  se lleva a cabo en función del error de la velocidad de giro del rotor.

40 Dichas curvas no tienen en cuenta pérdidas de sustentación asociadas a una eventual deposición de partículas sobre la superficie de la pala que alteren la geometría de los perfiles aerodinámicos ni a otros efectos que varían la sustentación de las palas, tales como la desorientación y su correspondiente valor  $\varphi$ .

45 Los puntos máximos de las curvas que relacionan el coeficiente de potencia [ $C_p$ ] con el ángulo de paso de pala  $\beta$  para diferentes valores de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  definen unos pares de puntos  $\beta$ - $\lambda$  que se emplean para caracterizar una curva ( $\beta_{\text{MIN}}-\lambda$ ), que se aprecia en la figura 4, que a su vez define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  que marca un valor de umbral de entrada en pérdida para cada valor de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ . Dicha curva se modela en una realización en forma de la anteriormente citada tabla y se implementa en el sistema de control del aerogenerador para tener caracterizada la correlación entre el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  que marca un umbral de entrada en pérdida y cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento  $\lambda$ . Esto permite obtener para cada valor del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  el valor límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  para evitar la operación en zona de pérdida aerodinámica. En hipotético valor de lambda en el instante  $i$  ( $\lambda_{\text{Med}(i)}$ ), se obtiene el correspondiente valor límite inferior de ángulo de paso de pala ( $\beta_{\text{MIN}(i)}$ ) tal y como se aprecia tras visualizar la figura 4.

55 Como la tabla implementada en el sistema de control del aerogenerador comprende un número de pares de puntos limitado, para aquellas medidas de valores de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  que no se corresponden con

ninguno de los puntos de la tabla, se realiza un proceso de interpolación entre al menos dos de ellos empleando técnicas de interpolación convencionales, como por ejemplo una interpolación lineal.

5 Dado que las señales relacionadas con las medidas de la velocidad de viento y de la velocidad de giro de rotor necesarias para la obtención del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  pueden tener ruido y producir efectos no deseables tales como fluctuaciones; el método aquí descrito prevé aplicar al menos un filtro F1 a cualquier señal que requiera del mismo, como en este caso a las señales relacionadas con el ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  para así realizar un proceso de filtrado y alisar dicha señal en el tiempo y que dichas fluctuaciones en las medidas no se vean reflejadas en el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$ .

10 Dichos filtros pueden ser de cualquier tipo que permita obtener el resultado deseado, como puede ser un filtro de paso bajo que permita el paso de frecuencias más bajas y atenúe aquellas frecuencias más altas y que además presenta una constante de tiempo configurable, o un filtro basado en una media móvil cuyo cálculo se puede llevar a cabo con un número de número de puntos que es configurable.

15 En una realización preferente, el método comprende sumar un término adicional de ángulo de paso de pala mínimo  $\Delta \beta_{\text{MIN}}$  (que puede ser predeterminado o dependiente del valor de la desorientación  $\varphi$ ) al valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  obtenido a partir de la comparación de la señal indicativa del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  con la curva o tabla predeterminada que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  en el que la pala no entra en pérdida, como se ilustra en las figuras 6 y 7. De esta manera, cuando existe desorientación, el valor de límite mínimo de ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  es mayor que cuando no existe, permitiendo emplear un límite mayor para evitar que la pala evolucione hacia un ángulo de paso de pala  $\beta$  menor al que la velocidad de viento requiere (nótese que debido a la desorientación, la componente de viento perpendicular al plano del rotor es menor que cuando el aerogenerador está orientado, por lo que el ángulo de paso de pala  $\beta$  tiende a disminuir para mantener la velocidad de giro; sin embargo, el ángulo de paso de pala  $\beta$  en esas circunstancias es menor que el correspondiente a la misma velocidad de giro con el aerogenerador orientado correctamente). Esto es particularmente ventajoso en la zona de producción nominal, o lo que es lo mismo, la zona en la que hay regulación de velocidad de giro de rotor con el ángulo de paso de pala  $\beta$ .

