

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 734 703**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

**H02P 9/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.03.2015 E 15000676 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2019 EP 2918824**

54 Título: **Sistema de control de inercia para aerogeneradores**

30 Prioridad:

**11.03.2014 ES 201400192**

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

**11.12.2019**

73 Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY  
INNOVATION & TECHNOLOGY, S.L. (100.0%)  
Avenida de la Innovación 9-11  
31621 Sarriguren (Navarra), ES**

72 Inventor/es:

**JIMÉNEZ BUENDÍA FRANCISCO**

**ES 2 734 703 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 de control de inercia para aerogeneradores.

### 5 Objeto de la invención

La presente invención está relacionada con el control de la entrega de potencia de los parques eólicos a la red eléctrica y más concretamente con un sistema de control de inercia de un parque de aerogeneradores que comprende un controlador de inercia que define y comunica referencias a los aerogeneradores que forman parte de dicho parque eólico, y que proporciona el valor de una constante de inercia configurable en los aerogeneradores del parque.

### Antecedentes de la invención

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica que es transmitida a una subestación del parque de aerogeneradores. Dicho parque de aerogeneradores consta al menos de un controlador de parque y al menos de un aerogenerador que comprende un rotor, un generador conducido por dicho rotor, que interactúa con un convertidor de potencia para generar energía eléctrica, un controlador del aerogenerador que comprende un controlador del ángulo de paso de pala y un controlador de potencia generada, un controlador del convertidor de potencia que interactúa con el controlador del aerogenerador; y un sistema de regulación que coordina los diferentes controladores del aerogenerador en función de una serie de parámetros como la velocidad de giro de la turbina o la frecuencia de red.

La góndola en un aerogenerador normalmente aloja diferentes componentes junto con un eje de transmisión que convierte la energía mecánica en eléctrica mediante un generador que interactúa con un convertidor de potencia. Por eje de transmisión de un aerogenerador se entiende el ensamblaje entre el rotor, el eje del rotor, la multiplicadora, el eje del generador y el generador.

El controlador del aerogenerador tiene la misión de maximizar la generación de potencia activa hasta un límite máximo de potencia predefinido y mantener un modo de funcionamiento seguro que evite daños tanto personales como en el aerogenerador. Este controlador del aerogenerador define un ángulo de paso de pala, enviado al actuador de cambio de paso para mover las palas a su posición correcta, y un punto de referencia de potencia activa que supone una referencia para el controlador del convertidor ubicado en la unidad de control del convertidor.

Hoy en día, el impacto de la conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica es ineludible por lo que los operadores de red están endureciendo cada vez más las condiciones de conexión a red de los aerogeneradores. Algunos de estos requerimientos están definidos en términos de transitorios de frecuencia que los aerogeneradores deben ser capaces de soportar sin desconectarse de la red e incluso reaccionar y así ayudar al sistema a recuperar la frecuencia de red a sus valores nominales prefijados.

Particularmente, los operadores de los sistemas de transmisión están preocupados por los transitorios de frecuencia que generalmente son causados por la desconexión del generador, de cargas o incluso de parte del sistema de transmisión, lo que causa un repentino cambio de la frecuencia de red fuera de sus valores nominales, debido a la diferencia entre la potencia activa producida y la potencia activa consumida. Este cambio en la frecuencia, precisa de una muy rápida respuesta, de forma que se evite que la frecuencia salga de sus rangos máximos y se produzca una desconexión en cascada de generadores y consumidores eléctricos.

Hay diferentes niveles de respuesta en los generadores y la red para corregir la frecuencia de red, en el caso de una repentina caída o incremento de frecuencia. Una primera respuesta es una respuesta natural del generador convencional, que consiste en entregar una potencia instantánea debida a la energía rotacional almacenada en los ejes, a esto se le denomina respuesta inercial. Una segunda respuesta es la dada por un controlador específico que incrementa la generación de potencia proporcionalmente a la desviación de la frecuencia de red respecto de la frecuencia nominal, una respuesta requiere de unos 15 a 60 segundos, y permite detener la frecuencia en su ascenso/descenso. Sin embargo, esta respuesta, conocida como respuesta primaria, no permite retornar al valor de frecuencia nominal. La tercera y cuarta respuestas, son las denominadas respuestas secundarias o terciarias, se basan en gestionar la generación de potencia activa desde generadores, incluyendo el arranque de unidades de generación, que hasta ahora se encuentran detenidas con objeto de mover el valor de la frecuencia de red hasta el valor de frecuencia nominal.

En este sentido, en relación a la respuesta inercial, las plantas de potencia convencionales que usan máquinas síncronas como generadores, se encuentran rígidamente conectadas a la red, por lo que un cambio en la frecuencia se traduce directamente en un cambio proporcional de la velocidad de giro de la turbina. La inercia mecánica del generador síncrono juega un papel importante, ya que dicha inercia puede verse como una conversión de la energía cinética de una masa rotacional en energía eléctrica entregada a la red, ayudando a la red a reducir la caída/incremento de la frecuencia.

La conversión de energía cinética en eléctrica puede expresarse en generación de potencia activa, es decir, la energía rotacional es proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación de la turbina, que es proporcional a la frecuencia de red. Como la potencia es la cantidad de energía por unidad de tiempo, la potencia entregada, debido al cambio de la frecuencia, puede expresarse, mediante deducción matemática, como negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia.

Sin embargo, los aerogeneradores de velocidad variable no disponen de esta respuesta "natural" (respuesta inercial) a los cambios de la frecuencia de red, porque el controlador electrónico del convertidor desacopla la frecuencia de la velocidad de rotación del generador. Entonces, los aerogeneradores no reducen naturalmente su velocidad en relación a la frecuencia y no entregan esta energía moviendo el rotor. Los aerogeneradores de velocidad variable no amortiguan la caída/incremento de la frecuencia.

Dado que la energía eólica está comenzando a ser una parte importante del sistema eléctrico, la incapacidad de proporcionar una respuesta inercial conduce a una reducción de la inercia del sistema y, por lo tanto, a un incremento de las caídas/incrementos de frecuencia. En este sentido, se deben tomar medidas para evitar esta falta de respuesta inercial de los aerogeneradores, que puede conllevar a mayores problemas en la red eléctrica debidos a caídas/incrementos de frecuencia.

Los aerogeneradores con control de inercia pueden ayudar a suavizar los cambios de frecuencia y, por lo tanto, ayudar a restaurar la frecuencia del sistema y prevenir caída de carga después de una gran caída de la frecuencia. Para los aerogeneradores, la aproximación conceptual pasa por incrementar la potencia activa e introducirla en la red eléctrica de forma dinámica y rápida, en unos segundos, usando la inercia de las palas rotativas. En este sentido se han encontrado diversas aproximaciones en la literatura científica y de patentes.

El documento "Frequency behavior of grid with high penetration rate of wind generation" (J. Duval, B. Meyer; 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania) describe la adicción de una potencia inercial adicional a la referencia al convertidor, de la potencia activa del controlador del aerogenerador. Esta potencia activa

adicional es calculada como proporcionalmente negativa a la tasa de cambio de frecuencia, con un parámetro que define su proporcionalidad. Sin embargo, la entrega de potencia cae rápidamente después de esto. Sin embargo, la caída de potencia entregada se debe a dos factores: la deceleración del rotor del aerogenerador, que provoca un decremento de la referencia de potencia activa del controlador del aerogenerador, y a que el controlador del aerogenerador controla la potencia de acuerdo con la desviación de la velocidad de la turbina respecto de una velocidad de referencia. Como el aerogenerador se decelera y se desvía de la velocidad de referencia, la potencia debe ser reducida para recuperar la velocidad de referencia. Esto es lo que se denomina en términos de red como un "periodo de recuperación" después de la entrega de inercia e introduce incertidumbres en el comportamiento del parque de aerogeneradores en términos de respuesta frecuencial e, incluso, puede causar una caída no deseada de frecuencia después de esta respuesta inercial.

