

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 814**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**G05B 13/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05808006 .0**

96 Fecha de presentación: **22.11.2005**

97 Número de publicación de la solicitud: **1817495**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **15.08.2007**

54 Título: **Procedimiento de optimización de parámetros de funcionamiento de una instalación de energía eólica e instalación de energía eólica**

30 Prioridad:  
**22.11.2004 DE 102004056255**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**26.06.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**26.06.2012**

73 Titular/es:  
**REPOWER SYSTEMS AG  
ALSTERKRUGCHAUSSEE 378  
22335 HAMBURG, DE**

72 Inventor/es:  
**ALTEMARK, Jens**

74 Agente/Representante:  
**López Bravo, Joaquín Ramón**

ES 2 383 814 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de optimización de parámetros de funcionamiento de una instalación de energía eólica e instalación de energía eólica

5 La invención se refiere a un procedimiento de optimización de parámetros de funcionamiento de una instalación de energía eólica en particular relativos al sistema rotor/generador en el que se predeterminan unos valores límites superior e inferior de un intervalo de valores del parámetro a optimizar y a una instalación energía eólica.

10 Las instalaciones de energía eólica modernas son construcciones que se hacen funcionar con ayuda de un sistema de control costoso. El sistema de control está diseñado para controlar distintos sistemas de la instalación de energía eólica en función de los valores de referencia del operario de la instalación de energía eólica y del explotador de la red, a la que está conectada la instalación de energía eólica, de la forma más provechosa posible. De la forma más provechosa posible significa, por lo general, que se consiga una gran producción de energía manteniendo adicionalmente la mínima emisión de ruido, mínima carga del conjunto de transmisión y de la estructura de soporte posibles y además incluso buena compatibilidad con la red de eléctrica. De especial importancia es el sistema rotor/generador. El rotor y sus palas es de una importancia determinante para captar la energía del viento, es decir, para transformar la energía del viento en energía mecánica que a su vez la transforma en energía eléctrica el generador. Un parámetro importante del rotor, además de los que quedan determinados por la estructura como, la longitud de las palas del rotor y la forma del perfil de las palas del rotor, es el ángulo de ataque que normalmente se puede ajustar. El ángulo de ataque se define como el ángulo que forma de una cuerda del perfil representativa con respecto al plano del rotor. El ángulo de ataque es de suma importancia para definir las condiciones aerodinámicas del la pala del rotor. Es determinante para la las condiciones de flujo entre la pala del rotor y el viento aparente que incide sobre la pala del rotor. El viento aparente es la combinación del viento real y las corrientes de aire inducidas por el movimiento de la pala del rotor. La intensidad y la dirección del viento aparente dependen, por tanto, de la velocidad de giro del rotor que depende a su vez de la velocidad del viento real y del ángulo de ataque. Se tiene entonces un sistema realimentado de regulación de la velocidad de giro del rotor. Hallar valores óptimos para los parámetros del ángulo de ataque resulta por tanto difícil.

25 Tradicionalmente se han usado valores del ángulo de ataque de las palas del rotor obtenidos de antemano como valores de referencia para el funcionamiento de las instalaciones de energía eólica. Un inconveniente de este método es que depende mucho de la precisión del cálculo previo. Además este método es sensible a las desviaciones de las palas del rotor de su forma ideal, por ejemplo, por las tolerancias de fabricación que no se pueden evitar. En conjunto este método no consigue resultados satisfactorios. Además también se conoce por divulgación no inocua efectuar mediciones durante intervalos de tiempo largos en la instalación de energía eólica y derivar a partir de éstas los valores de corrección correspondientes. Los inconvenientes mencionados se evitan así aunque este método supone mucho tiempo y dinero.

30 Además se conoce (documento DE-A-10127451) que con ayuda de un temporizador se hagan variaciones de los parámetros por turnos. El procedimiento se basa en la idea de variar un parámetro dentro de unos límites prefijados hasta que se encuentre un valor óptimo. Un inconveniente de este método es que es susceptible de encontrar un valor óptimo local. Existe el riesgo de que el óptimo global no se descubra. Además el método presenta el inconveniente de que no se pueden distinguir entre las variaciones estocásticas de la intensidad y dirección del viento y las mejoras que se consiguen con la configuración de parámetros modificada. Por este motivo este método no siempre da resultados satisfactorios.

35 Es un objetivo de la invención mejorar un procedimiento del tipo mencionado en la introducción para que se consiga una buena optimización para unas condiciones dificultadas por las variaciones estocásticas. La solución de acuerdo con la invención se recoge en las características de las reivindicaciones independientes. Perfeccionamientos ventajosos son el objeto de las reivindicaciones dependientes.

40 De acuerdo con la invención en un procedimiento de optimización de parámetros de funcionamiento de una instalación de energía eólica, en particular relativos al sistema rotor/generador, está previsto un ciclo en el que, se determinan los valores límites superior e inferior de un intervalo de valores de un parámetro de optimización, la instalación de energía eólica se hace funcionar alternativamente para cada valor límites del intervalo de valores generándose respectivamente un conjunto de datos con una magnitud objetivo, concretamente tras un número de repeticiones configurable; se evalúan los conjuntos de datos correspondientes a los valores límite del intervalo de valores construyendo una medida de calidad, se identifica el valor límite del intervalo de valores con el peor valor de calidad y se sustituye al menos este valor límite del intervalo de valores desplazándolo un valor incremental hacia el otro valor límite del intervalo de valores repitiéndose entonces el ciclo.

55 La invención se basa en la idea de utilizar un procedimiento iterativo de optimización de parámetros. La invención parte de la idea de que con un procedimiento iterativo con un número de muestras suficientemente grande se pueden suavizar las oscilaciones estocásticas de modo que en la práctica no repercutan negativamente en el resultado. Al contrario que en los procedimientos conocidos el procedimiento estadístico según la invención no se ve afectado negativamente por las magnitudes que varían estocásticamente como, por ejemplo, la velocidad y la dirección del viento. Por tanto, resulta muy bueno en su aplicación práctica también para condiciones adversas.

