

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 560 504**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 11/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.10.2006 E 06812802 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.12.2015 EP 1952017**

54 Título: **Un método para amortiguar vibraciones de torre en una instalación de turbina eólica**

30 Prioridad:

**01.11.2005 NO 20055118**

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

**19.02.2016**

73 Titular/es:

**HYWIND AS (100.0%)  
Forusbeen 50  
4035 Stavanger, NO**

72 Inventor/es:

**NIELSEN, FINN GUNNAR;  
SKAARE, BJØRN;  
TANDE, JOHN OLAV GIÆVER;  
NORHEIM, IAN y  
UHLEN, KJETIL**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 560 504 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**

Un método para amortiguar vibraciones de torre en una instalación de turbina eólica

5 El presente método es un método para amortiguar vibraciones de torre en una instalación de turbina eólica flotante. La instalación de turbina eólica comprende una celda flotante, una torre dispuesta sobre la celda flotante, un generador montado en la torre que puede hacerse girar en relación con la dirección del viento y equipado con una turbina eólica y una disposición de línea de anclaje que puede conectarse a los anclajes o los cimientos en el fondo marino.

10 El desarrollo de las turbinas eólicas flotantes ancladas que pueden usarse a grandes profundidades mejorará notablemente el acceso a las zonas para la expansión de la energía eólica en el mar. La tecnología actual para las turbinas eólicas localizadas en el mar está considerablemente limitada a torres instaladas de manera permanente a bajas profundidades, por debajo de aproximadamente 30 m.

15 Las instalaciones permanentes a profundidades por encima de 30 m dan como resultado, en general, problemas técnicos y costes elevados. Esto significa que, hasta ahora, las profundidades marinas de más de aproximadamente 30 m se han considerado como técnica y comercialmente desfavorables para la instalación de turbinas eólicas.

20 Con las soluciones flotantes a mayores profundidades marinas puede evitarse el problema de la cimentación y los costes asociados con instalaciones complejas y laboriosas.

25 Una turbina eólica que está montada sobre una cimentación flotante se moverá a causa de las fuerzas del viento y las olas. Un buen diseño de la cimentación de turbinas eólicas garantizará que los periodos propios del sistema para movimientos de celda rígida (sacudida, vaivén, subida y bajada, balanceo, cabeceo y guiñada) están fuera del intervalo de periodo de las olas del mar, que es de aproximadamente 5-20 segundos.

30 Todavía habrá fuerzas que actúen junto con los periodos propios del sistema (oleaje, fuerzas de olas no lineales, fluctuaciones en la velocidad del viento, fuerzas de la corriente, etc.). Si dichas fuerzas no producen movimientos inaceptables, estas no deben ser demasiado grandes, y el sistema debe tener la amortiguación para los períodos pertinentes.

35 El documento US 4420692 desvela una turbina eólica de cimentación fija con un acelerómetro dispuesto en la torre de soporte que proporciona una señal indicativa de la aceleración de la torre en la dirección del eje de rotación de rotor. La señal se hace pasar a través de un filtro de paso banda para sumarse a una señal de tasa de referencia de ángulo de paso de pala controlada por par/potencia, para proporcionar de este modo una amortiguación aerodinámica positiva adicional a la torre.

40 El documento WO02/075153 se refiere a un método para controlar una instalación de energía eólica que comprende un dispositivo de control para la gestión operativa de la instalación de energía eólica mediante el que se mide la aceleración de la torre.

45 La presente invención representa una solución, más concretamente un método y un controlador de ángulo de pala, para una amortiguación eficaz de las vibraciones de torre para instalaciones de turbinas eólicas. Los resultados obtenidos en los ensayos de simulación muestran que las vibraciones en relación con el período propio del sistema se amortiguan por un factor de aproximadamente 10 usando el método de acuerdo con la presente invención.

50 La presente invención proporciona un método para amortiguar vibraciones de torre en una instalación de turbina eólica flotante, comprendiendo la instalación una celda flotante, una torre dispuesta sobre la celda flotante, un generador montado en la torre que puede hacerse girar en relación con la dirección del viento y equipado con una turbina eólica que comprende unas palas de turbina, y una disposición de línea de anclaje que puede conectarse a los anclajes o los cimientos en un fondo marino; comprendiendo el método controlar el generador en respuesta a los cambios en la velocidad relativa del viento contra la turbina, controlando el ángulo de pala de las palas de turbina por medio de un controlador en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica; y amortiguar las vibraciones propias de la torre mediante, además del control del controlador en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica, un aumento que se añade al ángulo de pala de las palas de turbina sobre la base de las velocidades de torre, de manera que se contrarrestan las vibraciones propias de la torre; en el que las vibraciones en el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre que tienen la frecuencia de las vibraciones propias de la torre se amortiguan por medio de un estabilizador con una función de transferencia entre las velocidades de torre y el aumento de ángulo de pala y en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso bajo que está dispuesto de tal manera que el estabilizador no influye en el ángulo de pala a frecuencias en un intervalo superior a la frecuencia propia de las vibraciones de torre.

65 En otro aspecto, la presente invención proporciona un controlador de ángulo de pala para controlar el ángulo de pala de las palas de turbina en una instalación de turbina eólica flotante, comprendiendo la instalación una celda flotante, una torre dispuesta sobre la celda flotante, un generador montado en la torre que puede hacerse girar en relación

con la dirección del viento y equipado con una turbina eólica que comprende unas palas de turbina, y una disposición de línea de anclaje que puede conectarse a los anclajes o los cimientos en un fondo marino; en el que el controlador de ángulo de pala está adaptado para controlar el generador en respuesta a los cambios en la velocidad relativa del viento contra la turbina, controlando el ángulo de pala de las palas de turbina en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica; y para amortiguar las vibraciones propias de la torre mediante, además del control del ángulo de pala de las palas de turbina en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica, un aumento que se añade al ángulo de pala de las palas de turbina sobre la base de las velocidades de torre, de manera que se contrarrestan las vibraciones propias de la torre; en el que las vibraciones en el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre que tienen la frecuencia de las vibraciones propias de la torre se amortiguan por medio de un estabilizador con una función de transferencia entre las velocidades de torre y el aumento de ángulo de pala y en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso bajo que está dispuesto de tal manera que el estabilizador no influye en el ángulo de pala a frecuencias en un intervalo superior a la frecuencia propia de las vibraciones de torre.