La patente WO2011/000531A2 y el documento "Variable Speed Wind Turbines Capability for Temporary Over-Production" (Tarnowski, G.C., Kjar, P.C., Sorensen, P.E., Ostergaard, J. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE) describen una solución similar a la mencionada anteriormente, diferenciada sólo en que la referencia de potencia activa del controlador del aerogenerador, que se entrega al convertidor, es fijada en un valor previo a los transitorios durante un tiempo predefinido que concuerde con la duración esperada de los transitorios de frecuencia. La potencia adicional es entonces calculada como negativamente proporcional a la tasa del cambio de frecuencia y proporcional a la desviación de la frecuencia con respecto a la frecuencia nominal y añadida a la potencia fijada. En este caso, como no se sigue la referencia del controlador, no hay una caída de potencia debida a la deceleración de la velocidad del aerogenerador. Sin embargo, durante el tiempo que la sobreproducción es entregada a la red, el aerogenerador se decelera hasta llegar al punto de mínima velocidad, la entrega de inercia es parada y el valor fijo de potencia liberado. Esto provoca una drástica caída de la producción, que se mantiene hasta que el aerogenerador vuelve a recuperar su velocidad inicial.

La patente WO2011/1124696 también se basa en incluir una potencia adicional a la referencia de potencia activa del controlador del aerogenerador, que puede calcularse tanto como proporcional a la desviación de la frecuencia como de cualquier otra manera. En este caso, mientras la velocidad de la potencia activa no se congela, la velocidad del controlador del aerogenerador es sin embargo adaptada, superando el problema asociado con la caída de potencia debido a que la deceleración de la velocidad del aerogenerador mediante la "producción de una señal de cambio de velocidad rotacional, teniendo en cuenta un momento de rotación inercial, y tomando esto como una señal de salida, que es añadida a la señal de velocidad rotacional nominal mediante un elemento lógico". Es decir, el cambio en la velocidad debido a calcular esta potencia adicional, teniendo en cuenta el momento inercial rotativo, es introducido en el controlador del aerogenerador para cambiar la velocidad de referencia y, evitar así, la caída en la referencia de potencia activa. Sin embargo, cuando se termina esta potencia adicional, el aerogenerador tiene que volver a su modo de operación normal, resultando un "periodo de recuperación", que puede causar una caída de frecuencia no deseada después de esta respuesta inercial.

Andra Zertek et al, (doi:10.1109/TSTE.2012.2199773) describe un sistema de control de inercia con un bloque de emulación de inercia, pero no incluye cambios proporcionales de acuerdo a la tasa de cambio de frecuencia como es descrito en la presente invención.

Se puede deducir del Estado de la Técnica que siempre existe un "periodo de recuperación", que depende del rendimiento del aerogenerador previamente al comienzo de este periodo. Este "periodo de recuperación" es un desafío para la red porque, durante la entrega de la respuesta inercial, la red es soportada y el cambio de frecuencia de red es amortiguado; por lo tanto, el parque eólico está ayudando al sistema a atravesar esta situación. Sin embargo,

cuando comienza el periodo de recuperación, cae la producción del parque eólico por debajo de valores previos al evento y, consecuentemente, durante este periodo de tiempo, el parque eólico puede causar una caída de la frecuencia de red que debe ser resuelta por otra planta de generación.

5

### Descripción de la invención

Un objeto de la invención es un aerogenerador de acuerdo con la reivindicación 1 comprendiendo un rotor, que conduce un generador que interactúa con un convertidor de potencia para generar energía eléctrica; un controlador del aerogenerador equipado con un controlador de ángulo de paso de pala de al menos una pala y un controlador de la potencia producida, un controlador para el convertidor de potencia, que interactúa con el controlador del aerogenerador; y un sistema de regulación que evita interrupciones en la salida de potencia activa después de la adición o sustracción de potencia proporcional a la tasa del cambio de la frecuencia, mediante la generación de una señal de potencia, negativamente proporcional a la tasa de cambio de la frecuencia, que es añadida a la referencia de potencia del controlador de potencia generada del controlador del aerogenerador de forma que la referencia de la velocidad rotacional del controlador del aerogenerador es adaptada de acuerdo con la frecuencia de red.

20

Es un objeto de la invención un método que emule el mismo comportamiento que un generador síncrono en términos de respuesta inercial. Para ello, se prevé la implementación de un controlador específico que emule la respuesta inercial y que solucione los problemas de desacople de red de los que aerogeneradores con convertidor electrónico descritos en el Estado de la Técnica.

25

Es otro objeto de la invención un sistema de regulación que evite, como ocurre en el Estado de la Técnica, que el controlador del aerogenerador aumente o reduzca la demanda de potencia para llegar al punto de operación previo a la entrega de potencia adicional, que es adicional a la potencia definida por el controlador de potencia generada dentro del controlador del aerogenerador. Para ello, el sistema de regulación de la invención no solo demanda potencia que es negativamente proporcional a la tasa del cambio de la frecuencia, sino que genera una señal de adaptación de la velocidad de referencia para el controlador del aerogenerador en proporción a la frecuencia de red con dos objetivos:

30

- 35 – Asegurar que la entrega de potencia concuerda con la entrega de energía inercial almacenada en el aerogenerador, como se haría en un generador síncrono convencional.
- 40 – Asegurar que el controlador del aerogenerador no altera sobre la potencia que está siendo generada de cara a recuperar el punto de operación previo a la demanda de potencia adicional y así evitar un "periodo de recuperación".

Otro objeto de la invención es un sistema que evite dicho "periodo de recuperación". Para ello, el sistema cambia la referencia de la velocidad rotacional del aerogenerador en proporción al cambio de la frecuencia mediante una constante proporcional que se corresponde con el parámetro  $K_{inertia}$ . Esta proporción está relacionada con la proporcionalidad entre la potencia adicional y la tasa de cambio de frecuencia y puede ser modificada para asegurar una inercia "sintonizable", por lo que la invención contempla la definición del parámetro  $K_{inertia}$ , a que caiga dentro del rango entre 0 a 2.

45

Es otro objeto de la invención que el sistema tenga en cuenta los retrasos en el tiempo que provoca la adición de potencia por los cambios de frecuencia y la modificación de la velocidad rotacional del aerogenerador. Para ello, incluye retrasos en la medida de la tasa de cambio de

frecuencia, retrasos en la generación de potencia por parte del controlador del convertidor, e incluso retrasos debidos a los filtros internos en la velocidad rotacional del aerogenerador, usados dentro del controlador del aerogenerador.

- 5           – Es otro objeto de la invención que el sistema limite la entrega de potencia a red mediante un parámetro que defina la máxima potencia adicional, tanto negativa como positiva, que puede ser entregada.
- 10           – Es otro objeto de la invención un sistema que paralice tanto la entrega de potencia adicional como la adaptación de la velocidad rotacional del aerogenerador, cuando ocurre una de las siguientes condiciones: Cuando se alcanza un valor predefinido de pérdida de eficiencia aerodinámica provocado por una desviación del punto de operación del aerogenerador con respecto de su punto de operación ideal. Cuando el incremento o decremento de la velocidad rotacional del aerogenerador alcanza un valor
- 15           máximo o mínimo predefinido.

Es otro objeto de la invención que el sistema reanude tanto la entrega de potencia adicional como la adaptación de la velocidad rotacional del aerogenerador, cuando se produce una recuperación de la frecuencia.

20           Es otro objeto de la invención que el sistema disponga de un modo de operación adicional que evite la congelación del accionamiento de la inercia en un rango de frecuencia predefinido. Para ello, la invención determina un elemento que recalcula el parámetro  $K_{inertiapar}$  y obtiene el valor final  $K_{inertia}$  basado en un máximo y mínimo de frecuencia, y en el máximo aumento/decremento de la velocidad a partir del cálculo de la pérdida de eficiencia aerodinámica y de unos valores máximo y mínimo de la velocidad.

Por último, es aún otro objeto de la invención que el parque eólico gestione la respuesta inercia] mediante un elemento que controla el parámetro  $K_{inertiapar}$  a nivel de parque eólico, adaptando el valor del parámetro  $K_{inertiapar}$  de cada aerogenerador para coincidir con un valor predefinido de la constante de inercia del parque, donde la constante de inercia es definida como la suma de las constantes de inercia de todos los aerogeneradores, las cuales dependen del valor de la  $K_{inertia}$  y de la velocidad rotacional del aerogenerador.