20 Según una realización como la que se muestra en la figura 8; el método comprende modificar una constante de tiempo de filtrado  $\tau$  cuando hay desorientación. Así, en una realización, la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  cuando hay desorientación  $\tau_{\text{Desorientada}}$  empleada en el filtro F1 para calcular el valor filtrado del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ ,  $\lambda_{\text{med}}$ , es diferente que la constante de tiempo de filtrado cuando no hay desorientación  $\tau_{\text{Orientada}}$ . En concreto, de manera preferente el valor de la constante de tiempo del filtrado cuando hay una desorientación significativa  $\tau_{\text{Desorientada}}$  es mayor que la constante de tiempo del filtrado cuando no la hay  $\tau_{\text{Orientada}}$ , es decir ( $\tau_{\text{Desorientada}} > \tau_{\text{Orientada}}$ ). Esto tiene como efecto técnico, el tener una variación más lenta de la señal filtrada de  $\lambda$ ,  $\lambda_{\text{med}}$ , para la misma señal de entrada cuando hay desorientación que cuando no la hay y, por tanto, una evolución más temporal más lenta del valor del límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  en dichas circunstancias. Esto es especialmente ventajoso en la zona de operación a carga parcial, o lo que es lo mismo, la zona en la que se regula la velocidad de giro del rotor con el par eléctrico del generador. En este caso, cuando el aerogenerador se encuentra en la zona de regulación de velocidad de giro con par el ángulo de paso de pala  $\beta$  es el de mayor producción (o mayor coeficiente de sustentación). En este caso, si de repente se produce una ráfaga de viento, el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  aumentará su valor conforme aumente la velocidad de viento (o el ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ ) a una velocidad dependiente de una primera constante de filtrado más rápido de que lo haga la consigna de ángulo de paso de pala para control de velocidad de giro de rotor por el error de velocidad. Esto tiene como efecto que, por ser la consigna de paso de pala  $\beta$  inicial menor que el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$ , la consigna final toma el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$ . Sin embargo, si en ese momento se produce un cambio de orientación, es conveniente para reducir las cargas extremas, reducir la velocidad de actuación del sistema de paso de pala para lo cual se propone reducir la constante de tiempo aplicada para el cálculo del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .

50 Además, en una posible realización, es posible modificar el cálculo del valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  sólo si se determina que el valor de la desorientación  $\varphi$  está por encima de un valor umbral de desorientación predefinido, mediante una comparación del valor de desorientación  $\varphi$  del aerogenerador con el umbral.

55 Así, por ejemplo, en un posible realización en la cual se determina o se sabe que no existe desorientación o que la desorientación está por debajo del valor umbral predefinido, el cálculo del valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  se realiza a partir de una señal indicativa de la velocidad de viento, preferiblemente el ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ , y una curva predeterminada que define el ángulo mínimo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  que marca el umbral de entrada en pérdida para cada valor de ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ , sin llevarse a cabo la suma de ningún término adicional o modificación de constante de tiempo del filtrado  $\tau$ . Sin embargo, cuando la desorientación es significativa, la pérdida de sustentación o variación del  $C_p$  real es relevante y conviene protegerse

5 contra posibles nuevos cambios de dirección de viento; por lo que, si se determina que la desorientación supera el valor umbral de desorientación se lleva a cabo la modificación de dicho cálculo del valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$ , bien mediante la suma de un término adicional de ángulo de paso de pala mínimo  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  (que puede ser predeterminado o dependiente del valor de la desorientación) o bien mediante la modificación de la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  en el filtro F1.