La presente invención se describirá con más detalle a continuación usando ejemplos y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

Figura 1 muestra un diagrama con diversos intervalos de RPM para una turbina eólica con un control de RPM y de paso de rotor,

Figura 2 muestra una sección de un controlador de ángulo de pala y un boceto de la función de transferencia entre el ángulo de pala del rotor de turbina eólica y la velocidad de torre,

Figura 3 muestra la función de transferencia entre el ángulo de pala y la velocidad de torre, así como la función de transferencia para un estabilizador que amortigua las vibraciones con la frecuencia propia de las vibraciones de torre,

Figura 4 muestra un boceto del estabilizador que está diseñado para amortiguar las vibraciones con frecuencia propia de la torre,

Figura 5 muestra la respuesta de frecuencia (diagrama de Bode) del estabilizador diseñado mostrado en la figura 4. Las flechas definen la amplitud y la fase en relación con la frecuencia propia de la dinámica de torre,

Figura 6 muestra la solución de estabilizador incluida en la solución de control de acuerdo con la presente invención,

Figura 7 muestra diagramas basados en ensayos de simulación, con y sin un estabilizador, en relación con, respectivamente, el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre,  $\Delta Z$ , y la potencia activa (pu) suministrada a la red a una velocidad media del viento de 17,34 m/s,

Figuras 9-10 muestran diagramas basados en ensayos de simulación, con y sin un estabilizador, en relación con, respectivamente, el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre,  $\Delta Z$ , y la potencia activa (pu) suministrada a la red a una velocidad media del viento de 20,04 m/s,

Figura 11 muestra un diagrama general de una turbina eólica que incluye el estabilizador de acuerdo con la presente invención.

Cuando el viento actúa sobre una instalación de turbinas eólicas, las fuerzas del viento contribuirán a movimientos en la cimentación. Sin embargo, las fuerzas de la turbina eólica dependen de cómo se controla la turbina, es decir, cómo varían las RPM y el paso de las palas de turbina con la velocidad del viento. Los algoritmos de control variarán con la velocidad del viento. En la figura 1 se muestra una filosofía de control habitual para turbinas eólicas en tierra. Con referencia a esta figura, puede observarse que:

- En el intervalo de inicio, actúan pequeñas fuerzas sobre la turbina eólica. Las fuerzas del viento tendrán poco efecto sobre los movimientos. Si los movimientos se ven afectados por las fuerzas del viento, es posible controlar la turbina aproximadamente como en el intervalo de RPM variable.
- En el intervalo de RPM variable, existe un ángulo de paso aproximadamente constante para las palas de turbina. El objetivo es controlar las RPM para la turbina de manera que pueda producirse la potencia máxima en cualquier momento, dada la velocidad relativa momentánea del viento contra la turbina. La velocidad relativa del viento consiste en la velocidad media del viento, la variación en la velocidad del viento y el movimiento (velocidad) de la torre. Esto significa que habrá un aumento de potencia y un aumento de empuje desde la turbina cuando aumente el viento. A su vez, si el sistema (la turbina eólica, incluyendo la cimentación) se mueve contra el viento con un movimiento de sacudida y cabeceo combinado, esto supone un aumento de la velocidad del viento para la turbina, y un aumento del empuje. Esto es equivalente a una fuerza de amortiguación (una

fuerza que actúa contra la velocidad). En este intervalo de velocidad del viento, las fuerzas del viento sobre la turbina contribuirán, por lo tanto, a la amortiguación positiva del sistema. Esto contribuirá a una reducción de los movimientos en relación con los periodos propios del sistema.

- 5 • En el intervalo de momento constante, se alcanza la potencia nominal de la turbina. A continuación, lo normal es mantener las RPM aproximadamente constantes y controlar el momento y, por lo tanto, la potencia regulando el ángulo de paso de las palas de turbina. El objetivo es mantener la potencia aproximadamente constante. Si aumenta la velocidad del viento, se aumenta el ángulo de paso con el fin de reducir el momento. Esto también produce una reducción del empuje a pesar del aumento de la velocidad del viento. A diferencia de lo que ocurre en el intervalo de RPM variable, el resultado es, por lo tanto, un efecto de amortiguación negativa. Un sistema de control normalizado intentará ajustar todas las variaciones de potencia que se deben a cambios en la velocidad relativa del viento contra la turbina. Esto se hace cambiando el ángulo de paso de las palas, de manera que el momento en la turbina se mantiene constante a pesar de la variación en la velocidad relativa. Esto dará como resultado que la turbina eólica contribuye a una amortiguación negativa del sistema, lo que aumenta, por lo tanto, el movimiento de la torre en relación con los periodos propios. Esto puede producir unos movimientos inaceptablemente grandes.

Con la presente invención, se ha descubierto que los algoritmos de control deben modificarse para evitar el enlace negativo entre el control de las turbinas eólicas y los movimientos del sistema.

Es deseable mantener las RPM aproximadamente constantes y el momento en el intervalo de "momento constante", pero, usando los algoritmos de filtrado y de control adecuados, que se describirán con más detalle a continuación, se sigue evitando que la turbina suministre una amortiguación negativa en relación con la resonancia. De hecho, la filosofía de control descrita suministrará una amortiguación positiva en relación con la resonancia y reducirá de este modo los movimientos del sistema. La filosofía de control de acuerdo con la presente invención solo dará como resultado, en cualquier caso, fluctuaciones menores en la potencia producida. Esto se demuestra mediante simulaciones numéricas. Además, la reducción de movimientos contribuirá significativamente a la reducción de la carga en la turbina eólica y la estructura de torre.

La figura 2 muestra una sección de un controlador de ángulo de pala, con un control proporcional e integral (PI), y un esbozo de la función de transferencia.

$H_{\beta-\Delta Z_{dot}}(s)$ , entre el ángulo de pala,  $\beta$ , y la velocidad de torre horizontal. Este es el cambio requerido en el ángulo de pala de turbina para mantener una potencia constante en la turbina cuando cambia la velocidad relativa.