35           Estos y otros aspectos de la invención se describirán de una forma más detallada con ayuda de los dibujos que se describen a continuación.

### Breve descripción de las figuras

40           La Figura 1 muestra una vista en perspectiva de un aerogenerador de acuerdo con una realización de la invención.

La Figura 2 muestra una vista de perfil de una góndola de acuerdo con un tren de potencia en correspondencia con la realización de la Figura 1.

45           La Figura 3 muestra un diagrama de bloques que refleja la comunicación entre el controlador del aerogenerador y la unidad de control del convertidor, y entre el controlador del aerogenerador y el controlador del parque eólico de acuerdo con una realización de la invención.

50           La Figura 4 muestra un diagrama de bloques que comprende las etapas para emulación de inercia en correspondencia con la realización de la Figura 3.

La Figura 5 muestra la curva potencia-velocidad dada por el controlador de par y el cambio debido a la emulación de inercia.

5 La Figura 6 muestra la interacción entre el controlador del parque eólico y el controlador del aerogenerador, añadiendo las etapas del bloque de emulación de inercia en correspondencia con la Figura 3.

10 Las Figuras 7a-7f muestran el rendimiento de la invención cuando en caso de baja frecuencia transitoria sin que este llegue a un máximo de 200 kW, al cual la potencia adicional está limitada.

Las Figuras 8a-8f muestran el rendimiento de la invención cuando una sobre frecuencia transitoria ocurre, llegando al máximo de 200 kW, al cual la potencia adicional está limitada.

### 15 **Descripción detallada de la invención**

20 La Figura 1 es una vista en perfil que muestra un aerogenerador (1) de acuerdo con una realización preferente de la invención. El aerogenerador (1) incluye una torre (2) que se eleva verticalmente sobre una cimentación (3), una góndola (4) montada en la parte superior de la torre (2), y un rotor (5) montado en el final frontal de la góndola (4) para soporte rotacional con respecto a un eje sustancialmente horizontal X1-X1.

25 El rotor (5) tiene al menos una pala (6), como se muestra en la Figura 1, montada en un patrón radial con respecto a su eje de rotación. Por lo tanto, la energía del viento al soplar contra las palas (6) del aerogenerador desde la dirección del eje de rotación del rotor (5) se convierte en energía cinética que hace girar el rotor (5) en el eje de rotacional. La energía útil generada por el aerogenerador (1) es alimentada a través de una línea de suministro de potencia a la subestación de un parque eólico.

30 Un anemómetro (no mostrado en la Figura) mide la velocidad del viento en la vecindad y un anemoscopio (no mostrado en la Figura) mide la dirección del viento, para ello se disponen en localizaciones adecuadas de la superficie externa periférica (por ejemplo, en la parte superior) de la góndola (4) del aerogenerador.

35 La Figura 2 muestra una vista lateral en perspectiva de la góndola (4) en correspondencia con la realización de la Figura 1. La góndola (4) incluye varios componentes constituyendo el tren de potencia del aerogenerador (1) como un eje de rotor (7), una multiplicadora (8), un eje de generador (9) que se conecta mediante un acoplamiento (10) a un el eje de entrada (11) del generador y un generador (12) conectado eléctricamente al convertidor de potencia (13).

40 El aerogenerador (1) incluye una unidad de control del convertidor (14) y un controlador del aerogenerador (15). El parque eólico incluye a su vez un controlador de parque (16). La unidad de control del convertidor (14) y el controlador del aerogenerador (15) se comunicación entre sí, de la misma forma que el controlador del aerogenerador (15) y el controlador de parque (16), tal y como se muestra en la Figura 3. El controlador del aerogenerador (15) toma su entrada de la unidad de control del convertidor (14) y devuelve las señales de control. Además, el controlador del aerogenerador (15) toma medidas de diferentes sensores y envía una señal de control a las diferentes partes del aerogenerador (1), especialmente al actuador que actúa sobre el ángulo de paso de las palas rotando en su correspondiente eje (6). La unidad de control del convertidor (14) toma medidas eléctricas de diferentes sensores y envía la señal de control a las partes eléctricas del aerogenerador (1), especialmente al convertidor de potencia (13) que actúa en el generador (12).

45

50

De acuerdo con una realización de la invención, el controlador del aerogenerador (15) envía la señal de referencia de potencia a la unidad de control del convertidor (14) y también, el controlador del aerogenerador (15), recibe la medida de la velocidad rotacional del generador (12), definida como la velocidad rotacional de la turbina, y la medida de frecuencia procedente tanto de la unidad de control del convertidor (14) como del controlador del parque (16) de aerogeneradores. Además, la tasa de cambio de frecuencia puede ser calculada en el controlador (15) del aerogenerador o en la unidad de control del convertidor (14), o incluso en el controlador de parque (16), y entonces ser comunicado al controlador del aerogenerador (15). El controlador del aerogenerador (15), en cambio, comprende de varios elementos, incluyendo el bloque de emulación de inercia (17), el controlador de par (18), que es el regulador que envía la referencia de potencia a la unidad de control del convertidor (14), y el controlador de pitch (19), que es el regulador que envía la referencia del pitch al actuador de pitch.

La Figura 4 muestra un diagrama de flujo del bloque de emulación de inercia (17). Inicialmente, la frecuencia de red (21) se computa dentro del bloque de emulación de inercia (17) independientemente de si procede de la unidad de control del convertidor (14) o del controlador de parque de aerogeneradores (16). Este cómputo se realiza dentro del bloque de ratio de cambio de frecuencia y cálculos de frecuencia (22). Este bloque (22) calcula el ratio de cambio de frecuencia o recibe los valores de la unidad de control del convertidor (14) o del controlador de parque (16). Además, la frecuencia (21) es calculada para evaluar si su valor está fuera de un parámetro predefinido como "banda de frecuencia muerta", que se usa para habilitar la emulación de inercia solo si la frecuencia (21) está fuera de la banda muerta. El objetivo es mantener variaciones de frecuencia normales del continuo disparo de la emulación de inercia. La salida (IE\_ON) de este test (22) es la emulación de la inercia que define si la frecuencia (21) está fuera del rango de banda muerta de frecuencia.

El valor de tasa de cambio de frecuencia (23) del bloque (22) se introduce en el bloque de cálculo de la potencia adicional (24), donde el bloque (27) primero calcula un valor de potencia adicional como el valor negativo de la multiplicación del ratio de cambio de frecuencia (23) por el parámetro  $K_{inertia}$  (25), que puede ser definida localmente o comunicada por el elemento de emulación de inercia (20) en el controlador de parque (16) y por el valor al cuadrado de la velocidad rotacional de la turbina, que se mide mediante la unidad de control del convertidor (14) y es comunicada al controlador del aerogenerador (15). Los cálculos del bloque de cálculo de potencia adicional (24) pueden deshabilitarse mediante la señal deshabilitar inercia (26) cuando se alcanza un límite. En segundo lugar, esta potencia adicional es añadida (28) mediante la salida (31), que se explicará más adelante, y el computo del bloque de limitación de potencia adicional (29) que limita este valor mediante un valor máximo y mínimo configurables. Los resultados de esta computación son, en primer lugar, el valor final de la potencia adicional (32) y, en segundo lugar, la diferencia entre el valor límite y el valor ilimitado cuando la potencia adicional haya sido limitada. Este último cálculo es introducido en un elemento (30) que acumula el valor de entrada y saca el valor acumulado a (31), que multiplica, mediante una constante configurable, el valor de la acumulación para convertirla en potencia que es entonces añadida a la potencia adicional en (28). El propósito de éste cómputo es el de recuperar la energía que ha sido perdida debido a la limitación de la potencia adicional, y a su envío cuando sea posible, es decir, siempre que ninguna limitación haya sido aplicada.

