

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 900 001**

51 Int. Cl.:

G01W 1/10

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.05.2016 PCT/US2016/033233**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.11.2016 WO16187405**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.05.2016 E 16797288 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.09.2021 EP 3298521**

54 Título: **Sistemas y métodos para predecir la llegada de un evento de viento**

30 Prioridad:

19.05.2015 US 201514715869

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

15.03.2022

73 Titular/es:

**OPHIR CORPORATION (100.0%)
10184 West Belleview Avenue, Suite 200
Littleton, CO 80127, US**

72 Inventor/es:

**O'BRIEN, MARTIN;
CALDWELL, LOREN, M.;
ACOTT, PHILLIP, E. y
SPAETH, LISA**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 900 001 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 métodos para predecir la llegada de un evento de viento

Antecedentes

5 El radar láser (lidar) se ha utilizado en aviones militares y comerciales para medir los peligros del viento y proporcionar datos ópticos del aire. Lidar es una tecnología óptica de detección remota que mide las propiedades de la luz dispersa para encontrar el alcance y/u otra información de un objetivo distante. El alcance hasta un objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la transmisión de un pulso láser y la detección de la señal reflejada.

10 Las aeronaves y las turbinas eólicas (o generadores de turbinas eólicas) operan dentro de campos de flujo complejos y próximos y tienen una clara necesidad de detección, clasificación, medición, advertencia y/o mitigación avanzadas de los peligros del viento. Los campos de flujo pueden variar de muy laminar a muy turbulento, dependiendo del clima local, de la hora del día, de la humedad, de la temperatura, del lapso de tiempo, de la ubicación de la turbina, del terreno local, etc. Los peligros del viento aplicables a las turbinas eólicas incluyen ráfagas, alta velocidad del viento, cizalladura del viento vertical y horizontal, chorros nocturnos de bajo nivel, actividad convectiva, microrráfagas, flujos complejos inducidos por el terreno, inestabilidades de Kelvin Helmholtz, turbulencias y otros eventos similares.

15 Las turbinas eólicas pueden girar alrededor de un eje horizontal o vertical, y las turbinas de eje horizontal son mucho más comunes. Las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) tienen un árbol de rotor y un generador eléctrico normalmente ubicado en la parte superior de una torre, y el árbol del rotor suele estar paralelo al viento durante el uso. Las HAWT logran una alta eficiencia, ya que sus palas se mueven sustancialmente perpendiculares al viento. Dado que la torre que soporta la turbina produce turbulencias detrás de la misma, las palas de la turbina generalmente se colocan a barlovento de la torre.

20 La figura 1 es un diagrama simplificado de una turbina eólica 100 de eje horizontal. Las HAWT pueden incluir una, dos, tres o más palas giratorias 102 simétricas, cada una de las cuales tiene un eje de pala aproximadamente perpendicular al eje de rotación horizontal 104. Las palas de la turbina son generalmente rígidas para evitar que las palas sean empujadas hacia la torre por los fuertes vientos. Los fuertes vientos pueden hacer que las palas se doblen. 25 La alta velocidad del viento, las ráfagas y las turbulencias pueden provocar fallos por fatiga de las turbinas eólicas. El control del cabeceo de las palas es una característica de casi todas las turbinas eólicas modernas grandes de eje horizontal para permitir el ajuste de la carga de las palas de la turbina eólica, la velocidad de rotación del árbol del generador y la energía generada, así como la protección contra daños durante condiciones de viento fuerte. Mientras está en funcionamiento, un sistema de control para una turbina eólica ajusta el cabeceo de la pala girando cada pala sobre el eje de la pala. Además, las turbinas eólicas normalmente requieren un mecanismo de control de guiñada para 30 girar el eje de rotación de la turbina eólica, las palas y la góndola hacia el viento. Al minimizar un ángulo de guiñada que es la desalineación entre el viento y la dirección de la punta de la turbina, se maximiza la salida de potencia y se minimizan las cargas no simétricas.

35 El documento US 2012/0 179376 A1 divulga un método para proporcionar datos de clasificación y códigos basados en campos de viento de rango resuelto, incluyendo la gravedad, el tiempo de llegada y las características espaciales de las ráfagas, que comprende: realizar mediciones lidar en una región para producir datos de viento de largo alcance, estimar los campos de viento de propagación, en base a los vientos medidos en otras partes del campo de viento, sin el uso de sistemas lidar adicionales para las mediciones del viento, estimando el tiempo de llegada y la severidad de la ráfaga o evento turbulento, sobre el cual se puede actuar mediante un algoritmo de control del WTG.

40 Compendio

Esta divulgación avanza en la técnica al proporcionar un método rentable para, en ciertas realizaciones, medir datos de flujo de viento de largo alcance usando un solo lidar montado en un generador de turbina eólica y calcular campos de flujo de viento cerca de un plano de rotor de un generador de turbina eólica usando un sistema informático con un procesador. En una realización, el método genera datos de viento con resolución de rango en tiempo real para cada 45 pala del generador de turbina eólica, y también proporciona datos y códigos de clasificación a un sistema de control acoplado al generador de turbina eólica. En una implementación, los métodos y el sistema permiten que el generador de turbina eólica proporcione control de cabeceo de las palas y un alivio efectivo de ráfagas, para reducir la fatiga estructural y el daño, y mejorar la fiabilidad del generador de turbina eólica y mejorar la eficiencia de captura de energía para el generador de turbina eólica. En otra implementación, los métodos y sistemas permiten a una aeronave corregir 50 un evento de viento que se aproxima para reducir el efecto del evento de viento en la aeronave. Tales correcciones pueden incluir alivio de ráfagas, mitigación de turbulencias dinámicas, mitigación de cizallamiento horizontal y vertical y mayor comodidad de conducción.

En una realización, se proporciona un método para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica de acuerdo con la reivindicación 1.

55 En una realización, se proporciona un sistema para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica de acuerdo con la reivindicación 10.

En un ejemplo que no pertenece a la invención reivindicada, un aparato aeromecánico con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento incluye un lidar para detectar la velocidad del viento en un volumen atmosférico que se mueve hacia el aparato aeromecánico para obtener una serie temporal de mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente, y una unidad de predicción del viento para predecir la llegada del evento de viento al aparato aeromecánico en base a la serie temporales de mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente. El aparato aeromecánico incluye además al menos un accionador para mover al menos parte del aparato aeromecánico con relación al volumen atmosférico, y un módulo de control para controlar el accionador en base a dicha llegada de predicción del evento de viento.