Una vibración en  $\beta$  que tiene una frecuencia igual a la frecuencia propia  $\omega_{prop}$  de las vibraciones de torre dará como resultado, a través de la función de transferencia  $H_{\beta-\Delta Z_{dot}}(s)$ , la velocidad de la torre  $\Delta \dot{Z}$  dada por la amplificación y la fase de  $H_{\beta-\Delta Z_{dot}}(s)$  para  $\omega_{prop}$ . Se debe a que:

$$H_{\beta-\Delta Z_{dot}}(j\omega_{prop}) = K \cdot e^{j\varphi} \quad (1.1)$$

Para amortiguar las vibraciones en  $\beta$  con la frecuencia  $\omega_{prop}$ , es posible diseñar un estabilizador con la función de transferencia  $H_{estab}(s)$  entre  $\Delta \dot{Z}$  y  $\Delta \beta$  que es tal que la función de transferencia de bucle  $H_{\beta-\Delta Z_{dot}}(j\omega_{prop}) \cdot H_{estab}(j\omega_{prop}) = -b$ . Esto significa que:

$$H_{estab}(j\omega_{prop}) = \frac{-b}{K} e^{-j\varphi} \quad (1.2)$$

donde "b" es un amplificador de control variable. Este se selecciona sobre la base de la obtención de la mejor amortiguación posible de las oscilaciones de torre y, al mismo tiempo, evitando la excitación no deseada de otras frecuencias propias en función de las características de momento y de empuje de pala de turbina.

Dicha función de transferencia garantizará que el ángulo de pala no se ajuste para las fluctuaciones de velocidad que se producen en relación con la frecuencia propia de la torre. Esto producirá una amortiguación dependiente de la frecuencia. En relación con la frecuencia propia de la torre, esta amortiguación será equivalente a la amortiguación producida con un sistema de paso constante. Si se aumenta la amplificación, la amortiguación puede aumentarse aún más. Si se reduce, la amortiguación se reducirá hasta alcanzar un límite de contribución a la amortiguación de aproximadamente cero.

Para garantizar que el estabilizador no tenga un efecto no deseado sobre  $\beta$  en las frecuencias que son considerablemente diferentes de la frecuencia propia de las vibraciones de torre, es importante que  $H_{estab}(s)$  tenga los filtros necesarios que filtran estas frecuencias (véase la siguiente sección).

La figura 3 muestra un ejemplo de la función de transferencia entre el ángulo de pala y la velocidad de torre, así como la función de transferencia para un estabilizador que amortigua las vibraciones con la frecuencia propia de las vibraciones de torre.

5 Si se observa con atención el sistema mostrado en la figura 3 y se atiende a la señal que entra por la izquierda (variación en el ángulo de pala)  $\beta_0$ , puede establecerse la expresión para las velocidades de torre  $\Delta\dot{z}$  como

$$\Delta\dot{z} = H_{\beta-\Delta\dot{z}}(s)\beta_0 + H_{estab}(s)H_{\beta-\Delta\dot{z}}(s)\Delta\dot{z}, \quad (2.1)$$

10 Para las vibraciones de torre se obtiene entonces:

$$\Delta\dot{z} = \frac{H_{\beta-\Delta\dot{z}}(s)}{1 - H_{estab}(s)H_{\beta-\Delta\dot{z}}(s)}\beta_0 = H_{ls}(s)\beta_0, \quad (2.2)$$

15 En este caso,  $H_{ls}(s)$  es la función de transferencia para el bucle cerrado, incluyendo el estabilizador, desde  $\beta_0$  a  $\Delta\dot{z}$ .

Una amortiguación adicional que amortigua las vibraciones de torre en una frecuencia  $\omega_{prop}$  determinada puede diseñarse haciendo:

$$\begin{aligned} & H_{estab}(j\omega_{prop})H_{\beta-\Delta\dot{z}}(j\omega_{prop}) < 0 \\ & < H_{estab}(j\omega_{prop})H_{\beta-\Delta\dot{z}}(j\omega_{prop}) = 0 \quad (2.3) \\ & H_{ls}(s) \text{ estable} \end{aligned}$$

20 Cabe señalar que cualquier estabilizador diseñado de acuerdo con los criterios establecidos en (2.3) que reducirá las vibraciones de torre no suministrará necesariamente al sistema la amortiguación suficiente para hacerlo estable. Por lo tanto, además, es necesario exigir que el sistema sea estable cuando se seleccionan los parámetros de controlador para la turbina en cuestión.

25 Un ejemplo se basa en la frecuencia propia de las vibraciones de torre,  $\omega_{prop}$ , que es aproximadamente igual a 0,5 radianes/segundo ( $f_{prop} \approx 0,0795$  Hz), es decir, en una vibración de la torre que tiene un período de aproximadamente 12,57 s. El estabilizador de acuerdo con la presente invención, que se ha creado para amortiguar las vibraciones de torre que vibran con la frecuencia propia, tiene a continuación una función de transferencia como se muestra en la figura 4.

30 En la figura 5 se muestra un diagrama de Bode de esta función de transferencia. La figura muestra la respuesta de frecuencia del estabilizador diseñado. Las flechas definen la amplitud y la fase en relación con la frecuencia propia de la dinámica de torre.

35 En el diagrama elemental mostrado en la figura 6, la solución de estabilizador se incluye en la solución de control de acuerdo con la presente invención, y la figura muestra cómo la señal de salida del estabilizador está diseñada para modular el ángulo de pala de la turbina,  $\beta$ . El principio de la solución de acuerdo con la presente invención es, por lo tanto, amortiguar las vibraciones propias de la torre controlando el ángulo de pala de las palas de turbina de manera que se contrarresten las vibraciones propias. El estabilizador está diseñado de manera que solo tiene que influir en el ángulo de pala en el intervalo de frecuencias cercano a la frecuencia propia de las vibraciones de torre,  $\omega_{prop}$ . Un filtro de paso alto garantiza que no se proporciona ninguna amplificación (cero) a bajas frecuencias, y un filtro de paso bajo garantiza que no se proporciona ninguna amplificación (cero) a altas frecuencias. Además, debe ajustarse un filtro de compensación de fase de manera que la distorsión de fase en el estabilizador sea tal que una amortiguación adicional,  $\Delta\beta$  (+ o -), amortigüe las vibraciones en  $\Delta\dot{z}$  que se provocan por la frecuencia propia de las vibraciones de torre,  $\omega_{prop}$ . En otras palabras, esto significa que el ángulo de pala se ve influido por una amplitud y una fase en relación con la velocidad de torre  $\Delta\dot{z}$  de tal manera que amortigua las vibraciones en la torre que tienen una frecuencia  $\omega_{prop}$ .

