



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 361 575**

51 Int. Cl.:  
**F03D 7/02** (2006.01)  
**F03D 11/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07734948 .8**  
96 Fecha de presentación : **18.06.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2115299**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **11.11.2009**

54 Título: **Amortiguación del movimiento resonante de la torre y del movimiento simétrico de las palas de una turbina eólica utilizando procedimientos de estimación.**

30 Prioridad: **28.12.2006 US 878042 P**

73 Titular/es: **Clipper Windpower, Inc.**  
**6305 Carpinteria avenue, Suite 300**  
**Carpinteria, California 93013, US**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**20.06.2011**

72 Inventor/es: **Wilson, Kitchener Clark**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**20.06.2011**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

**ES 2 361 575 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

Amortiguación del movimiento resonante de la torre y del movimiento simétrico de las palas de una turbina eólica utilizando procedimientos de estimación

**Antecedentes de la invención**

- 5 La invención se refiere a estructuras de torre, tal como torres de turbinas eólicas y más particularmente a la amortiguación de las frecuencias resonantes primarias de turbina modulando el ángulo de paso de palas mientras se mantiene un par o potencial nominal.

**Descripción de la técnica anterior**

- 10 Las grandes turbinas eólicas modernas tienen diámetros de rotor de hasta 100 metros con torres de una altura para acomodarlas. En los Estados Unidos se está considerando que las torres verticales para algunos lugares, tales como las Grandes Llanuras Americanas, aprovechan las estimaciones de que duplicando la altura de la torre se aumenta la potencia del viento disponible en un 45%.

- 15 Varias técnicas están en servicio, o propuestas para su uso, para controlar una turbina eólica. El objetivo de estas metodologías de control es maximizar la generación de potencia eléctrica mientras se minimizan las cargas mecánicas impuestas sobre los diversos componentes de turbina. Las cargas causan tensión y esfuerzo y son la fuente de fallos por fatiga que acortan la vida útil de los componentes. Reducir las cargas permite el uso de componentes más ligeros y más pequeños, una importante consideración dada las dimensiones cada vez mayores de las turbinas eólicas. Reducir las cargas permite también el uso de los mismos componentes en turbinas de mayor potencia para manejar la mayor energía de viento o permite un aumento en el diámetro del roto para la misma potencia nominal.

- 20 Las turbinas eólicas, y las torres que las soportan, tienen una dinámica compleja influenciada por la actividad del viento así como las entradas de control. La dinámica incluye las revoluciones por minuto (RPM) del rotor, el movimiento de la torre ligeramente amortiguado, el movimiento de transmisión ligeramente amortiguado, la flexión de palas flexibles, etc. El control de turbina eólica es un hecho de equilibrio entre la provisión de un buen control de las revoluciones por minuto de la turbina, la adición de amortiguación de movimiento de torre, y la adición de amortiguación de transmisión a la vez que se minimiza o no se exagera la flexión de las palas. El control de estado, con complejos modelos de todas estas dinámicas, cumple con esto, pero tales controles son complejos y difíciles de desarrollar.

- 25 Es deseable proporcionar un procedimiento de control que añade amortiguación de la torre modulando los comando de paso de control generados por procedimientos de control convencionales (por ejemplo, compensadores proporcionales-integrales (PI). Tal procedimiento se puede adaptar a la inclusión en algoritmos de control de estado de estado así como para ser usado como adjunto a controles convencionales.

- 30 Los enfoques de amortiguación, por ejemplo la amortiguación de la torre, consisten generalmente en medir la aceleración de torre, detectar el modo resonante natural de torre dentro de la aceleración, y generar un paso de realimentación de palas que añade amortiguación. Las patentes de los Estados Unidos número 4.420.692 y 4.435.647 divulgan el uso de filtros de pasabanda convencionales aplicados a la amortiguación del primer momento de flexión de la torre mediante el uso de control de paso de palas. Este tipo de amortiguación en muchas situaciones aumenta el movimiento de flexión de palas, lo cual es inaceptable.

- 35 La señal de aceleración ha superpuesto al movimiento resonante natural de la torre, entre otros, una aceleración debida a la fuerza "tres por revolución" (3P) producida por los desequilibrios y las no-linealidades aerodinámicas de pala. No eliminar algunos de estas componentes de la señal de amortiguación de realimentación de paso puede agravar el movimiento de pala y conducir a la fatiga y el fallo de las palas. En particular la señal 3P recogida por el acelerómetro de torre 144 usada para amortiguación es muy cercana a la frecuencia resonante de torre y dentro de la pasa banda de los filtros de pasabanda divulgado en las patentes 4.420.692 y 4.435.647. Usar los filtros de pasabanda da como resultado señales 3P que san a través del control de paso de palas con una fase arbitraria. La fuente de la señal 3P es el modo de flexión simétrica de las palas donde las tres palas del rotor se mueven juntas, flexionándose hacia dentro y hacia fuera del plano del disco de rotor de palas. La componente de frecuencia 3P es cercana a la frecuencia resonante del modo de flexión simétrica de las palas y, cuando pasa con cambios de fase causados por el filtro de pasabanda, exagera la flexión simétrica de las palas.

- 40 Por lo tanto es deseable proporcionar un medio para separar el movimiento resonante de torre del causado por el desequilibrio de palas 3P. Los enfoques convencionales para eliminar una componente de frecuencia consisten en colocar un filtro de ranura en serie con el filtro pasabanda convencional. La ranura 3P, que está cercana en frecuencia al pasabanda, añade su error de fase y ganancia a la salida final dificultando el control. Este proceso no produce estimaciones del movimiento resonante de torre y del movimiento 3P.

Es deseable proporcionar estimaciones del movimiento de la torre y su frecuencia resonante conocida usando solamente las mediciones de aceleración de torre. Tales estimaciones, no corrompidas por otros movimientos, son necesarias para generar señales de realimentación de paso para la amortiguación de movimiento resonante de torre.

- 5 También es deseable proporcionar estimaciones de la aceleración 3P causada por la rotación de las tres palas desequilibradas. Tales estimaciones no corrompidas por el movimiento resonante de la torre y con fase seleccionada de manera a no exacerbar la flexión de las palas, son necesarias para la amortiguación de la torre y las palas y el control general de la turbina.

### **Sumario de la invención**

- 10 En breve, la presente invención se refiere a un aparato según la reivindicación 1 y un procedimiento según la reivindicación 6 para controlar una turbina eólica que tiene un número de palas de rotor que comprende un procedimiento para usar mediciones de aceleración de torre para amortiguar el movimiento resonante de la torre, y amortiguar el movimiento 3P y por consiguiente la flexión simétrica de las palas. La aceleración resonante de la torre es causada por la respuesta colectiva de la torre y las palas respecto del promedio de los cambios del viento en todo el disco de palas. Con tres palas desequilibradas girando en un gradiente de viento (vertical, horizontal o debido a un desalineamiento de guiñada), la interacción del flujo de aire con las palas es un movimiento de tres veces por revolución superpuesto al movimiento resonante. La aceleración global resultante de la torre incluye el movimiento resonante ligeramente amortiguado de la estructura de la torre con actividad superpuesta de tres veces por revolución. Este movimiento de la torre causa fallo por fatiga y acorta la vida de la torre.

- 20 Asimismo, las propias palas son estructuras flexibles alargadas que tienen sus propios modos de flexión y movimiento resonante. Como los comandos de paso son accionados sobre estas palas girándolas y a partir de posiciones de cambio de paso, la flexión de palas se ve fuertemente influenciada. Si los comandos de paso incluyen una componente de frecuencia cercana a la frecuencia resonante de flexión simétrica de las palas, la actividad de paso puede exacerbar la flexión de las palas y aumentar la carga de las palas y acortar su vida.

- 25 La invención permite que un aparato amortigüe al menos una componente de frecuencia de movimiento no deseada en una torre de turbina eólica. Una lógica de comandos de paso desarrolla una señal de comando de paso de palas de rotor. Una lógica de amortiguación de torre usa mediciones de aceleración de torre para estimar dicha al menos una componente de frecuencia de movimiento usando un estimador basado en un modelo.

- 30 La lógica de amortiguación de torre produce una modulación de paso colectiva basada en dicha al menos una estimación de componente. Una lógica de combinación conectada a dicha lógica de amortiguación de torre y a dicha lógica de comando de paso genera una salida que es un comando de paso de palas combinadas capaz de controlar el paso de las palas de rotor, lo cual incluye amortiguar dicha al menos una componente de frecuencia de movimiento de torre de turbina eólica.