Breve descripción de los dibujos

Se describen realizaciones ilustrativas de la presente invención en detalle a continuación con referencia a los dibujos adjuntos.

La figura 1 es un diagrama simplificado de un generador de turbina eólica de eje horizontal.

La figura 2 es un diagrama que ilustra la distribución del viento medida por lidar con resolución de rango cerca de un generador de turbina eólica en una realización en la que el lidar está montado en el buje de la turbina, a la altura del rotor.

La figura 3 es un diagrama que ilustra la monitorización del viento específica de la pala para previsualizar las mediciones del viento en una realización.

La figura 4 es un diagrama simplificado de un sistema que incluye un generador de turbina eólica, un sensor y un sistema de control en una realización.

La figura 5 es un diagrama de flujo para ilustrar las etapas para generar datos de viento con resolución de intervalo.

La figura 6 es un diagrama de flujo para ilustrar las etapas para proporcionar datos de clasificación y código a un sistema de control acoplado a un generador de turbina eólica.

La figura 7 ilustra un sistema para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica, de acuerdo con una realización.

La figura 8 ilustra un método para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica, de acuerdo con una realización.

Las figuras 9A y 9B ilustran un escenario, en el que un lidar mide las velocidades del viento para un volumen atmosférico que generalmente se mueve hacia una turbina eólica, de acuerdo con una realización.

La figura 10 ilustra un escenario, en el que un lidar mide las velocidades del viento para un volumen atmosférico que generalmente se mueve hacia una aeronave, de acuerdo con una realización.

Las figuras 11A-D ilustran geometrías de superficies de exploración de ejemplo que pueden ser utilizadas por un lidar para realizar mediciones de acuerdo con el método de la figura 8.

La figura 12 ilustra un método para determinar una evolución en el tiempo de un mapa de viento volumétrico completo para un volumen atmosférico que generalmente se mueve hacia una estructura aeromecánica para predecir la llegada de un evento de viento a la estructura aeromecánica, de acuerdo con una realización.

La figura 13 muestra un evento de viento local de ejemplo que se propaga en un volumen atmosférico hacia una superficie geométrica.

Las figuras 14A-14C muestran mediciones de ejemplo de la velocidad del viento a través de una superficie cónica.

Las figuras 15A-15C muestran una evolución temporal de ejemplo de un campo de viento volumétrico completo obtenido a partir de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento mostradas en las figuras 14A-C.

La figura 16 muestra la ubicación de llegada estimada de un evento de viento basado en la evolución en el tiempo del campo de viento volumétrico completo mostrado en las figuras 15A-C.

Las figuras 17A-17B muestra un mapa de campo de viento futuro de ejemplo, según se determina de acuerdo con una realización del método de la figura 12, y un mapa de campo de viento futuro simulado correspondiente.

La figura 18 ilustra un método para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica, que utiliza mapas de superficie de parámetros de viento, de acuerdo con una realización.

La figura 19 muestra un corte de ejemplo de una superficie cónica en una pluralidad de sectores, como se utiliza en una realización del método de la figura 18.

Las figuras 20A-20C representan esquemáticamente mapas de superficie de parámetros de viento de ejemplo.

La figura 21 muestra la llegada estimada de un evento de viento en base a los mapas de superficie de parámetros de viento de las figuras 20A-C, de acuerdo con una realización.

5 La figura 22 ilustra un ordenador que implementa una unidad de predicción del viento del sistema de la figura 7, de acuerdo con una realización.

La figura 23 ilustra un aparato aeromecánico con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento, de acuerdo con una realización.

La figura 24 ilustra un método para ajustar el funcionamiento de una estructura aeromecánica basado en la predicción de la llegada de un evento de viento a la estructura aeromecánica, de acuerdo con una realización.

10 La figura 25 ilustra una turbina eólica con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento, de acuerdo con una realización.

La figura 26 ilustra una aeronave con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento, de acuerdo con una realización.

15 La figura 27 ilustra otra turbina eólica con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento, de acuerdo con una realización.

La figura 28 ilustra otra aeronave con control de respuesta basado en predicciones a un evento de viento, de acuerdo con una realización.

Descripción detallada

20 La presente divulgación puede entenderse por referencia a la siguiente descripción detallada, tomada junto con los dibujos que se describen a continuación. Se observa que, con el propósito de una claridad ilustrativa, ciertos elementos de los dibujos pueden no estar dibujados a escala. Los números de referencia de los elementos que aparecen varias veces pueden omitirse para mayor claridad. Si es posible, se usan los mismos números de referencia en todos los dibujos y la siguiente descripción para referirse a las mismas partes o similares.

25 Un aparato de monitorización de amenazas de viento eficaz debe proporcionar datos precisos del viento a escalas espaciales suficientemente finas y escalas temporales lo suficientemente rápidas para determinar el tipo y la gravedad de la amenaza del viento. Un algoritmo de control del cabeceo de las palas necesita datos de viento de corto alcance que estén como máximo a unos pocos segundos del generador de turbina eólica. Además, para un control óptimo, el generador de turbina eólica necesita información sobre el viento en toda el área de barrido del rotor o pala del generador de turbina eólica. Estas regiones no se pueden monitorizar con un solo radar láser de orientación fija. Las mediciones con múltiples lidars serían muy caras.

30 Se describen métodos para medir vientos más lejos del generador de turbina eólica y estimar los vientos que vienen en un plano de rotor donde se encuentran una, dos, tres o más palas giratorias, con un tiempo de vista previa. Esta estimación se basa en mediciones del viento a distancias más largas, que incluyen, por ejemplo, la cizalladura horizontal y vertical, la estructura espacial del campo de viento y sus características temporales. Más específicamente, en ciertas realizaciones, los métodos y sistemas aquí descritos incluyen (1) monitorizar las condiciones y peligros del viento que se aproxima con suficiente velocidad y resolución espacial; (2) lograr un diseño de sistema de radar láser robusto y rentable; (3) proporcionar análisis de datos y productos de datos para ser utilizados por los sistemas de control de turbinas eólicas que pueden incluir tanto componentes de hardware como software para el alivio de ráfagas y control del cabeceo de la pala y control de guiñada, (4) determinar la severidad de los eventos de viento, incluyendo la cizalladura horizontal, la cizalladura vertical, las ráfagas, el flujo turbulento, los chorros de bajo nivel y las inestabilidades de Kelvin Helmholtz; (5) clasificar el campo de flujo entrante para permitir que los sistemas de control del generador de turbina eólica reaccionen adecuadamente, de manera oportuna, al campo de flujo entrante; (6) calcular productos de datos a partir del campo de flujo medido por Lidar; y (7) proporcionar tales análisis de datos y productos a velocidades suficientes, y en ubicaciones espaciales apropiadas, para el alivio efectivo de las ráfagas y el control del cabeceo de las palas y el control de la guiñada para reducir la fatiga estructural y los daños, mejorar la fiabilidad y mejorar la eficiencia de captura de energía para los generadores de turbina eólica modernos.