Otro bloque (33) calcula la variación máxima positiva y negativa de la velocidad de la turbina que coincide con una pérdida de eficiencia aerodinámica predefinida. La razón de este bloque (33) es que, cuando el aerogenerador está operando por debajo de su potencia nominal, el controlador del aerogenerador (15) actúa en la referencia de potencia y la referencia del pitch para producir el máximo de energía del viento de tal forma que existe una correlación entre el valor del ángulo de pitch, la velocidad de rotación de la turbina y la velocidad de viento. Sin embargo, cuando la velocidad rotacional cambia debido a un cambio en la frecuencia, el

aerogenerador (1) no correrá más dentro de su punto de operación ideal y el aerogenerador (1) puede sufrir de una pérdida de eficiencia aerodinámica.

5 La entrada para este bloque (33) es "emulación de inercia ON" (IE\_ON) de cara a conseguir cálculos solo cuando la emulación de inercia no está corriendo, debido a que los cálculos son inválidos cuando está corriendo. Asimismo, la potencia disponible ( $P_{aer}$ ) es también utilizada como entrada, dado que la energía eólica es suficiente para extraer potencia adicional cuando este valor es mayor que su potencia nominal y, por lo tanto, no hay pérdida de eficiencia aerodinámica.

10 El controlador del aerogenerador (15) calcula un valor dado lambda (A), que se define como el producto del radio de la pala y la velocidad rotacional del rotor dividido por el valor de la velocidad del viento. Este valor lambda (A) se introduce en el bloque (33). El bloque (34) utiliza el valor de lambda (A) para obtener la eficiencia aerodinámica de la pala mediante una tabla correlacionando lambda con el valor ideal de su coeficiente de potencia. La validez de esta tabla se basa en el hecho de que el aerogenerador opera con un ángulo de paso para una lambda predefinida que alcanza este coeficiente de potencia ideal. Entonces, este coeficiente de potencia es computado en el bloque (35) junto con el valor del parámetro sintonizable de máxima pérdida de eficiencia aerodinámica (36) para conseguir un valor "degradado" de eficiencia de potencia  $C_p$ , en el cual la pérdida de eficiencia aerodinámica ha sido considerada. Entonces esta eficiencia de potencia "degradada",  $C_p$ , es introducida en el bloque (37) para, mediante otra tabla, para obtener un nuevo valor de lambda "degradada". Finalmente, esta lambda es convertida en el bloque (39) en velocidad rotacional multiplicando lambda por la medida de velocidad de viento (38), recogida del anemómetro y acondicionada por el controlador del aerogenerador (15), y dividiendo por el radio de la pala. La diferencia entre la velocidad rotacional de la lambda inicial y la velocidad rotacional de la lambda "degradada" da el cambio en la velocidad rotacional que coincidirá con la pérdida de eficiencia aerodinámica (40).

30 El bloque (41) adapta la velocidad en función de la frecuencia para coordinar el punto de consigna del controlador de la velocidad del viento con el envío de potencia adicional. En primer lugar, la frecuencia (21) se emplea en el bloque (42) para adaptar la velocidad y la multiplicación de la frecuencia por la  $K_{inertia}$  (25) y dividido por la frecuencia nominal. El resultado es un factor que multiplica la referencia de velocidad de la turbina, típicamente en un rango entre 0,94 y 1,06. En segundo lugar, este cálculo de la adaptación de la velocidad está limitado en el bloque (43) a un valor máximo, valor mínimo y a una tasa de cambio en función del tiempo máximo positiva y negativa.

40 – Limitación de valor máximo, típicamente 1,06, se emplea para evitar el desacoplamiento debido a una velocidad rotacional máxima de la turbina cuando opera a una velocidad nominal de la turbina.

45 – Cálculo de valor mínimo, convertido a un valor por unidad usando el valor de la velocidad rotacional antes de la activación de la emulación de la inercia, desde dos fuentes:

o Cambio en la velocidad rotacional que coincide con la pérdida de eficiencia aerodinámica.

50 o La referencia de la velocidad rotacional mínima de la turbina.

– Los limitadores de máxima tasa de cambio en función del tiempo positivo y negativo se calculan como una proporción negativa y positiva del valor de limitación máximo positivo y negativo de la potencia adicional empleada en el bloque (29), dividida por la inercia y

la velocidad de la turbina. Este valor es convertido a un valor por unidad usando el valor de la velocidad rotacional de la turbina antes de la activación de la emulación de la inercia.

5 Por un lado, el resultado de este bloque es una señal que informa de la aplicación de un limitador máximo o mínimo (26) que es enviado a (24) para informar que las limitaciones son aplicadas y que entonces la entrega de potencia adicional debe ser deshabilitada. En segundo lugar, la adaptación de la velocidad (46) es enviada al siguiente bloque (45). En tercer lugar, este valor de adaptación de la velocidad de inercia es procesado a través de una función de  
10 transferencia que representa:

- Retrasos entre aplicar la potencia de referencia mediante el controlador de par (18) y generar la referencia de potencia por el convertidor, el controlador mediante la unidad de control del convertidor (14), y generada (12). Este retraso en la potencia implica un  
15 retraso en el cambio de la velocidad de la turbina, que debe ser incluido en la adaptación de la velocidad (47).
- Retrasos debidos al cálculo del ratio de cambio de frecuencia (23) debido a la formulación empleada en este cálculo implica un retraso respecto de un cálculo ideal que retrasa la referencia de potencia y, por lo tanto, la potencia generada y  
20 consecuentemente el cambio de la velocidad rotacional.
- Retraso debido a los filtros aplicados a la medida de la velocidad rotacional de la turbina dentro del controlador de pitch (19) y el controlador de par (18) porque el cambio de la  
25 velocidad de referencia debe ser retrasado en la misma forma.

Esta adaptación de la velocidad rotacional de la turbina (47) es empleada por el controlador de par (18) y el controlador de pitch (19) para adaptar internamente la referencia de la velocidad rotacional de la turbina.  
30

Para el controlador de pitch (19), la referencia de la velocidad rotacional de la turbina es generalmente la velocidad nominal de forma que la adaptación es aplicada a esta velocidad nominal. Sin embargo, el controlador de par (18) generalmente emplea una tabla par-velocidad con diferentes zonas de operación como la que se muestra en la Fig. 5, primero en la "zona  
35 baja", en la cual la referencia de velocidad es la velocidad rotacional mínima, en segundo lugar la zona "cuadrática", en la cual los cambios en la velocidad rotacional están relacionados con el par, y por último la "zona alta", en la que la referencia de velocidad es la velocidad rotacional nominal. La referencia de la velocidad rotacional debe ser cambiada en estas tres zonas de acuerdo con la adaptación de la velocidad rotacional (47). Esta Fig. 5 también muestra el  
40 cambio de la referencia de velocidad, con la excepción del caso de la "zona baja", debido a que esta es la referencia de velocidad mínima que no puede ser bajada.

El bloque emulación de inercia (17) contiene un bloque (48), mostrado en la Figura 6, que computa  $K_{inertipar}$ , que bien puede estar internamente definida como parámetro o bien provenir  
45 como señal (60) del controlador de parque (16). En primer lugar, hay un modo especial en el cual el valor de  $K_{inertipar}$  es cambiado para prevenir que se deshabilite la emulación de inercia (44) debido tanto a que se alcance la pérdida de eficiencia aerodinámica como a que se alcance la velocidad máxima o mínima de la turbina en el bloque (43). Este bloque (48) considera los parámetros predefinidos de frecuencia máximo y mínimo y limita los valores  
50 finales de  $K_{inertia}$  (25) para baja-frecuencia o sobre-frecuencia usando cálculos que están invertidos a los utilizados en el elemento (42) que relaciona la frecuencia mínima con el cambio en la velocidad rotacional que coincidirá con la pérdida de eficiencia aerodinámica (40) y la velocidad de turbina mínima, resultando en el valor de  $K_{inertia}$ , (25) para baja-frecuencia, y la máxima frecuencia con la velocidad de turbina máxima, resultando en  $K_{inertia}$ , (25) para sobre-

frecuencia. En segundo lugar, este elemento (48) calcula la constante de inercia del aerogenerador (47) como la multiplicación de la inercia del aerogenerador por el cuadrado de la velocidad rotacional y  $K_{inertia}$  (25), dividido entre dos.