El procedimiento, en cuanto a su concepto, es de una sencillez muy atractiva; para comenzar sólo necesita dos valores límites de un intervalo de valores de los parámetros a optimizar. Partiendo de esto el procedimiento sigue autónomamente y es capaz de determinar el valor óptimo tanto si queda dentro de los límites del intervalo de valores o más allá de los valores límites del intervalo de valores. La invención lo consigue midiéndose y almacenándose el parámetro objetivo deseado que corresponda primero a un valor límite del intervalo de valores y luego al otro de forma alternativa. Esta alternancia se repite un número determinado de veces. Este número puede ser fijo de antemano o ser variable en función del parámetro y la calidad de la optimización que ya se ha alcanzado expresada por la medida de calidad. Además, los valores de la magnitud objetivo se evalúan respectivamente para los dos valores límite del intervalo de valores y para cada uno de los valores límites del intervalo de valores se construye una medida de la calidad dependiendo del resultado. La medida de la calidad es una referencia de la eficiencia con la que la instalación de energía eólica funciona para los valores límites del intervalo de valores respectivos. Se obtiene por comparación con cuál de los valores límites del intervalo se consigue la peor medida de calidad. El valor límite del intervalo de valores correspondiente es el peor y el otro el mejor. El procedimiento prevé que el valor límite del intervalo de valores que es peor se sustituya por otro valor que se ve modificado por un valor  $\Delta$  incremental configurable, hacia el otro valor límite del intervalo de valores. La secuencia se repite entonces para el intervalo cuyos límites se han modificado. De esta forma finalmente cuando se llega al final se puede obtener el valor óptimo del parámetro. Preferentemente este parámetro es el ángulo de ataque de las palas del rotor, concretamente común para todas ellas o diferente para cada pala del rotor particular. El procedimiento según la invención tiene la ventaja de que autónomamente obtiene un valor óptimo de la configuración de las palas del rotor. Gracias a la invención no se necesita medir la velocidad del viento para calcular el ángulo de ataque óptimo. Tampoco hace falta ya medir otros parámetros relativos a las características del viento (o sí lo son pero sólo hace falta una precisión menor). El procedimiento según la invención posibilita una optimización que la hace independiente de la medición de los parámetros del viento. Así las imprecisiones como las que surgen habitualmente en gran medida a la hora de medir los parámetros del viento (o que pueden evitarse pero sólo aplicado unas medidas adicionales costosas) no repercuten negativamente en el funcionamiento de la instalación de energía eólica. Esto tiene importancia en particular para un conjunto comparativamente compacto de instalaciones de energía eólica en un espacio como típicamente el de un parque eólico. En estos, debido a las instalaciones de energía eólica vecinas, típicamente se ven afectadas negativamente las medidas de los parámetros del viento, como la velocidad y dirección del viento. El funcionamiento óptimo de la instalación de energía eólica casi no resulta posible. La invención se basa en la asombrosa idea de que no hace falta en absoluto medir estos parámetros. En lugar de esto con el procedimiento según la invención con las condiciones de viento que en su caso se den, independientemente de la dirección y la intensidad, se obtiene el ángulo de ataque óptimo. Aunque el número grande de muestras o iteraciones pueda derivar en que el tiempo necesario para la ejecución del procedimiento sea mayor, para un procedimiento automático, como la invención prevé, no juega un papel importante.

Gracias a la invención se consigue un mejor aprovechamiento de la instalación de energía eólica. Se consigue reducir así las pérdidas de rendimiento productivo debido a una elección no óptima del parámetro a optimizar.

A continuación se explicarán algunos conceptos utilizados. Por parámetro se entiende un coeficiente que influye en el comportamiento del sistema. Se puede tratar de un parámetro del sistema mecánico o eléctrico o de uno de los sistemas de control.

La magnitud objetivo a optimizar es una variable del sistema. Es el resultado de otras variables y parámetros. Ejemplos magnitudes objetivo son, entre otras, la potencia eléctrica de salida, el nivel de ruido que se emite, la carga de la estructura de la máquina a flexión y/o por las cargas vibratorias así como magnitudes de compatibilidad con la red, en particular, las fluctuaciones (flicker). La magnitud objetivo no tiene que ser forzosamente un valor escalar, puede ser también una magnitud vectorial compuesta de varias magnitudes.

Los valores límites del intervalo de valores se pueden fijar directamente al principio del procedimiento. También resulta posible calcular los valores límite del intervalo de valores concretamente a partir de un valor de funcionamiento  $\alpha_B$  y un valor de dispersión [runaway]  $\alpha_{off}$ . El segundo hace posible su sencilla integración en un sistema de control de funcionamiento que ya exista. Los parámetros determinados de forma tradicional por el sistema de control se tomarán en cada caso como valor inicial para el valor de funcionamiento ( $\alpha_B$ ). Entonces no hace falta determinar aparte un valor adecuado para comenzar el procedimiento según la invención.

Por lo general resultará que al final de un ciclo se modificarán ambos valores límite del intervalo de valores. Preferentemente esto se hace modificando el valor de funcionamiento ( $\alpha_B$ ). También puede estar previsto que adicionalmente el intervalo se reduzca. Se hace entonces una modificación del valor límite del intervalo de valores que es mejor en una cantidad más pequeña, concretamente la diferencia es el valor contracción  $\delta$ . Así se reduce el intervalo ciclo a ciclo sucesivamente hasta que al final el procedimiento según la invención converja a un valor óptimo. Además puede estar previsto que el valor de contracción sea negativo. Entonces, el intervalo encerrado por los valores límite del intervalo de valores se expande. Esto puede ser ventajoso al comienzo de la optimización cuando se tenga que sondear rápidamente un intervalo bastante grande.

Convenientemente el ciclo se va repitiendo un número veces hasta que se alcance un criterio de parada  $\epsilon$  prefijado.  $\epsilon$  representa convenientemente la diferencia de calidad. Si esta cantidad es suficientemente pequeña el procedimiento de optimización se puede detener. No resulta siempre necesario, sin embargo, que la calidad sea el

criterio de parada a adoptar. Puede estar previsto también que el ciclo se repita hasta que los valores límites del intervalo se diferencien en un valor  $\epsilon'$ .

5 Convenientemente el valor incremental  $\Delta o$ , en su caso, el valor de contracción  $\delta$  se determina mediante un predictor. Esto tiene la ventaja, con respecto a un valor fijo predeterminado que gracias al predictor se puede conseguir habitualmente una convergencia más rápida del procedimiento según la invención hacia el valor óptimo. Como predictor se pueden utilizar procedimientos de optimización comúnmente conocidos, por ejemplo, algoritmos genéricos.

10 En una forma de realización que ha dado buen resultado la medida de calidad se calcula haciendo una suma. Esta es una evaluación o construcción de la calidad que resulta eficiente al calcularla y particularmente sencilla. Si hubiera que considerar el número de datos utilizados también puede estar previsto calcular un valor medio. El valor medio hay que entenderlo ampliamente, el concepto comprende, además de la media aritmética, otros métodos de cálculo como, por ejemplo, la media geométrica. Se entiende que también pueden estar previstos procedimientos estadísticos más complejos en particular, aquellos en los que se hace una ponderación de los datos a lo largo de un intervalo de tiempo que se puede predeterminar (por ejemplo, mediante una ventana rectangular o una ventana de Hamming).

15 Es habitual que sólo haya que optimizar una magnitud objetivo. Puede ser también que se tengan que optimizar varias magnitudes objetivo. En este caso el valor de calidad se construye convenientemente multidimensionalmente. Preferentemente esto se hace con un vector.