10 Cuando el aerogenerador se encuentra operando en la zona de producción nominal según la figura 5, el sistema de control de paso de pala se encuentra regulando la velocidad de giro del rotor y el aerogenerador se encontrará operando con ángulos de paso de pala positivos. En una realización, cuando el aerogenerador se encuentra operando en dicha zona, si el valor de desorientación del aerogenerador supera el valor umbral predeterminado, valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  se calcula mediante la adición de un valor predeterminado  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  al valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  obtenido inicialmente a partir de la comparación de la señal indicativa de la velocidad de viento con la curva o tabla predeterminada que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  en el que la pala no entra en pérdida para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento, tal y como se aprecia en la figura 7. De esta manera, cuando el aerogenerador se encuentra operando en la zona de regulación de velocidad con paso de pala, si se produce una desorientación brusca por culpa de un cambio en la dirección del viento, se evita que el ángulo de paso de pala  $\beta$  se reduzca por debajo de un valor mayor que el límite mínimo de entrada en pérdida, tal y como se ilustra en la figura 6. En esta zona de producción es conveniente emplear un valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  por encima del valor del límite que marca la entrada en pérdida pues, si de nuevo cambia la dirección de viento y pasa a ser similar a la dirección anterior, y el ángulo de paso de pala  $\beta$  ya ha bajado como consecuencia de la reducción de par aerodinámico provocada por la desorientación transitoria del aerogenerador, la pala se encuentra en una zona en la que verá una carga más elevada. Por lo tanto es conveniente evitar excesos de cargas y de la manera descrita se consigue una reducción de cargas de fatiga en situaciones de vientos con frecuentes cambios de dirección en intervalos cortos de tiempo.

25 Además, cuanto mayor sea el error de orientación, conviene que el aerogenerador esté más protegido frente a nuevos cambios de dirección y ráfagas de viento, así que en una realización, el valor de sumado es creciente con el error de orientación a partir de un error mínimo umbral.

30 La obtención de dicho valor de límite mínimo adicional  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  se lleva a cabo mediante el bloque de cálculo del sistema de control que permite calcular, entre otras cosas, el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  en función de la desorientación como el mostrado en la figura 7. Como sea explicado existen diferentes escenarios para el cálculo que el término adicional  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$ :

- 35 • Comparación del valor de desorientación con el valor umbral de desorientación predeterminado de manera que si lo supera o es igual,  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  adopta un valor predeterminado positivo y si no lo supera  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  es igual a cero.
- Asignación de un valor de  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  para cada valor de desorientación a partir de una tabla o función.
- Combinación de los dos, comparación del valor de desorientación con el valor umbral de desorientación predeterminado y asignación de un valor de  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  para cada valor de desorientación a partir de una tabla o función cuando el valor de desorientación supera el valor umbral y cuando no lo supera  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  es igual a cero.

40 Si se mantiene la dirección de viento transcurrido un intervalo de tiempo predeterminado  $\Delta T$  desde un cambio brusco en la dirección del viento (que se puede determinar mediante la comparación de la tasa de cambio de desorientación con respecto al tiempo), el valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  se vuelve a calcular solamente a partir de la comparación de una señal indicativa de la velocidad de viento con una curva o tabla predeterminada que define el ángulo de paso de pala mínimo  $\beta_{\text{MIN}}$  que marca un umbral de entrada en pérdida para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento. O lo que es lo mismo, transcurrido un  $\Delta T$  desde un cambio brusco en la dirección del viento,  $\Delta\beta_{\text{MIN}}$  se anula o  $\tau$  vuelve a tomar el valor original. Esto es así porque, si se sostiene la dirección de la orientación de viento durante un tiempo, no conviene mantener un valor de límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{\text{MIN}}$  demasiado elevado, pues puede no ser adecuado a la velocidad de viento incidente. Es una medida de protección de la máquina transitoria, hasta que se determina que el aerogenerador se encuentra en una situación estable.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de aerogenerador que comprende una serie de palas, y un sistema de control de ángulo de paso de pala, comprendiendo el método los siguientes pasos:
- calcular un valor indicativo de desorientación del aerogenerador a partir de al menos una señal indicativa de la dirección de viento,
  - calcular una consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta$ ;
  - modificar la consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta$  si ésta es menor que un valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  de manera que una consigna final de ángulo de paso de pala sea mayor o igual que el valor del límite inferior del ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$ ; y
  - actuar sobre al menos una de las palas del aerogenerador en función del valor de consigna de ángulo de paso de pala final;

