

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 996 706**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.05.2018 PCT/US2018/032245**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.12.2018 WO18222371**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.05.2018 E 18810220 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.09.2024 EP 3631200**

54 Título: **Sistema y procedimiento para optimizar la salida de potencia de una turbina eólica durante una restricción operativa**

30 Prioridad:

01.06.2017 US 201715611159

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

13.02.2025

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC RENOVABLES ESPAÑA,
S.L. (100.00%)
Calle Roc Boronat 78
08005 Barcelona, ES**

72 Inventor/es:

**VADLAMUDI, VENKATA, KRISHNA;
MOVSICHOFF, BERNARDO, ADRIAN;
AMBEKAR, AKSHAY y
KOERBER, ARNE**

74 Agente/Representante:

DE ROOIJ, Mathieu Julien

ES 2 996 706 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 y procedimiento para optimizar la salida de potencia de una turbina eólica durante una restricción operativa

5 **Campo**

[0001] La presente divulgación se refiere, en general, a turbinas eólicas, y, más en particular, a sistemas y procedimientos para optimizar la salida de potencia, reducir cargas y/o disminuir el ruido durante una restricción operativa de una turbina eólica.

10

Antecedentes

[0002] La energía eólica se considera una de las fuentes de energía más limpias y más respetuosas con el medioambiente disponibles actualmente, y las turbinas eólicas han obtenido una creciente atención a este respecto. Una turbina eólica moderna típicamente incluye una torre, un generador, una caja de engranajes, una góndola y un rotor que incluye una o más palas de rotor. Las palas de rotor capturan la energía cinética del viento usando principios de perfil alar conocidos y transmiten la energía cinética a través de energía de rotación para hacer girar un eje que acopla las palas de rotor a una caja de engranajes, o si no se usa una caja de engranajes, directamente al generador. A continuación, el generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica que se puede distribuir en una red de suministro.

[0003] Durante la operación de una turbina eólica, diversos componentes de la turbina eólica están sometidos a diversas cargas debido a las cargas aerodinámicas del viento que actúan sobre la pala. En particular, las palas de rotor experimentan una carga significativa y cambios frecuentes en la carga durante la operación debido a la interacción con el viento. Los cambios en la velocidad y dirección del viento, por ejemplo, pueden modificar las cargas experimentadas por las palas de rotor. Para reducir la carga en las palas de rotor, se han desarrollado diversos sistemas de control que permiten que las palas de rotor se desprendan de una parte de las cargas experimentadas de este modo. Estos sistemas de control incluyen, por ejemplo, *pitch*ear las palas de rotor y/o modificar el par de torsión de generador durante la operación. En un modo operativo de velocidad de rotor variable de la turbina eólica, el sistema de control se puede diseñar para regular la velocidad de rotor para seguir una consigna de velocidad específica (TSR) definida (a través de la regulación del par de torsión de generador) y mantener el ángulo de *pitch* en una consigna de *pitch* definida. Además, la regulación de la TSR se puede basar en la TSR medida o en la TSR estimada.

[0004] Por tanto, las turbinas eólicas modernas, como las descritas en los documentos EP 2829724 A1 y EP 2522853 A2, operan de acuerdo con una o más consignas diseñadas para lograr la máxima potencia mientras también se mantienen las cargas dentro de límites seguros. En particular, muchos esquemas de control de turbina eólica implementan una o más restricciones operativas para lograr un equilibrio entre las cargas y el rendimiento de potencia. Por ejemplo, una de dichas restricciones operativas es una restricción de empuje que implica reducir las cargas cuando un valor de empuje estimado excede un límite de empuje predefinido.

[0005] El coeficiente de potencia (en general, denominado C_p) de una turbina eólica es la medida de la eficiencia aerodinámica de turbina eólica y es la tasa de la potencia mecánica real producida por la turbina eólica dividida por la potencia total disponible en el viento que fluye a través del rotor a una velocidad del viento específica. En determinados casos, el coeficiente de potencia se puede predecir a partir de mapas de rendimiento aerodinámico, que son tablas o gráficos dimensionales o adimensionales que describen la carga y el rendimiento del rotor (por ejemplo, potencia, empuje, par de torsión, momento de flexión o similares) en condiciones dadas (por ejemplo, densidad, velocidad del viento, velocidad de rotor, ángulos de *pitch* o similares). Como tal(es), el/los mapa(s) de rendimiento aerodinámico puede(n) incluir: coeficientes de potencia, coeficientes de empuje, coeficientes de par de torsión y/o derivadas parciales con respecto al ángulo de *pitch*, velocidad de rotor o velocidad específica (TSR). De forma alternativa, los mapas de rendimiento aerodinámico pueden ser valores dimensionales de potencia, empuje y/o par de torsión en lugar de coeficientes.

[0006] Por ejemplo, los mapas de rendimiento aerodinámico pueden incluir una tabla de consulta del coeficiente de potencia en función del ángulo de *pitch* y la TSR de la turbina eólica. En otras palabras, para la operación normal de la turbina eólica, las restricciones operativas se convierten en valores de coeficientes aerodinámicos de modo que la consigna operativa óptima (por ejemplo, el coeficiente de potencia) que satisface todas las restricciones y también maximiza la potencia se pueda elegir del mapa de rendimiento aerodinámico. El controlador de turbina puede usar las consignas de TSR y de *pitch* óptimas resultantes obtenidas del mapa para controlar la turbina eólica. En general, la consigna de TSR es un valor fijo al que se regula la turbina durante la operación de velocidad de rotor variable de la turbina eólica. Cuando se implementa(n) la(s) restricción/restricciones operativa(s) por el controlador de turbina, el coeficiente de potencia disminuye, puesto que una consigna de TSR fija no puede ser óptima a través de un intervalo de restricciones operativas.

60

[0007] En consecuencia, la presente divulgación está dirigida a sistemas y procedimientos para variar la consigna de TSR durante dichas restricciones operativas para optimizar la potencia, reducir las cargas y/o disminuir la emisión de ruido acústico de la turbina eólica.

5 **Breve descripción**

[0008] Los aspectos y ventajas de la invención se expondrán en parte en la siguiente descripción, o pueden ser evidentes a partir de la descripción, o se pueden aprender a través de la práctica de la invención.

10 [0009] En un aspecto, la presente divulgación está dirigida a un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para optimizar la producción de potencia de una turbina eólica. El procedimiento incluye determinar al menos una restricción operativa para la turbina eólica. El procedimiento también incluye operar la turbina eólica con al menos una restricción operativa activada. Además, el procedimiento incluye variar una velocidad específica para la turbina eólica mientras la al menos una restricción operativa está activada para maximizar un coeficiente de potencia de la turbina eólica.

15 [0010] En un modo de realización, la(s) restricción/restricciones operativa(s) puede(n) incluir una restricción de empuje, una restricción de velocidad de rotor/generador, una restricción de par de torsión, una restricción de ruido y/o una consigna externa, por ejemplo, de un esquema de control de gestión de estela de parque. En otro modo de realización, la(s) restricción/restricciones operativa(s) puede(n) imponer un límite operativo en la turbina eólica. Por ejemplo, el límite operativo puede incluir un empuje máximo predeterminado, una velocidad máxima predeterminada, un par de torsión máximo predeterminado, un límite de ruido máximo predeterminado y/o una consigna de velocidad específica recibida de una fuente externa.