20 Un parámetro de la optimización es preferentemente el ángulo de ataque de la pala del rotor y la magnitud objetivo es la potencia eléctrica de salida. Como se ha mencionado en la introducción, el ángulo de ataque de las palas es un criterio importante de la eficiencia de la captura de energía mecánica para impulsar el generador a partir de la energía del viento. Por tanto, resulta especialmente determinante para la potencia eléctrica generada y por tanto para el rendimiento de la instalación de energía eólica. Por otro lado también resulta que el ángulo de ataque queda determinado por las condiciones de flujo entre el viento aparente y la pala concreta del rotor quedando determinado el viento aparente a su vez por el viento real y la velocidad de giro del rotor. La velocidad de giro del rotor a su vez queda determinada fundamentalmente por el ángulo de ataque. Resulta entonces una situación de realimentación en la que el procedimiento de optimización según la invención se puede utilizar de forma particularmente ventajosa.

25 Se entiende que el procedimiento se puede adoptar para otros parámetros. Por ejemplo, se puede usar como parámetro la curva característica de par del generador. Ésta tiene también un efecto determinante sobre la velocidad de giro del rotor y por tanto también sobre el ángulo de ataque de la pala. Otros parámetros convenientes son los parámetros del viento como el desplazamiento de la paleta catavientos para determinar inexactitudes o formación de torbellinos en la zona alrededor de la paleta catavientos de la instalación de energía eólica. Con el procedimiento según la invención también se pueden optimizar otros parámetros como los parámetros de regulación de los sistemas de regulación de la instalación de energía eólica (por ejemplo, los reguladores PID) o parámetros de un sistema de control de un convertidor de la instalación de energía eólica (por ejemplo, la varianza de la potencia, el "flicker" de la red o las sobreoscilaciones).

30 Ha dado buen resultado utilizar no sólo una magnitud objetivo sino varias magnitudes objetivo. Si, por ejemplo, una magnitud a optimizar es, por ejemplo, la potencia eléctrica de salida, preferentemente, como magnitud de salida adicional puede estar prevista una medida de la carga estructural, por ejemplo, de las palas del rotor así como la emisión de ruido, en su caso adicionalmente también un parámetro de la carga de la máquina (damage equivalence load).

La invención se refiere además a una instalación de energía eólica como la que se indica en la reivindicación 14.

La invención se expondrá más en detalle en referencia a los ejemplos de realización representados en los dibujos. Muestran:

- 45 la figura 1 una vista de conjunto de una instalación de energía eólica para realizar el procedimiento según la invención
- la figura 2: una vista parcial del rotor de la instalación energía eólica representada en la figura 1
- la figura 3: un diagrama de bloques esquemático de la instalación de energía eólica representada en la figura 1
- la figura 4: un procedimiento general del procedimiento de optimización según la invención
- 50 la figura 5: un plan de secuencia de acuerdo con un ejemplo de realización del procedimiento de optimización según la invención
- la figura 6: una vista detallada de una variante del procedimiento representado en la figura 5 y
- la figura 7: una vista detallada de otra variante del procedimiento representado en la figura 5

Una instalación de energía eólica prevista para la ejecución del procedimiento según la invención comprende una estructura de soporte que como torre 1 con una carcasa 2 de máquinas colocada encima. En ésta están dispuestas la mayoría de los componentes fundamentales de la instalación energía eólica.

En el frente de la carcasa 2 de máquinas está dispuesto un rotor 3 para que pueda girar gracias a un eje 50 de rotor. A través de éste eje 50 de rotor el rotor 3 impulsa, en su caso, a través de un mecanismo de transmisión, el generador 5 dispuesto en la carcasa 2 de máquinas. El generador 5 puede ser de varios tipos constructivos, se puede tratar de un generador de corriente continua alterna o trifásica. Además se puede tratar de una máquina síncrona o de una máquina asíncrona con alimentación simple o doble. Preferentemente el generador 5 es una máquina asíncrona doblemente alimentada. El generador 5 está conectado a través de un convertidor 7 y a través de unas líneas de conexión, que no se representan más en detalle, con una red 9 de suministro eléctrico. Además esta previsto un sistema 6 de control que controla el funcionamiento de la instalación de energía eólica. Está previsto un sistema 23 de medición para determinar la potencia eléctrica de salida. La potencia eléctrica de salida es, preferentemente, la potencia P activa puesto que es mejor que la potencia reactiva o la potencia aparente como medida de la potencia que de verdad se extrae de la instalación de energía eólica. Además puede estar previsto también que en lugar de la potencia se use la energía eléctrica de salida. Esto tiene la ventaja de que al hacer las mediciones para intervalos de tiempo grandes se está haciendo de forma automática una integración. Convenientemente, para esto se puede recurrir al contador que ya hay en cualquier caso en la instalación de energía eólica para medir la energía de salida (contador de kilovatios-hora). Así no sólo se ahorra un sensor aparte sino que también se hace una integración automática de la señal de potencia reduciéndose el ruido no deseado de la señal de medida. También se pueden adoptar otros parámetros que sean una medida de la energía o potencia producida por el sistema rotor/generador o la potencia. Se contemplan en este caso, en particular, el par eléctrico producido por el generador o el par mecánico entregado por el rotor que en función del intervalo de funcionamiento se puede adoptar, con o sin análisis de la velocidad de giro, para obtener una medida de eficiencia.

La estructura del sistema 6 de control está representada esquemáticamente en la figura 3. El sistema 23 de medición de la potencia eléctrica de salida está conectado a un convertidor 61 analógico/digital. Está diseñado para convertir, a intervalos regulares de tiempo configurables, la señal entregada por sistema 23 de medición en datos de un conjunto de datos. El conjunto de datos se le pasará a una unidad 60 central por una línea de conexión. La unidad 60 central presenta un microprocesador 62 para ejecutar los programas de funcionamiento de control necesarios para el funcionamiento de la instalación de energía eólica. Además a la unidad 60 central está conectada una memoria 64. A las salidas de la unidad 60 central están conectados el generador 5 y el convertidor 7. Además, a una salida de la unidad 60 de control está conectado el sistema 4 de ajuste del ángulo de las palas. Se expondrá más en detalle a continuación.