5 Finalmente, cuando el aerogenerador opera usando el valor definido por el controlador de  
parque (29) para  $K_{inertiapar}$  (60), el elemento de emulación de inercia (20) dentro del controlador  
parque eólico (17) es empleado para que el controlador de parque eólico (17) consiga un valor  
de referencia de la inercia del parque eólico (50) definida de forma externa, preferentemente  
10 por el operador de red. Cuando el parque alcance ese valor de referencia, la potencia adicional  
del parque completo será negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia, y la  
constante proporcional será la constante de inercia de parque eólico (50) multiplicada por dos.

Este valor de referencia de la inercia del parque eólico (50) es comparado con el valor de la  
15 inercia del parque eólico al completo, calculado como la adición de la inercia de cada  
aerogenerador individualmente (47). La diferencia es la desviación calculada por un  
controlador, preferentemente un controlador PI, para extraer el valor de  $K_{inertiapar}$ , (60), que es  
enviado como una consigna a los aerogeneradores. Todas las señales (50), (47) y (60) pueden  
20 ser separadas en eventos de baja-frecuencia o sobre-frecuencia. Además, todos esos cálculos  
se llevan a cabo cuando la emulación de inercia está OFF, lo cual queda definido cuando la  
señal (IE\_ON) está a cero, y se congela durante el tiempo que la emulación de inercia está  
actuando, definido cuando la señal (IE\_ON) es uno, de cara a evitar cambios durante el evento  
de baja-frecuencia o sobre-frecuencia, ya que calcular la inercia del aerogenerador (47)  
25 durante eventos no es aplicable y la constante  $K_{inertiapar}$  (60) necesita ser mantenida constante  
para prevenir un mal funcionamiento.

Las Figuras 7a-7f muestran el funcionamiento de la invención en baja frecuencia de entre 50-  
49Hz (Figura 7b), viento variable (Figura 7a) y una potencia adicional (Figura 7e) con límites  
máximo (200kW) y mínimo de (-200kW). La adaptación de la velocidad (46) puede verse en la  
Figura 7c con la misma forma que la frecuencia. La velocidad de la turbina en la Figura 7d  
30 sigue los puntos de consigna con un pequeño retraso debido al elemento (45) y con una  
pequeña oscilación de la frecuencia de resonancia del eje de potencia que es amortiguada  
rápidamente. La generación de potencia sigue el punto de consigna de la potencia adicional en  
la Figura 7e con un retraso debido a que el convertidor y el generador (12) introducen un  
retraso entre el punto de consigna y generación.

35 Las Figuras 8a-8f muestran el funcionamiento de la invención en el caso de una sobre-  
frecuencia de 50 Hz y 51Hz (Figura 8b), viento variable (Figura 8a) y potencia adicional (Figura  
8e) limitada por su valor mínimo de 200kW. En este caso, la adaptación de la velocidad (46) no  
sigue la misma forma que la frecuencia porque la rampa está limitada por una rampa máxima  
negativa. La velocidad de la turbina, tal y como se muestra en la Figura 8d, sigue la adaptación  
40 de la velocidad (46) con un pequeño retraso debido al elemento (45) y con una pequeña  
oscilación de la frecuencia de resonancia del tren de potencia que es amortiguada  
rápidamente. La generación de potencia sigue el punto de consigna de la potencia adicional  
(Figura 8e) con un retraso debido a que el convertidor y el generador (12) introducen un retraso  
45 entre el punto de consigna y generación.

## REIVINDICACIONES

1. Sistema de control de inercia para el tipo de aerogeneradores que comprenden un rotor (5), un generador (12) accionado por el rotor (5) que interactúa con un convertidor de potencia (13) para generar energía eléctrica, un controlador del aerogenerador (15) que comprende un controlador de cambio de paso (19) de pala y un controlador de la potencia generada (18), un controlador del convertidor de potencia (14) que interactúa con el controlador del aerogenerador (15), dicho sistema de control de inercia comprende: un bloque de emulación de inercia (17) para prevenir la distorsión en la salida de potencia activa después de la adición o sustracción de potencia proporcional a la tasa de cambio de frecuencia, que genera una señal de potencia adicional (32), negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia (23), caracterizado porque dicho valor de la tasa de cambio de frecuencia (23) del bloque (22) es introducido en el bloque de cálculo de potencia adicional (24), donde un bloque (27) primero calcula el valor de potencia adicional como un valor negativo de la multiplicación de la tasa de cambio de frecuencia (23) por un parámetro  $K_{inertiapar}$  (25), que puede ser definido localmente o comunicado por un elemento de emulación de inercia (20) en el controlador del parque eólico (16), y por el valor al cuadrado de la velocidad de rotación de la turbina, el cual es medido mediante la unidad de control del convertidor (14) y comunicado al controlador del aerogenerador (15); los cálculos de dicho bloque de cálculo de potencia adicional (24) pueden deshabilitarse mediante la señal deshabilitar inercia (26) cuando se alcanza un límite, dicha potencia adicional es añadida (28), mediante una salida (31) y una computación de un bloque de limitación de potencia adicional (29) que limita este valor por medio de valores configurables máximo y mínimo, a una potencia de referencia del controlador del aerogenerador (15); dicha potencia adicional (32) está previamente limitada en el bloque de limitación de potencia adicional (29) según un parámetro configurable y la potencia no entregada, debido a la limitación, es acumulada en un elemento (30) cuyo valor acumulado (31) previo a la multiplicación por una constante configurable es añadido a la potencia activa adicional (28); y la velocidad rotacional de referencia del controlador del aerogenerador (15) es adaptado (47) en proporción al cambio de frecuencia (21) dividido por la frecuencia nominal y por  $K_{inertiapar}$  (25) y es adaptado de acuerdo a la frecuencia de red (23).

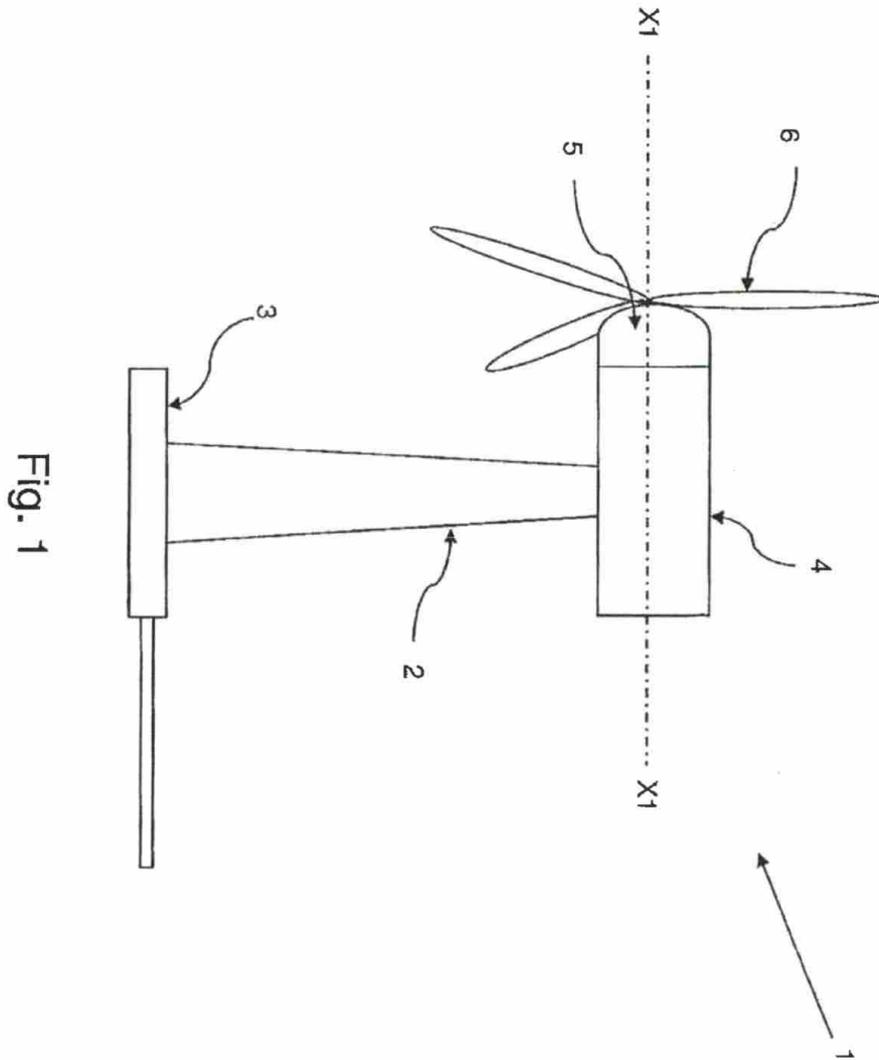
2. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según la reivindicación 1, caracterizado porque la relación proporcional entre la salida de potencia adicional (32) del bloque emulación de inercia (17) y la tasa de cambio de frecuencia es una constante de inercia dependiente de la inercia mecánica, la velocidad rotacional de la turbina y la potencia activa, y un parámetro  $K_{inertiapar}$  definido localmente o por un controlador remoto.

3. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según la reivindicación 1, caracterizado porque la adaptación de la velocidad de referencia (46) del controlador del aerogenerador (15) está limitada en su tasa de cambio (43) proporcional al parámetro que limita la potencia activa añadida o sustraída (32).

4. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según la reivindicación 1, caracterizado porque la adaptación de la velocidad de referencia (46) del controlador del aerogenerador (15) esta modificada por una función de transferencia (45) que modela retrasos entre el cambio en la referencia de potencia adicional (32) y el cambio en la velocidad rotacional de la turbina, medido por sensores que comunican el valor al control del aerogenerador (17), así como el retraso asociado con el filtrado de la velocidad rotacional de la turbina dentro del control del aerogenerador (17).

5. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según las reivindicaciones 1-4, caracterizado porque el bloque de emulación de inercia (17) comprende un bloque (33) que calcula el máximo decremento en la velocidad rotacional de la turbina que coincide con una predefinida pérdida de eficiencia aerodinámica.

- 5 6. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según la reivindicación 1, caracterizado porque el bloque de emulación de inercia (17) paraliza la adición o sustracción de potencia adicional (32) y cambio en la velocidad rotacional de la turbina (26) en uno de los siguientes casos: a) cuando el decremento de la velocidad rotacional de la turbina alcanza un valor (40) que coincide con una predefinida pérdida de eficiencia aerodinámica (36). b) cuando el decremento o incremento alcanza unos valores máximo o mínimo predefinidos de velocidad.
- 10 7. Sistema de control de inercia para aerogeneradores según las reivindicaciones 1-6, caracterizado porque el bloque de emulación de inercia (17) determina un modo de operación opcional que limita valores separados de  $K_{inertia}$  para sobre-frecuencia y baja-frecuencia de acuerdo con valores calculados que evitaran parar la adición o sustracción y el cambio en la velocidad rotacional de la turbina cuando la velocidad rotacional de la turbina se incrementa o decrementa, alcanzando valores de velocidad predefinidos máximo o mínimo y una pérdida de eficiencia aerodinámica predefinida (40).
- 15 8. Un parque eólico que consta de un sistema de control de inercia para aerogeneradores del tipo descrito en la reivindicaciones 1-7, caracterizado porque comprende un controlador de parque eólico (16) y al menos un aerogenerador (1) que a su vez comprende un rotor (5), un generador (12) accionado por el rotor (5) que interactúa con un convertidor de potencia (13) para generar energía eléctrica, un controlador del aerogenerador (15) que comprende un controlador de cambio de paso (19) de pala y un controlador de la potencia generada (18), un controlador del convertidor de potencia (14) que interactúa con el controlador del aerogenerador (15) y donde genera una señal de potencia adicional (32), negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia (23), para prevenir distorsión en la salida de potencia activa después de la adición o sustracción de potencia proporcional a la tasa de cambio de frecuencia, donde dicha tasa de cambio de frecuencia es entonces añadida a la referencia de potencia del controlador de potencia generada (15) del controlador del aerogenerador (15), donde la referencia de velocidad rotacional del controlador es adaptada de acuerdo con la frecuencia de red (23).
- 20 25 30 9. Un parque eólico según la reivindicación 8, caracterizado porque el controlador de parque eólico (16) comprende un elemento de emulación de inercia (20) que adapta dinámicamente referencias de los aerogeneradores a  $K_{inertiapar}$  (60) de cara a conseguir que el parque eólico genere potencia adicional negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia, y la constante proporcional es la constante de inercia de parque eólico (50) multiplicada por dos.
- 35