20 [0011] En otros modos de realización, cuando la al menos una restricción operativa está activada, el procedimiento puede incluir determinar una emisión de ruido acústico de la turbina eólica y, si se alcanza un valor límite, disminuir la velocidad específica, a veces junto con un incremento de los ángulos de *pitch* de pala.

25 [0012] En varios modos de realización, la etapa de variar la velocidad específica para la turbina eólica mientras la al menos una restricción operativa está activada puede incluir reducir la velocidad específica cuando se alcanza el empuje máximo predeterminado. Además, el procedimiento puede incluir incrementar un ángulo de *pitch* de al menos una pala de rotor de la turbina eólica además de reducir la velocidad específica.

30 [0013] En otro modo de realización, el procedimiento puede incluir monitorizar una o más condiciones de operación de turbina o condiciones del viento de la turbina eólica cuando la al menos una restricción operativa está activada, determinar un valor de empuje estimado de la turbina eólica en base a las una o más condiciones de operación de turbina o condiciones del viento, y variar la velocidad específica para la turbina eólica si el valor de empuje estimado es mayor que o igual al empuje máximo predeterminado.

35 [0014] En modos de realización adicionales, cuando la(s) restricción/restricciones operativa(s) está(n) activada(s), el procedimiento puede incluir además monitorizar un par de torsión de la turbina eólica. Más específicamente, durante la monitorización, si se alcanza un valor de par de torsión nominal, el procedimiento puede incluir incrementar la velocidad específica. Además, el procedimiento puede incluir incrementar un ángulo de *pitch* de al menos una pala de rotor de la turbina eólica además de incrementar la velocidad específica.

40 [0015] En modos de realización particulares, el procedimiento también puede incluir operar la turbina eólica con una pluralidad de restricciones operativas activadas. Por ejemplo, en un modo de realización, cuando tanto el esquema de control de gestión de estela como la restricción de empuje están activados, el procedimiento puede incluir seleccionar la velocidad específica en base a un valor de velocidad específica mínimo entre el esquema de control de gestión de estela y la restricción de empuje.

45 [0016] En determinados modos de realización, el procedimiento puede incluir además restablecer la velocidad específica cuando la al menos una restricción operativa está desactivada.

50 [0017] En otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a un sistema de acuerdo con la reivindicación 13 para optimizar la producción de potencia de una turbina eólica. El sistema incluye un controlador de turbina que tiene uno o más procesadores configurados para realizar una o más operaciones, incluyendo, pero sin limitarse a, determinar al menos una restricción operativa para la turbina eólica, operar la turbina eólica con al menos una restricción operativa activada y variar una velocidad específica para la turbina eólica mientras la al menos una restricción operativa está activada para maximizar un coeficiente de potencia de la turbina eólica.

55 [0018] Aún en otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a una turbina eólica. La turbina eólica incluye una torre, una góndola montada en la torre, un rotor acoplado a la góndola y un controlador de turbina. El rotor incluye un buje rotatorio que tiene una pluralidad de palas de rotor montadas en el mismo. El controlador de turbina incluye al menos un procesador configurado para realizar una o más operaciones, incluyendo, pero sin limitarse a, determinar al menos una restricción operativa para la turbina eólica, operar la turbina eólica con al menos una

restricción operativa activada y variar una velocidad específica para la turbina eólica mientras la al menos una restricción operativa está activada para maximizar un coeficiente de potencia de la turbina eólica.

5 [0019] Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y reivindicaciones adjuntas. Los dibujos adjuntos, que se incorporan en y constituyen una parte de esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, conjuntamente con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

Breve descripción de los dibujos

10

[0020] En la memoria descriptiva se expone una divulgación completa y habilitante de la presente invención, incluyendo el mejor modo de la misma, dirigida a un experto en la técnica, que hace referencia a las figuras adjuntas, en las que:

15

la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

20

la FIG. 2 ilustra una vista interna en perspectiva de un modo de realización de una góndola de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

25

la FIG. 3 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir dentro de un controlador de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

30

la FIG. 4 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para optimizar la producción de potencia de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

35

la FIG. 5 ilustra un modo de realización de un mapa de rendimiento aerodinámico que representa la operación normal sin restricciones de la turbina eólica;

40

la FIG. 6 ilustra un modo de realización de un mapa de rendimiento aerodinámico que representa la operación de la turbina eólica bajo una restricción de empuje;

45

la FIG. 7 ilustra un modo de realización de un mapa de rendimiento aerodinámico que representa la operación de la turbina eólica bajo una restricción de par de torsión; y

50

la FIG. 8 ilustra un gráfico de un modo de realización de la velocidad específica frente a la velocidad del viento de acuerdo con la presente divulgación.

Descripción detallada

40

[0021] Ahora se hará referencia en detalle a modos de realización de la invención, ilustrándose uno o más de sus ejemplos en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, no de limitación de la invención. De hecho, será evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones y variaciones en la presente invención sin apartarse del alcance de la invención. Por ejemplo, se pueden usar características ilustradas o descritas como parte de un modo de realización con otro modo de realización para proporcionar todavía además otro modo de realización. Por tanto, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones que entran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

45

[0022] En referencia ahora a los dibujos, la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica 10 de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra, la turbina eólica 10 incluye una torre 12 que se extiende desde una superficie de soporte 14, una góndola 16 montada en la torre 12 y un rotor 18 acoplado a la góndola 16. El rotor 18 incluye un buje 20 rotatorio y al menos una pala de rotor 22 acoplada a y que se extiende hacia afuera desde el buje 20. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 incluye tres palas de rotor 22. Sin embargo, en un modo de realización alternativo, el rotor 18 puede incluir más o menos de tres palas de rotor 22. Cada pala de rotor 22 se puede espaciar alrededor del buje 20 para facilitar la rotación del rotor 18 para posibilitar que la energía cinética se transfiera desde el viento para convertirse en energía mecánica utilizable y, posteriormente, energía eléctrica. Por ejemplo, el buje 20 se puede acoplar en forma rotatoria a un generador eléctrico 24 (FIG. 2) situado dentro de la góndola 16 para permitir que se produzca energía eléctrica.

50

[0023] En referencia ahora a la FIG. 2, se ilustra una vista interna simplificada de un modo de realización de la góndola 16 de la turbina eólica 10. Como se muestra, el generador 24 se puede disponer dentro de la góndola 16. En general, el generador 24 se puede acoplar al rotor 18 de la turbina eólica 10 para generar potencia eléctrica a partir de la energía de rotación generada por el rotor 18. Por ejemplo, el rotor 18 puede incluir un eje de rotor principal 40 acoplado al buje 20 para su rotación con el mismo. A continuación, el generador 24 se puede acoplar al eje de rotor 40 de modo que la rotación del eje de rotor 40 accione el generador 24. Por ejemplo, en el modo de

55

60

realización ilustrado, el generador 24 incluye un eje de generador 42 acoplado de forma rotatoria al eje de rotor 40 a través de una caja de engranajes 44. Sin embargo, en otros modos de realización, se debe apreciar que el eje de generador 42 se puede acoplar directamente de forma rotatoria al eje de rotor 40. De forma alternativa, el generador 24 se puede acoplar directamente de forma rotatoria al eje de rotor 40 (a menudo denominado "turbina eólica de accionamiento directo").

