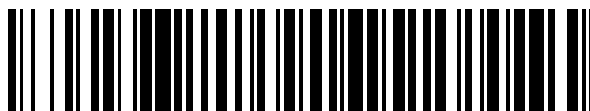


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 950 170**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.02.2021** **E 21155544 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.04.2023** **EP 3862561**

54 Título: **Sistemas y procedimientos para el control en base al aprendizaje automático continuo de turbinas eólicas**

30 Prioridad:

07.02.2020 US 202016784798

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

05.10.2023

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**VIRANI, NURALI;
EVANS, SCOTT CHARLES;
DAVOUST, SAMUEL;
SHARTZER, SAMUEL BRYAN y
ARORA, DHIRAJ**

74 Agente/Representante:

DE ROOIJ, Mathieu Julien

ES 2 950 170 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

Sistemas y procedimientos para el control en base al aprendizaje automático continuo de turbinas eólicas

5 **Antecedentes**

[0001] El campo de la invención se refiere, en general, a los sistemas de control de turbina eólica y, más en particular, a un sistema y procedimiento para el control en base al aprendizaje automático ("*machine learning*") continuo de turbinas eólicas.

[0002] Las turbinas eólicas más conocidas incluyen un rotor que tiene múltiples palas. El rotor a veces está acoplado a una carcasa, o góndola, que se sitúa en la parte superior de una base, por ejemplo, una torre tubular. Al menos algunas turbinas eólicas de uso general conocidas, es decir, turbinas eólicas diseñadas para proporcionar potencia eléctrica a una red de suministro, tienen palas de rotor que tienen conformaciones y dimensiones predeterminadas. Las palas de rotor transforman la energía cinética del viento en fuerzas aerodinámicas de pala que inducen un par de torsión rotacional mecánico para accionar uno o más generadores, generando posteriormente potencia eléctrica.

[0003] Las turbinas eólicas se exponen a grandes variaciones en el flujo de entrada de viento, que ejercen cargas variables a la estructura de turbina eólica, en particular, el rotor y eje de turbina eólica. Algunas turbinas eólicas conocidas incluyen conjuntos de sensor para detectar de forma remota características del viento, tales como la dirección y la velocidad. Las características del viento detectadas se pueden usar para controlar las cargas mecánicas de la turbina eólica. Por ejemplo, en base a una velocidad del viento detectada, la turbina eólica se puede controlar para operarse a una potencia de salida particular. La potencia de salida, en general, se selecciona usando una curva de potencia de velocidad del viento. Dichas curvas representan, en general, una variable de entrada (por ejemplo, la velocidad del viento) y, en general, no están optimizadas para una variedad de factores diferentes en todas las condiciones operativas. Por lo tanto, es deseable un sistema de control mejorado para turbinas eólicas.

[0004] Los documentos US 2014/100703 A1 y EP 3273055 A1 se refieren a sistemas de control para turbinas eólicas

30 **Breve descripción**

[0005] En un aspecto, se divulga un sistema de control. El sistema de control incluye una turbina eólica, al menos un sensor configurado para detectar al menos una propiedad de la turbina eólica para generar datos de medición y un controlador acoplado en comunicación a la turbina eólica y al menos un sensor. El controlador incluye al menos un procesador en comunicación con al menos un dispositivo de memoria. El al menos un procesador está configurado para controlar, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba, recibir, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición, generar, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control, recibir, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor, actualizar el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición, y controlar la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.

[0006] En otro aspecto, se divulga un controlador. El controlador está acoplado en comunicación a una turbina eólica y a al menos un sensor. El controlador incluye al menos un procesador en comunicación con al menos un dispositivo de memoria. El al menos un procesador está configurado para controlar, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba, recibir, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición, generar, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control, recibir, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor, actualizar el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición, y controlar la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.

[0007] En otro aspecto, se divulga un procedimiento para controlar una turbina eólica usando un controlador. El controlador está acoplado en comunicación a la turbina eólica y a al menos a un sensor. El controlador incluye al menos un procesador en comunicación con al menos un dispositivo de memoria. El procedimiento incluye controlar, por el controlador, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba, recibir, por el controlador, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición, generar, por el controlador, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control, recibir, por el controlador, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor, actualizar, por el controlador, el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición, y controlar, por el controlador, la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.

Dibujos

[0008] Estos y otras características, aspectos y ventajas de la presente divulgación se entenderán mejor cuando se lea la siguiente descripción detallada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que caracteres similares representan piezas similares a lo largo de los dibujos, en los que:

5 La FIG. 1 es una vista en perspectiva de una turbina eólica de ejemplo.

La FIG. 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de turbina eólica de ejemplo para su uso en el control de la turbina eólica mostrada en la FIG. 1.

10 La FIG. 3 es un gráfico que ilustra curvas de potencia de ejemplo que se pueden usar para controlar la turbina eólica mostrada en la FIG. 1.

La FIG. 4 es un diagrama de flujo de un procedimiento de ejemplo para controlar una turbina eólica.