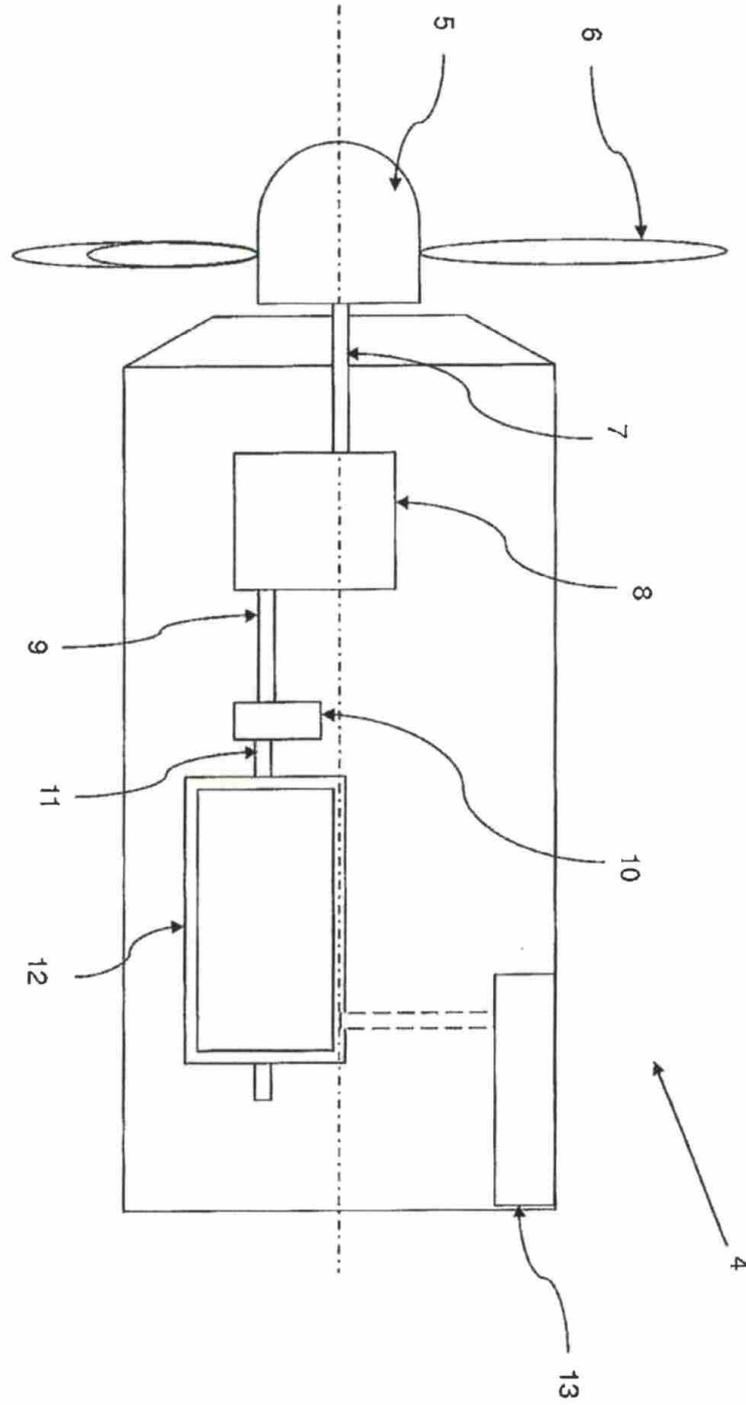


Fig. 2

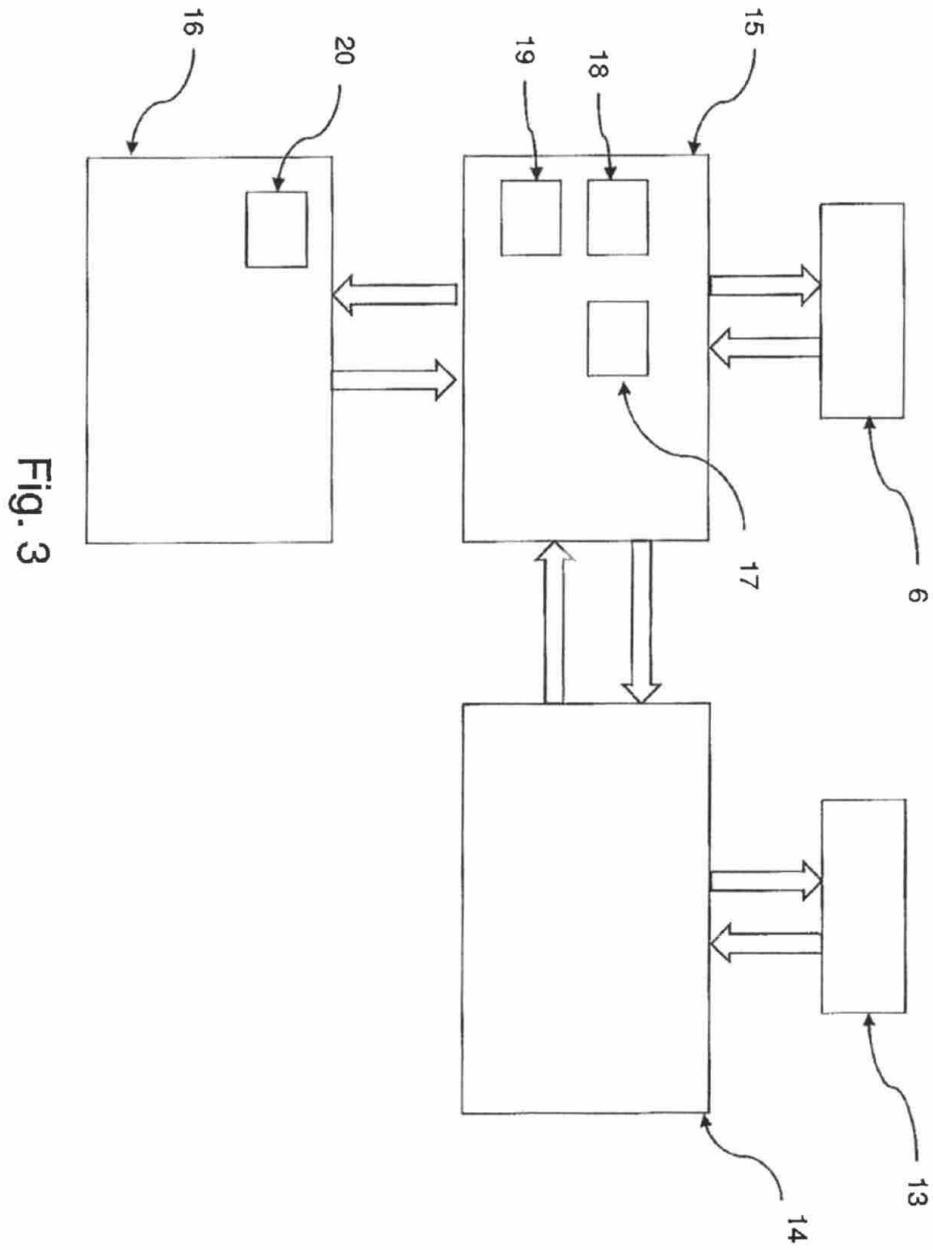


Fig. 3

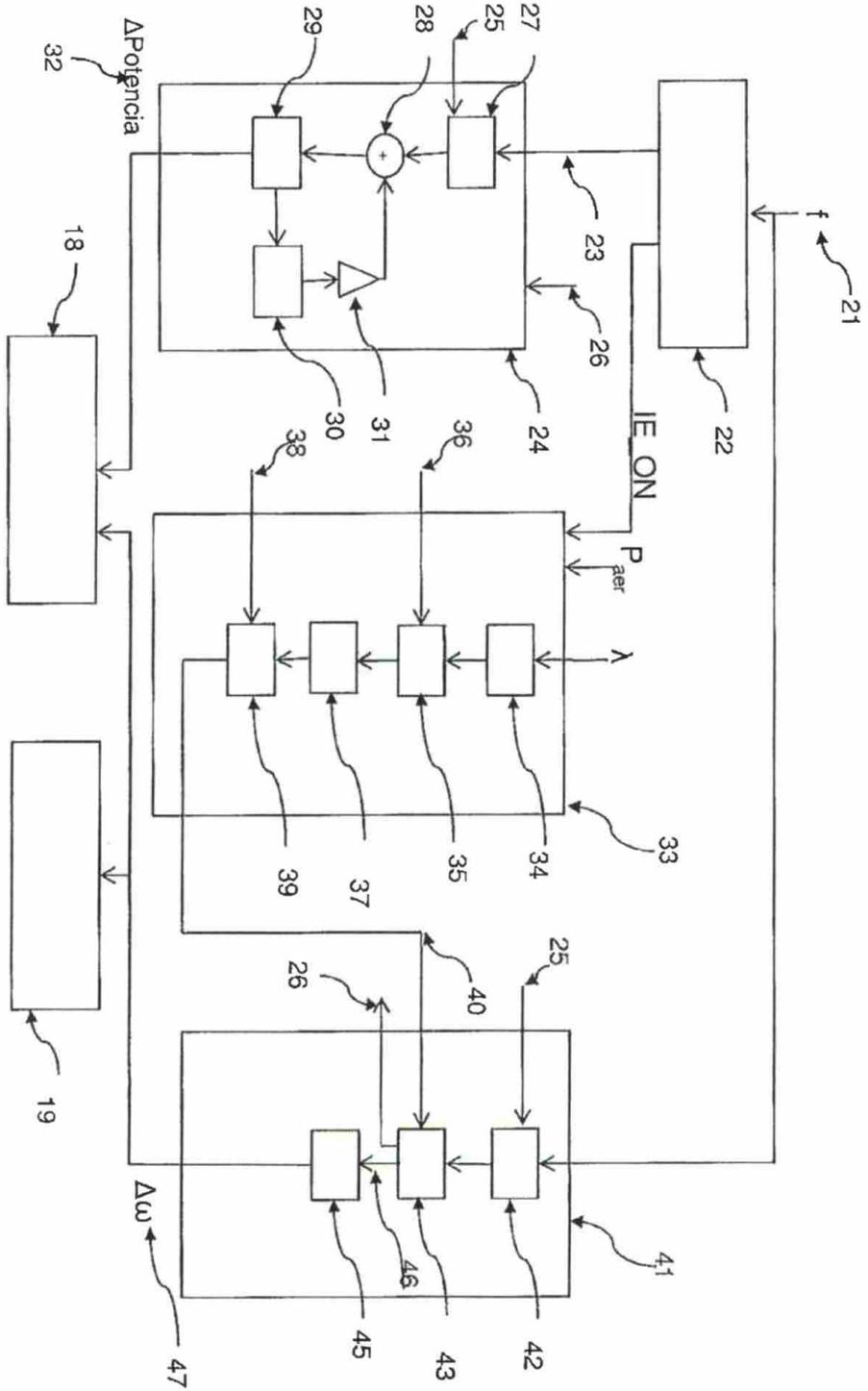


Fig. 4

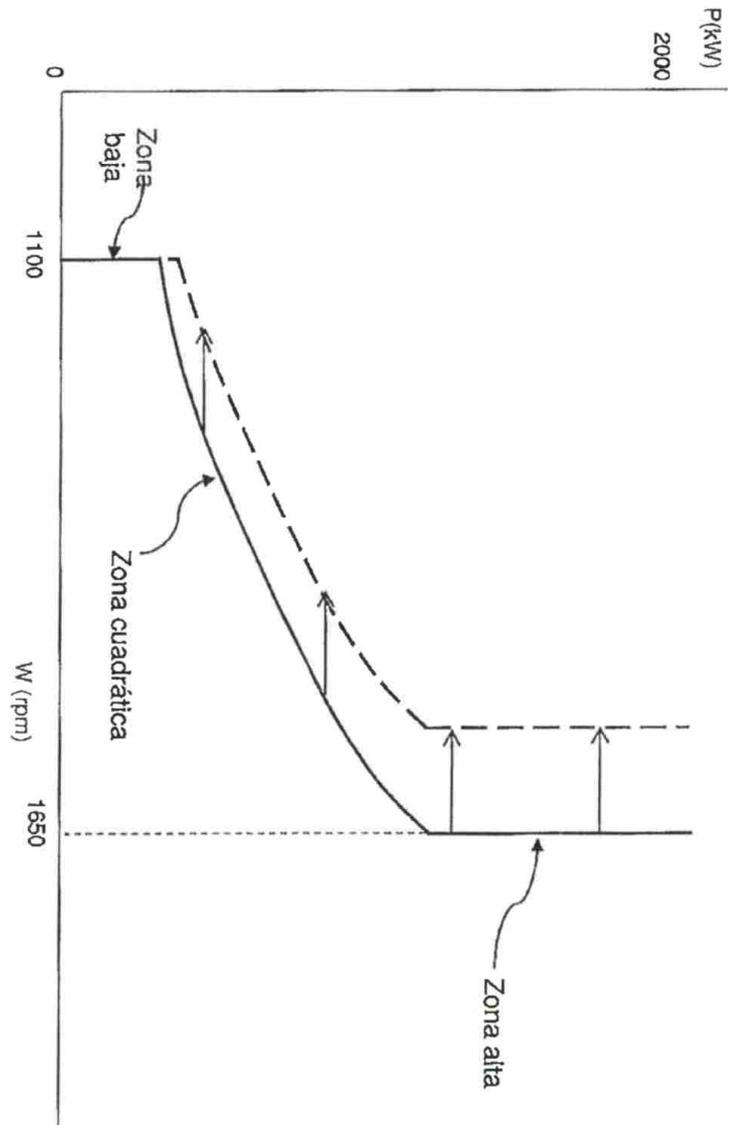