40 El uso del estabilizador lleva a que la turbina experimente una velocidad relativa del viento con una influencia muy reducida de las vibraciones propias de la torre en relación con una situación en la que no se usa el estabilizador. Además, la torre vibrará físicamente mucho menos cuando se use un estabilizador.

45 Ensayos de simulación

50 Sobre la base de la solución de control que se ha descrito anteriormente, se realizaron ensayos de simulación para dos series de viento con una velocidad media del viento de 17,43 m/s y 20,04 m/s. Estas velocidades se seleccionaron debido a que la necesidad de amortiguación es mayor a estas altas velocidades de viento, es decir, cuando se hacen funcionar las turbinas en modo de potencia constante.

Las figuras 7 y 8 muestran una selección de los resultados de la simulación de series de viento a 17,43 m/s con y sin estabilizadores para amortiguar las vibraciones de torre.

La figura 7 muestra que existen vibraciones de torre considerables cuando se hace funcionar la turbina en modo de potencia constante y no se usa el estabilizador. Esto también da como resultado grandes fluctuaciones en la potencia suministrada a la red (véase la figura 8). Las elevadas amplitudes en las vibraciones de torre pueden explicarse de la siguiente manera:

en el intervalo de RPM constante, el empuje se reduce cuando aumenta la velocidad del viento. Si la torre asume una velocidad de retroceso, se reducirá la velocidad relativa del viento que experimenta la torre. El ángulo de pala (paso) se ajustará (aumentará) para mantener el momento y, por lo tanto, la potencia constante. Por lo tanto, el empuje también aumentará a pesar de la reducción de la velocidad relativa del viento. En consecuencia, cuando la torre se mueve a una velocidad en contra de la dirección del viento, aumentará la velocidad relativa del viento. El ángulo de pala (paso) se ajustará (reducirá) para reducir el momento. Esto también reducirá el empuje. Este método de regulación de la turbina producirá, por lo tanto, una variación en el empuje que actúa en la misma dirección que el movimiento de torre. Es decir, una amortiguación negativa. Esto dará como resultado una amplificación del movimiento de torre, en particular cerca del periodo de resonancia de la torre en el que el movimiento se controla por amortiguación. Estas son las vibraciones de torre para cuya amortiguación se diseñó el estabilizador descrito anteriormente. En el ejemplo en cuestión, las vibraciones son tan grandes que, incluso si se hace funcionar la turbina en modo de potencia constante, no es posible suministrar una potencia constante, figura 8.

Si se usa el estabilizador de acuerdo con la presente invención, la figura 7 muestra que las vibraciones de torre se amortiguan bien, y la figura 8 muestra que la variación de potencia también se reduce considerablemente. Por lo tanto, el estabilizador produce el efecto deseado. En algunas partes de la simulación, la amplitud de las vibraciones de torre se redujo de más de 10 m sin un estabilizador a menos de 1 m con un estabilizador.

La figura 9 y la figura 10 muestran los resultados para el caso con una velocidad del viento de 20,04 m/s. Puede observarse que la turbina suministra una potencia aproximadamente constante sin un estabilizador, figura 9, pero que las vibraciones de torre se acumulan gradualmente hasta convertirse en grandes fluctuaciones, figura 10. Si se usa un estabilizador, la potencia permanece aproximadamente constante, a la vez que se logra una considerable reducción en el movimiento de torre.

La figura 11 muestra un diagrama general de una turbina eólica que incluye el estabilizador de acuerdo con la presente invención. Leyenda para las figuras:

- $u_t$  - Velocidad del viento resultante en la turbina
- $\beta$  - Angulo de pala
- $T_{turb}$  - Momento mecánico en el lado de turbina del árbol
- $T_g$  - Momento mecánico en el lado de generador del árbol
- $\omega_t$  - RPM en el lado de turbina del árbol
- $\omega_g$  - RPM en el lado de generador del árbol
- $n_g$  - Conversión de guiñada (en el presente documento esto es igual a 1)
- $u_f$  - Tensión interna del generador de imanes permanentes
- $f_1$  - Frecuencia de la tensión terminal del generador de imanes permanentes
- $P_s$  - Potencia activa suministrada por el generador de imanes permanentes
- $U_s$  - Tensión terminal del generador de imanes permanentes
- $U_d$  - Tensión en el circuito intermedio de CC
- $f_n$  - Frecuencia de la tensión principal
- $Q_{red}$  - Potencia reactiva suministrada por la turbina eólica a la red

En resumen, el estabilizador actúa recibiendo la señal asociada con el cambio en la velocidad de torre,  $\dot{\Delta\beta}$ , procedente de un sensor (no mostrado) en forma de un acelerómetro o similar. La señal se "procesa" por el estabilizador, que emite una nueva señal a un controlador para que las palas de rotor cambien el ángulo de paso,  $\Delta\beta$ , de las palas para lograr la amortiguación deseada de las vibraciones en la torre como se ha descrito anteriormente.