15 Descripción detallada

[0009] En la siguiente memoria descriptiva y las reivindicaciones, se hará referencia a una serie de términos, que se definirán para que tengan los siguientes significados.

20 **[0010]** Las formas en singular "un", "una" y "el/la" incluyen referencias al plural a menos que el contexto lo indique claramente de otro modo.

[0011] Se puede aplicar lenguaje aproximado, como se usa en el presente documento a lo largo de la memoria descriptiva y reivindicaciones, para modificar cualquier representación cuantitativa que podría variar de forma permisible sin dar como resultado un cambio en la función básica con la que se relaciona. En consecuencia, un valor modificado por un término o términos, tales como "sustancialmente" y "aproximadamente" no se debe limitar al valor preciso especificado. En al menos algunas instancias, el lenguaje aproximado puede corresponder a la precisión de un instrumento para medir el valor. Aquí, y a lo largo de la memoria descriptiva y reivindicaciones, las limitaciones de intervalo se pueden combinar y/o intercambiar, dichos intervalos se identifican e incluyen todos los subintervalos contenidos en los mismos a menos que el contexto o lenguaje lo indique de otro modo.

[0012] Los modos de realización descritos en el presente documento incluyen un sistema de control, incluyendo una turbina eólica, al menos un sensor configurado para detectar al menos una propiedad de la turbina eólica para generar datos de medición y un controlador acoplado en comunicación a la turbina eólica y al menos un sensor. El controlador incluye al menos un procesador en comunicación con al menos un dispositivo de memoria. El al menos un procesador está configurado para controlar, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba, recibir, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición, generar, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control, recibir, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor, actualizar el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición, y controlar la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control generado, en base a los segundos datos de medición recibidos.

[0013] La FIG. 1 es una vista en perspectiva esquemática de una turbina eólica 100 de ejemplo. En el modo de realización de ejemplo, la turbina eólica 100 es una turbina eólica de eje horizontal. La turbina eólica 100 incluye una torre 102 que se extiende desde una superficie de soporte (no mostrada), una góndola 106 acoplada a la torre 102 y un rotor 108 acoplado a la góndola 106. El rotor 108 tiene un buje 110 rotatorio y una pluralidad de palas 112, 114, 116 acopladas al buje 110 rotatorio. En el modo de realización de ejemplo, el rotor 108 tiene una primera pala 112, una segunda pala 114 y una tercera pala 116. En modos de realización alternativos, el rotor 108 tiene cualquier número de palas 112, 114, 116 que posibilite que la turbina eólica 100 funcione como se describe en el presente documento. En el modo de realización de ejemplo, la torre 102 está fabricada de acero tubular y tiene una cavidad (no mostrada en la FIG. 1) que se extiende entre la superficie de soporte y la góndola 106. En modos de realización alternativos, la turbina eólica 100 incluye cualquier torre 102 que posibilite que la turbina eólica 100 opere como se describe en el presente documento. Por ejemplo, en algunos modos de realización, la torre 102 es una cualquiera de una torre de acero de celosía, una torre arriostrada, una torre de hormigón y una torre híbrida.

[0014] En el modo de realización de ejemplo, las palas 112, 114, 116 se sitúan alrededor del buje 110 rotatorio para facilitar la rotación del rotor 108 cuando el viento fluye a través de la turbina eólica 100. Cuando el rotor 108 rota, la energía cinética del viento se transforma en energía mecánica utilizable y, posteriormente, en energía eléctrica. Durante la operación, el rotor 108 rota alrededor de un eje de rotación 120 que es sustancialmente paralelo a la superficie de soporte. Además, en algunos modos de realización, el rotor 108 y la góndola 106 se hacen rotar alrededor de la torre 102 en un eje de orientación 122 para controlar la orientación de las palas 112, 114, 116 con respecto a la dirección del viento. En modos de realización alternativos, la turbina eólica 100 incluye cualquier rotor 108 que posibilite que la turbina eólica 100 opere como se describe en el presente documento.

[0015] En el modo de realización de ejemplo, cada pala 112, 114, 116 está acoplada al buje 110 rotatorio en un extremo de buje 124 y se extiende radialmente hacia afuera desde el buje 110 rotatorio hasta un extremo distal 126.

Cada pala 112, 114, 116 define un eje longitudinal 128 que se extiende entre el extremo de buje 124 y el extremo distal 126. En modos de realización alternativos, la turbina eólica 100 incluye cualquier pala 112, 114, 116 que posibilite que la turbina eólica 100 opere como se describe en el presente documento.