Fig. 5

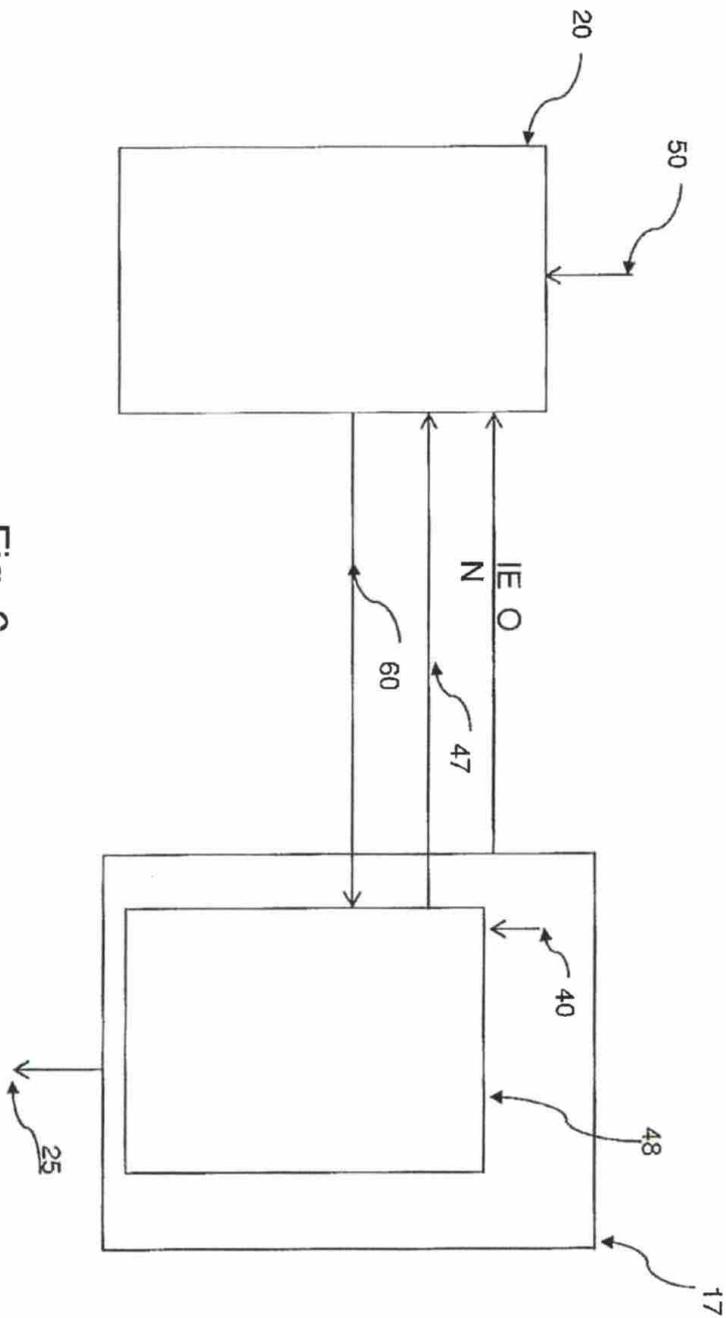


Fig. 6

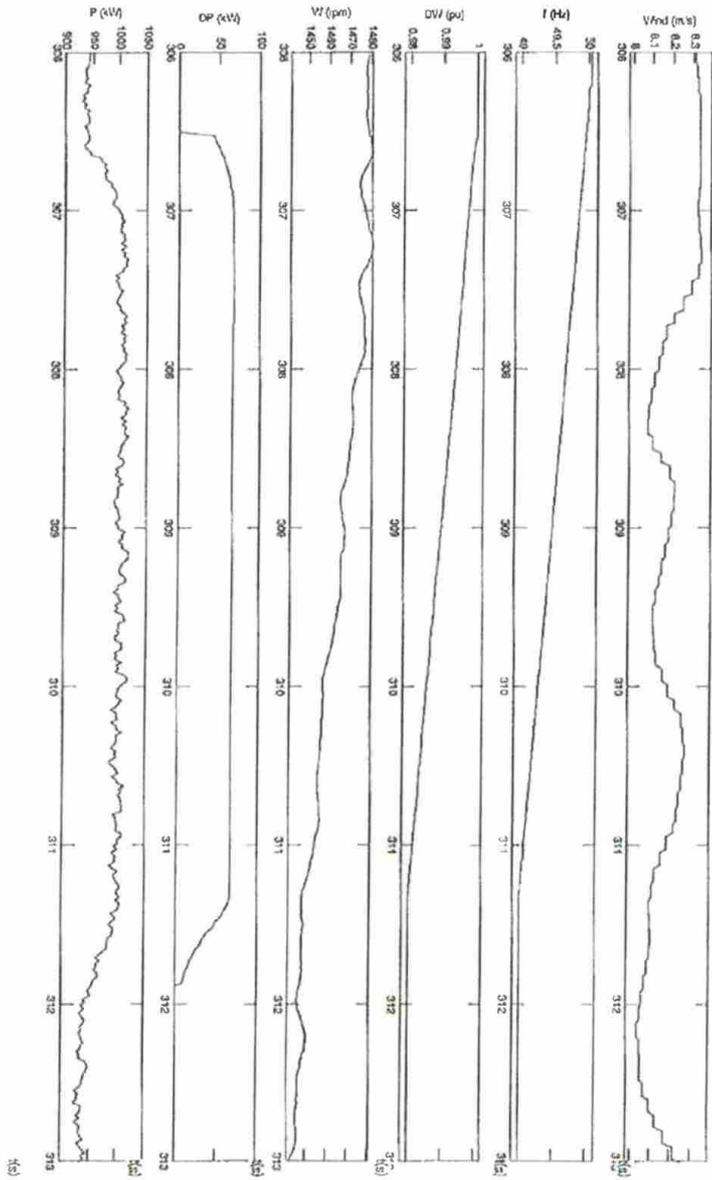


Fig. 7a

Fig. 7b

Fig. 7c

Fig. 7d

Fig. 7e

Fig. 7f