[0024] Se debe apreciar que el eje de rotor 40 se puede soportar, en general, dentro de la góndola 16 por un bastidor de soporte o bancada 46 situado encima de la torre de turbina eólica 12. Por ejemplo, el eje de rotor 40 se puede soportar por la bancada 46 por medio de un par de soportes de rodamiento ("pillow blocks") 48, 50 montados en la bancada 46.

[0025] Además, como se muestra, la turbina eólica 10 también puede incluir un sistema de control de turbina o un controlador de turbina 26 ubicado dentro de la góndola 16. Por ejemplo, como se muestra en el modo de realización ilustrado, el controlador de turbina 26 está dispuesto dentro de un armario de control 52 montado en una parte de la góndola 16. Sin embargo, se debe apreciar que el controlador de turbina 26 se puede disponer en cualquier ubicación sobre o en la turbina eólica 10, en cualquier ubicación en la superficie de soporte 14 o, en general, en cualquier otra ubicación. Además, como se describe en el presente documento, el controlador de turbina 26 también se puede acoplar en comunicación a diversos componentes de la turbina eólica 10 para controlar, en general, la turbina eólica y/o dichos componentes, así como los diversos modos de operación (por ejemplo, secuencias de arranque o parada) de la turbina eólica 10. Por ejemplo, el controlador 26 se puede configurar para controlar el *pitch* de pala o ángulo de *pitch* de cada una de las palas de rotor 22 (es decir, un ángulo que determina una perspectiva de las palas de rotor 22 con respecto a la dirección 28 del viento) para controlar la carga en las palas de rotor 22 ajustando una posición angular de al menos una pala de rotor 22 en relación con el viento. Por ejemplo, el controlador de turbina 26 puede controlar el ángulo de *pitch* de las palas de rotor 22, individual o bien simultáneamente, transmitiendo instrucciones/señales de control adecuadas a diversos accionamientos de *pitch* o mecanismos de ajuste de *pitch* 32 (FIG. 2) de la turbina eólica 10. Específicamente, las palas de rotor 22 se pueden montar de forma rotatoria en el buje 20 por uno o más rodamientos de *pitch* (no ilustrados) de modo que el ángulo de *pitch* se pueda ajustar rotando las palas de rotor 22 alrededor de sus ejes de *pitch* 34 usando los mecanismos de ajuste de *pitch* 32. Además, a medida que cambia la dirección 28 (FIG. 1) del viento, el controlador de turbina 26 se puede configurar para controlar una dirección de orientación de la góndola 16 alrededor de un eje de orientación 36 para situar las palas de rotor 22 con respecto a la dirección del viento 28, controlando, de este modo, las cargas que actúan sobre la turbina eólica 10. Por ejemplo, el controlador de turbina 26 se puede configurar para transmitir instrucciones/señales de control a un mecanismo de accionamiento de orientación 38 (FIG. 2) de la turbina eólica 10 de modo que la góndola 16 se pueda rotar alrededor del eje de orientación 30.

[0026] Todavía además, el controlador de turbina 26 se puede configurar para controlar el par de torsión del generador 24. Por ejemplo, el controlador de turbina 26 se puede configurar para transmitir señales/instrucciones de control al generador 24 para modular el flujo magnético producido dentro del generador 24, ajustando, por tanto, la demanda de par de torsión o consigna del generador 24. Dicha reducción de potencia temporal del generador 24 puede reducir la velocidad de rotación de las palas de rotor 22, reduciendo, de este modo, las cargas aerodinámicas que actúan sobre las palas 22 y las cargas de reacción en diversos otros componentes de turbina eólica 10.

[0027] Se debe apreciar que el controlador de turbina 26 puede comprender, en general, un ordenador o cualquier otra unidad de procesamiento adecuada. Por tanto, en varios modos de realización, el controlador de turbina 26 puede incluir uno o más procesadores y dispositivos de memoria asociados configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador, como se muestra en la FIG. 3 y se analiza en el presente documento. Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a circuitos integrados a los que se hace referencia en la técnica como incluidos en un ordenador, sino que también se refiere a un controlador, un microcontrolador, un microordenador, un controlador de lógica programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación y otros circuitos programables. Adicionalmente, el/los dispositivo(s) de memoria 62 del controlador de turbina 26 pueden comprender, en general, elemento(s) de memoria, incluyendo, pero no se limitan a, medio legible por ordenador (por ejemplo, una memoria de acceso aleatorio (RAM)), medio no volátil legible por ordenador (por ejemplo, una memoria *flash*), un disquete, un disco compacto con memoria de solo lectura (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD) y/u otros elementos de memoria adecuados. Dicho(s) dispositivo(s) de memoria 62, en general, se puede(n) configurar para almacenar instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan por el/los procesador(es) 60, configuran el controlador 26 para que realice diversas funciones implementadas por ordenador, incluyendo, pero sin limitarse a, realizar algoritmos de control proporcional integral derivativo ("PID"), incluyendo diversos cálculos dentro de uno o más bucles de control PID, y diversas otras funciones implementadas por ordenador adecuadas. Además, el controlador de turbina 26 también puede incluir diversos canales de entrada/salida para recibir entradas de sensores y/u otros dispositivos de medición y para enviar señales de control a diversos componentes de la turbina eólica 10.

5 **[0028]** Se debe entender adicionalmente que el controlador 26 puede ser un controlador único o incluir diversos componentes, tales como controladores de *pitch* y/o controladores de orientación, que se comuniquen con un controlador central para controlar específicamente el *pitch* y la orientación como se analiza. Adicionalmente, el término "controlador" también puede englobar una combinación de ordenadores, unidades de procesamiento y/o componentes relacionados en comunicación entre sí.

10 **[0029]** La presente divulgación está dirigida además a procedimientos para optimizar la producción de potencia de la turbina eólica 10, por ejemplo, cuando una o más restricciones operativas se implementan por el controlador de turbina 26. En particular, el controlador 26 se puede utilizar para realizar dichos procedimientos. Por tanto, como se muestra en la FIG. 3, se ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir dentro del controlador de turbina 26 de acuerdo con aspectos de la presente materia. Como se muestra, el controlador 26 puede incluir uno o más procesadores 60 y dispositivos de memoria 62 asociados configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, realizar los procedimientos, etapas, cálculos y similares divulgados en el presente documento). Adicionalmente, el controlador 15 26 también puede incluir un módulo de comunicaciones 64 para facilitar las comunicaciones entre el controlador 26 y los diversos componentes de la turbina eólica 10. Por ejemplo, el módulo de comunicaciones 64 puede servir como interfaz para permitir que el controlador de turbina 26 transmita señales de control a cada mecanismo de ajuste de *pitch* 32 para controlar el ángulo de *pitch* de las palas de rotor 22. Además, el módulo de comunicaciones 64 puede incluir una interfaz de sensor 66 (por ejemplo, uno o más convertidores de analógico a digital) para permitir que las señales de entrada transmitidas desde, por ejemplo, diversos sensores, se conviertan en señales que se puedan entender y procesar por el/los procesador(es) 60.