El sistema 4 de ajuste del ángulo de las palas sirve para ajustar el ángulo  $\alpha$  de ataque de las palas 31 del rotor. Como se representa en la figura 2 el ángulo  $\alpha$  es el que queda comprendido entre la cuerda 39 de perfil representativa de la pala 31 del rotor y el plano de giro del rotor cuya dirección normal queda determinada por el eje 50 del rotor. En la figura 2 se muestra una vista del extremo 32 de una de las palas 31 del rotor representadas en la figura 3. La cuerda 39 del perfil conecta el borde 35 de la punta que está en la parte delantera con el borde 34 trasero de la pala 31 del rotor. La pala del rotor 31 está anclada al morro 4 por la raíz 33 de la pala. La pala 31 del rotor se retuerce y la cuerda del perfil va formando un ángulo de ataque cada vez mayor a medida que se va desde la punta 32 de la pala hacia la raíz 33 de la pala. La raíz 33 de la pala tiene un diseño en la zona del morro 4 que es preferentemente circular de modo que la pala 31 del rotor se puede girar alrededor del centro del círculo. El sistema 4 de ajuste de la pala comprende un motor 40 dispuesto en la punta del morro 4 en cuyo eje de transmisión de potencia está dispuesto un mecanismo de transmisión de ejes en ángulo que comprende una rueda 41 dentada grande y un piñón 42. El piñón 42 engrana en la dentadura perimetral asociada a la raíz 33 de la pala. Así se consigue que al poner en marcha el motor 40 se pueda girar la pala 31 del rotor como se simboliza con la doble flecha 49 representada en la figura 2.

Se expondrá ahora la secuencia del procedimiento según la invención. Se hará referencia a la figura 4a. Al inicio del procedimiento se inicializa la instalación de energía eólica. Esto significa que se establecen los valores límites del intervalo de valores, los datos antiguos se borran de la memoria y en cuanto a lo demás la instalación de energía eólica se prepara de forma comúnmente conocida. Para la invención otros pasos adicionales de la inicialización son: poner en marcha el temporizador t y determinar el valor  $\alpha_B$  de funcionamiento de un parámetro a optimizar para usarlo como valor inicial con el que se inicia el funcionamiento. Este valor se puede determinar de forma comúnmente conocida como se haría para una instalación de energía eólica sin el procedimiento según la invención. Después de la inicialización puede empezar el procedimiento 104 de optimización según la invención.

Ahora se hará referencia a la figura 5. Partiendo del valor  $\alpha_B$  de funcionamiento, en un primer paso se establecen respectivamente unos valores  $\alpha_U$ ,  $\alpha_L$  límite superior e inferior del intervalo de valores sumándose o restándose al valor  $\alpha_B$  de funcionamiento un valor  $\alpha_{OFF}$  de dispersión. Un contador i de muestras aleatorias se pone a cero. Entonces al principio de un ciclo se ajusta uno de los valores límites del intervalo de valores, en el ejemplo de realización representado, el valor límite del intervalo de valores,  $\alpha_L$  (paso 112). Las palas 31 del rotor se posicionan mediante el sistema de ajuste a un primer valor  $\alpha(i) = \alpha_L$ . Con este ángulo de ataque se hace funcionar la instalación de energía eólica (paso 114). El sistema 6 de control registra, mediante un sistema 23 de medición, la energía eléctrica de salida y en su caso otros parámetros durante un intervalo de tiempo determinado. El vector de medidas

$Z(\alpha_L)$ , tras la conversión A/D (en la medida en que sea necesario) se almacena como conjunto  $D_L(i)$  de datos en la memoria 64 (paso 116). En el siguiente paso 118 se modifica el ángulo  $\alpha(i)$  de ataque poniéndolo al valor  $\alpha_U$  límite superior del intervalo de valores y la instalación de energía eólica sigue funcionando con este ángulo de ataque modificado (paso 120). Como se ha hecho ya antes a partir de los datos del sistema 23 de medición y en su caso de otros parámetros se forma un vector de medida y se almacena en la memoria (64) concretamente como conjunto de datos del valor  $D_U(i)$  superior (paso 122). Así se termina una extracción de muestra aleatoria con un funcionamiento alternativo de la instalación de energía eólica con los valores límite superior e inferior del intervalo de valores. Ahora y para terminar se aumenta el valor del contador de muestras aleatorias (paso 124). Si el número de muestras aleatorias extraídas queda por debajo de un valor  $n$  límite configurable se seguirán extrayendo muestras aleatorias a partir del paso 112 hasta que su número sea igual al valor  $n$  configurable (paso 126). Los valores de  $n$  están, por ejemplo, en el intervalo entre 100 y 100000, en particular, ha dado buen resultado un intervalo entre 1000 y 10000. Preferentemente el número se puede modificar, por ejemplo, en función de la varianza de los parámetros contenidos en los conjuntos de datos. El intervalo temporal durante el que se hace el muestreo aleatorio se elige convenientemente en función del parámetro considerado. En el ejemplo de realización representado, para el ángulo  $\alpha$  de ataque, la duración del intervalo está convenientemente entre 10 y 120 segundos. Para una curva característica de par como parámetro la duración del intervalo está convenientemente entre 30 segundos y 10 minutos y para parámetros de regulación convenientemente entre 10 segundos y 10 minutos. Para magnitudes más dinámicas como, por ejemplo, los parámetros del convertidor se prefiere una duración del intervalo más corta, por ejemplo entre 10 ms segundos y 30 segundos. La base de elegir estos intervalos de tiempo es la idea de hacerlos preferentemente tan largos que se eliminen los efectos no estacionarios, por ejemplo, aquellos debidos a la inercia del flujo de aire (dynamic wake).

Al terminar el procedimiento de extracción de muestras aleatorias con el paso 128 empieza el proceso de evaluación. Los conjuntos de datos contenidos en la memoria (64) correspondientes al ángulo  $D_L(i)$ ,  $D_U(i)$  de ataque menor y mayor se consultan y se evalúan para todo (i) desde 0 a  $n-1$ . La evaluación se puede referir a todos los elementos del conjunto de datos o sólo a una parte de ellos. En el primer caso se asocia a los elementos individuales convenientemente, mediante coeficientes de ponderación, una magnitud escalar. En el segundo caso se puede calcular directamente a partir de su valor. La medida de calidad puede ser una función no lineal compleja de varios parámetros. Puede estar prevista también una medida de calidad simple para cuya construcción no haga falta recurrir a valores individuales almacenados. Ésta medida de calidad tiene la ventaja de que se puede construir permanentemente durante el ciclo de extracción de muestras aleatorias que se esté haciendo. Los valores medidos se procesan directamente para construir el valor de calidad. Esto tiene la ventaja de que no es necesario almacenar los valores medidos. Un ejemplo de una medida de calidad así es calcular la suma, por ejemplo, de la energía suministrada por la instalación de energía eólica a la red durante un ciclo en el que se haga funcionar en el intervalo del valor óptimo de la razón de la velocidad de punta. Los valores de energía se suman por separado para cada valor límite del intervalo de valores, lo que se puede hacer permanentemente durante la medición de modo que no sea necesario el almacenamiento. Para determinar si la instalación de energía eólica durante la extracción de muestras aleatorias de verdad está funcionando en el intervalo del valor óptimo de la razón de la velocidad de punta está previsto convenientemente un detector 22 de funcionamiento. Está diseñado para que a partir de la velocidad de giro del rotor 3 determine si la instalación está funcionando en este intervalo. Convenientemente el detector 22 es un conmutador de valor umbral con un valor límite inferior de velocidad de giro y un valor límite superior de velocidad de giro entre los que está el intervalo del valor óptimo de la razón de la velocidad de punta. No hace falta que el detector 22 utilice sin excepción la velocidad de giro como señal de entrada, puede adoptar también la potencia eléctrica de salida de la instalación de energía eólica para determinarlo. A menudo puede ocurrir también que la señal de estado correspondiente del modo el funcionamiento ya exista en el sistema 6 de control de la máquina. Entonces resulta suficiente con leer esta señal. No hacen falta entonces sensores aparte. Con el detector 22 se garantiza que para las muestras aleatorias del procedimiento estadístico sólo se tomen los valores de medición para los que la instalación de energía eólica funcionaba en el intervalo del valor óptimo de la razón de la velocidad de punta. Si éste no fuera el caso la muestra aleatoria no es válida y no se puede usar. Se desechará y se repetirá la extracción de muestras aleatorias.