La invención, tal como se define en las reivindicaciones, no se limita a los ejemplos descritos anteriormente. Por lo tanto, el paso de las palas de turbina de la turbina eólica puede controlarse de manera conjunta, es decir, el mismo ángulo de paso,  $\beta$ , para todas las palas, o de manera individual con un ángulo de paso diferente para cada pala.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para amortiguar vibraciones de torre en una instalación de turbina eólica flotante, comprendiendo la instalación una celda flotante, una torre dispuesta sobre la celda flotante, un generador montado en la torre que puede hacerse girar en relación con la dirección del viento y equipado con una turbina eólica que comprende unas palas de turbina, y una disposición de línea de anclaje que puede conectarse a los anclajes o los cimientos en un fondo marino; comprendiendo el método:

controlar el generador en respuesta a los cambios en la velocidad relativa del viento contra la turbina, controlando el ángulo de pala de las palas de turbina por medio de un controlador en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica; y amortiguar las vibraciones propias de la torre ( $\omega_{prop}$ ) mediante, además del control del controlador en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica, un aumento ( $\Delta\beta$ ) que se añade al ángulo de pala de las palas de turbina sobre la base de las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ), de manera que se contrarrestan las vibraciones propias de la torre; en el que las vibraciones en el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre ( $\Delta Z$ ) que tienen una frecuencia  $\omega_{prop}$  se amortiguan por medio de un estabilizador con una función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta\beta$ ) y en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso bajo que está dispuesto de tal manera que el estabilizador no influye en el ángulo de pala a frecuencias en un intervalo superior a la frecuencia propia de las vibraciones de torre ( $\omega_{prop}$ ).

2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta\beta$ ) es tal que la función de transferencia de bucle  $H_{\beta} \cdot \Delta Z_{dot} (j\omega_{prop}) \cdot H_{estab} (j\omega_{prop}) = -b$ , lo que significa que:

$$H_{estab} (j\omega_{prop}) = \frac{-b}{K} e^{-j\varphi}$$

donde "b" es una variable que depende de las características de momento y de empuje de las palas.

3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que la función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta\beta$ ) es tal que la función de transferencia de bucle  $H_{\beta} \cdot \Delta Z_{dot} (j\omega_{prop}) \cdot H_{estab} (j\omega_{prop}) = -1$ , lo que significa que:

$$H_{estab} (j\omega_{prop}) = \frac{-1}{K} e^{-j\varphi}$$

4. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso alto que garantiza que no se proporciona una amplificación a bajas frecuencias.

5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el estabilizador está provisto de un filtro de compensación de fase que se ajusta de manera que la distorsión de fase en el estabilizador es tal que el aumento de ángulo de pala ( $\Delta\beta$ ) amortigua las vibraciones en las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ) que se provocan por la frecuencia propia de las vibraciones de torre ( $\omega_{prop}$ ).

6. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que se controla individualmente el paso ( $\beta$ ) de cada una de las palas de turbina.

7. Un controlador de ángulo de pala para controlar el ángulo de pala de las palas de turbina en una instalación de turbina eólica flotante, comprendiendo la instalación una celda flotante, una torre dispuesta sobre la celda flotante, un generador montado en la torre que puede hacerse girar en relación con la dirección del viento y equipado con una turbina eólica que comprende unas palas de turbina, y una disposición de línea de anclaje que puede conectarse a los anclajes o los cimientos en un fondo marino; en el que el controlador de ángulo de pala está adaptado para controlar el generador en respuesta a los cambios en la velocidad relativa del viento contra la turbina, controlando el ángulo de pala de las palas de turbina en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica; y para amortiguar las vibraciones propias de la torre ( $\omega_{prop}$ ) mediante, además del control del ángulo de pala de las palas de turbina en la potencia constante o el intervalo de RPM de la turbina eólica, un aumento ( $\Delta\beta$ ) que se añade al ángulo de pala de las palas de turbina sobre la base de las velocidades de torre ( $\Delta\dot{z}$ ), de manera que se contrarrestan las vibraciones propias de la torre;

en el que las vibraciones en el desplazamiento horizontal de la parte superior de la torre ( $\Delta Z$ ) que tienen una frecuencia  $\omega_{prop}$  se amortiguan por medio de un estabilizador con una función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta \dot{Z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta \beta$ ) y

5 en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso bajo que está dispuesto de tal manera que el estabilizador no influye en el ángulo de pala a frecuencias en un intervalo superior a la frecuencia propia de las vibraciones de torre ( $\omega_{prop}$ ).

8. Un controlador de ángulo de pala de acuerdo con la reivindicación 7, en el que la función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta \dot{Z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta \beta$ ) es tal que la función de transferencia de bucle  $H_{\beta-\Delta Z\_dot}(j\omega_{prop}) \cdot H_{estab}(j\omega_{prop}) = -b$ ,  
 10 lo que significa que:

$$H_{estab}(j\omega_{prop}) = \frac{-b}{K} e^{-j\varphi}$$

15 donde "b" es una variable que depende de las características de momento y de empuje de las palas.

9. Un controlador de ángulo de pala de acuerdo con la reivindicación 7 u 8, en el que la función de transferencia ( $H_{estab}(s)$ ) entre las velocidades de torre ( $\Delta \dot{Z}$ ) y el aumento de ángulo de pala ( $\Delta \beta$ ) es tal que la función de transferencia de bucle  $H_{\beta-\Delta Z\_dot}(j\omega_{prop}) \cdot H_{estab}(j\omega_{prop}) = -1$ ,  
 20 lo que significa que:

$$H_{estab}(j\omega_{prop}) = \frac{-1}{K} e^{-j\varphi}$$

10. Un controlador de ángulo de pala de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que el estabilizador está provisto de un filtro de paso alto que garantiza que no se proporciona una amplificación a bajas frecuencias.  
 25

11. Un controlador de ángulo de pala de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en el que el estabilizador está provisto de un filtro de compensación de fase que se ajusta de manera que la distorsión de fase en el estabilizador es tal que el aumento de ángulo de pala ( $\Delta \beta$ ) amortigua las vibraciones en las velocidades de torre ( $\Delta \dot{Z}$ ) que se provocan por la frecuencia propia de las vibraciones de torre ( $\omega_{prop}$ ).  
 30

12. Un controlador de ángulo de pala de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, en el que se controla individualmente el paso ( $\beta$ ) de cada una de las palas de turbina.  
 35