[0016] La FIG. 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de turbina eólica 200 de ejemplo. El sistema de control de turbina eólica 200 incluye un dispositivo objetivo 202, un controlador de turbina eólica 204 y uno o más sensores 206. En algunos modos de realización, el dispositivo objetivo 202 es sustancialmente similar a la turbina eólica 100 (mostrada en la FIG. 1). Adicionalmente o de forma alternativa, el dispositivo objetivo 202 puede ser otro dispositivo que se pueda controlar electrónicamente. El controlador de turbina eólica 204 está acoplado en comunicación al dispositivo objetivo 202 e incluye un procesador 208 y un dispositivo de memoria 210. En algunos modos de realización, al menos alguna funcionalidad del controlador de turbina eólica 204 se realiza por el procesador 208 y/o dispositivo de memoria 210.

[0017] En el modo de realización de ejemplo, el dispositivo objetivo 202 incluye una turbina eólica que convierte la energía cinética del viento en fuerzas aerodinámicas de pala que inducen un par de torsión rotacional mecánico para generar potencia eléctrica, por ejemplo, transformando la energía cinética del viento en fuerzas aerodinámicas de pala que inducen un par de torsión rotacional mecánico. Una cantidad de potencia de salida producida por el dispositivo objetivo 202 depende, por ejemplo, de una cantidad de velocidad y/o par de torsión de operación del dispositivo objetivo 202. Además, otras características del dispositivo objetivo 202 pueden depender de la velocidad y/o par de torsión de operación del dispositivo objetivo 202, tales como la fatiga de los componentes del dispositivo objetivo 202.

[0018] El controlador de turbina eólica 204 controla la operación del dispositivo objetivo 202, por ejemplo, controlando la velocidad y/o par de torsión al que opera el dispositivo objetivo 202. Por ejemplo, en algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 puede controlar un ángulo de *pitch* de las palas 112, 114, 116 (mostradas en la FIG. 1), una orientación del dispositivo objetivo 202, una configuración de multiplicadora del dispositivo objetivo 202 y/u otro parámetro operativo del dispositivo objetivo 202 que afecte a la velocidad y/o par de torsión. Al controlar la velocidad y/o par de torsión del dispositivo objetivo 202, el controlador de turbina eólica 204 puede seleccionar la potencia de salida a la que opera el dispositivo objetivo 202.

[0019] Antes de la operación normal del dispositivo objetivo 202, el controlador de turbina eólica 204 opera el dispositivo objetivo 202 en una fase de entrenamiento inicial. Durante la fase de entrenamiento inicial, el controlador de turbina eólica 204 controla el dispositivo objetivo 202 de acuerdo con al menos un parámetro de prueba. Por ejemplo, en algunos modos de realización, el parámetro de prueba es una serie de niveles de velocidad, niveles de par de torsión, consignas de *pitch* de pala y/o niveles de potencia de salida correspondientes. Durante la fase de entrenamiento, el controlador de turbina eólica 204 recibe datos de medición de los sensores 206. En algunos modos de realización, los datos de medición incluyen condiciones operativas generales del dispositivo objetivo 202, tales como una densidad del aire y/o velocidad del viento, y datos específicos para cada punto de datos de prueba, tales como la fatiga en los componentes del dispositivo objetivo 202. Usando los datos de medición, el controlador de turbina eólica puede generar un modelo de control para el dispositivo objetivo 202. Por ejemplo, en algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 aplica uno o más algoritmos de aprendizaje automático a los datos de medición recibidos para generar el modelo de control. En algunos modos de realización, el modelo de control está diseñado para lograr, por ejemplo, una vida útil operativa máxima y/o una producción anual de energía (PAE) máxima del dispositivo objetivo 202.

[0020] En algunos modos de realización, se lleva a cabo una fase de diseño del experimento, por ejemplo, durante la fase de entrenamiento inicial, donde los parámetros de control se someten a ciclos siguiendo un programa, de forma aleatoria o inteligente a través de un conjunto predefinido de niveles o por medio de un muestreo aleatorio o un enfoque inteligente (tal como optimización bayesiana, aprendizaje por refuerzo, etc.) sobre un conjunto continuo o discreto de consignas de control. Esta fase de diseño del experimento se concluye en base a la duración del tiempo, la cantidad de instancias de datos obtenidos u otro criterio de detención para obtener un conjunto inicial de datos de entrenamiento. Se puede entrenar un modelo de aprendizaje automático a partir de los datos recabados durante esta fase de recopilación de datos (a) para predecir una cifra de mérito, tal como la potencia de turbina, y, a continuación, identificar consignas que optimicen esa cifra de mérito; o bien (b) para recomendar directamente una consigna que probablemente optimice esa figura de mérito. Una vez entrenado, este modelo de aprendizaje automático se puede usar periódica y/o intermitentemente para determinar la configuración de control óptima, por ejemplo, para el dispositivo de objetivo 202. El modelo de aprendizaje automático puede dar una evaluación inherente de competencia del modelo en base al nivel de incertidumbre de su predicción, tal como en el caso de modelos de conjuntos, modelos bayesianos (incluyendo procedimientos gaussianos), intervalos de predicción no conformal u otros procedimientos que pueden proporcionar incertidumbre de predicción. De forma alternativa, se puede aprender una evaluación de competencia del modelo a partir de los datos de entrenamiento usando estimación de densidad, estimación de conjunto de niveles, clasificador de una clase, aprendizaje múltiple ("*manifold learning*"), detección de anomalías u otros enfoques de aprendizaje supervisados o no supervisados. Adicionalmente, el controlador de turbina eólica 204 puede usar la evaluación tanto interna como externa de competencia del modelo para una instancia de datos obtenidos durante la operación. De esta manera, para una consulta o estado de retroalimentación particular, el modelo de aprendizaje automático puede evaluar su nivel de competencia y, si es competente, a continuación, el controlador actuará sobre las sugerencias del modelo de consignas de control para maximizar al menos una cifra de mérito, tal