35 La figura 2 es un diagrama que ilustra la distribución del viento medida por lidar con resolución de rango cerca de un generador de turbina eólica 206 en una realización. El generador de turbina eólica 206 tiene una, dos, tres o más palas giratorias 214 en un plano de rotor 204. La distribución natural del viento señalada por las flechas 210 se detecta en función de la posición o rango de la turbina. La longitud del contenedor de rango lidar 208 proporciona la resolución espacial de un radar láser para mediciones de flujo de viento. El viento natural típicamente tiene un gradiente de velocidad o una cizalladura vertical sobre el suelo. La variación de la velocidad vertical puede proporcionarse para el ajuste de la altitud de cada pala a medida que gira de baja a alta altitud y de regreso a baja altitud. El plano de notificación de la medición del viento 212 está definido por una distancia de vista previa 220 desde el plano del rotor 204.

Se calcula un tiempo de vista previa basándose en la distancia de vista previa 220 y en la velocidad del viento local cerca del plano del rotor 204 para la región espacial ligeramente por delante de la posición de la pala (ver la región 304 en la figura 3). El tiempo de vista previa varía según el tipo de turbina, la ubicación y las condiciones del viento local. El tiempo de vista previa se puede ajustar para varias dimensiones de turbinas, tipos de turbinas, dinámica del viento o del aire, régimen operativo de las turbinas, etc.

En general, las mediciones del viento tomadas a una distancia mayor del plano del rotor 204, también denominado "largo alcance", se utilizan principalmente para la evaluación del campo de viento - monitorización de la severidad de la turbulencia, mediciones de cizalladura, etc. Estos rangos suelen ser mayores que la distancia de medición del viento a proporcionar al sistema de control para el generador de turbina eólica 206. Aunque solo una pequeña fracción del campo de viento interactúa con las palas, la góndola y la torre y, por lo tanto, se acopla directamente al generador de turbina eólica (WTG), se puede extraer información útil de todo un campo volumétrico de interés.

Con referencia a la figura 2 nuevamente, la región volumétrica 222 está rodeada por las líneas 202A, 202B, una porción izquierda de la línea 202C, 202D y una porción izquierda de la línea 202E, y está a una distancia del plano del rotor 204. La región 222 también se denomina "región de largo alcance". Las mediciones lidar se realizan en la región 222 para producir datos de viento de largo alcance. Los datos en estos rangos largos brindan información importante sobre ráfagas, cizalladura y otros peligros y brindan advertencias importantes y avanzadas de ráfagas y condiciones turbulentas.

Además, la región 224 está rodeada por las líneas 202A, 202B, una porción derecha de la línea 202C y una porción derecha de la línea 202E y el plano del rotor 204 y también se denomina "región de corto alcance". Los datos del viento en la región de corto alcance 224 contienen una vista previa de los vientos que se aproximan y son útiles para el control de prealimentación del WTG. Los datos del viento en la región de corto alcance 224 son importantes para los sistemas de control de cabeceo y guiñada de las palas. La región de corto alcance 224 está lo suficientemente cerca del generador de turbina eólica 206 para permitir que el sistema de control tenga una capacidad de "avance". Esta capacidad de avance está directamente relacionada con el tiempo de vista previa. La región de largo alcance 222 y la región de corto alcance 224 pueden variar con la velocidad media del viento. Por ejemplo, las definiciones de "largo alcance" y "corto alcance" aumentan en distancia cuando aumenta la velocidad media del viento. La distancia de vista previa 220 está determinada principalmente por el hardware del WTG y los algoritmos de control, pero se puede ajustar debido a las condiciones del campo de viento local y a la severidad de las ráfagas que se aproximan.

Se puede montar un radar láser (no mostrado) en varios lugares cerca de la turbina, tal como la góndola, el buje o la torre. Sin embargo, el sistema lidar solo puede medir los vientos en la línea de visión a lo largo del rayo láser en cada ubicación de montaje. Es cada vez más difícil medir los vientos que se acercan en ángulo recto a través del rayo láser, lo que da como resultado una zona muerta (por ejemplo, la región de corto alcance 224), es decir, una región donde un sistema lidar de escaneado no mide el campo de viento local de manera efectiva. Más específicamente, en la región de largo alcance 222, un solo sistema lidar puede medir eficazmente el campo de viento, mientras que el sistema lidar único no puede medir eficazmente el campo de viento en la región de corto alcance 224. Por lo tanto, los campos de viento que se propagan se estiman, basándose en los vientos medidos en otras partes del campo de viento, sin el uso de sistemas lidar adicionales para las mediciones del viento. La región de corto alcance 224 también se etiqueta como "Volumen computacional del viento" en la figura 2. Esta estimación del campo de viento en la región de corto alcance 224 se logra basándose en la medición de los campos de viento en la región de largo alcance 222, también etiquetada como "Volumen de medición lidar". El método de estimación se basa en varias mediciones en la región de largo alcance 222, tales como cizalladura horizontal y vertical, estructura espacial del campo de viento y sus características temporales.

El tiempo de llegada y la gravedad de la ráfaga o evento turbulento se estiman a partir de las mediciones de la velocidad del viento en la región de largo alcance 222. Tales estimaciones se vuelven más precisas a medida que el evento de viento se acerca al plano del rotor 204. Además, los vientos estimados cerca de cada pala 214 proporcionan datos de viento específicos de la pala, que se pueden utilizar junto con los algoritmos de control del WTG para evitar daños a los componentes del WTG, para reducir las cargas a los componentes del WTG, para reducir el desgaste y la fatiga de los componentes del WTG y optimizar la potencia eléctrica neta generada por el WTG. Es útil proporcionar datos de velocidad del viento en tiempo real específicos para cada pala 214 para aliviar las ráfagas y controlar el cabeceo de las palas. También es útil para proporcionar datos de viento de prealimentación y vista previa a los algoritmos de control del WTG. Los datos del viento proporcionan mediciones del vector de velocidad del viento, incluyendo la velocidad y la dirección, y el tiempo de llegada asociado cuando se puede esperar que un evento de viento impacte una pala. Por ejemplo, los datos del viento proporcionan la velocidad del viento en un momento de impacto específico, tal como el tiempo de vista previa asociado con el algoritmo de control de prealimentación. Se proporcionan perfiles de viento con resolución de rango en cada posición de escaneado para mejorar la resolución espacial del campo de viento medido y aumentar la velocidad temporal de la tasa de actualización de datos. El campo de viento o los datos en la región de largo alcance 222 se utilizan para cuantificar la severidad de las ráfagas, cizalladura y turbulencia y para proporcionar estimaciones precisas del campo de viento en la región de corto alcance 224, que es una parte del campo de viento sobre la que se puede actuar mediante los algoritmos de control del WTG.