- 35 Según un aspecto de la invención, la turbina eólica usa comando de paso de realimentación para controlar el paso de las palas con el fin de controlar las revoluciones por minuto del rotor y la potencia generada por la turbina. La presente invención añade a este paso de realimentación de control de revoluciones por minuto, una componente de realimentación para amortiguar el movimiento resonante de torre que no incluye frecuencias que exacerban la flexión de las palas. Esta componente de paso de realimentación de amortiguación de movimiento resonante de torre se aplica colectivamente (de manera idéntica a cada pala).

- 40 Según un aspecto de la invención, la presente invención añade, además, una componente de paso de realimentación que reduce el movimiento de torre 3P y, por lo tanto, la flexión de las palas. Esta componente de paso de realimentación de amortiguación de movimiento 3P se aplica también colectivamente.

- 45 Según un aspecto de la invención, con el fin de amortiguar el movimiento de la torre, el control de turbina incluye un medio para estimar el movimiento resonante de la torre y estimar simultáneamente el movimiento 3P de la torre. El control produce, además, una señal de realimentación de paso de amortiguación de la torre y una señal de paso de realimentación de paso de amortiguación 3P.

- 50 Según un aspecto de la invención, esto se consigue mediante un estimador que usa solamente las mediciones de aceleración de torre y que está sintonizado para estimar específicamente la aceleración resonante de la torre y estimar simultáneamente la aceleración 3P de la torre. La señal de realimentación de paso de amortiguación resonante de la torre se forma a partir de la tasa de aceleración resonante estimada de la torre, y la señal de realimentación de paso 3P se forma a partir de la tasa de aceleración de torre 3P.

Además, para corregir el accionador de paso y otros retardos del sistema de turbina, cada señal de realimentación está provista de un control individual de fase para avanzar o retardar cada una según las necesidades. La señal de realimentación de paso 3P no exacerba el modo de flexión simétrica de las palas puesto que su fase está establecida para mitigar este modo.

Asimismo, para dar cuenta de las condiciones variables del viento, cada señal de realimentación está provista de una ganancia que se adapta a la condición.

5 Las señales de realimentación se forman como modulaciones de las señales de paso nominal desarrolladas por los controles de torre (espacio de estado, Proporcional-Integral-Derivado- PID, ...) para revoluciones por minuto u otros fines. El comando de paso final respecto del accionador de paso es la suma de la modulación nominal. La modulación de paso de amortiguación de torre resonante, y la modulación de realimentación de paso 3P.

Según un aspecto de la invención, la aceleración causada por el movimiento 3P de las palas desequilibradas se rechaza en la señal de realimentación de paso resonante de la torre.

10 Según un aspecto de la invención, la aceleración causada por el movimiento resonante de la torre se rechaza en la señal de realimentación de paso 3P.

15 La invención tiene la ventaja de que libra la señal de control de paso de movimiento resonante de la torre de la señal 3P (o cualquier frecuencia seleccionada) mientras pasa la primera frecuencia de flexión de la torre (o cualquier otra frecuencia seleccionada). Además, libra la señal de control de paso 3P de la señal de movimiento resonante de la torre (o cualquier otra frecuencia seleccionada) mientras pasa la frecuencia 3P (o cualquier otra frecuencia seleccionada). Además, proporciona señales de paso de realimentación para mitigar el movimiento resonante de torre y el movimiento 3P.

Esto sigue siendo cierto incluso cuando tales frecuencias están demasiado cerca para usar filtros de frecuencia convencionales.

20 Asimismo, según la invención se proporciona un procedimiento para usar mediciones de aceleración de la torre para amortiguar el movimiento de resonancia de la torre. Este procedimiento también suprime señales no deseadas en las mediciones, en una torre de turbina eólica que usa un comando de paso para controlar el paso de las palas de rotor de dicha turbina eólica.

Según la invención el procedimiento comprende las etapas de:

medir la aceleración de la torre;

25 estimar la aceleración resonante de la torre y la aceleración no deseada usando las mediciones de aceleración con un estimador basado en un modelo;

proporcionar una modulación resonante de paso de palas para amortiguar el movimiento de la torre usando dichas estimaciones de aceleración resonante de la torre;

30 combinar dicha modulación resonante de paso de palas con dicho comando de paso dando como resultado un comando de paso combinado, y

usar dicho comando de paso combinado para controlar el paso de dichas palas de rotor con el fin de amortiguar dicho movimiento resonante de la torre de turbina eólica mientras se suprime el movimiento no deseado.

Asimismo, se incluye un procedimiento para introducir una fase deseada para compensar los retardos del accionador.

35 Asimismo, se incluye un procedimiento de adaptación de ganancia a las condiciones del viento. Esto es una técnica muy general y relativamente sencilla que se puede usar para detectar una señal de frecuencia cuando otra está cerca y se puede usar ventajosamente para muchos fines distintos de la amortiguación del movimiento de la torre.

### **Breve descripción de los dibujos**

40 La invención y su modo operativo se entenderá mejor a partir de la siguiente descripción detallada cuando se toman con los dibujos anexos en los cuales:

**La figura 1** es un diagrama de bloques de una turbina eólica de velocidad variable según la presente invención que representa los elementos clave de turbina.

**La figura 2** es un diagrama de bloques de un sistema de amortiguación de torre según la presente invención.

45 **La figura 3** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la tasa de aceleración resonante de torre estimada llevada a cabo por la aceleración medida de la torre antes de la selección de parámetros.

**La figura 4** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la tasa de aceleración resonante de torre estimada llevada a cabo por la aceleración medida de la torre después de la selección de parámetros.

**La figura 5** es una visualización gráfica de una tasa de muestras de sensibilidad de aceleración respecto del estado de paso estable donde el paso es un sustituto para la velocidad del viento.

**La figura 6** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la modulación de paso para compensar la aceleración resonante de la torre llevada a cabo por la aceleración medida de la torre después de la selección de parámetros y la provisión de ganancia adaptativa (y velocidad del viento de 14 m/s o un grado de inclinación de 10,77).

**La figura 7** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la modulación de paso para compensar la aceleración resonante de la torre llevada a cabo por la aceleración medida de la torre después de la selección de parámetros y la provisión de ganancia adaptativa (y velocidad del viento de 14 m/s o un grado de inclinación de 10,77) y la adición de un avance de fase de 30 grados.

**La figura 8** es una visualización gráfica de la función de transferencia de una replicación de los filtros convencionales de pasabanda y de ranura de la figura 4 para ilustrar el error de fase introducido.

**La figura 9** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la tasa de aceleración 3P estimada llevada a cabo por la aceleración medida de la torre después de la selección de parámetros.

**La figura 10** es una visualización gráfica de la función de transferencia de la tasa de aceleración 3P estimada desfasada -30 grados llevada a cabo por la aceleración medida de la torre después de la selección de parámetros.

#### Descripción detallada de la invención

En referencia a la **figura 1**, que es un diagrama de bloques de un aparato de turbina eólica de velocidad variable según la presente invención. El dispositivo generador de potencia eólica incluye una turbina con uno o más generadores eléctricos alojados en una góndola 100, que está montada en la parte superior de una estructura de torre vertical 102 anclada al suelo 104. La góndola 100 descansa sobre una plataforma de guiñada 101 y puede girar libremente en el plano horizontal alrededor de un pivote de guiñada 106 y se mantiene en la trayectoria de la corriente de viento principal.

La turbina tiene un rotor con palas de paso variable 112, 114, fijadas a un cubo de rotor 118. Las palas giran en respuesta a la corriente de viento. Cada una de las palas puede tener una sección de base de pala y una sección de extensión de pala de manera que el rotor sea de longitud variable para proporcionar un rotor de diámetro variable. Como se describe en la patente de los Estados Unidos número 6.726.439, el diámetro de rotor se puede controlar para extender totalmente el rotor a baja frecuencia de flujo y para retirar el rotor, cuando se incrementa la velocidad de flujo de manera que las cargas distribuidas por o ejercidas sobre el rotor no sobrepasan límites establecidos. La góndola 100 se mantiene sobre la estructura de torre en la trayectoria de la corriente de viento de manera que a góndola de mantiene en posición horizontal alineada aproximadamente con la corriente principal. El generador eléctrico es accionado por la turbina para producir electricidad y se conecta a cables portadores de energía eléctrica que se interconectan a otras unidades y/o a una red eléctrica.