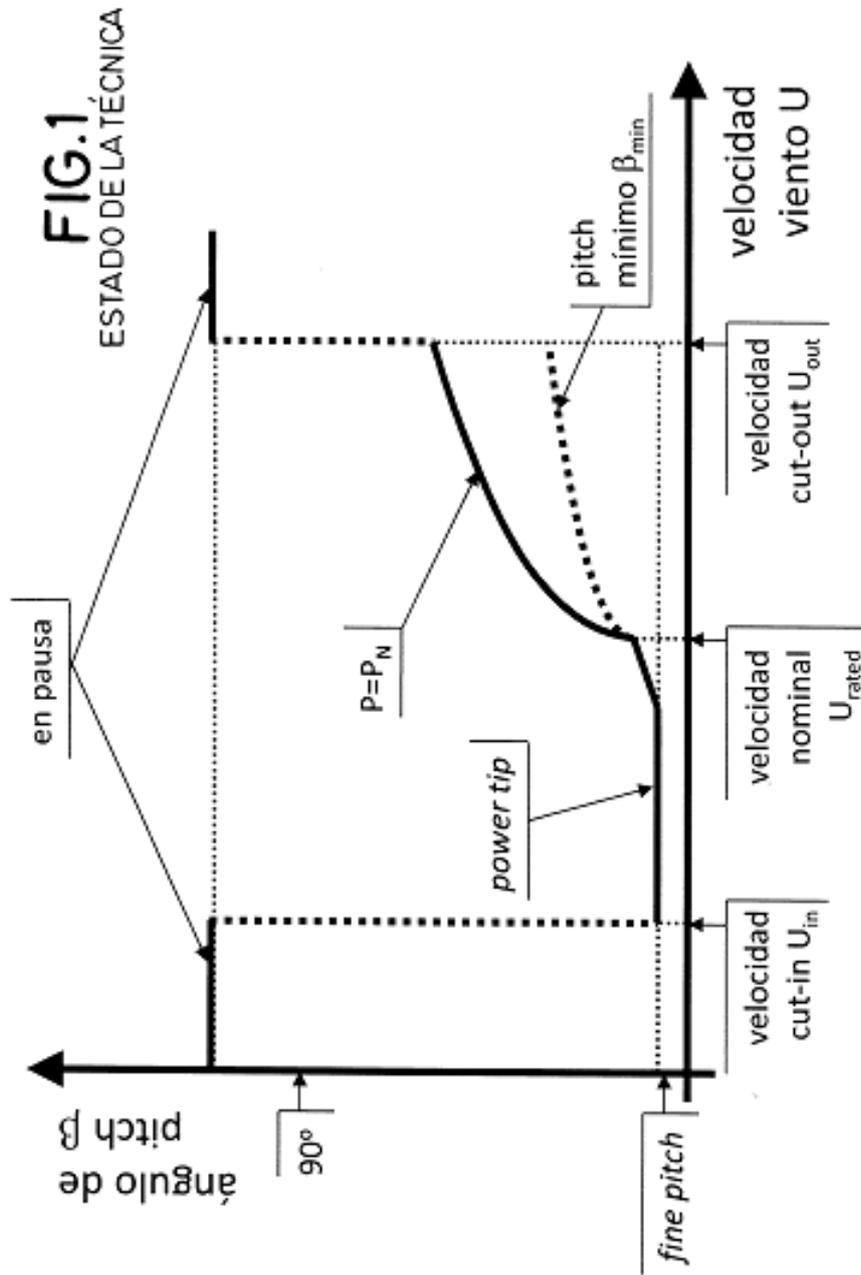
donde en la etapa de cálculo de la consigna inicial de ángulo de paso de pala  $\beta$  se lleva a cabo en función de al menos un valor relacionado con un error en la velocidad de giro del rotor y el valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  se calcula a partir de al menos un valor indicativo de la desorientación, y

estando el método caracterizado porque el cálculo del valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  comprende llevar a cabo una comparación de una señal indicativa de la velocidad de viento con una curva o tabla que comprende una correlación entre el valor límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  que marca un umbral de entrada en pérdida y cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento.