En una realización, los campos de viento específicos de la pala pueden calcularse basándose en los datos de viento medidos en la región de largo alcance 222, lo que puede reducir el coste de usar múltiples radares láser para proporcionar datos de viento específicos de la pala.

En una realización alternativa, se pueden aplicar vectores de escala de perfil de viento para informar de los datos de viento resueltos en rango para reducir el volumen de datos transferidos al algoritmo de control del WTG. Por ejemplo, se puede aplicar un factor de escala del diámetro del rotor a los datos del viento con resolución de rango para calcular el impacto de una parcela de viento específica en una ubicación específica de la pala 214. La eficiencia de recogida aerodinámica de cada pala y los tipos específicos de la pala, a lo largo del diámetro de la pala, pueden aplicarse a los datos de viento con resolución de rango. Tanto la carga de la pala como el impacto del par del rotor se pueden calcular utilizando tales vectores de escala.

La figura 3 es un diagrama que ilustra la monitorización del viento específica de la pala para previsualizar las mediciones del viento en una realización. La figura 3 muestra una rotación anticipada del rotor en un tiempo de vista previa. Un ángulo de vista previa es un ángulo entre la posición de cada pala 214 o rotor en el momento t y la posición anticipada en un momento $t + t_{\text{vista previa}}$, como se ilustra en la figura 3. Una tasa de rotación de la pala determina la posición de la pala al final de la duración de la prealimentación, o el tiempo de vista previa. El tiempo de vista previa se calcula basándose en la distancia de vista previa 220 y la velocidad del viento local en la región espacial 304 por delante de la posición de cada pala 214. Las áreas de medición del viento 304 para cada pala son las áreas a las que girarán las palas 214 en una dirección apuntada por la flecha 306. Las áreas de medición del viento 304 para cada pala 214 son una parte de la región de corto alcance 224 como se ilustra en la figura 2. Para mayor claridad, la región de largo alcance 222 no se muestra en la figura 3.

El generador de turbina eólica (WTG) 206 no reacciona a todas las escalas espaciales y temporales por igual. Por ejemplo, los campos de viento a gran escala espacial son mucho más grandes que el diámetro del rotor o el diámetro de la pala y pueden parecer laminares al WTG 206 y acoplarse eficientemente al WTG 206. Por otro lado, los campos de viento a pequeña escala espacial son mucho más pequeños que el diámetro del rotor y no son lo suficientemente energéticos como para afectar significativamente las palas o la torre del WTG. Del mismo modo, las grandes escalas temporales aparecen como condiciones de viento que varían lentamente, de modo que los campos de viento temporal a largo plazo se pueden gestionar eficazmente con algoritmos de control del WTG. Sin embargo, escalas temporales que varían muy rápidamente no se acoplan energéticamente al WTG 206. Por lo tanto, el impacto de los campos de viento en una turbina eólica depende de las escalas espaciales y temporales de los campos de viento, el tipo y el tamaño de la turbina, el tipo y el tamaño del rotor y la velocidad del viento local. El rango de medición lidar, el tiempo de vista previa y el ángulo de vista previa son fundamentales para el rendimiento del WTG 206. Dichos valores deben determinarse dependiendo, entre otros, del tamaño de los rotores de la turbina, las condiciones locales del viento, las velocidades del viento que se encuentran actualmente, los niveles de turbulencia y cizallamiento locales y las velocidades de cabeceo de las palas deseadas para reducir el desgaste y la fatiga de los componentes de accionamiento del cabeceo de las palas.

El WTG 206 incluye tres regímenes operativos. Un primer régimen es para velocidades del viento por debajo de una velocidad mínima del viento. Un segundo régimen es para velocidades del viento por encima de la velocidad mínima, pero por debajo de un umbral para la generación de energía. Un tercer régimen es para velocidades del viento iguales o superiores al umbral para la generación de energía, pero por debajo de una velocidad del viento operativa máxima segura. El WTG 206 puede procesar los datos de viento con resolución de rango de manera diferente, dependiendo de los tres regímenes operativos del WTG 20.

En una realización específica, el sensor 308 está montado en un buje de la turbina (no mostrado). Un eje óptico de medición es colineal con el árbol de la turbina 230 (ver la figura 2) de manera que la coordenada de medición del viento esté alineada con los vectores del viento que tienen el mayor impacto en las palas 214. Los escaneados cónicos de ángulo único, cónicos de múltiples ángulos y en roseta se pueden generar de manera económica para proporcionar mediciones de viento con resolución de rango con resolución espacial pequeña mediante el uso de hardware robusto y rentable.

En una realización alternativa, la ubicación de montaje del radar láser puede variar, tal como el montaje de la góndola, el montaje de la torre de la turbina y el montaje en el suelo. El sistema lidar puede proporcionar simultáneamente mediciones de la velocidad del viento, la temperatura y la presión, tal como el lidar de Rayleigh/Mie. Dicho sistema lidar puede proporcionar perfiles de viento, temperatura y presión con resolución de rango. Dichos sistemas lidar también pueden proporcionar información local sobre el número de Richardson y/o el número de Reynolds.

La figura 4 es un diagrama de sistema simplificado en una realización. El sistema 400 incluye un generador de turbina eólica 206, que tiene engranajes y motores de control de guiñada o un accionador de ángulo de guiñada 412 y un accionador de cabeceo de la pala 410. El sistema 400 también incluye un sensor 308 para monitorizar el campo de viento 408 cerca del generador de turbina eólica 206. El sistema 400 incluye además un sistema de control 404 para controlar el accionador de cabeceo de la pala 410 y los engranajes y motores de control de guiñada 412, entre otras funciones. El sistema 400 también incluye un sistema informático 418 con un procesador 414 para analizar los datos de viento desde el sensor 308 con un algoritmo 416. El sistema informático con procesador 414 proporciona datos de viento con resolución de rango, que incluyen datos de viento o campos de viento en la región de corto alcance 224 y

la región de largo alcance 222 de la figura 2, así como datos de viento o campos de viento específicos de la pala, al sistema de control 404.