El aparato mostrado en la **figura 1** controla las revoluciones por minuto de una turbina eólica y amortigua el movimiento resonante de la torre y el movimiento 3P. El paso de las palas es controlado de una manera convencional por una componente de comando, una lógica de comando de paso 148, que usa las revoluciones por minuto del generador 138 para desarrollar una señal de comando de paso de palas de rotor nominal 154. La lógica de amortiguación 146 conectada a la señal de aceleración de torre 143 genera un comando de modulación de paso de palas estimada 152. La lógica de combinación 150 conectada al comando de modulación de paso de palas estimada 152 y al comando de paso 154 proporciona un comando de paso de palas combinado 156 capaz de controlar el paso de las palas de rotor, incluyendo dicho comando de paso de palas combinado la amortiguación del movimiento resonante de la torre de turbina eólica y del movimiento de desequilibrio de palas 3P.

El aparato mostrado en la **figura 2** compensa la resonancia de la torre y el desequilibrio de las palas en una turbina eólica 200. El paso nominal de las palas se controla de una manera convencional 201 mediante una componente de comando 248, que usa las propias revoluciones por minuto del generador 238 para desarrollar la modulación de movimiento 3P 249. La lógica de combinación 250 conectada a los comandos de modulación de paso de palas 247 y 249 y al comando de paso colectivo 248, proporciona un comando de paso de palas combinado 252 capaz de controlar el paso de las palas de rotor, que incluye amortiguar la torre de turbina eólica y las palas.

La lógica de amortiguación de torre 240 comprende un estimador de movimiento de torre 246 que usa mediciones de aceleración de torre 245 para estimar el movimiento resonante de la torre 260 y el movimiento 3P de la torre 262. Las estimaciones de movimiento resonante 260 se ajustan en fase 264 y amplifican mediante una ganancia adaptativa 266 usando la componente de comando RPM colectiva 248 para seleccionar la ganancia apropiada. Las estimaciones de movimiento 3P 262 están ajustadas en fase 265 y se amplifican mediante una ganancia adaptativa 267 usando la componente de comando RPM colectiva 248 para seleccionar la ganancia apropiada.

El estimador: La lógica de estimador resonante de torre se basa en un modelo amortiguado de segundo orden del movimiento resonante de torre:

$$a_{resonante} = -\omega_{resonante}^2 x_{resonante} - 2\omega_{resonante} \xi_{resonante} v_{resonante}$$

5 en el cual  $a$  es la aceleración (m/s/s),  $v$  es la velocidad (m/s),  $x$  es la posición (m), y  $\xi_{resonante}$  es el coeficiente de amortiguación de la respuesta resonante de torre de estimador (no necesariamente de la dinámica de la torre) usada para sintonizar su respuesta, y  $\omega_{resonante}$  es la frecuencia resonante conocida de este movimiento. Tomando dos derivadas respecto del tiempo, este modelo se escribe en términos de aceleración solamente como:

$$\ddot{a}_{resonante} = -\omega_{resonante}^2 a_{resonante} - 2\omega_{resonante} \xi_{resonante} \dot{a}_{resonante} + \delta_{resonante}$$

10 El término añadido  $\delta_{resonante}$  (m/s/s/s) es una cantidad de ruido estocástica que representa imprecisiones en el modelo y su desviación estándar  $\sigma$  se usa para sintonizar, además, la respuesta de estimador.

El estimador se basa, además, en un modelo amortiguado de segundo orden del movimiento de gradiente de viento 3P.

$$\ddot{a}_{3P} = -\omega_{3P}^2 a_{3P} - 2\omega_{3P} \xi_{3P} \dot{a}_{3P} + \delta_{3P}$$

en la que  $\xi_{3P}$  y  $\delta_{3P}$  se usan igualmente para sintonizar la respuesta de estimador.

15 El estimador usa la ecuación de medición relativa a estas dos aceleraciones en relación con la aceleración medida

$$a_{medida} = a_{resonante} + a_{3P} + \delta_{medición}$$

en la cual el término añadido  $\delta_{medición}$  (m/s/s) representa desviaciones de medición estocástica más allá de la modelizada y se usa también para sintonizar la respuesta de estimador. La representación de espacio de estado del sistema completo es

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} a_{resonante} \\ \dot{a}_{resonante} \\ a_{3P} \\ \dot{a}_{3P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_{resonante}^2 & -2\xi_{resonante}\omega_{resonante} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_{3P}^2 & -2\xi_{3P}\omega_{3P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{resonante} \\ \dot{a}_{resonante} \\ a_{3P} \\ \dot{a}_{3P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{resonante} \\ \delta_{3P} \end{bmatrix}$$

$$a_{medida} = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} a_{resonante} \\ \dot{a}_{resonante} \\ a_{3P} \\ \dot{a}_{3P} \end{bmatrix} + \delta_{medición}$$

20 Si la señal de aceleración tiene un desvío que puede cambiar lentamente con el tiempo, se maneja filtrando con paso alto la señal (a aproximadamente 0,01 Hz) antes de enviarlo al estimador, o incluir una componente de estimación de desvío dentro del estimador.

25 Cualquier número de medios numéricos y explícitos se encuentra disponible para convertir esto en un modelo de tiempo discreto y del mismo en un estimador de tiempo discreto (por ejemplo filtro de Kalman,  $H_\infty$ , colocación de polo, ...) que tiene generalmente la forma de

$$\begin{aligned} \underline{x}_{i+1/i} &= \underline{A} \underline{x}_{i/i} \\ \underline{x}_{i+1/i+1} &= \underline{x}_{i+1/i} + \underline{k}(a_{medición,i}^* - \underline{c} \underline{x}_{i+1/i}) \\ &= \underline{A} \underline{x}_{i/i} + \underline{k}(a_{medición,i}^* - \underline{c} \underline{A} \underline{x}_{i/i}) \\ &= (\underline{I} - \underline{k} \underline{c}) \underline{A} \underline{x}_{i/i} + \underline{k} a_{medición,i}^* \\ &= \underline{\Gamma} \underline{x}_{i/i} + \underline{k} a_{medición,i}^* \end{aligned}$$

5 en la que  $\underline{k}$  es la matriz de ganancia de estimador y  $a_{medición,i}^*$  es la propia medición de aceleración en el tiempo  $t_i$ . La ganancia puede variar con cada estimación (como en los filtros de Kalman o  $H_\infty$ ) o se puede seleccionar como una matriz constante (como en la colocación de polo y las ganancias de  $H_\infty$  o Kalman de estado estables). Las ganancias variables de tiempo tienen la ventaja de adaptarse a resonantes cambiantes y gradiente de viento  $\omega$  y  $\xi$  mientras que las ganancias constantes tienen la ventaja de formar un filtro muy sencillo y computacionalmente eficiente.

10 Las dos etapas del estimador, la resonante y la 3P, se forman juntas dentro del mismo observador. Esto significa que el proceso de diseño (selección de ganancia) produce un observador que "sabe" que ambos fenómenos existen y sus interacciones. Y, debido a que es un estimador y de este modo no se permiten errores de fase, las estimaciones tienen un error de fase mínimo (generalmente un error cero a menos que los anchos de banda de frecuencia se solapen sustancialmente). Además, puesto que se estiman ambos fenómenos, cada uno es independiente del otro.