2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la señal indicativa de la velocidad de viento comprende un ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ , definido como el cociente entre la velocidad lineal de la punta de la pala y la velocidad de viento:

$$\lambda = \left( \frac{\text{velocidad\_lineal\_punta\_pala}}{\text{velocidad\_viento}} \right),$$

3. Método según la reivindicación 2, caracterizado porque la señal indicativa de la velocidad de viento es una medida filtrada del ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  obtenida mediante la aplicación de un filtro F1 al ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .
4. Método según reivindicación 3 caracterizado porque el filtro F1 comprende una constante de tiempo  $\tau$  que es configurable.
5. Método según reivindicación 4 caracterizado porque el filtro F1 es una media móvil.
6. Método según reivindicación 5 caracterizado porque comprende calcular la media móvil con un número configurable de puntos empleados.
7. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque el cálculo del valor del límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  comprende el paso de sumar un término adicional  $\Delta\beta_{MIN}$  al valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  obtenido a partir de la comparación de la señal indicativa de la velocidad de viento con la curva o tabla que comprende la correlación entre el valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  que marca un umbral de entrada en pérdida para cada valor de la señal indicativa de la velocidad de viento, cuando se determina la existencia de desorientación a partir del valor indicativo de desorientación.
8. Método según la reivindicación 7 caracterizado porque el término adicional  $\Delta\beta_{MIN}$  es predeterminado o dependiente del valor de la desorientación del aerogenerador.
9. Método según la reivindicación 3 caracterizado porque el paso de calcular el valor de límite inferior de ángulo de paso de pala  $\beta_{MIN}$  comprende una modificación de una constante de tiempo de filtrado  $\tau$  para el filtro F1 aplicado al ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$ .
10. Método según la reivindicación 9 caracterizado porque comprende comparar el valor indicativo de desorientación del aerogenerador con un valor umbral de desorientación predeterminado y porque la modificación de la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  para el filtro F1 está relacionada con el valor indicativo de desorientación del aerogenerador; de tal manera que una constante de tiempo de filtrado  $\tau$  para el filtro F1 es mayor cuando el valor indicativo de desorientación del aerogenerador es mayor que el valor umbral de desorientación y menor cuando el valor indicativo de desorientación del aerogenerador es menor que el valor umbral de desorientación.
11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 ó 10 caracterizado porque la modificación de la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  para el filtro F1 aplicado al ratio de velocidad de punta de pala  $\lambda$  se lleva a cabo en una zona de producción parcial.
12. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9 caracterizado porque, transcurrido un intervalo de tiempo predeterminado  $\Delta T$  desde un cambio brusco en la desorientación, si la dirección de viento se mantiene, el término adicional  $\Delta\beta_{MIN}$  se cancela.
13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11 caracterizado porque, transcurrido un intervalo de tiempo predeterminado  $\Delta T$  desde un cambio brusco en la desorientación, si la dirección de viento se mantiene, la constante de tiempo de filtrado  $\tau$  del filtro F1 vuelve a tomar su valor original  $\tau$ .