como potencia o vida, y si no es competente, a continuación, usar una consigna de valor de referencia, continuar en una consigna previa o usar otro enfoque de control por seguridad o solidez para asignar consignas de control.

[0021] Durante una fase operativa, el controlador de turbina eólica 204 controla el dispositivo objetivo 202 en base al modelo de control generado. Por ejemplo, en algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 recibe datos de medición de los sensores 206, tales como una velocidad del viento actual y/o una densidad del aire actual. Usando la velocidad del viento actual y/o densidad del aire actual como una entrada, el modelo de control puede proporcionar un parámetro de salida, tal como una potencia de salida, con el que operar el dispositivo objetivo 202. El controlador de turbina eólica 204, a continuación, opera el dispositivo objetivo 202 en consecuencia. En algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 continúa refinando y/o actualizando el modelo de control durante la operación normal del dispositivo objetivo 202 en base a los datos de medición recibidos de los sensores 206 durante la fase operativa.

[0022] En algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 está configurado además para calcular un nivel de competencia para una entrada dada de datos de medición. Por ejemplo, si los datos de entrada son iguales o similares a los datos que se usaron para generar el modelo de control, el nivel de competencia puede ser relativamente alto, y, si los datos de entrada, son diferentes o disimilares a los datos previos, el nivel de competencia puede ser relativamente bajo. En algunos de dichos modos de realización, si el nivel de competencia está por debajo de un umbral, el controlador de turbina eólica 204 no controla el dispositivo objetivo 202 en base al modelo de control actual y, en cambio, toma medidas para actualizar el modelo de control e incrementar el nivel de competencia. Por ejemplo, en algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 recibe datos de medición derivados de otros sistemas de control de turbina eólica que experimentaron condiciones operativas similares a las condiciones operativas actuales del dispositivo objetivo 202 y usa los datos de medición recibidos para actualizar el modelo de control. En algunos modos de realización, el controlador de turbina eólica 204 adicionalmente o de forma alternativa inicia una fase de entrenamiento posterior donde los datos de medición que reflejan las condiciones actuales se obtienen del dispositivo objetivo 202 y de los sensores 206 y se usan para actualizar el modelo de control. En algunos modos de realización, la fase de entrenamiento posterior es sustancialmente similar a la fase de entrenamiento inicial.

[0023] La FIG. 3 es un gráfico 300 que ilustra una primera curva de potencia 302 y una segunda curva de potencia 304 que se pueden usar para controlar la turbina eólica 100 (mostrada en la FIG. 1). El gráfico 300 incluye un eje horizontal 308 correspondiente a una velocidad del viento tal como, por ejemplo, una velocidad del viento detectada en la turbina eólica 100. El gráfico 300 incluye además un eje vertical 310 correspondiente a una potencia de salida de la turbina eólica 100. La potencia de salida de la turbina eólica 100 se puede seleccionar en base a la velocidad del viento actual usando, por ejemplo, la primera curva de potencia 302 o la segunda curva de potencia 304.

[0024] La potencia de salida, cuando se selecciona en base a la primera curva de potencia 302 o a la segunda curva de potencia 304, en general, se incrementa a medida que se incrementa la velocidad del viento hasta que se alcanza un umbral de velocidad del viento 312, después de lo que la potencia de salida permanece constante. El control de la turbina eólica 100 en base a la primera curva de potencia 302, en general, da como resultado una mayor potencia de salida y una PAE correspondientemente mayor que el control de la turbina eólica 100 en base a la segunda curva de potencia 304. Por el contrario, en algunos modos de realización, el control de la turbina eólica 100 en base a la segunda curva de potencia 304 da como resultado una menor fatiga y una vida útil operativa correspondientemente más larga de la turbina eólica 100 que el control de la turbina eólica 100 en base a la primera curva de potencia 302. En algunos modos de realización, para controlar la turbina eólica 100, una de la primera curva de potencia 302 o de la segunda curva de potencia 304 se puede seleccionar por el controlador de turbina eólica 204 usando el modelo de control generado en base a las condiciones de entrada actuales.