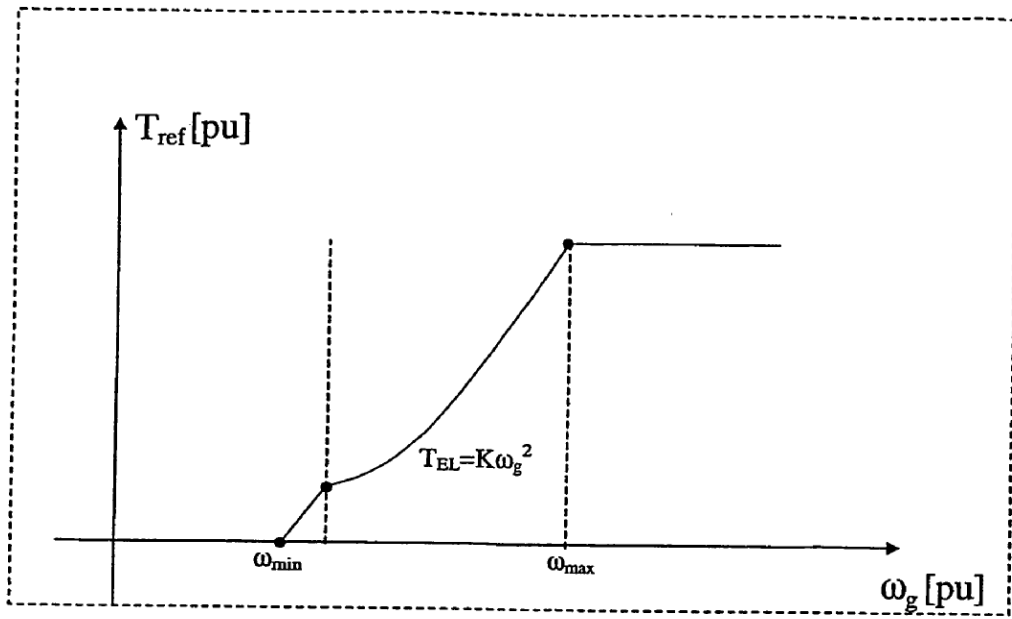


Fig. 1

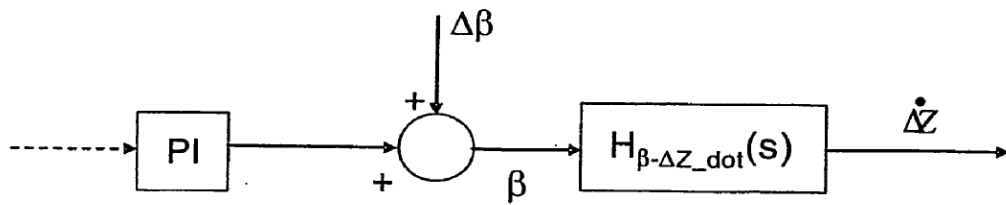


Fig.2

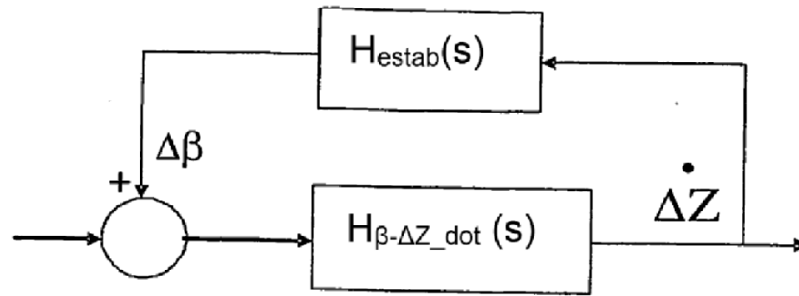


Fig. 3

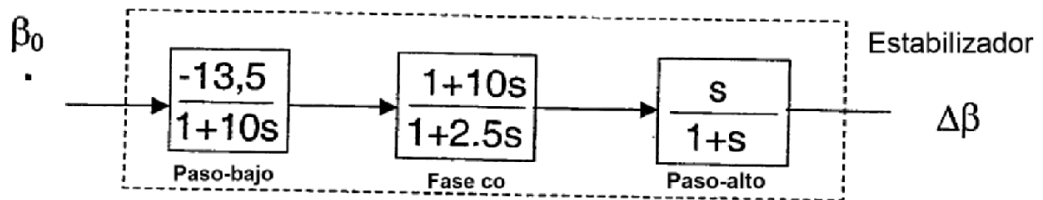