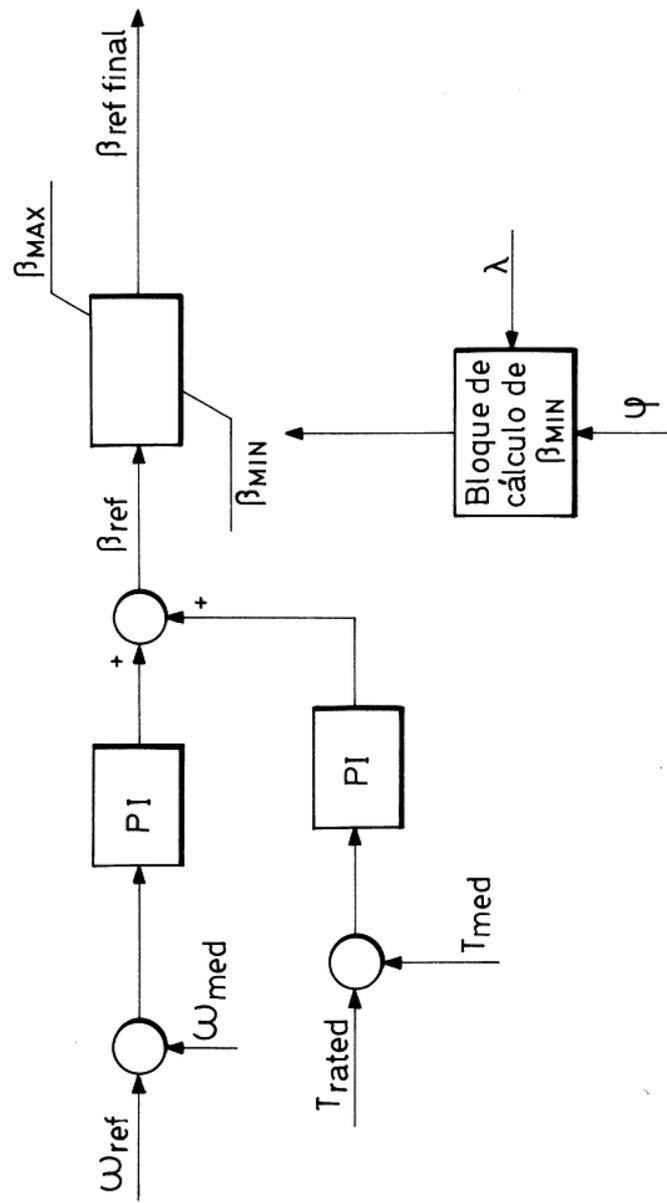
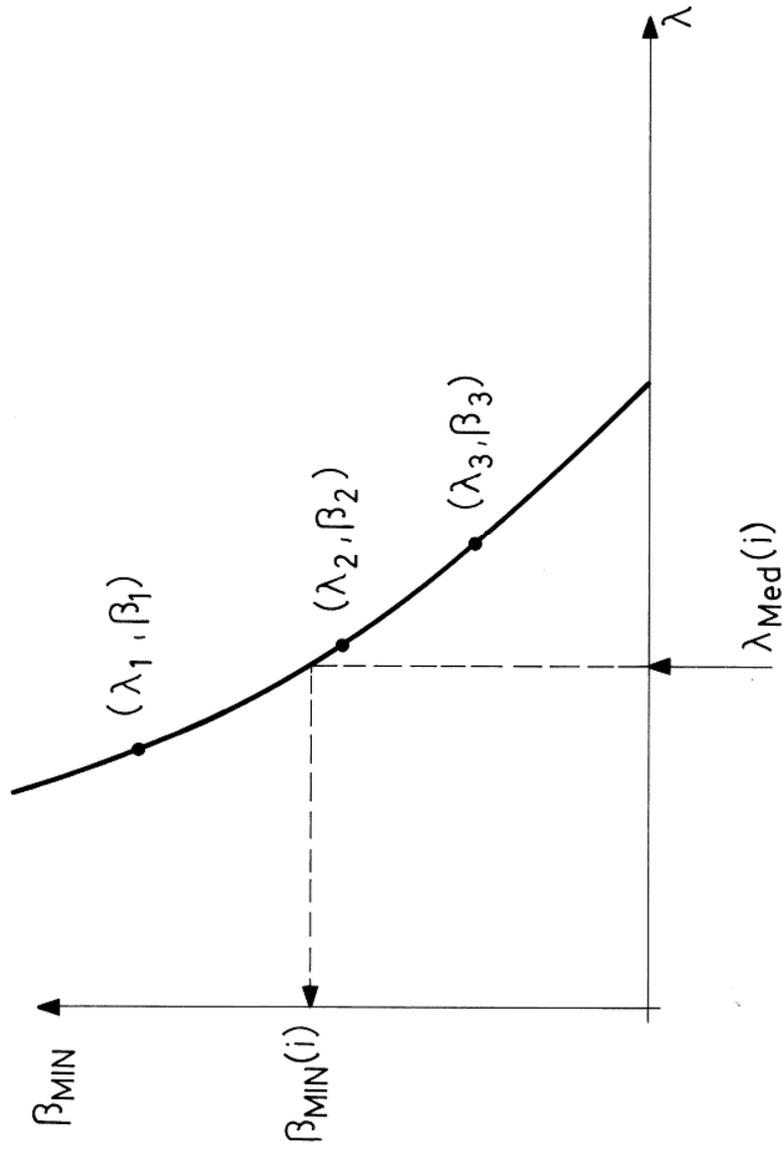