20 **[0030]** En referencia ahora a la FIG. 4, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 100 para optimizar la producción de potencia de la turbina eólica 10 cuando una o más restricciones operativas se implementan por el controlador de turbina 26. Más específicamente, como se muestra en 102, el procedimiento 100 incluye determinar al menos una restricción operativa para la turbina eólica 10. Como se muestra en 104, el procedimiento 100 incluye operar la turbina eólica 10 con la(s) restricción/restricciones operativa(s) activada(s). En un modo de realización, por ejemplo, la(s) restricción/restricciones operativa(s) puede(n) incluir una restricción de empuje, una restricción de velocidad, una restricción de par de torsión, una restricción de ruido y/o un esquema de control de gestión de estela. Estas restricciones se pueden medir con sensores físicos o estimar. Por ejemplo, en determinados modos de realización, las restricciones se pueden medir usando mediciones de sensores de turbina disponibles y/o modelos dinámicos usando técnicas de predicción o estimación. Como tal, las señales medidas o predichas/estimadas se pueden comparar con valores umbral (definidos como parámetros operativos) para determinar si las restricciones están activas. Además, el procedimiento 100 puede incluir definir la restricción usando los mapas de rendimiento aerodinámico en el espacio de TSR/ángulo de *pitch* para las condiciones del viento medidas o estimadas predominantes, lo que permite que el procedimiento defina una TSR óptima y una consigna de *pitch* para maximizar el coeficiente de potencia mientras se satisface la restricción.

35 **[0031]** En otros modos de realización, el procedimiento 100 puede incluir operar la turbina eólica 10 con una pluralidad de restricciones operativas activadas. Por ejemplo, en un modo de realización, la turbina eólica 10 se puede operar tanto con el esquema de control de gestión de estela como con la restricción de empuje activados. Por tanto, en determinados modos de realización, la(s) restricción/restricciones operativa(s) puede(n) imponer un límite operativo en la turbina eólica 10. Por ejemplo, los procedimientos de acuerdo con la presente divulgación, en algunos modos de realización, pueden incluir además el establecimiento de un empuje máximo, una velocidad de generador máxima, un par de torsión máximo y/o un límite de ruido máximo predeterminado. En modos de realización de ejemplo, el par de torsión máximo es un par de torsión de generador máximo, aunque, en modos de realización alternativos, se podría establecer un par de torsión aerodinámico máximo y establecer el par de torsión de generador máximo a través del cálculo a partir del mismo. Dichos valores máximos son, en general, valores preestablecidos o nominales ("ratings") que, en general, es deseable que no se excedan durante la operación de la turbina eólica 10.

40 **[0032]** Por tanto, como se muestra en 106, el procedimiento 100 incluye además variar una velocidad específica (TSR) para la turbina eólica 10 mientras la(s) restricción/restricciones operativa(s) está(n) activada(s) para maximizar un coeficiente de potencia de la turbina eólica 10. Por ejemplo, en varios modos de realización, el controlador 26 se puede configurar para reducir la TSR cuando se alcanza el empuje máximo predeterminado. Además, el controlador 26 se puede configurar para incrementar el ángulo de *pitch* de al menos una pala de rotor 22 de la turbina eólica 10 además de reducir la TSR. Como se usa en el presente documento, la velocidad específica o TSR, en general, se refiere a la tasa entre la velocidad tangencial de la punta de una de las palas de rotor 22 y la velocidad del viento real. Por tanto, la TSR se puede calcular, en general, multiplicando la velocidad de rotación actual de la turbina eólica 10 (tal como el rotor 18 de la misma) (medida por sensores adecuados en la turbina eólica 10) por el radio máximo del rotor 18, y dividiendo este resultado por la velocidad del viento. Como tal, para reducir la TSR como se describe en el presente documento, el controlador 26 puede reducir la velocidad de turbina (es decir, la velocidad de rotor o la velocidad de generador). En consecuencia, en dichos modos de realización, la presente divulgación está configurada para incrementar la salida de potencia de la turbina eólica 10 sin incrementar el ruido generado por la turbina 10 (que es una función de la velocidad de turbina).

[0033] En referencia ahora a la FIGS. 5-7, se proporcionan diversos gráficos (también, en general, denominados mapas de rendimiento aerodinámico) para ilustrar las ventajas de la presente divulgación. Más específicamente, la FIG. 5 ilustra un modo de realización de un mapa de rendimiento aerodinámico de acuerdo con la operación normal o sin restricciones de la turbina eólica. Las FIGS. 6 y 7 ilustran diversos mapas de rendimiento aerodinámico de acuerdo con la operación restringida de la turbina eólica. Como se muestra, en particular, en la FIG. 5, la consigna operativa óptima 72 sin restricciones corresponde a la consigna operativa óptima para la turbina eólica 10 sin ninguna restricción implementada. Además, como se muestra, la consigna operativa óptima 72 se elige para maximizar el rendimiento de potencia de la turbina eólica 10.

[0034] En referencia, en particular, a las FIGS. 6 y 7, se han implementado diversas restricciones por el controlador de turbina 26 para ilustrar además las ventajas de la presente divulgación. Más específicamente, la FIG. 6 ilustra una restricción de empuje implementada por el controlador de turbina 26, como se indica por la región 70. De forma similar, como se muestra en la FIG. 7, se ha implementado una restricción de par de torsión por el controlador de turbina 26, como se indica por la región 90. En otras palabras, para ambos mapas, la turbina eólica 10 está limitada a la operación dentro de las regiones 70 y 90, respectivamente, y no puede operar con las regiones 78, 98. Como tal, el controlador 26 debe seleccionar nuevos puntos de operación dentro de las regiones 70 y 90. Por ejemplo, los puntos de operación 76, 96 representan esquemas de control de turbina eólica convencionales que utilizan una TSR fija durante momentos de restricción/restricciones operativa(s). Más específicamente, como se muestra en la FIG. 6, para las restricciones de empuje, los sistemas de control convencionales incrementan el *pitch* y mantienen la TSR en un valor fijo para obtener un nuevo coeficiente de potencia C_p . De forma similar, como se muestra en la FIG. 7, para las restricciones de par de torsión, los sistemas de control convencionales también incrementan el *pitch* y mantienen la TSR en un valor fijo para obtener un nuevo coeficiente de potencia C_p .

[0035] Por el contrario, como se muestra por los puntos de operación 74, 94, la metodología de control de la presente divulgación varía la TSR durante momentos de restricción/restricciones operativa(s) para maximizar el coeficiente de potencia de la turbina eólica 10. Más específicamente, como se muestra en la FIG. 6, para las restricciones de empuje, el controlador de turbina 26 de la presente divulgación puede incrementar el *pitch* y reducir la TSR para obtener un nuevo coeficiente de potencia C_p , como se muestra en 74, que sea mayor que el coeficiente de potencia C_p para esquemas de control convencionales. Además, como se muestra en la FIG. 7, para las restricciones de par de torsión, el controlador de turbina 26 de la presente divulgación está configurado para incrementar la TSR para obtener un nuevo coeficiente de potencia C_p , como se muestra en 94, que también sea mayor que el coeficiente de potencia C_p para esquemas de control convencionales.