[0025] La FIG. 4 ilustra un procedimiento 400 de ejemplo para controlar la turbina eólica 100. En algunos modos de realización, el procedimiento 400 se realiza por el controlador de turbina eólica 204. El procedimiento 400 incluye controlar 402, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica 100 de acuerdo con al menos un parámetro de prueba. El procedimiento 400 incluye además recibir 404, de al menos un sensor (tal como los sensores 206), durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición. El procedimiento 400 incluye además generar 406, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control. El procedimiento 400 incluye además recibir 408, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor. El procedimiento 400 incluye además actualizar 410 el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición. El procedimiento 400 incluye además controlar 412 la operación de la turbina eólica 100, usando el modelo de control generado, en base a los segundos datos de medición recibidos.

[0026] Un efecto técnico de ejemplo de los procedimientos, sistemas y aparatos descritos en el presente documento incluye al menos uno de: (a) mejorar una producción anual de energía (PAE) de una turbina eólica usando un modelo de control en base al aprendizaje automático para controlar la turbina eólica; (b) mejorar una vida útil de una turbina eólica por un modelo de control en base al aprendizaje automático para controlar la turbina eólica; (c) proporcionar un modelo de control para una turbina eólica aplicando al menos un algoritmo de aprendizaje automático a los datos obtenidos de al menos la turbina eólica; y (d) mejorar un modelo de control de turbina eólica actualizando periódica y/o intermitentemente el modelo de control de turbina eólica en base a datos en tiempo real; y (e) mejorar la producción

anual de energía (PAE) de un grupo de turbinas eólicas y/o parque eólico controlando el grupo de turbinas eólicas y/o parque eólico usando un modelo de control en base al aprendizaje automático.

[0027] En el presente documento se describen modos de realización de ejemplo de un sistema para el control en base al aprendizaje automático continuo de turbinas eólicas. Los sistemas y procedimientos de operación y fabricación de dichos sistemas y dispositivos no están limitados a los modos de realización específicos descritos en el presente documento, sino que los componentes de los sistemas y/o etapas de los procedimientos se pueden utilizar independiente y separadamente de otros componentes y/o etapas descritos en el presente documento. Por ejemplo, los procedimientos también se pueden usar en combinación con otros sistemas electrónicos, y no están limitados a la práctica solo con los sistemas electrónicos y procedimientos como se describe en el presente documento. Más bien, el modo de realización de ejemplo se puede implementar y utilizar en conexión con muchos otros sistemas electrónicos.

[0028] Algunos modos de realización implican el uso de uno o más dispositivos electrónicos o informáticos. Dichos dispositivos típicamente incluyen un procesador, dispositivo de procesamiento o controlador, tal como una unidad central de procesamiento (CPU) de propósito general, una unidad de procesamiento de gráficos (GPU), un microcontrolador, un procesador de ordenador con conjunto de instrucciones reducido (RISC), circuito integrado específico de aplicación (ASIC), un circuito de lógica programable (PLC), una matriz de compuerta programable en campo (FPGA), un dispositivo de procesamiento de señal digital (DSP) y/o cualquier otro circuito o dispositivo de procesamiento que pueda ejecutar las funciones descritas en el presente documento. Los procedimientos descritos en el presente documento se pueden codificar como instrucciones ejecutables realizadas en un medio legible por ordenador, incluyendo, sin limitación, un dispositivo de almacenamiento y/o un dispositivo de memoria. Dichas instrucciones, cuando se ejecutan por un dispositivo de procesamiento, provocan que el dispositivo de procesamiento realice al menos una parte de los procedimientos descritos en el presente documento. Los ejemplos anteriores solo son de ejemplo y, por tanto, no se pretende que limiten de ninguna manera la definición y/o el significado del término procesador y dispositivo de procesamiento.

[0029] Aunque las características específicas de diversos modos de realización de la invención se pueden mostrar en algunos dibujos y no en otros, esto solo es por conveniencia. De acuerdo con los principios de la divulgación, se puede hacer referencia a y/o reivindicar cualquier característica de un dibujo en combinación con cualquier característica de cualquier otro dibujo.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de control (200) que comprende:

una turbina eólica (100);
 al menos un sensor (206) configurado para detectar al menos una propiedad de dicha turbina eólica para generar datos de medición; y
 un controlador (204) acoplado en comunicación a dicha turbina eólica y dicho al menos un sensor, comprendiendo dicho controlador al menos un procesador (208) en comunicación con al menos un dispositivo de memoria (210), dicho al menos un procesador configurado para:

controlar, durante una fase de entrenamiento, dicha turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba;
 recibir, de dicho al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición; generar, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control;
 recibir, durante una fase operativa, segundos datos de medición de dicho al menos un sensor; actualizar el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición; y controlar la operación de dicha turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.

2. El sistema de control de la reivindicación 1, en el que dicho al menos un procesador (208) está configurado además para determinar, durante la fase operativa, un nivel de competencia en base al modelo de control y los segundos datos de medición recibidos.

3. El sistema de control de la reivindicación 2, en el que dicho al menos un procesador (208) está configurado además para:

determinar que el nivel de competencia está por debajo de un umbral de certeza; e
 iniciar una fase de entrenamiento posterior en base a la determinación.