Realimentación para amortiguación resonante de torre. El término realimentación de amortiguación se desarrolla para añadir amortiguación a la porción de la dinámica resonante de torre. Un modelo más completo de la dinámica resonante, uno que incluye el efecto de paso de palas y velocidad del viento, es:

$$15 \quad \ddot{a}_{resonante} = -\omega_{resonante}^2 a_{resonante} - 2\omega_{resonante} \xi_{inherente} \dot{a}_{resonante} + f_{resonante}(\beta, V_{viento}) + \dots$$

en la que  $\xi_{inherente}$  es la amortiguación natural inherente o existente, y  $f_{resonante}(\beta, V_{viento})$  es una función de fuerza que representa la influencia del paso de palas  $\beta$  y la velocidad del viento  $V_{viento}$  mediante la aerodinámica de las palas. Si se añade amortiguación modulando el paso, entonces aproximadamente

$$20 \quad \ddot{a}_{resonante} = -\omega_{resonante}^2 a_{resonante} - 2\omega_{resonante} (\xi_{inherente} + \xi_{xtra}) \dot{a}_{resonante} + f_{resonante}(\beta, V_{viento}) + g_{resonante}(V_{viento}) \Delta\beta_{resonante} + \dots$$

en la que  $\xi_{xtra}$  es el coeficiente de amortiguación adicional producido por la modulación  $\Delta\beta_{resonante}$  impuesta. El factor de ganancia  $g_{resonante}(V_{viento})$  determinado a partir de estudios de simulación de la turbina. Poniendo en ecuación los términos, se proporciona la amortiguación adicional mediante la modulación cuando la modulación se paso es fija mediante la velocidad del viento como

$$\Delta\beta_{resonante} = -\frac{2\omega_{resonante} \xi_{xtra}}{g_{resonante}(V_{viento})} \dot{a}_{resonante}$$

25 Al carecer de valores de velocidad del viento,  $V_{viento}$  se sustituye por el paso dado por la relación de estado estable  $V_{vientoSS} = h(\beta_{SS})$  entre la velocidad del viento y el paso para la turbina

$$\Delta\beta_{resonante} = -\frac{2\omega_{resonante} \xi_{xtra}}{g_{resonante}[h(\beta)]} \dot{a}_{resonante}$$

30 El paso de realimentación es una modulación respecto de la demanda de paso normalmente producida por la turbina para sus otras funciones de control (por ejemplo control de rpm usando compensadores PID). Como la realimentación se basa solamente en la estimación de movimiento resonante, y esta está libre de dinámica 3P, la realimentación no tiene frecuencias no deseadas y no exagera los modos de palas de turbina.

Control de fase: Una cosa es solicitar un paso y otra conseguir una respuesta. Los accionadores de paso y otros

requisitos de procesamiento añaden retardo entre la solicitud y la actuación, y esto se puede corregir añadiendo adelanto a la modulación de demanda. Simplificando la dinámica resonante del estimador ignorando los términos de amortiguación  $\xi$ :

$$\ddot{a}_{resonante} = -\omega_{resonante}^2 a_{resonante}$$

5 En estado estable la solución exponencial compleja es

$$a_{resonante}(j\omega_{resonante}) = \lambda e^{j\omega_{resonante} t}$$

$$\dot{a}_{resonante}(j\omega_{resonante}) = j\omega_{resonante} \lambda e^{j\omega_{resonante} t}$$

Si el término desfasado está formado por una ganancia unitaria de  $\hat{a}_{resonante}$  y  $a_{resonante}$  como

$$\dot{a}_{resonante\_desfasado} = \frac{\gamma\omega_{resonante} a_{resonante} + \dot{a}_{resonante}}{\sqrt{1+\gamma^2}}$$

10 usando entonces la ecuación de Euler

$$\begin{aligned} \dot{a}_{resonante\_desfasado}(j\omega_{resonante}) &= \dot{a}_{resonante}(j\omega_{resonante}) \frac{1-\gamma j}{\sqrt{1+\gamma^2}} \\ &= \dot{a}_{resonante}(j\omega_{resonante}) e^{j\phi_{resonante}} \\ &= \dot{a}_{resonante}(j\omega_{resonante}) (\cos\phi_{resonante} + j\sin\phi_{resonante}) \end{aligned}$$

en la que  $\phi_{resonante}$  es el desfase deseado (positivo para adelantog). Poniendo en ecuación los términos reales e imaginario

$$\begin{aligned} \cos\phi &= \frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \\ \sin\phi &= -\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \\ \dot{a}_{resonante\_desfasado} &= \frac{\dot{a}_{resonante} - (\omega_{resonante} \tan\phi_{resonante}) a_{resonante}}{\sqrt{1+\tan^2\phi_{resonante}}} \\ &= -(\omega_{resonante} \sin\phi_{resonante}) a_{resonante} + (\cos\phi_{resonante}) \dot{a}_{resonante} \end{aligned}$$

15 La modulación de paso controlada de fase se da entonces mediante

$$\Delta\beta_{resonante\_desfasado} = -\frac{2\omega_{resonante} \xi_{xtra}}{g_{resonante} [h(\beta)]} [-(\omega_{resonante} \sin\phi_{resonante}) a_{resonante} + (\cos\phi_{resonante}) \dot{a}_{resonante}]$$

Ejemplo de amortiguación resonante de torre: Considerar una turbina que tiene frecuencia de resonancia de torre de 0,38 Hz, un momento de flexión de palas cercano a la frecuencia 3P, y un bucle de control de 20 Hz. A rpm nominal (15,5 rpm) 3P se encuentra a 0,775 Hz y se debe eliminar de la realimentación de paso modulado de manera a no exacerbar la flexión de las palas. Usando los valores preliminares

20

$$\xi_{xtra} = 0,707$$



$$\sigma_{\delta_{\text{medición}}} = 0,1$$

$$\phi = 0$$

$$\omega_{\text{resonante}} = 2\pi(0,38)$$

$$\omega_{\text{resonante}} = 2\pi(0,775)$$

5  $\sigma_{\delta_{\text{resonante}}} = 0,001$

$$\xi_{\text{resonante}} = 0$$

$$\sigma_{\delta_{3P}} = 0,001$$

$$\xi_{3P} = 0$$

10 el modelo de espacio de estado se digitaliza (usando la transformada de Tuslin o bilineal), se calculan las ganancias de Kalman de estado estable, y el diagrama de Bode (usando retenedor de orden cero) de la medición de aceleración respecto de  $\hat{a}_{\text{resonante}}$ , mostrado en la **figura 3** tiene un pico en  $\omega_{\text{resonante}}$  y una ranura en  $\omega_{3P}$ .

Aunque un filtro dinámico Kalman es útil para seguir la frecuencia 3P cuando la turbina cambia las rpm, aquí el estado estable es considerado como siendo más sencillo computacionalmente y que se ha mostrado que trabaja bien.

15 Incrementar  $\sigma_{\delta_{\text{resonante}}}$  y  $\sigma_{\delta_{3P}}$  para ensanchar el ancho de banda del pico y la ranura, ya que las frecuencias resonante y 3P no son las bien conocidas, e incrementar  $\xi_{\text{resonante}}$  y  $\xi_{3P}$  para suavizar la respuesta

$$\sigma_{\delta_{\text{resonante}}} = 0,016$$

$$\xi_{\text{resonante}} = 0,2$$

$$\sigma_{3P} = 0,06$$

20  $\xi_{3P} = 0,04$

produce el diagrama de Bode de la **figura 4**. Obsérvese que tanto en la **figura 3** como en la **figura 4**, la fase de la señal resonante a  $\omega_{\text{amort}}$  es  $\sim 90$  grados como se espera de un diferenciador, y sin error. Las matrices de estimador resultantes son:

$$\underline{\Gamma}_{ss} = \begin{bmatrix} 0,96833 & 0,047412 & -0,023486 & -0,0011803 \\ -0,30196 & 0,94372 & 0,0048336 & 0,00024292 \\ -0,090436 & -0,0044280 & 0,88257 & 0,044354 \\ -0,14511 & -0,0071052 & -1,2992 & 0,94492 \end{bmatrix}$$

$$\underline{k}_{ss} = \begin{bmatrix} 0,024186 \\ -0,0049776 \\ 0,091135 \\ 0,14624 \end{bmatrix}$$

25 Los estudios de simulación de la turbina producen  $g_{\text{resonante}}[h(\beta)]$ , el término fijación de ganancia, mostrado en la **figura 5**, con el diagrama de Bode resultante de la modulación de paso de la **figura 6**. También se muestra en la **figura 6** el compensador convencional de paso de banda desarrollado originalmente para esta turbina (líneas de puntos). Mientras el sistema original exacerbaba la flexión de las palas, el estimador no lo hace y produce amortiguación resonante de torre equivalente.

30 Para ilustrar la propiedad de desfase, incrementar

$$\phi = 30 \text{ grados}$$

produce el diagrama de Bode de la **figura 7** donde se ve el desfase de + 30 grados a  $\omega_{resonante}$  cuando se compara con la **figura 6**.

Los intentos para producir la función de transferencia de la figura 4 usando filtros convencionales de frecuencia no tienen éxito. La **figura 8** es el resultado del uso de un paso bajo seguido de un filtro de ranura:

$$Paso\ bajo(s) = g_{bajo} \frac{\omega_{resonante}^2}{s^2 + 2\xi_{bajo}s + \omega_{resonante}^2}$$

$$ranura(s) = 1 - g_{ranura} \frac{\omega_{3P}^2}{s^2 + 2\xi_{ranura}s + \omega_{3P}^2}$$

$$\begin{aligned} g_{bajo} &= -0,5 \\ \xi_{bajo} &= 0,3 \\ g_{ranura} &= 0,85 \\ \xi_{ranura} &= 0,3 \end{aligned}$$

5

Aunque el diagrama de magnitud es similar, la fase no lo es: hay un desfase añadido de 22 grados a  $\omega_{resonante}$  en contraste con el estimador de la **figura 4**.