El sensor 308 puede ser un lidar capaz de proporcionar varias mediciones, incluyendo mediciones de velocidad del viento, mediciones de temperatura y/o mediciones de presión. El sensor 308 está acoplado al procesador 414 que está acoplado al sistema de control 404.

El sistema de control 404 está acoplado operativamente al generador de turbina eólica 206 para control de guiñada, control de cabeceo de las palas y alivio de ráfagas en base al análisis de datos realizado en el procesador 414 usando los datos de viento medidos con el sensor 308, tal como un lidar. El sistema de control 404 también está acoplado a los engranajes y motores de control de guiñada 412. El sistema de control 404 también puede acoplarse a otros sensores de entrada (no mostrados) para recibir información sobre el par de control de retroalimentación, la tensión de la torre, la velocidad del rotor del generador eléctrico y la carga del generador eléctrico. El sistema de control 404 puede incluir control de retroalimentación o de prealimentación de la carga, la velocidad del rotor y la generación de energía eléctrica del generador de turbina eólica 206. En este documento, el control de "prealimentación" se refiere al control realizado antes de que ocurra un evento en anticipación del evento, en contraposición al control realizado después del inicio del evento en reacción al evento.

El sensor 308 debe ser capaz de monitorizar todo un campo de interés, que al menos incluye un volumen espacial cilíndrico definido por el área barrida por los rotores o palas 214 en una longitud contra el viento de la turbina, tal como la región de largo alcance 222 en la figura 2, suficiente para la detección y el alivio de ráfagas. Los campos de viento en el volumen espacial deben monitorizarse con suficiente resolución espacial para monitorizar los eventos de campo de viento de escala moderada. La resolución espacial debe ser igual o menor que aproximadamente un tercio del diámetro del rotor. Preferentemente, la resolución espacial es una décima parte (o menor) del diámetro del rotor.

El sensor 308 también debe ser capaz de monitorizar todo el campo volumétrico con una frecuencia de muestreo suficientemente alta para capturar los campos de viento que se acoplan de manera eficiente al WTG. Para reducir el consumo de energía, el volumen, el coste, el desgaste y la fatiga de los accionadores de cabeceo de las palas 410 y los engranajes y motores de control de guiñada 412, el tiempo de reacción para el sistema de control 404 se limita típicamente al orden de aproximadamente 1 segundo. Por lo tanto, un tiempo de respuesta mínimo para el sensor es de aproximadamente un tercio de segundo, lo que proporciona una tasa de actualización de datos de al menos 3 Hz. Se prefieren velocidades de actualización más rápidas, especialmente durante eventos de ráfagas energéticas. Si el sensor o lidar 308 falla, el WTG 206 no falla, pero perderá la capacidad de "avance". El sistema de control 404 puede funcionar entonces en un modo de capacidad reducida que no produce la máxima eficiencia para la generación de energía o se acerca a niveles de carga de la pala más altos.

Es posible que el WTG 206 necesite estabilizar las palas para ráfagas importantes. Sin embargo, la velocidad máxima de cabeceo la establece el hardware de cabeceo de la pala. Para aumentar la fiabilidad y reducir la fatiga, el WTG 206 prefiere utilizar velocidades de cabeceo de pala más lentas.

Es deseable combinar las mediciones y técnicas de viento disponibles para proporcionar las evaluaciones del campo de viento y las predicciones del momento de llegada más precisas. Más específicamente, los datos de viento de rango resuelto pueden obtenerse combinando datos de viento medidos en la región de largo alcance 222 para evaluaciones de campo eólico y datos de viento calculados en la región de corto alcance 224 cerca del plano del rotor 204, así como datos de viento específicos de pala calculados o medidos. Los datos de viento con resolución de alcance en la región de corto alcance 224 pueden ser utilizados por algoritmos para el alivio de ráfagas y el control del cabeceo de las palas y el control de la guiñada.

Además, se pueden utilizar diferentes técnicas de procesamiento espacial y temporal. Dado que los datos del viento se recopilan a largo plazo en tiempo real, la suposición de "turbulencia congelada" de Taylor se puede utilizar para cubrir aquellas regiones espaciales que no se miden directamente por el patrón de escaneado lidar, tal como la región de corto alcance. Además, se pueden calcular términos temporales y espaciales de orden superior para cuantificar con mayor precisión las perturbaciones del campo de flujo, tal como cizalladura, turbulencia y ráfagas, especialmente cerca del plano del rotor.

De acuerdo con las realizaciones de la presente divulgación, se proporcionan sistemas y métodos para monitorizar, clasificar, evaluar y detectar las condiciones y los peligros del viento inminente para las turbinas eólicas modernas. Los métodos incluyen monitorizar el campo de flujo que se aproxima con suficiente velocidad y resolución espacial para el alivio de las ráfagas y el control del cabeceo de las palas y el control de la orientación de las turbinas eólicas modernas. Los métodos también incluyen realizar análisis de datos a velocidades suficientes y en ubicaciones espaciales apropiadas.

La figura 5 es un diagrama de flujo 500 que ilustra las etapas para generar datos de viento con resolución de rango cerca de un generador de turbina eólica. El método 500 comienza con la medición de datos del viento en la región de largo alcance 222 medidos con un radar láser 308 montado en, o cerca, del generador de turbina eólica 206 en la etapa 502. La región de largo alcance está a una distancia de un plano de rotor del generador de turbina eólica. El método 500 incluye estimar el tiempo de vista previa en la etapa 504. El método 500 también incluye la etapa 506 de

calcular los campos de viento en la región de corto alcance 224 más cerca del plano del rotor del generador de turbina eólica 206 en base a los datos de viento medidos en la región de largo alcance 222. El método 500 también incluye la etapa 508 de calcular el campo de viento específico de la pala en base a los datos de viento medidos en la región de largo alcance 222. El método también incluye la etapa 510 de evaluar la gravedad de los eventos de viento con métricas de campo de viento. El método 500 incluye además la etapa 512 de generar los datos de viento con resolución de rango.

La figura 6 es un diagrama de flujo 600 para ilustrar las etapas para proporcionar datos de clasificación y código a un sistema de control acoplado a un generador de turbina eólica. El método 600 comienza con la recepción de datos de viento con resolución de alcance en la etapa 602 en un sistema informático con un procesador 414. El método 600 incluye estimar el tiempo de vista previa en la etapa 604. El método 600 también incluye la etapa 606 de evaluar la gravedad de los eventos de viento con métricas de campo de viento. El método 600 incluye además la etapa 608 de generar los datos de viento con resolución de rango. El método también incluye clasificar el campo de viento que se aproxima para proporcionar datos y códigos de clasificación a un sistema de control en la etapa 610. El método también puede incluir datos de rendimiento de lidar al sistema de control en la etapa 612.