4. El sistema de control de la reivindicación 2 o reivindicación 3, en el que, para determinar el nivel de competencia, dicho al menos un procesador (208) está configurado para computar el nivel de competencia usando al menos uno de estimación de densidad, estimación de conjunto de nivel, clasificador de una clase, aprendizaje múltiple y detección de anomalías.

5. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho controlador (204) está acoplado en comunicación a al menos un sistema de control (200) adicional, y en el que dicho al menos un procesador (208) está configurado además para:

recibir, del al menos un sistema de control adicional, terceros datos de medición; y
 generar el modelo de control en base además a los terceros datos de medición recibidos.

6. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que, para actualizar el modelo de control, dicho al menos un procesador (208) está configurado además para iniciar una fase de entrenamiento posterior para generar un modelo de control revisado en base a los segundos datos de medición.

7. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que, para generar el modelo de control, dicho al menos un procesador (208) está configurado para aplicar al menos un algoritmo de aprendizaje automático a los primeros datos de medición.

8. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que los primeros datos de medición incluyen al menos una de una velocidad del viento, una densidad del aire, una potencia de salida, una temperatura y una medición de la estabilidad del viento.

9. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que, para controlar dicha turbina eólica, dicho al menos un procesador (208) está configurado para controlar al menos uno de un par de torsión, una velocidad, un ángulo de *pitch* de pala y un ángulo de ataque de dicha turbina eólica.

10. El sistema de control de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que, para generar el modelo de control, dicho al menos un procesador (208) está configurado para calcular al menos una de una potencia y una fatiga de dicha turbina eólica.

11. Un controlador (204) acoplado en comunicación a una turbina eólica (100) y al menos un sensor (206), comprendiendo dicho controlador al menos un procesador (208) en comunicación con al menos un dispositivo de memoria (210), dicho al menos un procesador configurado para:

- 5 controlar, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba;
 recibir, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición;
 generar, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control;
 recibir, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor;
 actualizar el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición; y
 controlar la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.
- 10 12. El controlador de la reivindicación 11, en el que dicho al menos un procesador (208) está configurado además para determinar, durante la fase operativa, un nivel de competencia en base al modelo de control y los segundos datos de medición recibidos.
- 15 13. El controlador de la reivindicación 12, en el que dicho al menos un procesador (208) está configurado además para:
 determinar que el nivel de competencia está por debajo de un umbral de certeza; e
 iniciar una fase de entrenamiento posterior en base a la determinación.
- 20 14. El controlador de la reivindicación 12 o 13, en el que, para determinar el nivel de competencia, dicho al menos un procesador (208) está configurado para computar el nivel de competencia usando al menos uno de estimación de densidad, estimación de conjunto de nivel, clasificador de una clase, aprendizaje múltiple y detección de anomalías.
- 25 15. Un procedimiento de control de una turbina eólica (100) usando un controlador (204) acoplado en comunicación a la turbina eólica y al menos un sensor (206), incluyendo el controlador al menos un procesador (208) en comunicación con al menos un dispositivo de memoria (210), comprendiendo dicho procedimiento:
 controlar, por el controlador, durante una fase de entrenamiento, la turbina eólica de acuerdo con al menos un parámetro de prueba;
 recibir, por el controlador, del al menos un sensor, durante la fase de entrenamiento, primeros datos de medición;
 generar, por el controlador, en base al al menos un parámetro de prueba y los primeros datos de medición recibidos, un modelo de control;
 recibir, por el controlador, durante una fase operativa, segundos datos de medición del al menos un sensor;
 actualizar, por el controlador, el modelo de control continuamente en base a los segundos datos de medición; y
 controlar, por el controlador, la operación de la turbina eólica, usando el modelo de control actualizado.
- 30
- 35