La realimentación para la amortiguación 3P de torre más el control de fase: De manera idéntica para la amortiguación resonante anterior, la amortiguación de movimiento de torre 3P es dada por

$$\dot{a}_{3P\_desfasado} = -(\omega_{3P} \sin\phi_{3P})a_{3P} + (\cos\phi_{3P})\dot{a}_{3P}$$

10

$$\Delta\beta_{3P\_desfasado} = -\frac{2\omega_{3P}\xi_{extra}}{g_{3P}[h(\beta)]} \dot{a}_{3P3P\_desfasado}$$

15

en la que los términos de aceleración 3P se toman directamente de los valores del estimador y  $g_{3P}[h(\beta)]$  se determina a partir de estudios de simulación. La función de transferencia de la aceleración de torre a  $\hat{a}_{3P}$  se muestra en la **figura 9**: hay una ranura a  $\omega_{resonante}$  y un pico a  $\omega_{3P}$  con el desfase de +90 grados anticipado de un diferenciador. La fase es de hecho ligeramente inferior a 90 grados debido a un retardo introducido a  $\omega_{3P}$  por la naturaleza de los retenedores de orden cero de sistemas de datos muestreados (retardo añadido = 0,0775 Hz\*360 grados/20 Hz = 14 grados). El control de fase es importante en la medida en que no exacerba la flexión de las palas mientras se amortigua. Como se ha visto en la **figura 6**, el diseño convencional que exacerbó la flexión de las palas produjo una componente de realimentación de 3P con una fase de alrededor de -98 grados. Con el signo negativo usado en la ganancia de realimentación, la realimentación de estimador nominal es cercana a -90+14 = -76 grados y necesita ser ajustada para amortiguar y no excitar el modo de flexión de las palas. La **figura 10** ilustra el retardo de 30 grados añadido cuando  $\phi_{3P} = -30$  grados.

20

**REIVINDICACIONES**

- 1.- Aparato que amortigua al menos una componente de frecuencia de movimiento no deseada en una torre de turbina eólica que comprende:
- una lógica de comando de paso que desarrolla una señal de comando de paso de palas de rotor;
- 5 una lógica de amortiguación de torre que utiliza mediciones de aceleración de la torre para estimar dicha al menos una componente de frecuencia de movimiento utilizando un estimador basado en un modelo;
- una salida de dicha lógica de amortiguación de torre que comprende una modulación de paso colectiva basada en dicha al menos una estimación de componente; y
- 10 una lógica de combinación conectada a dicha lógica de amortiguación de torre y a dicha lógica de comando de paso, siendo una salida de dicha lógica de combinación un comando de paso de palas combinado capaz de controlar el paso de las palas de rotor, que incluye amortiguar dicha al menos una componente de frecuencia de movimiento de la torre de turbina eólica.
- 2.- Aparato de la reivindicación 1 en el cual dicha modulación de paso colectiva incluye uno o más movimiento resonante de la torre y un movimiento de frecuencia no deseado.
- 15 3.- Aparato de la reivindicación 1 en el cual dichas estimaciones de componente incluyen uno o más estimaciones de movimiento resonante y estimaciones de movimiento de frecuencia no deseado.
- 4.- Aparato de la reivindicación 1 en el cual dicho modelo es una respuesta amortiguada de segundo orden.
- 5.- Aparato de la reivindicación 1 en el cual la lógica de amortiguación desfasa, además, la modulación de paso colectiva sobre la base de dicha al menos una estimación de componente de frecuencia.
- 20 6.- Procedimiento de uso de mediciones de aceleración de la torre para amortiguar el movimiento resonante de la torre, a la vez que se suprimen también señales no deseados en las mediciones, en una torre de turbina eólica que usa un comando de paso para controlar el paso de las palas de rotor de dicha turbina eólica, que comprende las etapas de:
- A. medir la aceleración de la torre;
- 25 B. estimar la aceleración resonante de la torre y la aceleración no deseada usando las mediciones de aceleración con un estimador basado en un modelo;
- C. proporcionar una modulación resonante de paso de palas para amortiguar el movimiento de la torre usando dichas estimaciones de aceleración resonante de la torre;
- 30 D. combinar dicha modulación resonante de paso de palas con dicho comando de paso que da como resultado un comando de paso combinado; y
- E. usar dicho comando de paso combinado para controlar el paso de las palas de rotor con el fin de amortiguar dicho movimiento resonante de la torre de turbina eólica a la vez que se suprime el movimiento no deseado.
- 7.- Procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además, las etapas de
- 35 proporcionar una modulación no deseada de paso de palas y para amortiguar el movimiento no deseado usando dichas estimaciones de aceleración no deseadas;
- combinar el comando no deseado de paso de palas para formar el comando de paso combinado.
- 8.- Procedimiento de la reivindicación 6, en el cual en la etapa B se usa un modelo amortiguado de segundo orden para estimar las aceleraciones no deseadas y resonantes de la torre.