Fig. 4

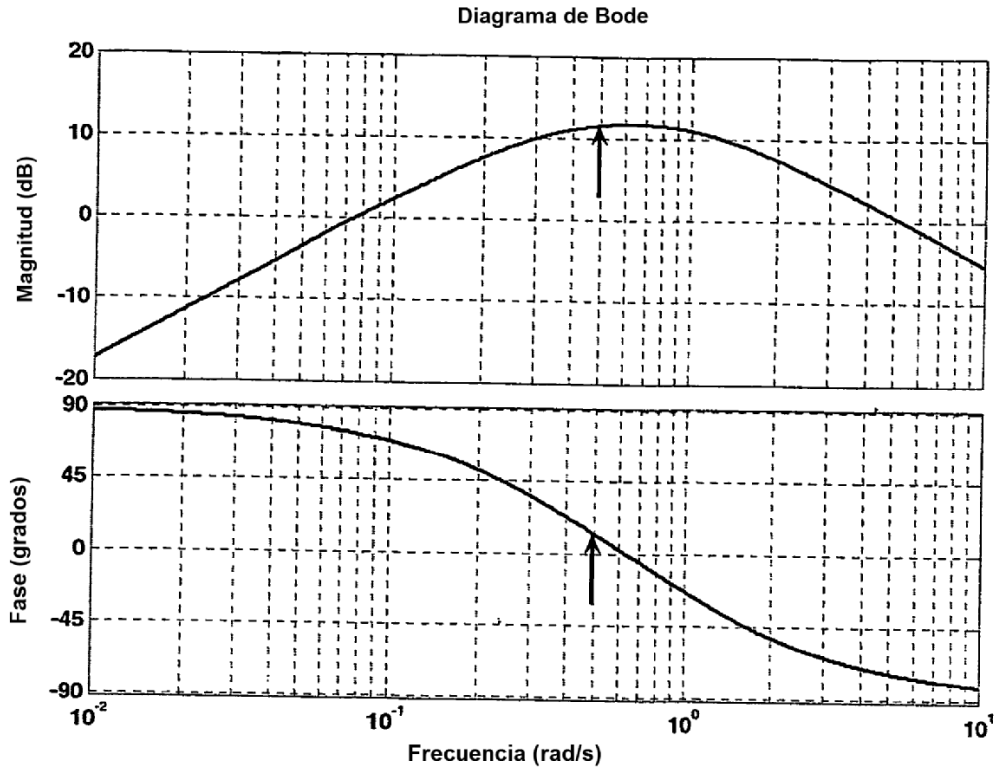


Fig. 5

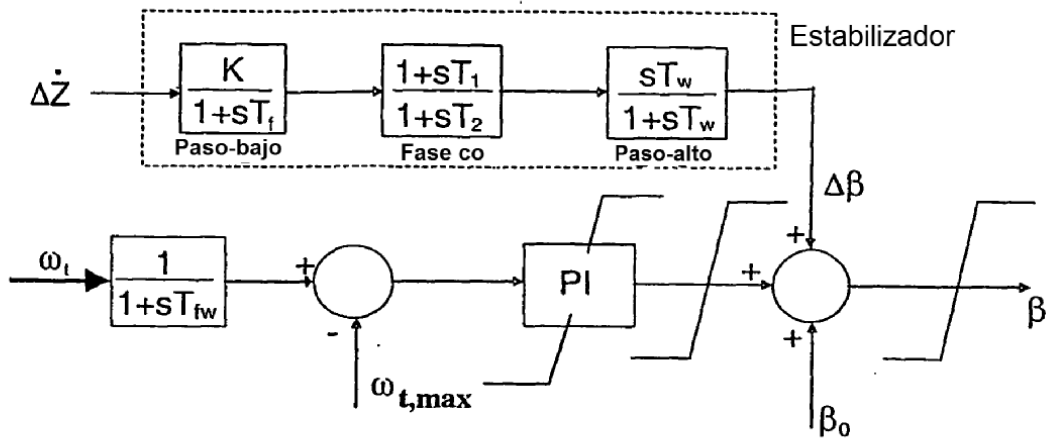


Fig. 6

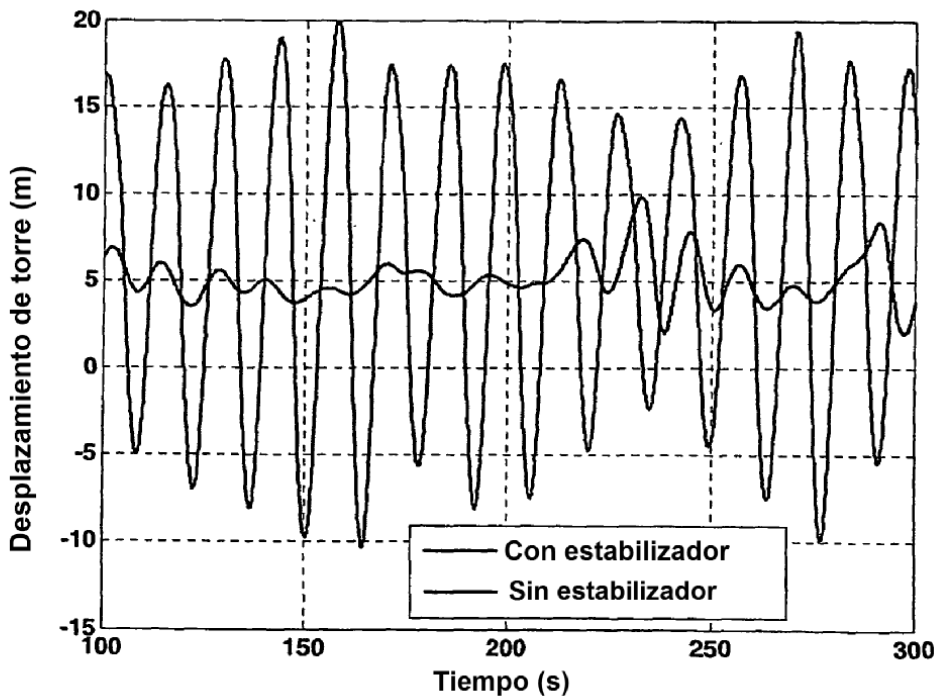


Fig. 7