El sistema de control 404 usa los datos del viento en la región de corto alcance 224 para ajustar el control de cabeceo y guiñada de las palas al generador de turbina eólica 206 en la etapa 506. El procesador 414 también evalúa la gravedad de los eventos de viento con métricas de campo de viento para proporcionar las métricas al sistema de control 404 en la etapa 508. El procesador 414 clasifica además el campo de flujo entrante para proporcionar códigos y datos de clasificación al sistema de control 404 en la etapa 510 y proporcionar datos de rendimiento de lidar al sistema de control en la etapa 512.

Se pueden usar numerosos métodos de escaneado para monitorizar y/o evaluar todo el campo volumétrico de interés o subconjuntos de todo el campo volumétrico de interés. Los métodos de escaneado incluyen exploraciones de azimut y/o escaneados de elevación, y/o una combinación de escaneados de azimut y elevación de escáneres de patrones de trama. Además, las exploraciones cónicas incluyen un ángulo cónico singular o múltiples ángulos cónicos, y exploraciones en roseta realizadas por escáneres de prisma Risely. Otros sistemas de escaneado que se pueden utilizar incluyen, escáneres de máquina microoptoeléctrica (MEM) y sistemas de escaneado que incorporan elementos ópticos holográficos (HOE), elementos ópticos difractivos (DOE) y prismas de cuña, etc.

Los datos del viento pueden informarse en numerosos sistemas de coordenadas, lo que permite diferentes algoritmos de control del WTG o sistemas de informes de datos para abordar diferentes problemas operativos. Los sistemas de coordenadas pueden ser un sistema centrado en la Tierra basado en coordenadas geoespaciales locales, o un sistema centrado en la turbina basado en una referencia ubicada en la turbina, es decir, en la intersección del árbol del rotor de la turbina y el plano del rotor. Se pueden utilizar numerosos métodos y métricas para detectar, monitorizar y evaluar el campo de viento.

Los productos de datos de campos eólicos incluyen métricas de campos eólicos, datos y códigos de clasificación y datos de rendimiento específicos de lidar. Utilizando las métricas del campo de viento, los campos de viento en la región de corto alcance 224 y los datos específicos de la pala se estiman usando datos de flujo de viento medidos en la región de largo alcance 222 de un solo lidar 308. Las métricas del campo de viento incluyen lo siguiente:

(1) Una velocidad de una parcela de viento, tal como un sector que se encontrará con una pala de turbina, y un tiempo de llegada asociado de la parcela de viento para impactar la pala,

(2) El perfil de velocidad del viento resuelto por rango, incluyendo una velocidad máxima del viento,

(3) Un primer momento de la medición de velocidad con resolución de rango (es decir, el viento promedio),

(4) Un segundo momento de la medición de velocidad con resolución de rango (es decir, la desviación estándar, o ancho espectral lidar, del perfil de viento medido),

(5) Una tasa de disipación de remolinos, calculada o estimada a partir de los parámetros del campo de viento,

(6) Una función de estructura de velocidad promedio $[(v(r+\Delta r) - v(r))^2]$, donde $v(r)$ es la velocidad del viento medida en el rango r , y Δr es la resolución espacial local, o una forma alternativa de la función de estructura de velocidad promedio $[(v(r+\Delta r) - v(r)) / \Delta r]^2$,

(7) Un gradiente de velocidad $Vv(r)$, o una magnitud del gradiente de velocidad $|\nabla v(r)|$ o $(\nabla v(r))^2$, y promedios de conjuntos de estas métricas basadas en gradientes,

(8) Métricas de estabilidad atmosférica basadas en perfiles de temperatura medidos, tal como el gradiente de temperatura $VT(r)$, donde $T(r)$ es el perfil de temperatura medido, o el número de Richardson, Ri ,

(9) Métricas del régimen de flujo atmosférico basadas en mediciones localizadas de velocidad, temperatura y presión, tal como el número de Reynolds, y

(10) Función de ponderación del rotor o vector $V(r)$ que compensa el impacto de la parcela de viento en la pala.

Las métricas del campo de viento pueden evaluarse en coordenadas centradas en la Tierra (x, y, z) o en coordenadas esféricas (ρ, θ, ϕ), coordenadas cilíndricas ($\phi, r, 1$) o en direcciones específicas de la pala (r, ϕ). Las métricas del campo de viento se pueden calcular para aquellas subsecciones del campo de viento que finalmente impactan las palas. Las métricas del campo de viento se pueden multiplicar o compensar con la función de pesaje del rotor. Por ejemplo, se pueden aplicar funciones o vectores de ponderación a los datos de viento con resolución de rango para calcular la carga efectiva de la pala y/o el par entregado a cada pala. En sistemas de coordenadas centrados en la Tierra, centrados en turbinas o específicos de palas, y en todas las porciones o subporciones del campo volumétrico de interés, las métricas del campo eólico pueden usarse para detectar, monitorizar y evaluar el campo eólico. Por ejemplo, estas métricas de campo de viento pueden modificarse para corregir el rendimiento del rotor dependiente del diámetro o para corregir el rendimiento del lidar, tal como el nivel de la señal lidar o la relación señal-ruido (SNR) del lidar. Las métricas del campo de viento se pueden utilizar para evaluar el tipo, la gravedad y el impacto del campo de viento. Dichas métricas de campo de viento proporcionan clasificaciones de campo de viento para ayudar al WTG 206 a seleccionar entre varios métodos y algoritmos de control.

Los datos y códigos de clasificación se pueden desarrollar y entregar al WTG para fines de control. Los datos y códigos de clasificación incluyen lo siguiente:

- (1) tipo y gravedad del campo de viento con resolución de rango, incluyendo datos de cizallamiento horizontal, vertical, de pala y de pala a pala,
- (2) carga y/o variabilidad en cada pala resultante del campo de viento específico de la pala,
- (3) el par del rotor y/o la variabilidad entregada por cada pala como resultado del campo de viento específico de la pala,
- (4) severidad, tiempo de llegada y características espaciales de las ráfagas,
- (5) características temporales del campo de viento con resolución de rango, tales como tiempos de llegada de ráfagas inminentes, peligros o variaciones de flujo, y
- (6) características espaciales del campo de viento con resolución de alcance, tal como la variabilidad del campo de viento en función de la dirección de guiñada o la posición de la pala.