Resultan posibles otras simplificaciones del procedimiento según la invención. Así el sistema 23 de medición, el convertidor 61 A/D y la memoria 64 no tienen que estar previstos obligatoriamente. A menudo la medida de la cantidad electromagnética y eventualmente los otros parámetros utilizados están disponibles de la instalación de control de funcionamiento de la instalación de energía eólica, concretamente, en muchos casos, también su valor medio. Se puede prescindir entonces de una medición y memoria aparte. Los parámetros se pueden seguir procesando directamente de acuerdo con el procedimiento según la invención

Al final del paso 128 los valores  $G_U$ ,  $G_L$  proporcionan la calidad de ambos valores límites del intervalo de valores. En el subsiguiente paso 130 se comprueba si ambos valores  $G_U$ ,  $G_L$  de calidad son iguales (con una tolerancia  $\epsilon$ ) o no. En caso de desigualdad se comprueba a qué valor límite del intervalo de valores le corresponde el mejor valor de calidad. Si el valor límite superior del intervalo de valores consigue el mejor valor de calidad el valor  $\alpha_B$  de funcionamiento se aumenta en un valor  $\Delta$  incremental (paso 134). Si el valor límite inferior del intervalo de valores tiene el mejor valor de calidad el incremento el valor  $\alpha_B$  de funcionamiento se reduce en un valor  $\Delta$  incremental (paso 136). El procedimiento salta 137 entonces al paso 110 y comienza de nuevo continuando hasta que finalmente se obtenga un valor óptimo. Esto se determina al comparar ambos valores de calidad en el paso 132. En el caso

positivo el procedimiento de optimización ha cumplido su objetivo y se pasa al funcionamiento 138 de regulación. El procedimiento de optimización llega así a su final. La secuencia posterior es entonces como la representada en la figura 4a.

5 Volviendo ahora a la figura 4a se hará funcionar la instalación de energía eólica con el valor óptimo obtenido así (paso 108). Esto continuará (retorno 109 al principio de bucle) hasta que haya transcurrido un tiempo  $t_w$  de repetición que se puede ajustar (paso 106). Se salta (107) a continuación de vuelta al procedimiento de optimización (104) que se ejecuta otra vez. La espera hasta que haya pasado un tiempo de repetición, paso 106, no tiene por qué ser el único criterio que produzca una repetición del procedimiento de optimización según la invención. Alternativamente o adicionalmente pueden estar previstos otros criterios (véase figura 4b). Por ejemplo, en la figura 10 4b está representada una instrucción adicional (paso 106') según la que se comprueban adicionalmente los cambios significativos de uno de los parámetros utilizados, por ejemplo, de la potencia eléctrica. Si se supera un valor  $\mu$  límite configurable se ejecuta el salto 107 aunque el tiempo de repetición aun no haya transcurrido.

15 La invención no está limitada al ejemplo de realización representado en la figura 5. Resultan concebibles distintas variantes del procedimiento de optimización según invención. Así, en la figura 6, se representan dos variantes independientes. La primera se refiere a un cambio del valor límite del intervalo de valores al iterar. Al contrario que en el paso 134, en el paso 134' no se cambia el valor  $\alpha_B$  de funcionamiento y con él ambos valores límites del intervalo de valores sino que se establecen directamente nuevos valores límites del intervalo de valores que son mayores en la cantidad del valor  $\Delta$  incremental. La segunda variante se refiere a una modificación del tamaño del intervalo. Esto se puede hacer, por ejemplo, de la forma representada en el paso 134'. El valor  $\alpha_L$  límite inferior del 20 intervalo de valores se modifica invariablemente en la cantidad del valor  $\Delta$  incremental. El valor  $\alpha_U$  superior del intervalo de valores no se aumenta en la misma cantidad, sino que la cantidad es menor en un valor  $\delta$  de contracción. El valor de contracción también puede tener el mismo valor que  $\Delta$ , es decir, el valor límite superior del intervalo de valores no resultaría modificado. Así se consigue una reducción del intervalo determinado por ambos valores iniciales en una cantidad que es la del valor  $\delta$  de contracción de modo que el procedimiento según la 25 invención converge más rápido. Análogamente, en el paso 135' el valor límite superior del intervalo de valores se disminuye invariablemente en una cantidad  $\Delta$  mientras que el valor  $\alpha_L$  límite inferior sólo se disminuye en una cantidad  $\Delta - \delta$ . Se entiende que en esta variante, en el paso 110, no se volverán a inicializar los valores límites del intervalo de valores. En consonancia, puede estar también previsto disminuir el valor  $\alpha_{OFF}$  de dispersión en una cantidad que sea la mitad del valor de contracción,  $\delta/2$ . Así resulta también una contracción del intervalo en una 30 cantidad igual al valor  $\delta$  de contracción.