[0036] Más específicamente, en determinados modos de realización, cuando la(s) restricción/restricciones operativa(s) está(n) activada(s), el controlador 26 también puede monitorizar un par de torsión de la turbina eólica 10. Como tal, durante la monitorización, si se alcanza un valor de par de torsión nominal, el controlador 26 está configurado para incrementar la TSR a un valor máximo. Además, como se muestra en la FIG. 7, el controlador 26 puede incrementar el ángulo de *pitch* de una o más de las palas de rotor 22 de la turbina eólica 10 además de incrementar la TSR.

[0037] Como se menciona, se pueden implementar múltiples restricciones por el controlador de turbina 26 al mismo tiempo. En dichos casos, el controlador 26 puede variar la TSR en función de ambas restricciones. Por ejemplo, en un modo de realización, cuando tanto el esquema de control de gestión de estela como la restricción de empuje están activados, el controlador 26 puede modificar la TSR en base a un valor de TSR mínimo entre el esquema de control de gestión de estela y la restricción de empuje.

[0038] Además, en determinados modos de realización, el controlador de turbina 26 puede monitorizar una o más condiciones de operación de turbina y/o condiciones del viento de la turbina eólica 10, por ejemplo, cuando la(s) restricción/restricciones operativa(s) está(n) activada(s). Por ejemplo, se pueden medir las condiciones de operación de turbina y/o las condiciones del viento, tal como a través del uso de diversos sensores adecuados. Más específicamente, los sensores de viento 80 adecuados (FIG. 2) pueden incluir, por ejemplo, dispositivos de distancia y detección por luz ("LIDAR"), dispositivos de distancia y detección por sonido ("SODAR"), anemómetros, veletas, barómetros y dispositivos de radar (tales como dispositivos de radar Doppler). En otros modos de realización, las condiciones de operación de turbina pueden incluir sensores de torre 82, sensores de generador 84, sensores de eje principal 88 y/o sensores de pala 86. Todavía además, se puede utilizar cualquier dispositivo de medición adecuado para medir directa o indirectamente las condiciones de operación de turbina y/o las condiciones del viento de la turbina eólica 10. Como tal, en determinados modos de realización, el controlador 26 está configurado además para determinar un valor de empuje estimado de la turbina eólica 10 en base a la(s) condición/condiciones de operación de turbina y/o las condiciones del viento. De esta forma, el controlador 26 puede variar la TSR de la turbina eólica 10 si el valor de empuje estimado es mayor que o igual al empuje máximo predeterminado. Además, se puede proporcionar un esquema de control de este tipo para cualquiera de las restricciones descritas en el presente documento.

[0039] En modos de realización adicionales, el controlador de turbina 26 también se puede configurar para restablecer (por ejemplo, incrementar) la TSR cuando la(s) restricción/restricciones operativa(s) (por ejemplo, la

restricción de empuje) está(n) desactivada(s) para reanudar la operación normal y maximizar el coeficiente de potencia.

5 **[0040]** En referencia ahora a la FIG. 8, se ilustra un modo de realización de un gráfico de la velocidad específica frente a la velocidad del viento de acuerdo con la presente divulgación. Más específicamente, como se muestra, el gráfico ilustra el empuje 110, el ángulo de *pitch* 112, la velocidad de generador 114 y el par de torsión de generador 116 en función de la variación de TSR 118 y la velocidad del viento. Además, como se muestra en 120, el gráfico ilustra un incremento del par de torsión 116 debido a una menor TSR. Además, el gráfico ilustra una TSR reducida en la región de control de empuje 124. Además, en la región de control de empuje 124, el gráfico ilustra una
10 disminución 126 del *pitch* en comparación con el *pitch* de referencia 112, así como una disminución 128 de la velocidad de generador.

[0041] Esta descripción por escrito usa ejemplos para divulgar la invención, incluyendo el mejor modo, y también para posibilitar que cualquier experto en la técnica ponga en práctica la invención, incluyendo fabricar y usar
15 cualquier dispositivo o sistema y realizar cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (100) para optimizar la producción de potencia de una turbina eólica (10), comprendiendo el procedimiento (100):
 - 5 determinar una restricción operativa para la turbina eólica (10), siendo la restricción operativa una de: una restricción de empuje para un rotor de la turbina eólica (10), imponiendo la restricción de empuje un empuje máximo predeterminado, y una restricción de par de torsión para un generador de la turbina eólica (10), imponiendo la restricción de par de torsión un par de torsión máximo predeterminado;
 - 10 proporcionar un mapa de rendimiento aerodinámico, correspondiendo el mapa de rendimiento aerodinámico a la restricción operativa determinada y siendo una tabla o un gráfico que describe, en un espacio de velocidad específica - ángulo de *pitch* y para una condición del viento dada, un coeficiente de potencia de la turbina eólica (10) y el empuje de rotor o el par de torsión de generador;
 - 15 operar la turbina eólica (10) con la restricción operativa activada de modo que la operación de la turbina eólica esté restringida a una región limitada (70, 90) del mapa de rendimiento aerodinámico; y,
 - 20 variar una velocidad específica para la turbina eólica (10) mientras la restricción operativa está activada para maximizar el coeficiente de potencia de la turbina eólica (10) dentro de la región limitada del mapa de rendimiento aerodinámico.
2. El procedimiento (100) de la reivindicación 1, en el que la restricción operativa es la restricción de empuje.
- 25 3. El procedimiento (100) de la reivindicación 1 o 2, en el que la condición del viento dada comprende al menos una de densidad del aire y velocidad del viento, y/o es una condición del viento medida o estimada predominante.
- 30 4. El procedimiento (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que, cuando la restricción operativa está activada, el procedimiento (100) comprende además:
 - determinar una emisión de ruido acústico de la turbina eólica (10); y,
 - 35 si se alcanza un valor límite, reducir la velocidad específica.
5. El procedimiento (100) de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que variar la velocidad específica para la turbina eólica (10) mientras la restricción operativa está activada comprende además reducir la velocidad específica cuando se alcanza un límite de empuje máximo predeterminado.
- 40 6. El procedimiento (100) de la reivindicación 5, que comprende además incrementar un ángulo de *pitch* de al menos una pala de rotor (22) de la turbina eólica (10) además de reducir la velocidad específica.
7. El procedimiento (100) de la reivindicación 4, que comprende además:
 - 45 monitorizar una o más condiciones de operación de turbina o condiciones del viento de la turbina eólica (10) cuando la restricción operativa está activada;
 - determinar un valor de empuje estimado de la turbina eólica (10) en base a las una o más condiciones de operación de turbina o condiciones del viento; y
 - 50 variar la velocidad específica para la turbina eólica (10) si el valor de empuje estimado es mayor que o igual a un límite de empuje máximo predeterminado.
8. El procedimiento (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que, cuando la restricción operativa está activada, el procedimiento (100) comprende además monitorizar un par de torsión de la turbina eólica (10), y, si se alcanza un valor de par de torsión nominal, incrementar la velocidad específica.
- 55 9. El procedimiento (100) de la reivindicación 8, que comprende además incrementar un ángulo de *pitch* de al menos una pala de rotor (22) de la turbina eólica (10) además de incrementar la velocidad específica.
- 60 10. El procedimiento (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además operar la turbina eólica (10) con una pluralidad de restricciones operativas activadas.
- 65 11. El procedimiento (100) de la reivindicación 10, en el que, cuando tanto un esquema de control de gestión de estela como la restricción de empuje están activados, el procedimiento (100) comprende además seleccionar

la velocidad específica en base a un valor de velocidad específica mínimo entre una consigna externa y la restricción de empuje.