FIG. 1

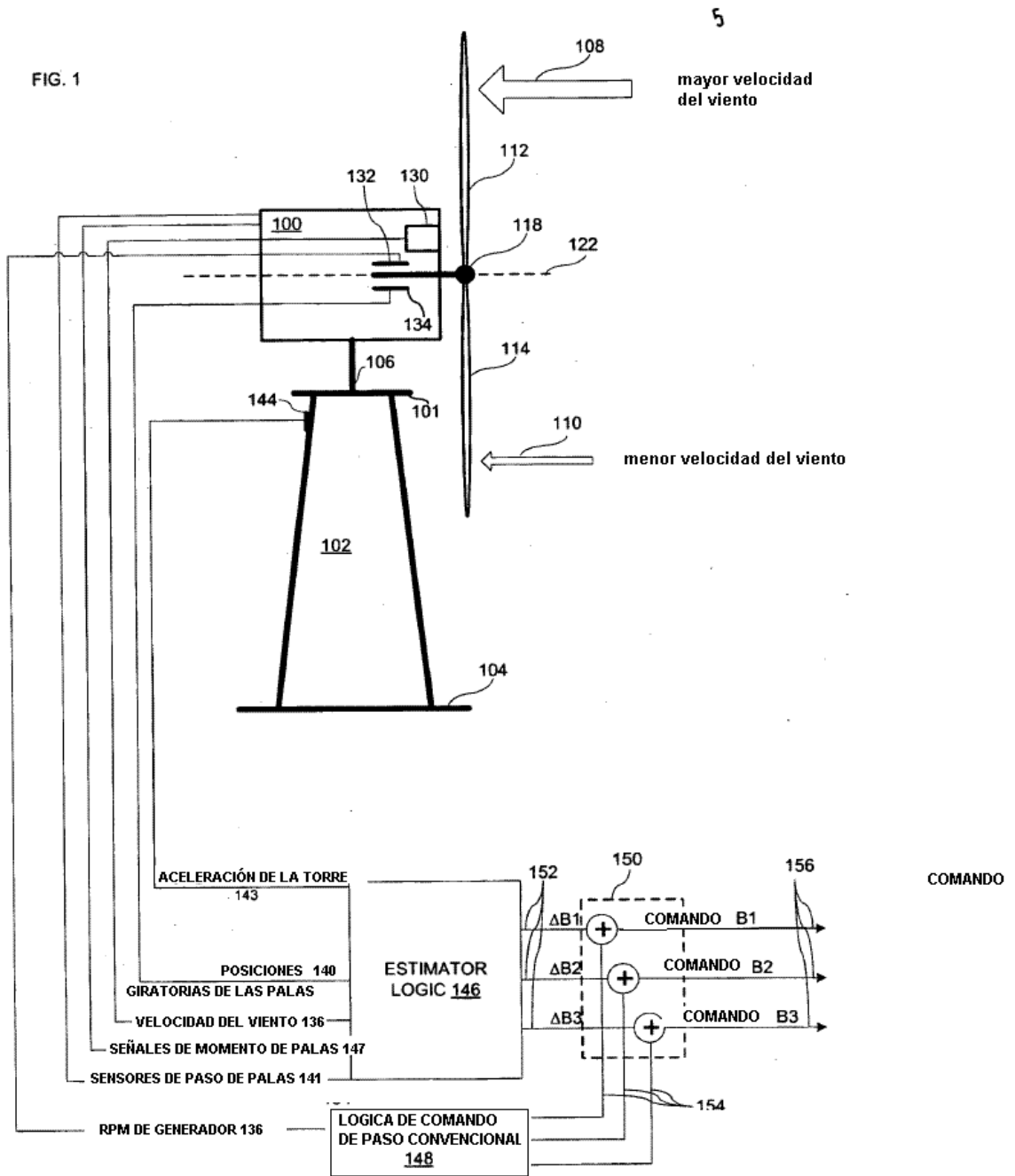
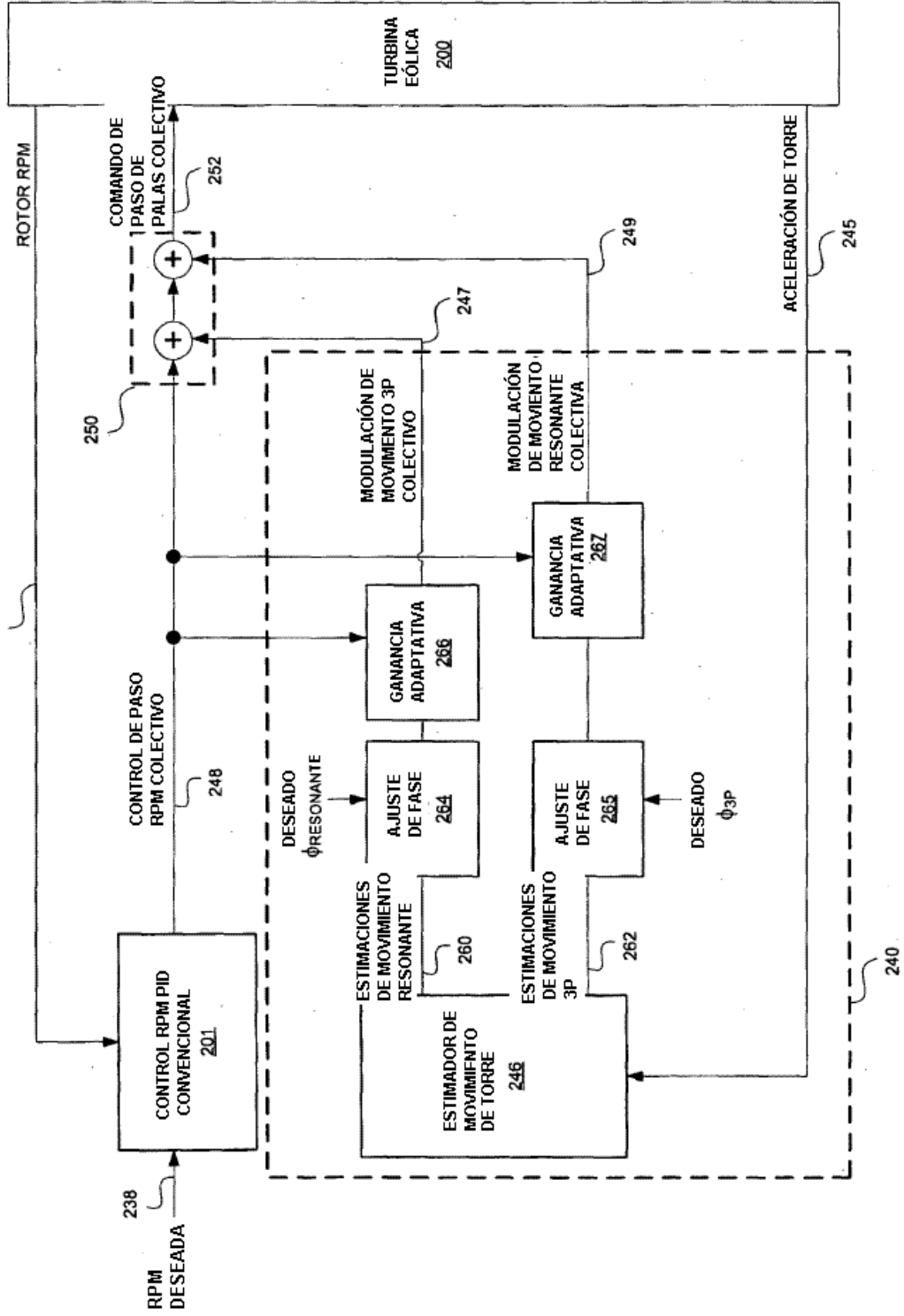