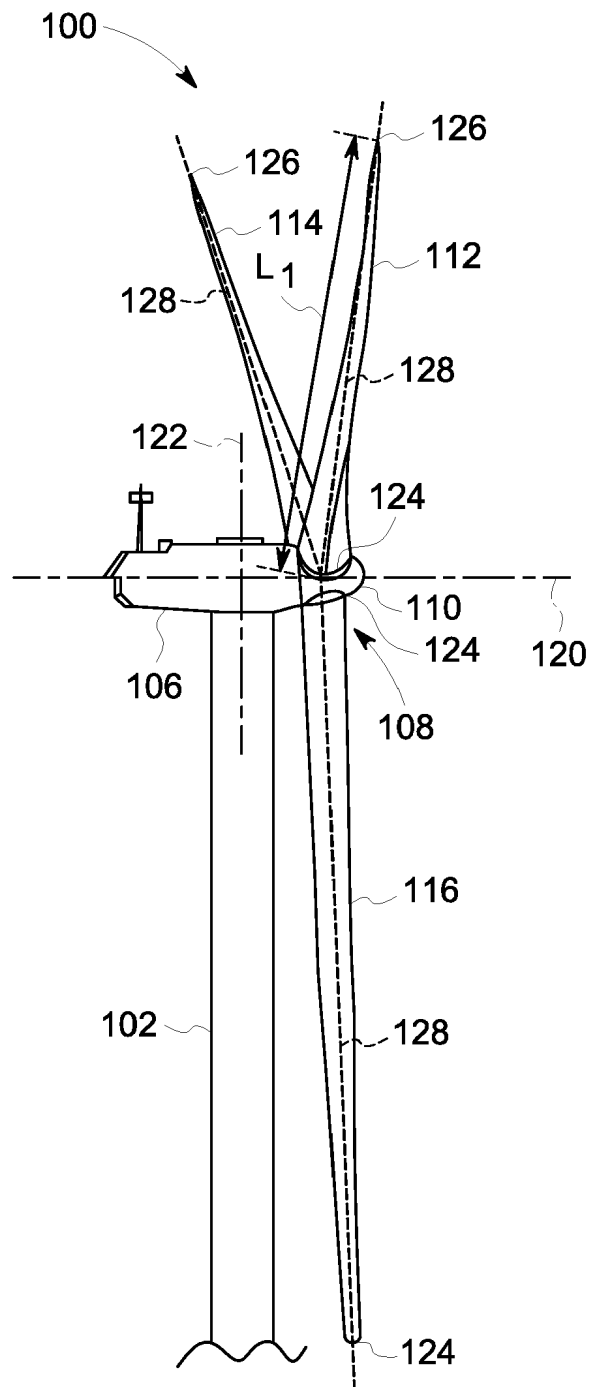


FIG. 1

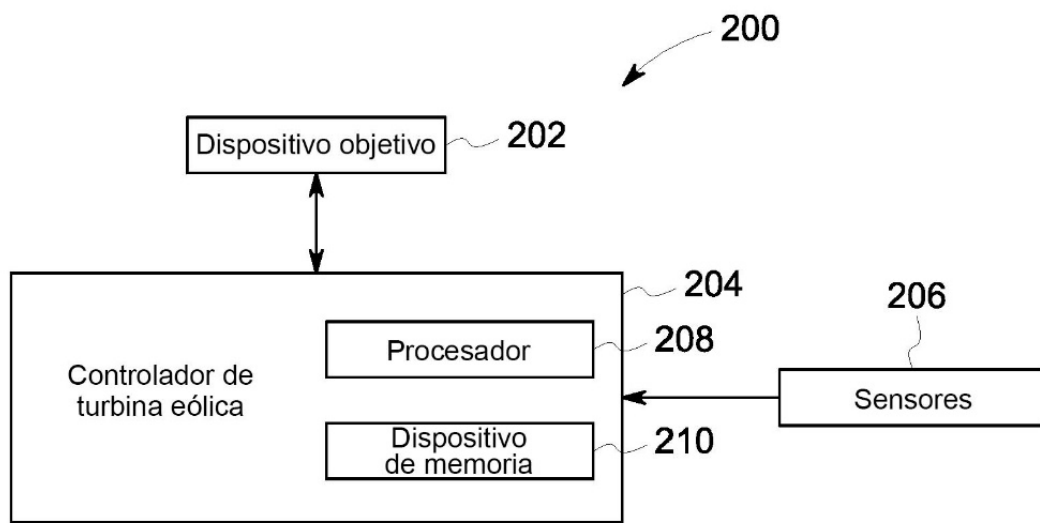


FIG. 2