- 5
12. El procedimiento (100) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además restablecer la velocidad específica cuando la restricción operativa está desactivada.
 13. Un sistema para optimizar la producción de potencia de una turbina eólica (10), comprendiendo el sistema:
10 un controlador de turbina que comprende uno o más procesadores configurados para realizar el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones precedentes.

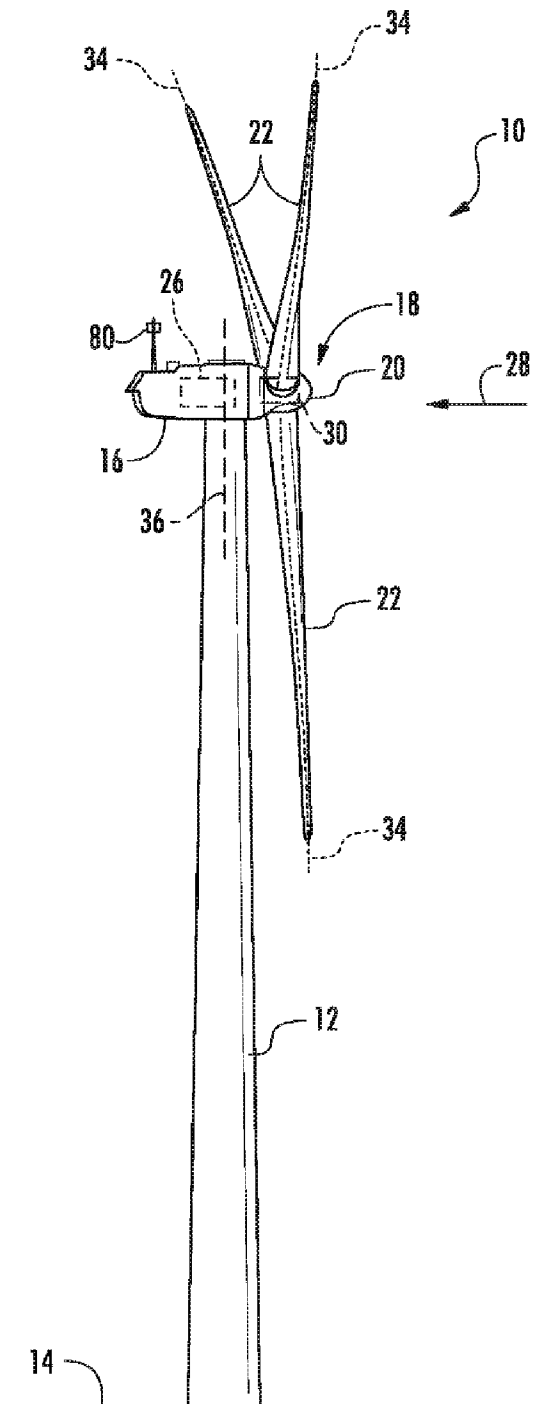


FIG. 1

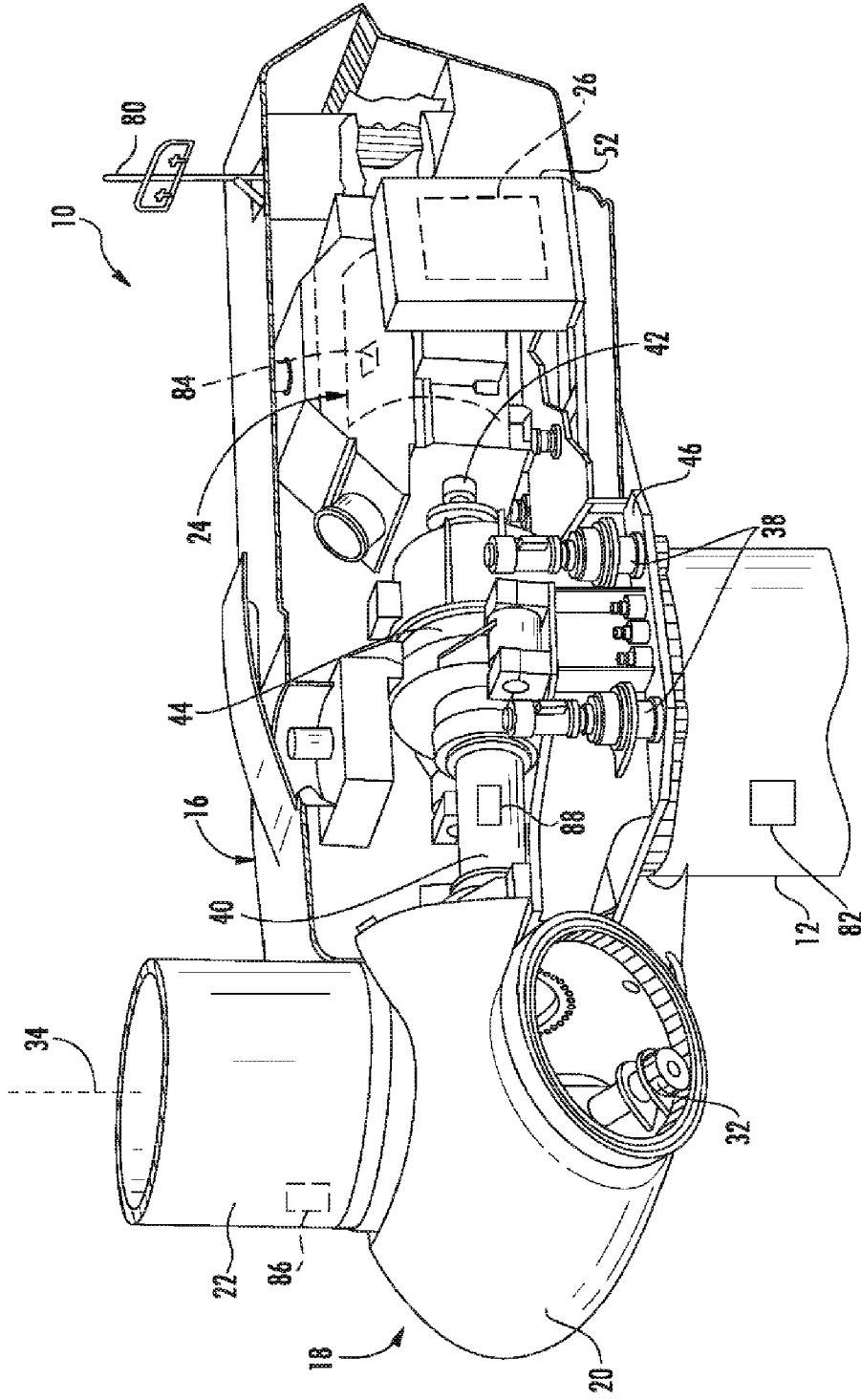


FIG. 2

26 ↘