Para determinar el valor  $\Delta$  incremental y en su caso  $\delta$  se utiliza preferentemente un predictor. Como se representa en la figura 7, para esto, en el paso 131 se calculan dos funciones  $\Phi$ ,  $\Psi$  de predictor en base a los valores obtenidos de calidad así como a los valores límites del intervalo de valores incluyendo entre ellos, en su caso, los conjuntos de 35 datos contenidos en la memoria 64. Con ayuda de las funciones de predictor se pueden ajustar el valor  $\Delta$  incremental y el valor  $\delta$  de contracción a las eventualidades respectivas. Además puede estar previsto determinar el valor  $\Delta$  incremental y el valor  $\delta$  de contracción en base a curvas características o a tablas de consulta en lugar de en base a predictores. Esto tiene la ventaja de que se pueden tener en cuenta los valores experimentales para elegir el valor  $\Delta$  incremental y el valor  $\delta$  de contracción al principio y al final del procedimiento de optimización según la invención. Además ofrece la ventaja de un cálculo más sencillo. Así, en su caso, al comienzo del procedimiento se 40 puede trabajar con unos valores incrementales más grandes para conseguir una convergencia más rápida, mientras que después se puede trabajar con unos valores más pequeños para conseguir una mayor precisión.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de optimización de parámetros de funcionamiento de una instalación de energía eólica en particular relativos al sistema rotor/generador determinándose (110) un valor límite superior e inferior de un intervalo de valores de un parámetro de optimización
- 5 **caracterizado por** un ciclo (112, 114, 118, 120) de funcionamientos alternativos de la instalación de energía eólica para cada valor límite del intervalo de valores generándose (116, 122) respectivamente un conjunto de datos de una magnitud objetivo concretamente tras un número de repeticiones (126) configurable;
- 10 se evalúan los conjuntos de datos correspondientes a los valores límite del intervalo de valores construyendo una medida de calidad, se identifica el valor límite del intervalo de valores con el peor valor de calidad (130) y se sustituye al menos este valor límite del intervalo de valores desplazándolo un valor incremental  $\Delta$  hacia el otro valor límite (134, 136) del intervalo de valores, repitiéndose entonces el ciclo (137).
- 15 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** los valores límite del intervalo de valores se predeterminan directamente.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** los valores límite del intervalo de valores están determinados por un valor ( $\alpha_B$ ) de funcionamiento y un valor ( $\alpha_{OFF}$ ) de dispersión.
- 20 4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3 **caracterizado porque** para modificar al menos el peor valor límite del intervalo de valores se modifica el valor ( $\alpha_B$ ) de funcionamiento en un valor  $\Delta$  incremental.
5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4 **caracterizado porque** la diferencia de los valores límite del intervalo de valores se reduce en un valor  $\delta$  de contracción, preferentemente disminuyendo el valor ( $\alpha_{OFF}$ ) de dispersión.
- 25 6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5 **caracterizado porque** la repetición del ciclo se ejecuta hasta que se cumpla un criterio ( $\epsilon$ ) de terminación configurable (130).
7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5 **caracterizado porque** la repetición del ciclo se ejecuta hasta que la diferencia de los valores límite del intervalo de valores sea ( $\epsilon'$ ).
8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3 ó 4 **caracterizado porque** se utiliza un predictor para determinar el valor  $\Delta$  incremental y en su caso el valor  $\delta$  de contracción (131).
- 30 9. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores **caracterizado porque** la calidad estadística se calcula (128) haciendo una suma.
10. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores **caracterizado porque** el conjunto de datos contiene varias magnitudes objetivo y se construye un valor de calidad multidimensional.
- 35 11. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores **caracterizado porque** el parámetro es el ángulo de ataque de la pala del rotor y la magnitud objetivo la energía o la potencia eléctrica de salida.
12. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 11 **caracterizado porque** el parámetro es una curva característica de par.
13. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 10 a 12 **caracterizado porque** como magnitud objetivo se usa adicionalmente la carga estructural y/o la emisión de ruido.
- 40 14. Instalación de energía eólica con una carcasa (2) de máquinas dispuesta sobre una estructura (1) de soporte y un rotor (3) dispuesto en el frente que puede girar, un generador (5) impulsado por éste para suministrar energía eléctrica a través de un convertidor (7) y un sistema (6) de control que tiene un microprocesador (60) y un sistema (64) de memoria así como un sistema (23) de medición **caracterizado porque** el sistema (6) de control ejecuta el procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 13 mientras funciona la instalación.

Fig. 1

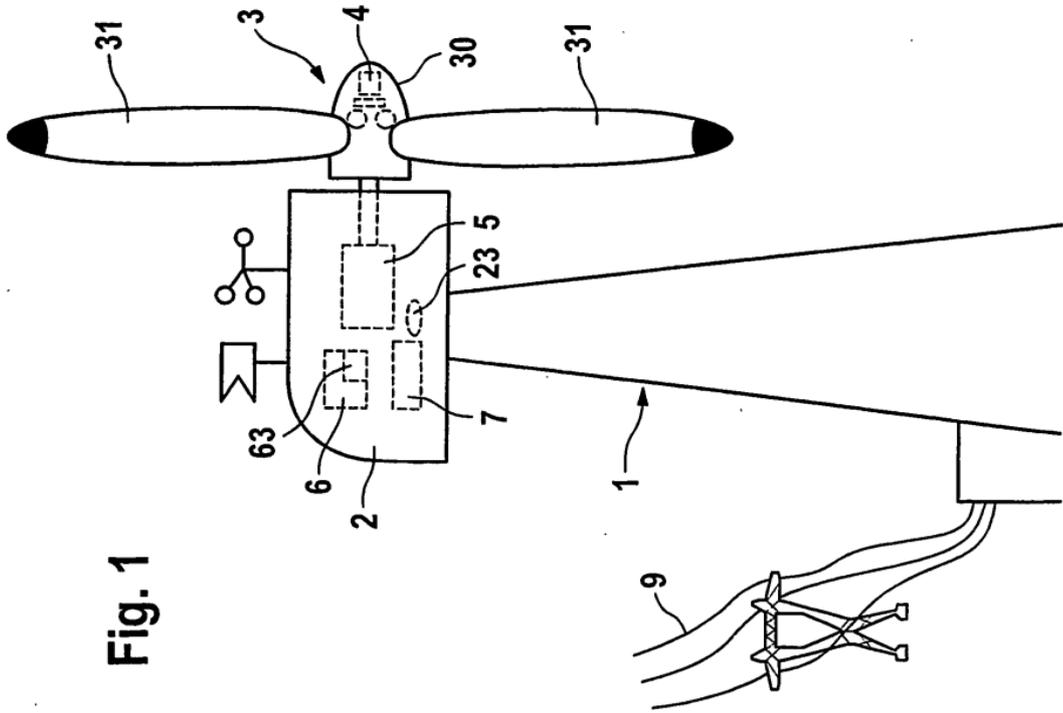
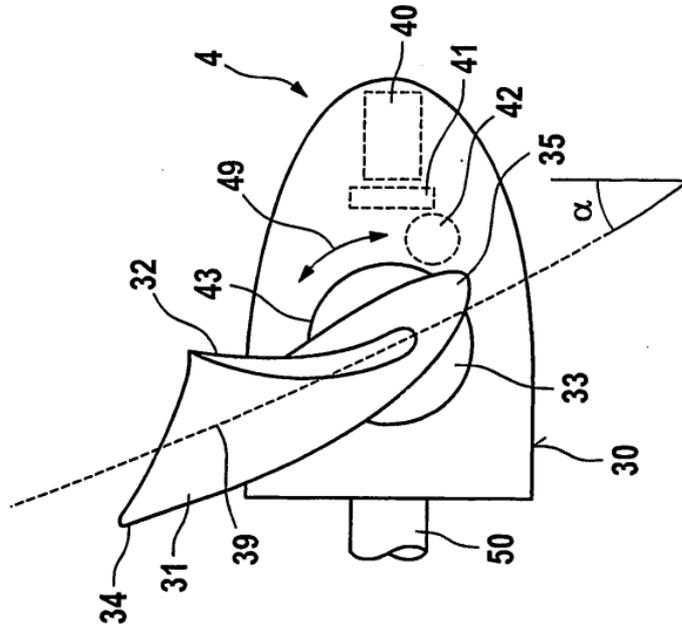