FIG. 2



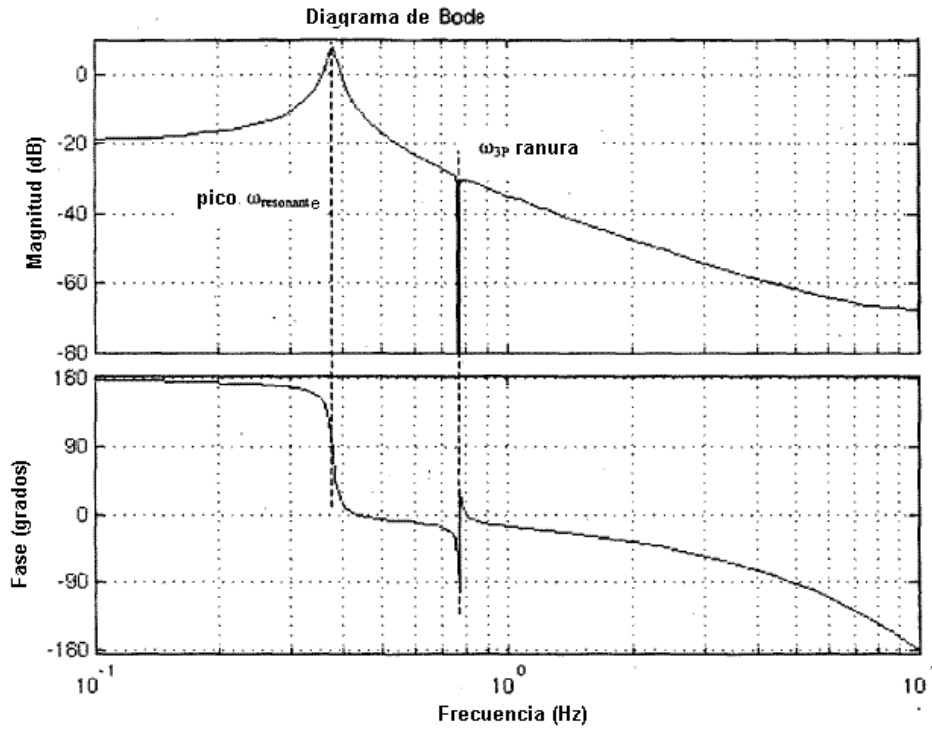


FIGURA 3

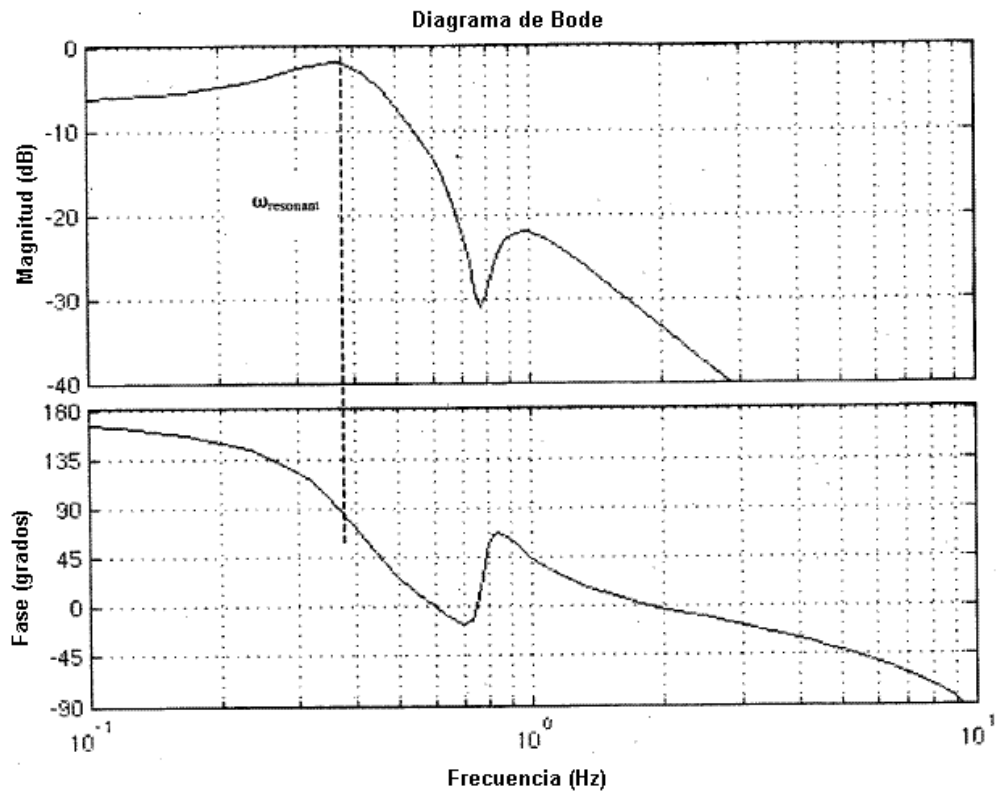


FIGURA 4

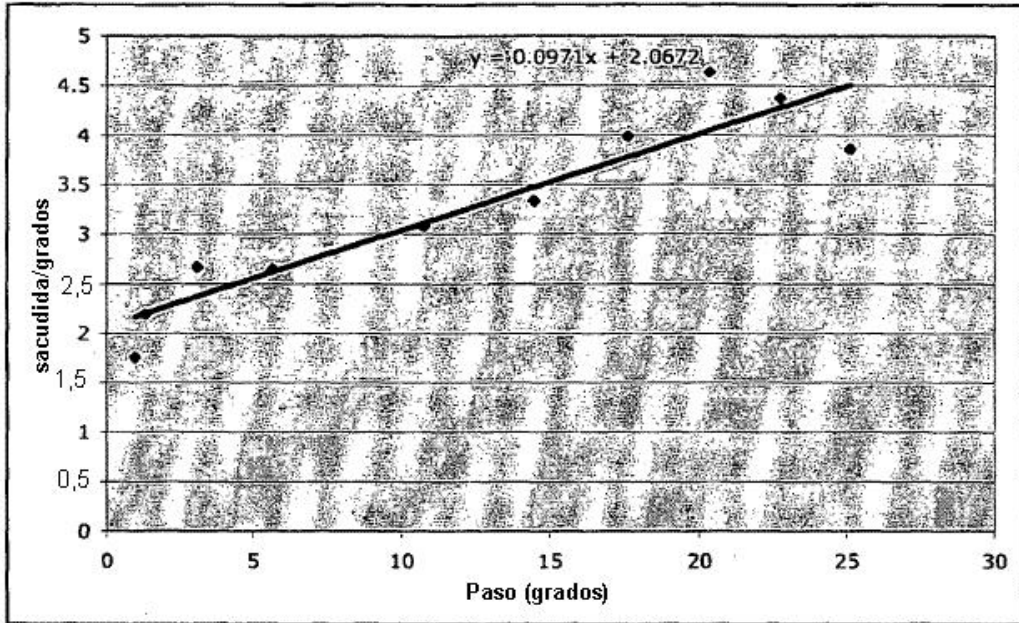


Figura 5



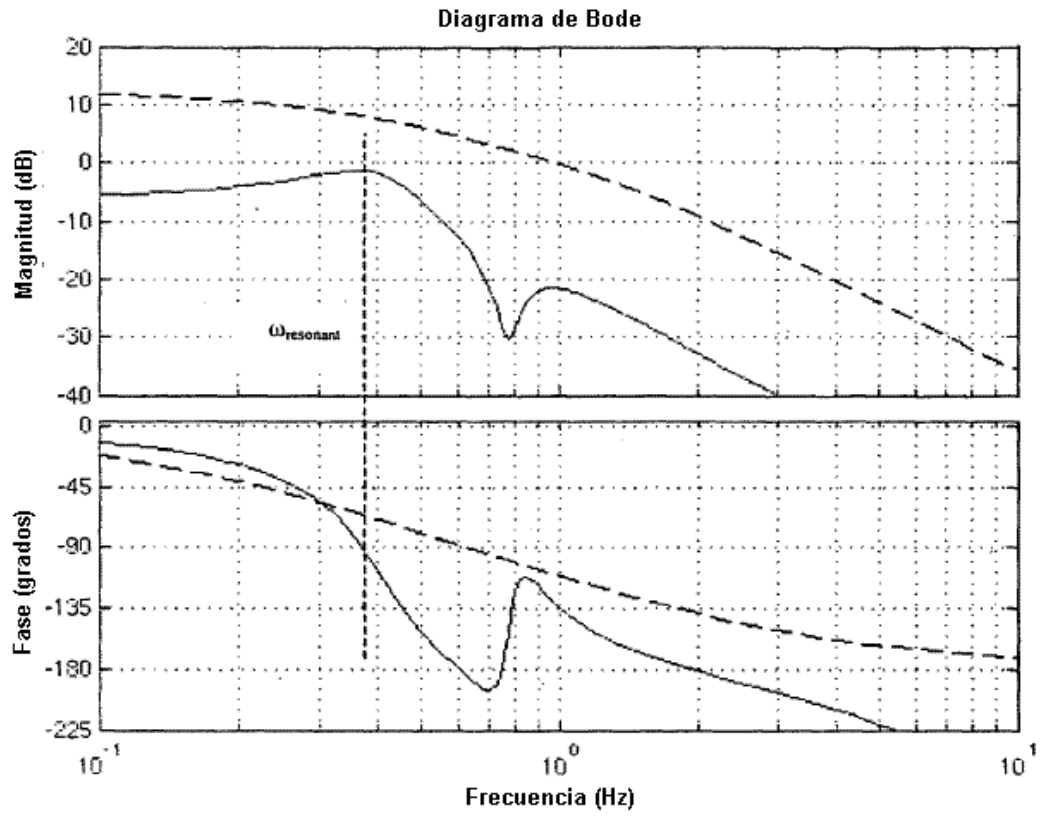