FIG.2





**FIG.4**

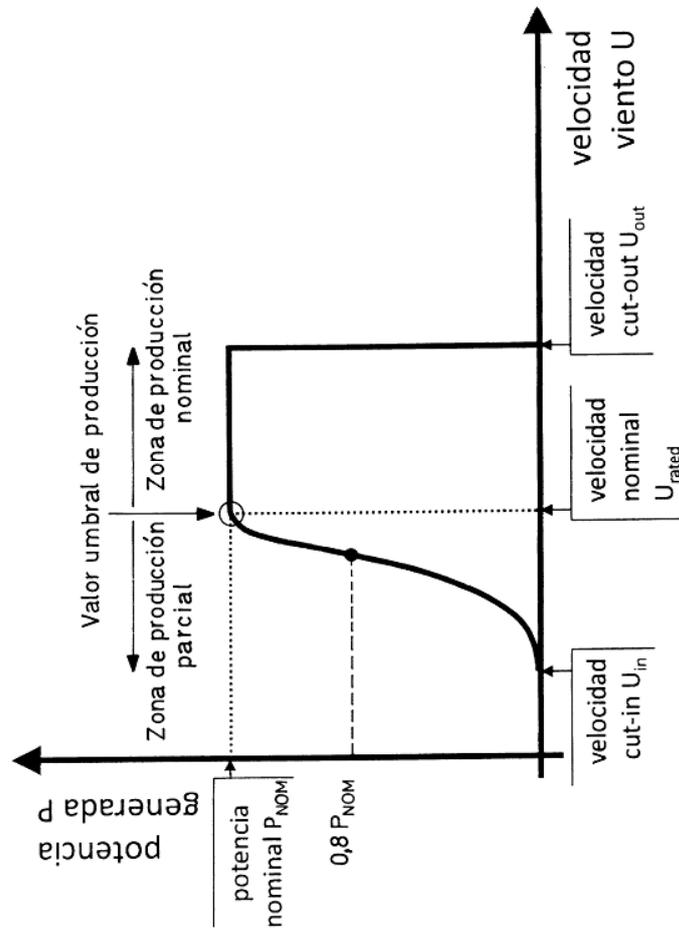


FIG.5

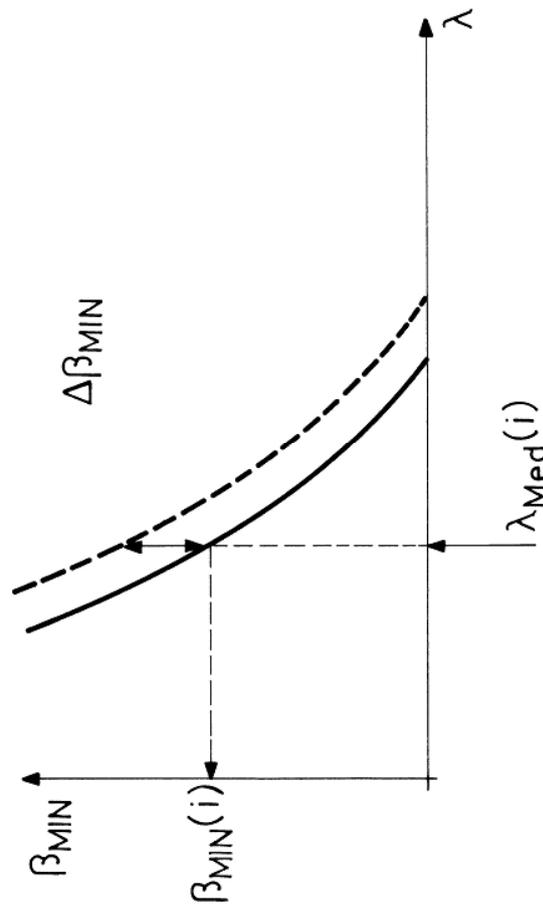