Fig. 2



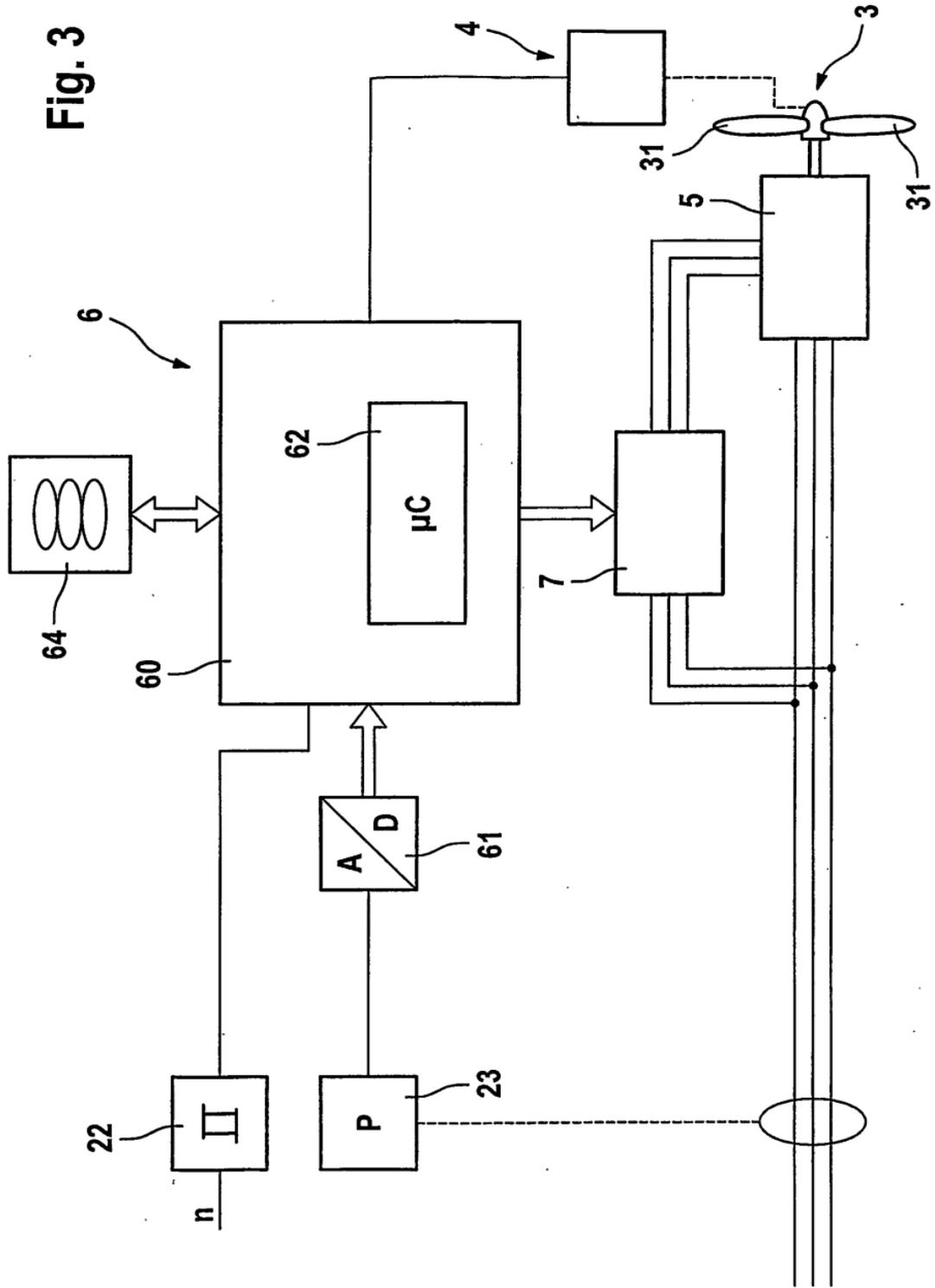
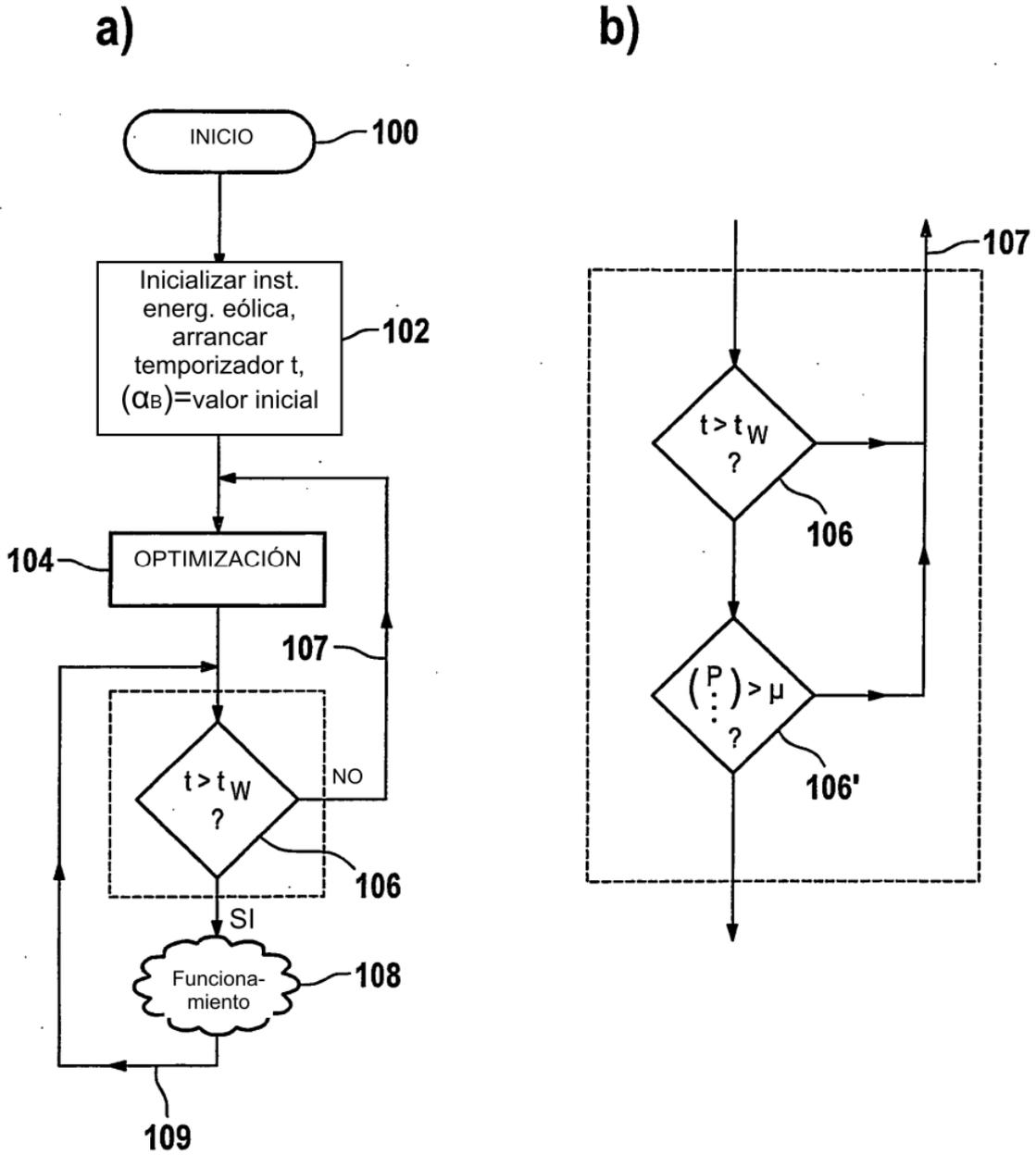