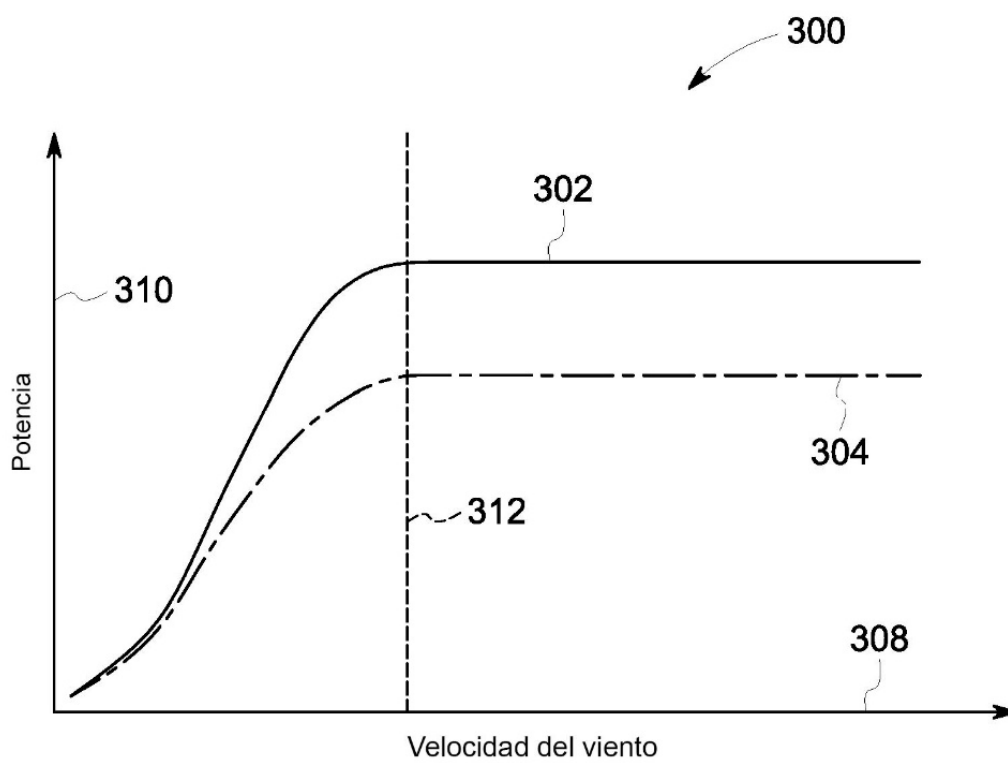


FIG. 3

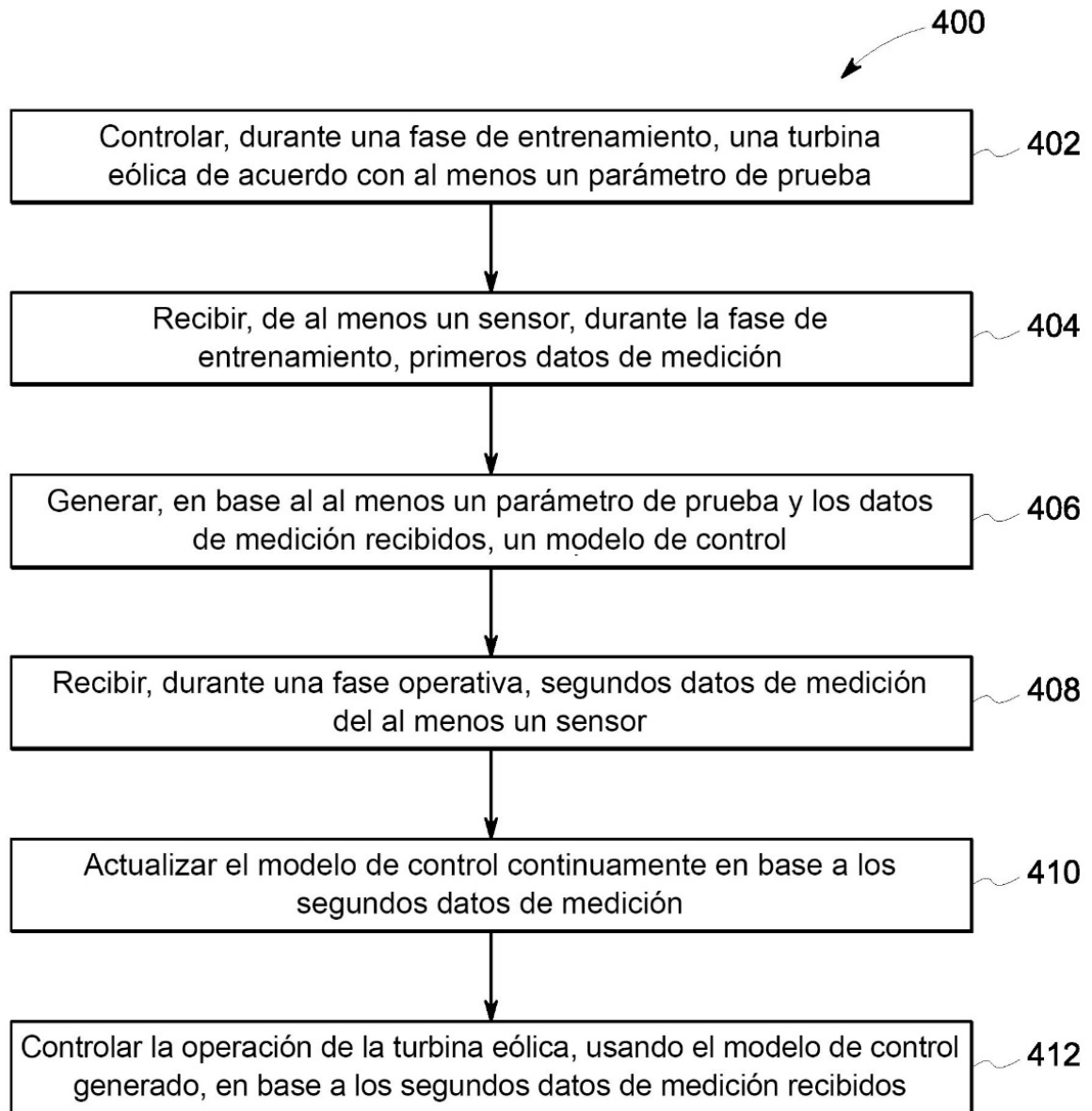


FIG. 4