FIG.6

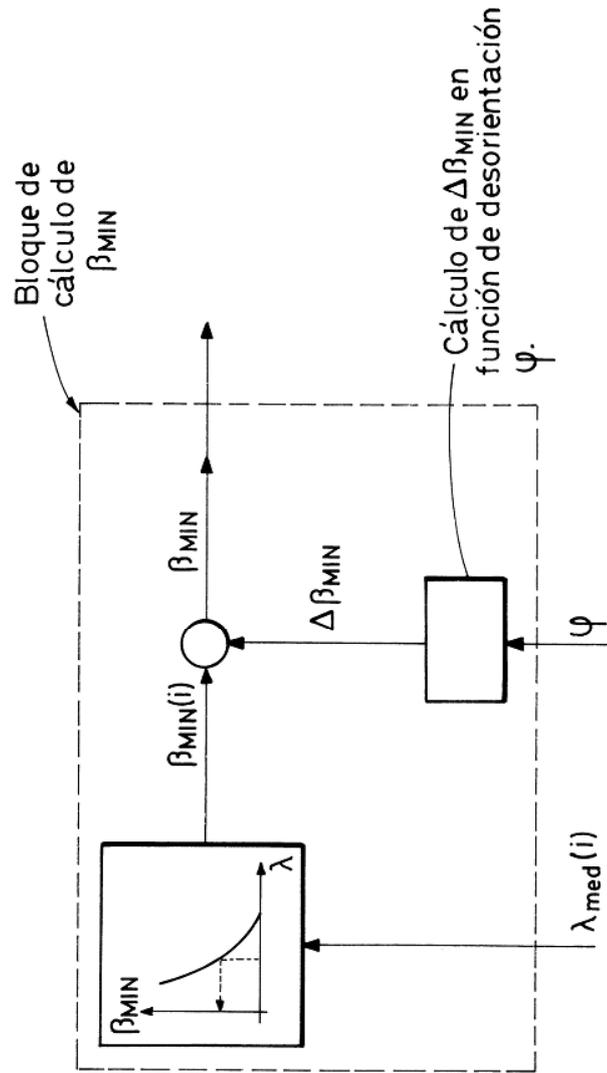


FIG. 7

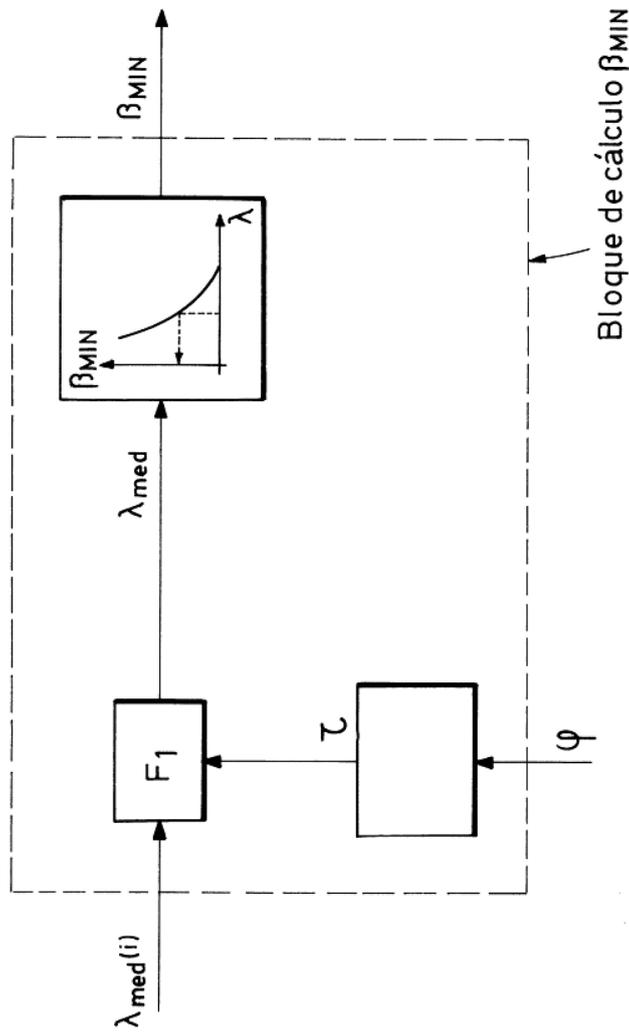


FIG.8