Fig. 4



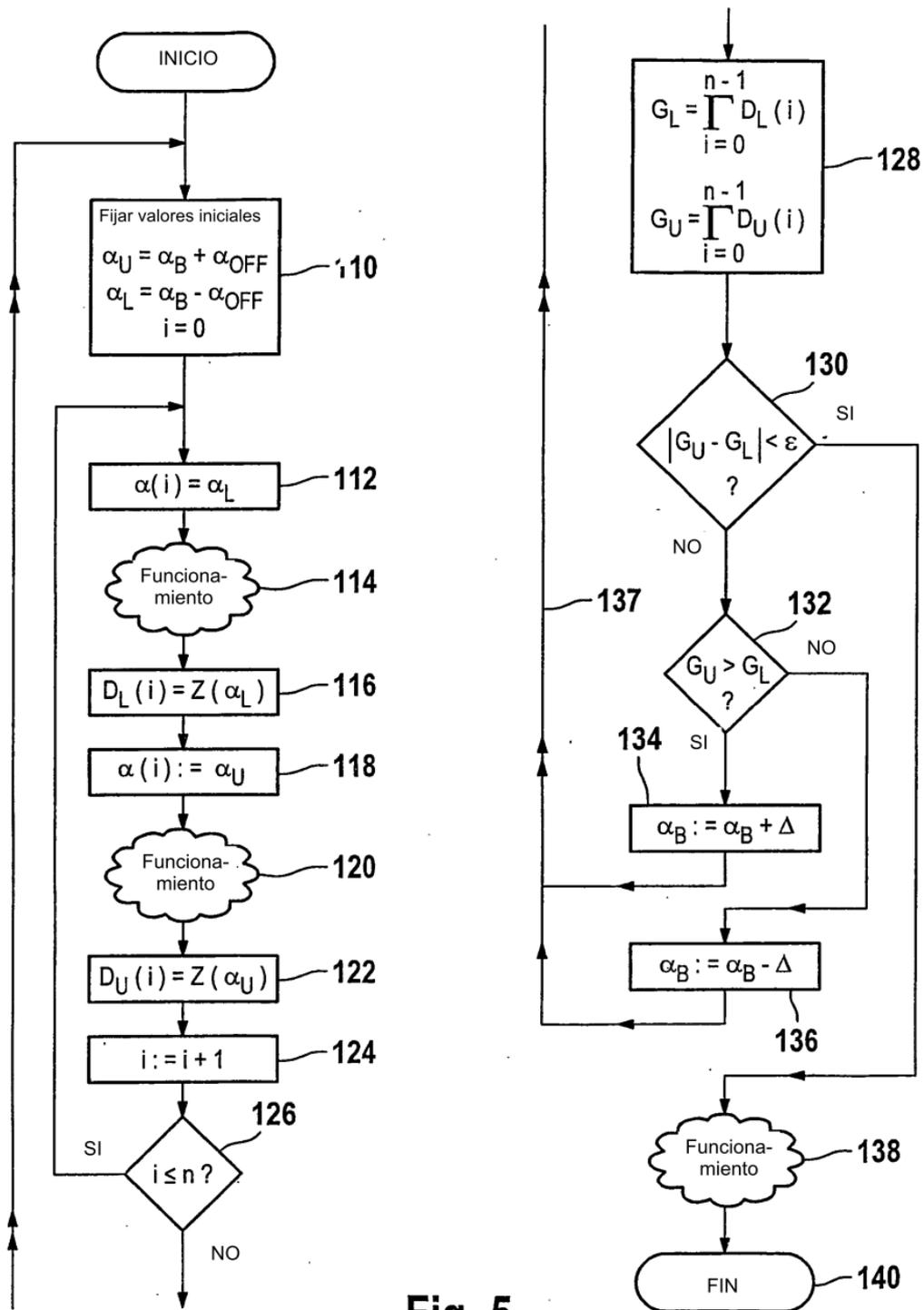


Fig. 5

Fig. 6

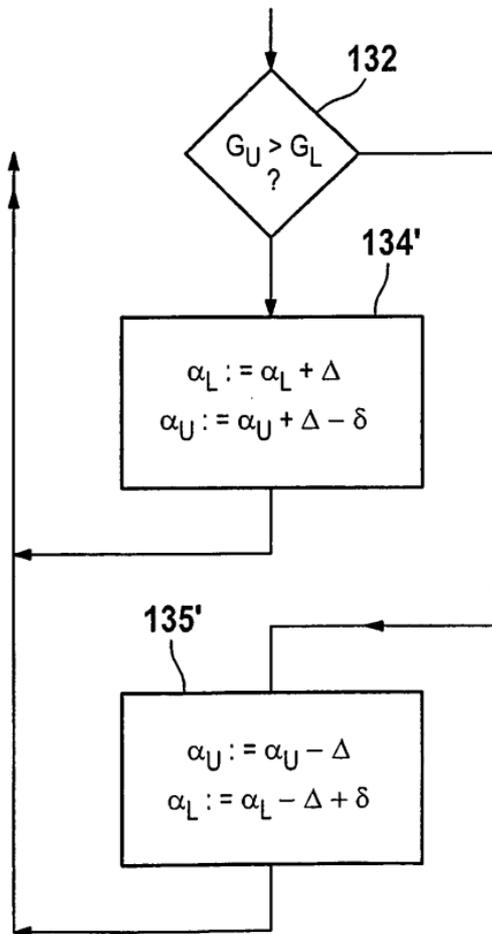


Fig. 7