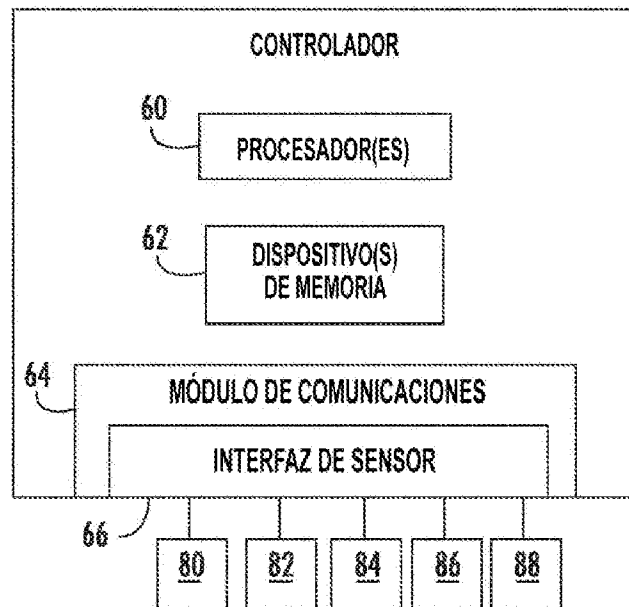


FIG. 3

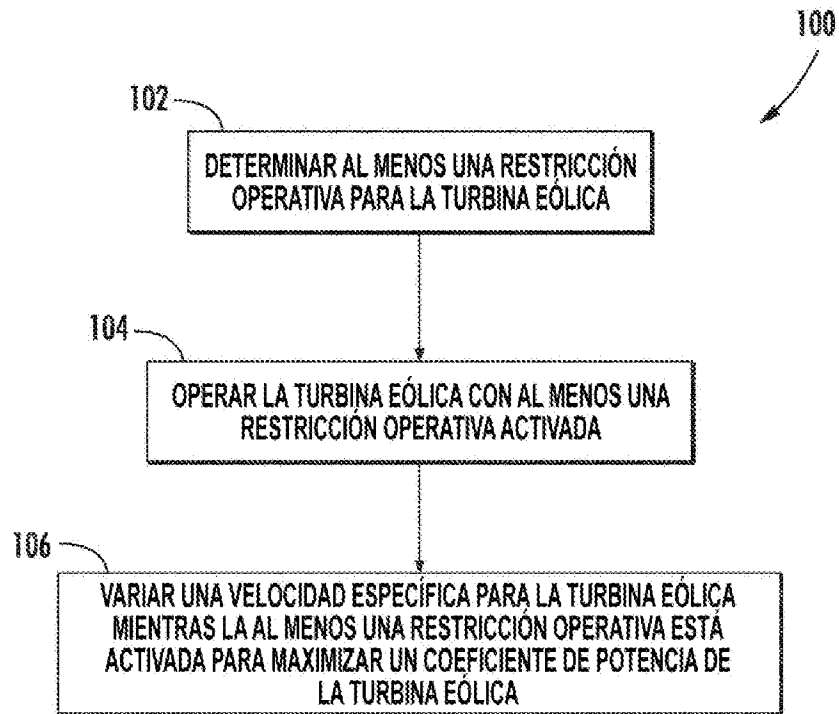


FIG. 4

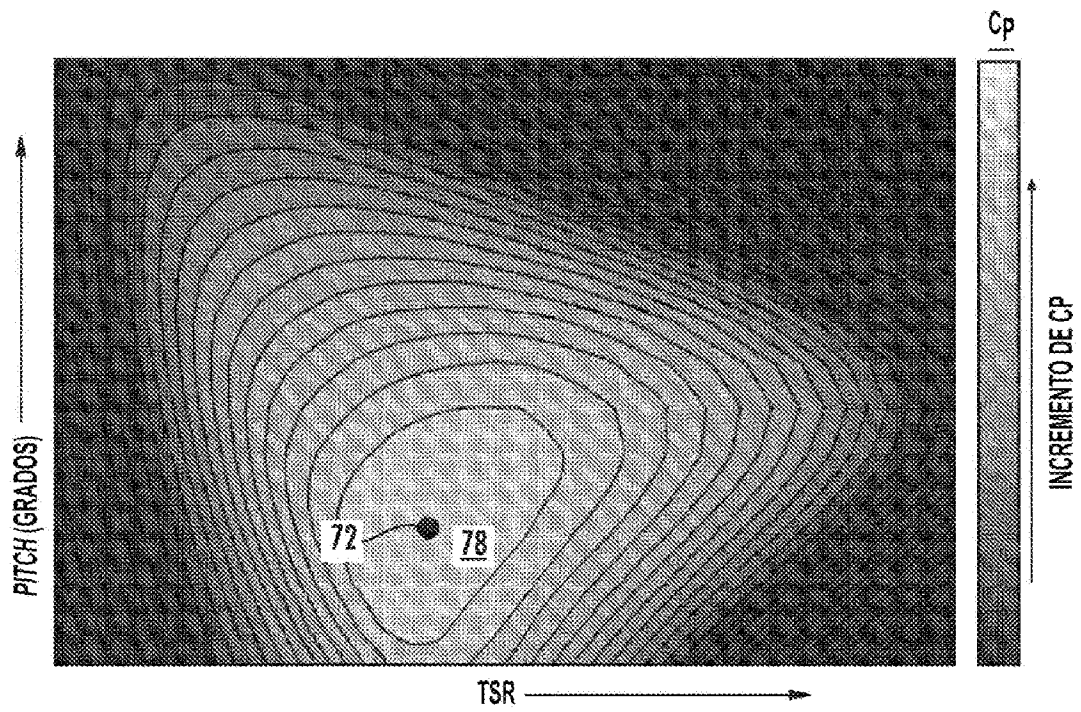


FIG. 5

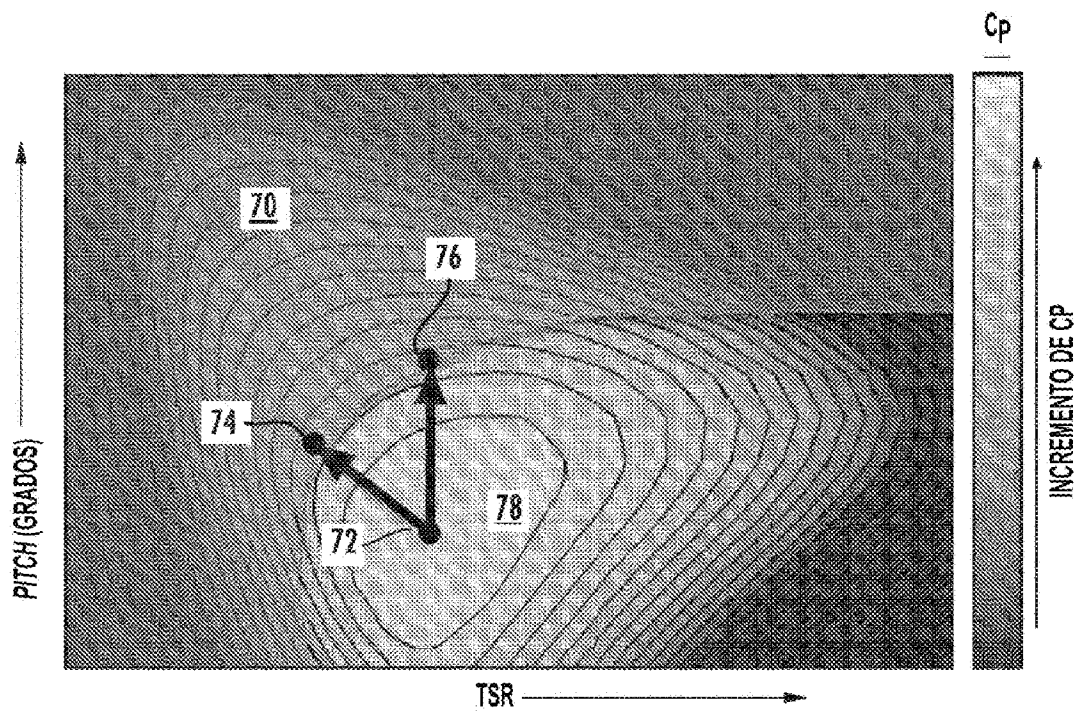


FIG. 6

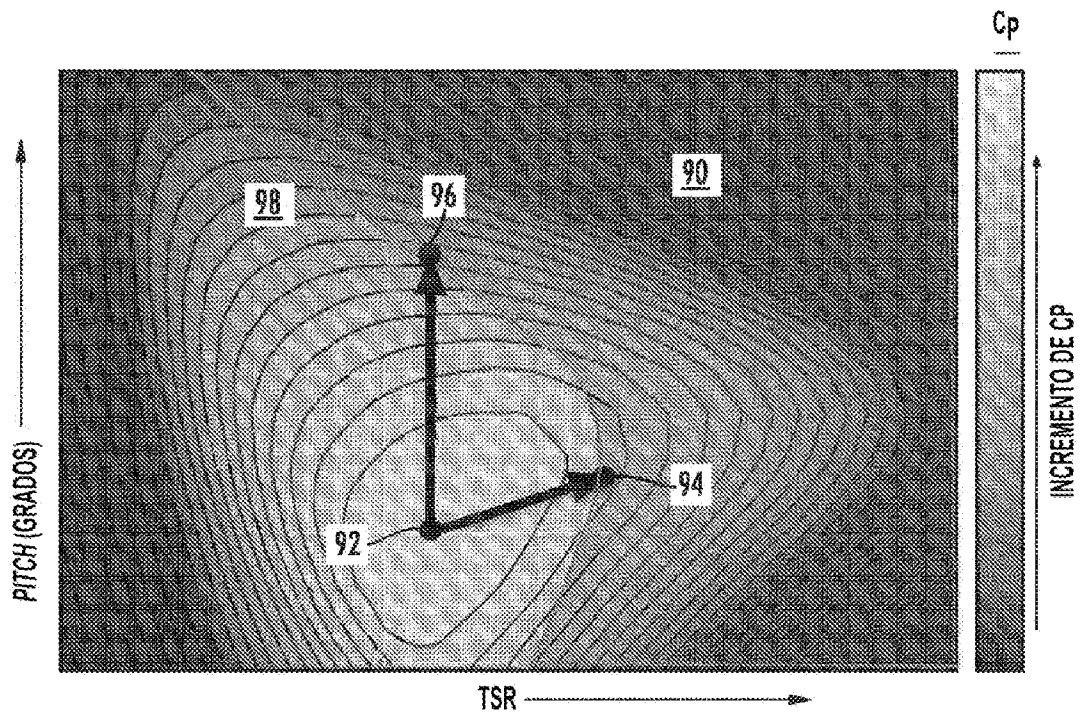


FIG. 7

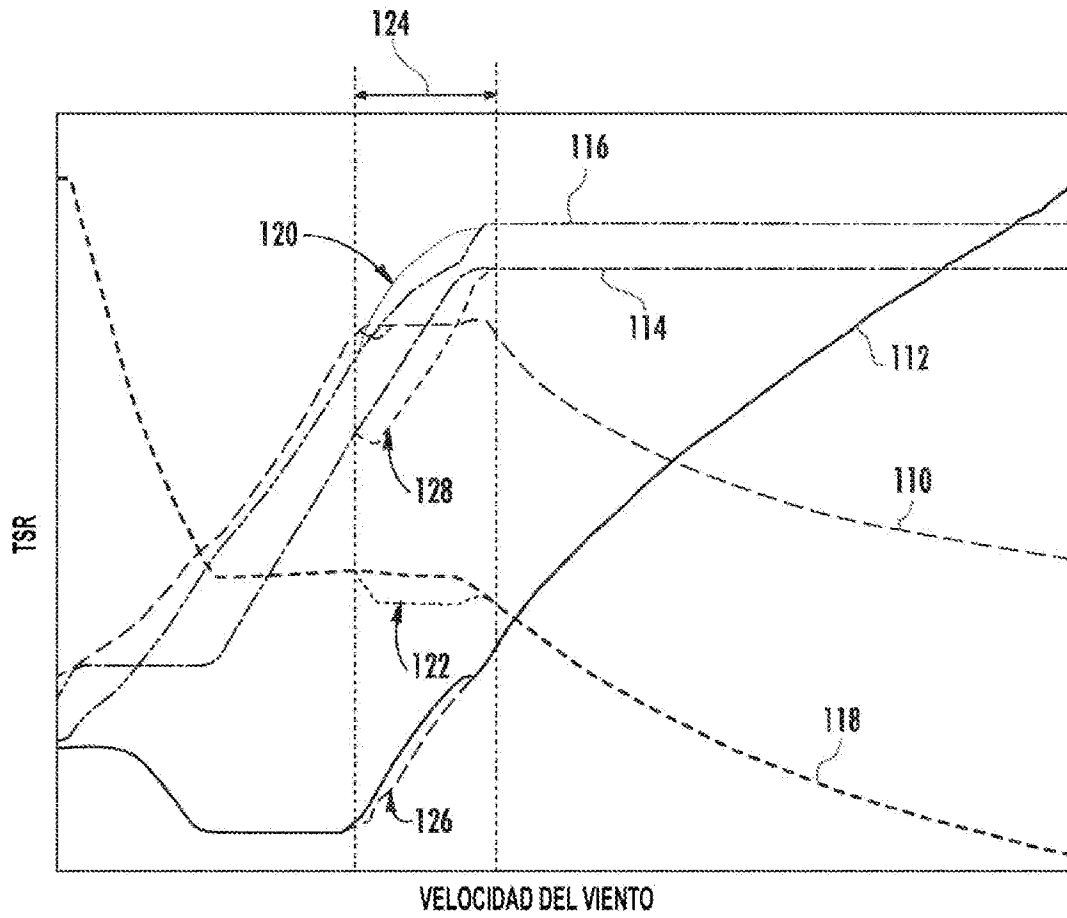


FIG. 8