Los productos de datos de campo de viento pueden incluir cualquiera de las métricas y datos/códigos de clasificación mencionados anteriormente. Además, se pueden incluir datos de rendimiento específicos de lidar.

Los datos de rendimiento específicos de lidar incluyen (1) validez de datos que incluye 0 y 1 para los datos que se determina que son inválidos y válidos respectivamente, (2) códigos de estado operativo del hardware y software de lidar, incluyendo los códigos de fallo de los resultados de la prueba incorporada, (3) códigos de mantenimiento de lidar, tal como ventana sucia o suministro de energía insuficiente, y (4) características de rendimiento de lidar, tal como intensidad de la señal o relación señal-ruido (SNR), degradación de la sensibilidad de lidar debido al clima tal como la nieve y la lluvia.

Los métodos y el sistema proporcionan una alternativa de bajo costo a los sistemas de medición del viento que tienen múltiples lidares. Los datos del viento en la región de largo alcance se pueden medir con un solo lidar. Los datos del viento en la región de corto alcance se pueden calcular en función de los datos del viento medidos en el largo alcance. Los datos de viento con resolución de rango, que incluyen los datos de viento tanto en la región de largo alcance como en la región de corto alcance, así como los datos de viento específicos de la pala, ayudan a los generadores de turbinas eólicas a realizar un alivio de ráfagas efectivo, control de cabeceo de la pala y control de guiñada para reducir la fatiga estructural y daños, para proteger las costosas turbinas de eventos de viento severos pero breves y rápidos y para mejorar la fiabilidad y la eficiencia de captura de energía.

La figura 7 ilustra un sistema 700 de ejemplo para predecir la llegada de un evento de viento 755 a una estructura aeromecánica 730. En este documento, una "estructura aeromecánica" se refiere a una estructura, cuya operación utiliza el aire circundante u otros gases, a través de un acoplamiento mecánico con la misma. Específicamente, la estructura aeromecánica 730 se acopla con un volumen atmosférico 750 que se mueve generalmente hacia la estructura aeromecánica 730. La estructura aeromecánica 730 es, por ejemplo, una turbina eólica o una aeronave. En el ejemplo de una turbina eólica, el volumen atmosférico 750 es un volumen de aire que generalmente se mueve hacia la turbina eólica. En el ejemplo de una aeronave, el volumen atmosférico 750 es el volumen de aire hacia el que se mueve la aeronave cuando la aeronave está en vuelo. Visto desde el marco de referencia de la aeronave, el volumen atmosférico 750 se mueve generalmente hacia la aeronave cuando la aeronave está en vuelo. Sin apartarse del alcance del mismo, el volumen atmosférico 750 también puede tener una velocidad con respecto al suelo, de manera que el volumen atmosférico 750 se acerque a la aeronave formando un ángulo con la dirección de desplazamiento de la aeronave.

El sistema 700 incluye una unidad de predicción del viento 710 que procesa una serie de tiempo 780 de un conjunto de mediciones de velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente del volumen atmosférico 750 para estimar la información de llegada 790 para el evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. Cada conjunto de mediciones de la velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente, es decir, cada punto temporal de la serie de tiempo 780, incluye una pluralidad de mediciones de la velocidad del viento en una pluralidad respectiva de ubicaciones espaciales diferentes en el volumen atmosférico 750. Cada conjunto de mediciones de velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente se mide en un momento diferente. Las mediciones del viento en la región 222 de largo alcance, como se describe en referencia a las figuras 2, 5 y 6, son un ejemplo de mediciones de la velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente. La unidad de predicción del viento 710 utiliza la serie de tiempo 780, a diferencia de un solo punto de tiempo, para obtener un historial de las velocidades del viento en el volumen atmosférico 750. A partir de este historial de velocidades del viento, la unidad de predicción del viento 710 se extrapola al tiempo futuro para predecir la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730. Dado que el sistema 700 utiliza el historial de velocidades del viento en el volumen atmosférico 750, el sistema 700 es capaz de tener en cuenta la dinámica compleja del campo de viento. Por ejemplo, el sistema 700 puede tener en cuenta que la velocidad del paquete, o la velocidad de fase, del evento de viento 755 es diferente de la velocidad del viento medida directamente dentro del evento de viento 755. Esto proporciona una predicción precisa de la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730.

Aunque se muestra en la figura 7 como que incluye tres conjuntos de mediciones de velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente, la serie de tiempo 780 puede incluir dos, cuatro o más conjuntos de mediciones de velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente. En el presente documento, "mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente" se refieren a mediciones de la velocidad del viento que están distribuidas espacialmente en un volumen tridimensional y que no están necesariamente confinadas a una línea recta o un plano.

La unidad de predicción del viento 710 incluye un módulo de identificación de eventos de viento 712 y un módulo de seguimiento 714. En determinadas realizaciones, la unidad de predicción del viento 710 también incluye un módulo de determinación de la gravedad 716. El módulo de identificación de eventos de viento 712 procesa la serie de tiempo 780 para determinar la presencia del evento de viento 755. En ciertas realizaciones, el módulo de identificación de eventos de viento 712 también determina el tipo de evento de viento 755. Por ejemplo, el módulo de identificación de eventos de viento 712 determina la presencia de un evento de viento 755 que es una cizalladura vertical, una cizalladura horizontal, un paquete cohesivo de estructura de viento ("turbulencia"), una ráfaga o una combinación de los mismos. Sin apartarse del alcance del mismo, el módulo de identificación de eventos de viento 712 puede identificar una pluralidad de eventos de viento 755 asociados con una pluralidad respectiva de información de llegada 790. El módulo de seguimiento 714 rastrea el evento de viento 755, basado en la serie de tiempo 780, para estimar la información de llegada 790 para el evento de viento 755. La información de llegada 790 puede incluir al menos una de las horas estimadas de llegada del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730 y el tipo de evento de viento 755. La información de llegada 790 puede incluir además una métrica de gravedad que indique la gravedad del impacto del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. En determinadas realizaciones, la información de llegada 790 incluye información espacial estimada, tal como la velocidad, la dirección, la extensión espacial y la estructura espacial para el evento de viento 755.

Se entiende que, para los eventos de viento 755 de duración prolongada, la hora de llegada puede referirse a un momento en el que una propiedad del evento de viento 755 llega a la estructura aeromecánica 730, de modo que el sistema 700, de forma continua o regular, proporciona predicciones actualizadas sobre el evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. Asimismo, el evento de viento 755 puede referirse al regreso a condiciones normales de viento después de un evento de viento que se desvía de las condiciones normales de viento.