FIGURA 6

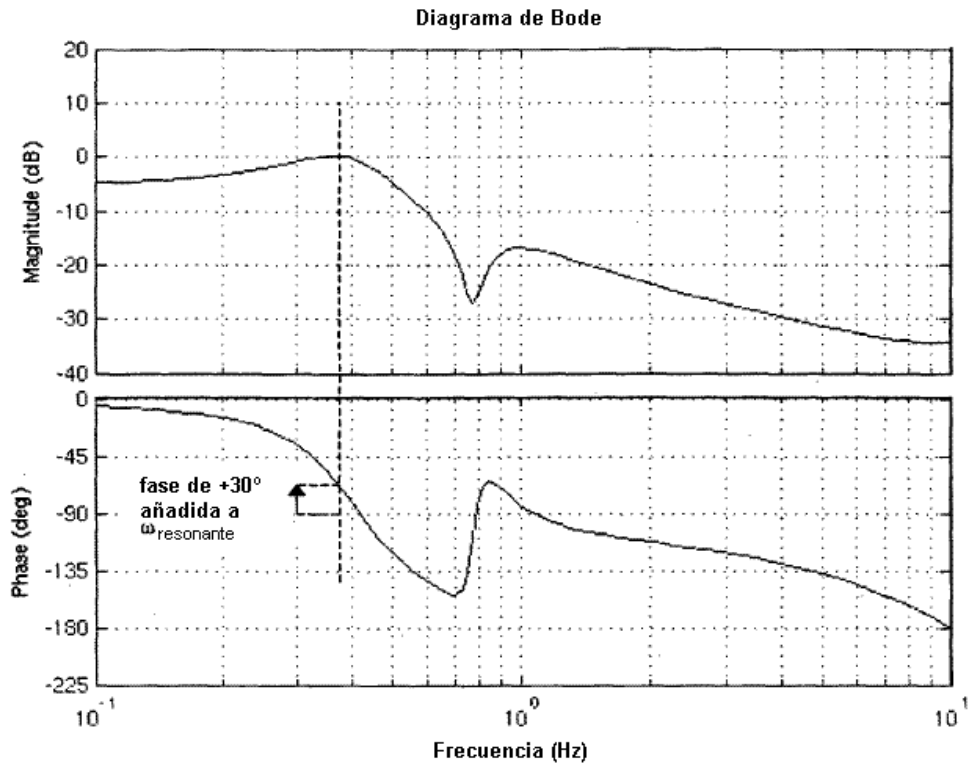


FIGURA 7

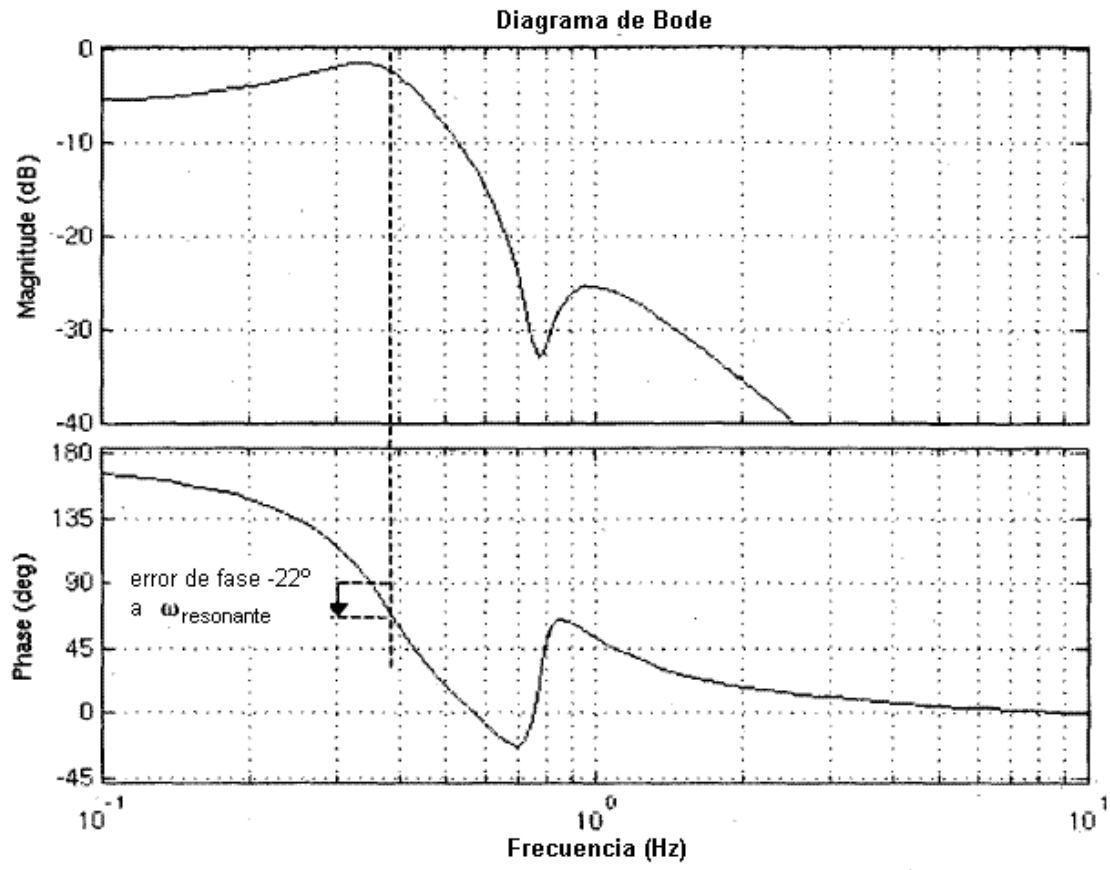


FIGURA 8

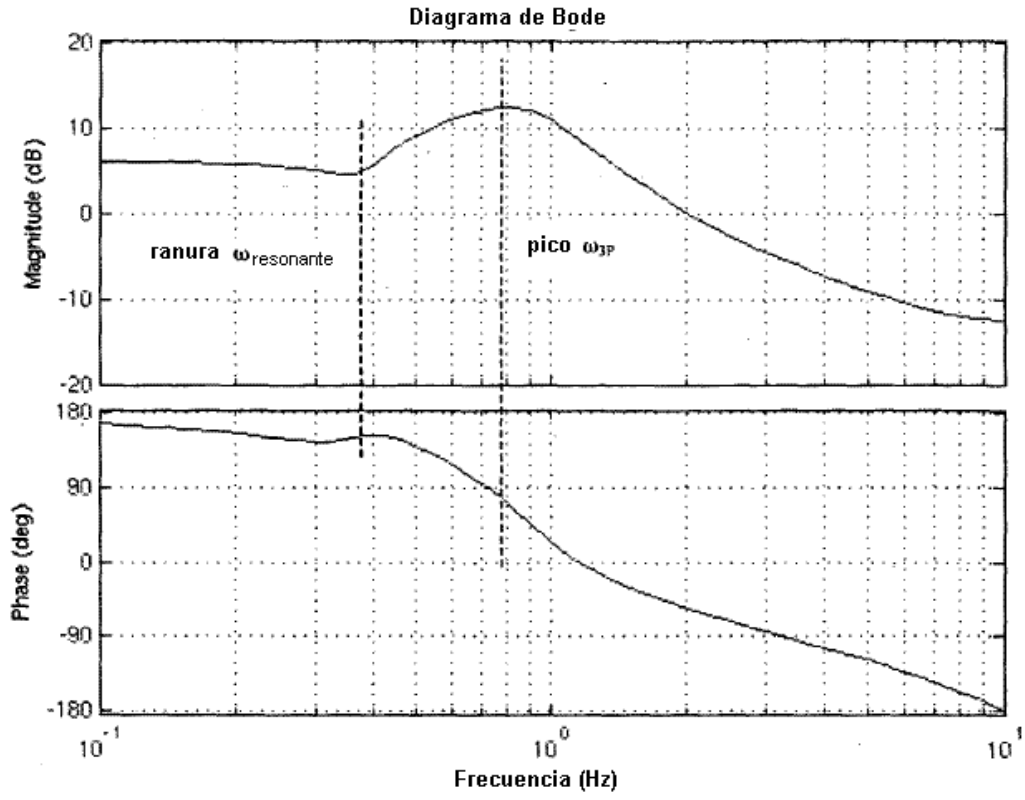


FIGURA 9

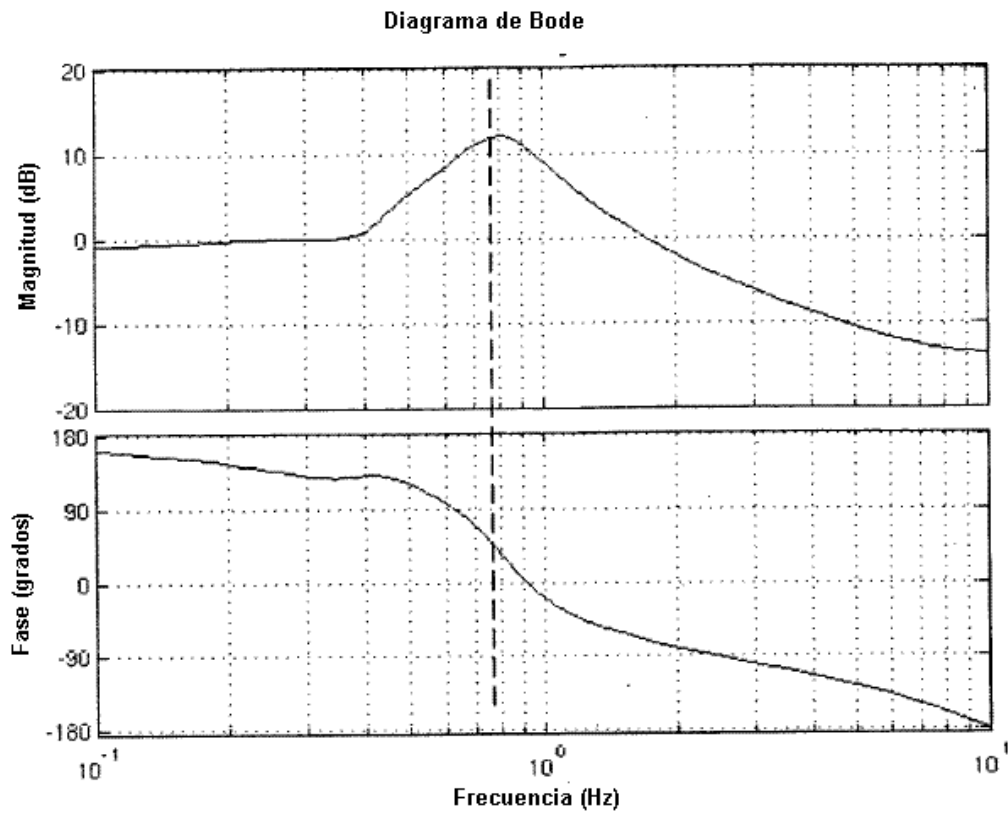


FIGURA 10