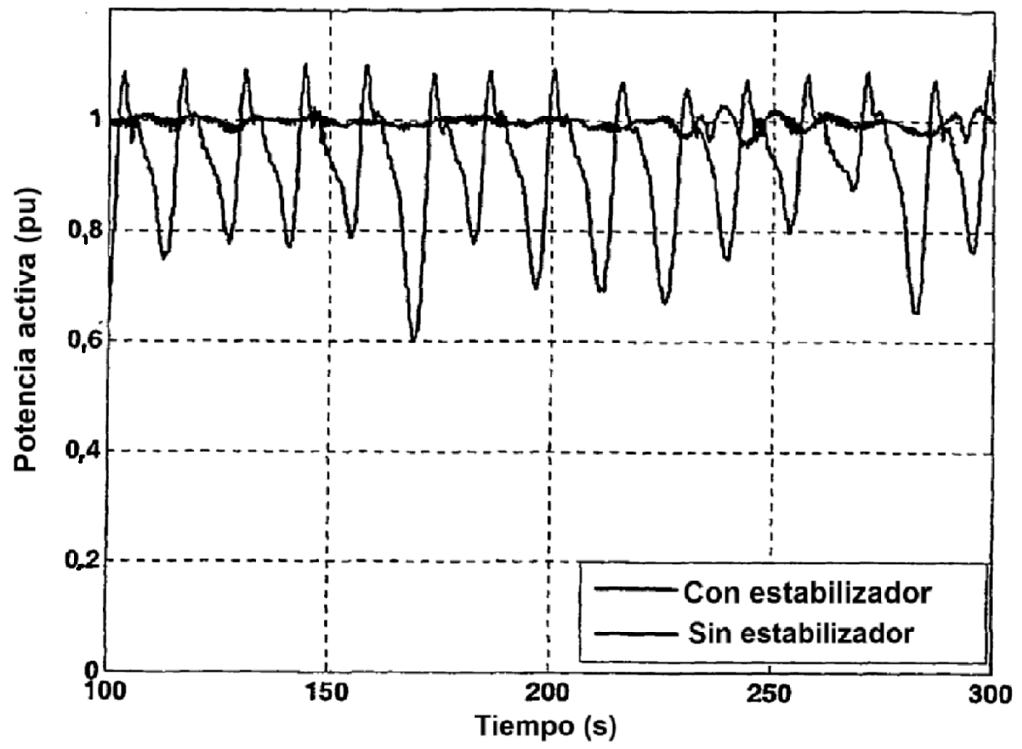


Fig. 8

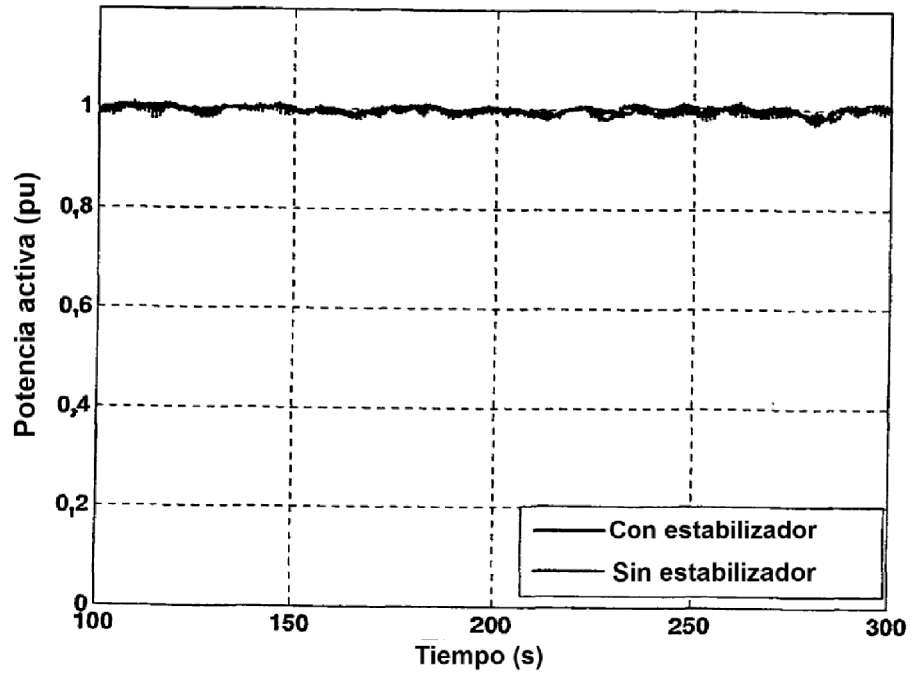


Fig. 9

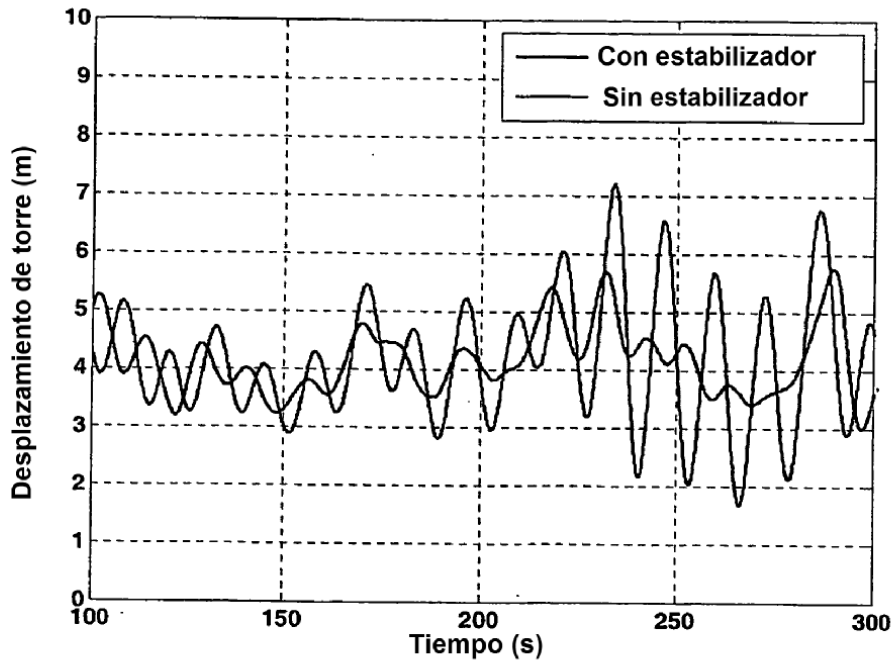


Fig. 10

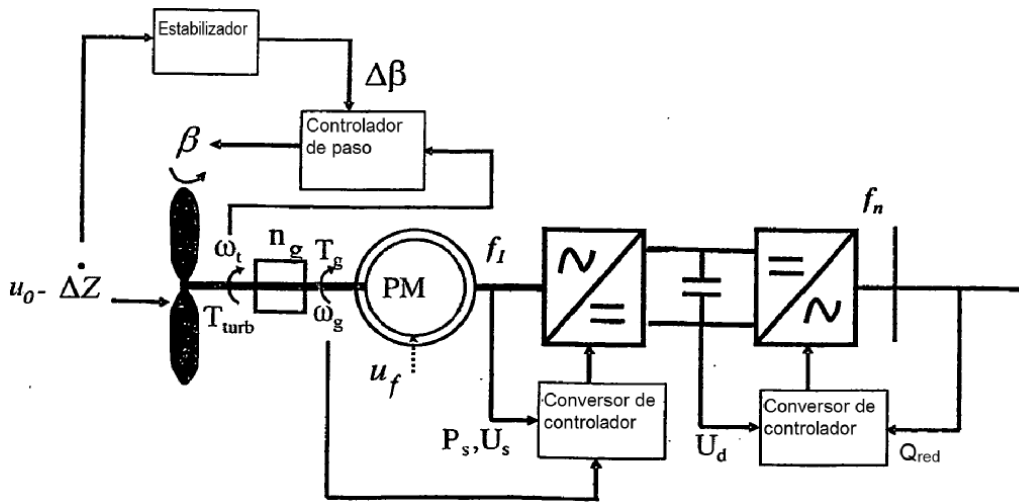


Fig. 11