En una realización, el sistema 700 incluye además un lidar 720 que genera series de tiempo 780. El lidar 720 está ubicado en la estructura aeromecánica 730, por ejemplo, en o sobre un aparato aeromecánico, o cerca de la estructura aeromecánica 730, de modo que el lidar 720 está en comunicación óptica con el volumen atmosférico 750. El lidar 720 se puede configurar para medir las velocidades del viento a lo largo de la línea de visión del rayo láser del lidar 720. El lidar 720 puede incluir una o más características descritas anteriormente con respecto al sensor 308. El rayo láser del lidar 720 tiene una dirección variable para obtener mediciones de la velocidad del viento 785 distribuidas espacialmente. En otra realización, el sistema 700 no incluye 720, pero está configurado para recibir series de tiempo 780 desde un tercer lidar que puede ser similar al lidar 720.

El sistema 700 puede predecir la llegada del evento de viento 755 varios segundos antes de la llegada del evento de viento 755. En un ejemplo, la estructura aeromecánica 730 es una turbina eólica, y el sistema 700 produce información de llegada 790 al menos de tres a cinco segundos antes de la llegada del evento de viento 755 a la turbina eólica. Esto permite ajustar el funcionamiento de la turbina eólica durante al menos tres a cinco segundos. Tal ajuste puede incluir cambiar el cabeceo de una o más palas de rotor de la turbina eólica. Los sistemas de medición del viento de la técnica anterior generalmente solo permiten aproximadamente un segundo para el ajuste del funcionamiento de la turbina eólica, lo que provoca una fatiga estructural significativa de las partes mecánicas de la turbina eólica. Por lo tanto, la industria de las turbinas eólicas prefiere la predicción de la llegada de eventos de viento al menos de tres a cinco segundos antes de la llegada real. El sistema 700 es capaz de predecir la hora de llegada del evento de viento 755 en el aparato aeromecánico, de tres a cinco segundos antes de la llegada real y con una precisión de aproximadamente 0,1 segundos o mejor. En el ejemplo de una turbina eólica, esto permite el ajuste de la turbina eólica

con una fatiga estructural mínima y un daño mínimo de las partes mecánicas de la turbina eólica, al tiempo que proporciona la precisión requerida para una eficiencia operativa óptima durante el evento de viento 755. En otro ejemplo, la estructura aeromecánica 730 es una aeronave y el sistema 700 está configurado para predecir la llegada del evento de viento 755 a la aeronave (incidencia de la aeronave en el evento de viento 755) antes del tiempo de incidencia para proporcionar tiempo para ajustar una o más superficies de control de la aeronave.

La figura 8 ilustra un método 800 de ejemplo para predecir la llegada de un evento de viento 755 a una estructura aeromecánica 730. El método 800 puede ser realizado por el sistema 700.

En una realización, el método 800 incluye una etapa 801 de usar un lidar, colocado en la estructura aeromecánica 730, para escanear repetidamente el volumen atmosférico 750 para obtener series de tiempo 780. El lidar obtiene mediciones en una pluralidad de posiciones a lo largo de la dirección de propagación general del volumen atmosférico 750, y en una pluralidad de posiciones en cada uno de al menos un plano perpendicular a la dirección de propagación general del volumen atmosférico 750. En un ejemplo de la etapa 801, el lidar 720 escanea repetidamente el volumen atmosférico 750 para obtener la serie temporal 780. En otra realización, el método 800 recibe la serie de tiempo 780, pero no incluye la etapa 801 de generar la serie de tiempo 780.

La etapa 801 puede utilizar uno o más de una variedad de métodos de escaneado para monitorizar y/o evaluar el volumen atmosférico 750. Dichos métodos de escaneado incluyen exploraciones de azimut y/o escaneados de elevación, y/o una combinación de escaneados de azimut y elevación de escáneres de patrones de trama. Además, las exploraciones cónicas incluyen un ángulo cónico singular o múltiples ángulos cónicos, y exploraciones en roseta realizadas por un escáner de prisma Risely. Otros sistemas de escaneado que se pueden utilizar en la etapa 801 incluyen, escáneres de máquina microoptoeléctrica (MEM) y sistemas de escaneado que incorporan elementos ópticos holográficos (HOE), elementos ópticos difractivos (DOE) y prismas de cuña, etc.

En una realización, el lidar escanea el volumen total del volumen atmosférico 750. En otra realización, el lidar escanea solo una o más superficies en el volumen atmosférico 750. Un escaneado de volumen completo puede requerir múltiples lidars para lograr una velocidad de escaneado requerida, mientras que un escaneado de superficie puede ser realizado por un solo lidar y aún proporcionar datos suficientes para predecir la llegada del evento de viento 755. Cuando la etapa 801 utiliza un escaneado de superficie, el lidar puede escanear esta superficie a una alta velocidad, proporcionando así datos de alta resolución temporal. La alta resolución temporal es beneficiosa para predecir con precisión la hora de llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730.

En la etapa 810, el método 800 determina la presencia del evento de viento 755 de la serie de tiempo 780. En ciertas realizaciones, la etapa 810 incluye una etapa 812 de determinar el tipo de evento de viento 755. Por ejemplo, la etapa 812 determina que el evento de viento 755 es un cizallamiento vertical, un cizallamiento horizontal, una ráfaga vertical, una ráfaga horizontal, una turbulencia o una combinación de los mismos. En un ejemplo de la etapa 810, el módulo de identificación de eventos de viento 712 procesa la serie de tiempo 780 para determinar la presencia, y opcionalmente el tipo, de evento de viento 755, como se describe con referencia a la figura 7.

En una etapa 820, el método 800 rastrea el evento de viento 755, basado en la serie de tiempo 780, para estimar la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730. En una realización, el método 800 realiza la etapa 820 cuando se determina el evento de viento 755 en la etapa 810. En un ejemplo de la etapa 820, el módulo de seguimiento 714 estima la llegada del evento de viento 755 basándose en la serie de tiempo 780, como se describe con referencia a la figura 7. La etapa 820 incluye una etapa 822 de estimación del tiempo de llegada del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. La etapa 822 puede incluir en la etapa 824 la determinación de la velocidad del paquete del evento de viento 755 con el fin de deducir el tiempo de llegada del mismo. Como se discutió con referencia a la figura 7, la determinación de la velocidad del paquete del evento de viento 755 mejora la precisión de la información de llegada 790. La etapa 820 puede incluir además una etapa 826 de estimación de la dirección del viento y/o la velocidad del viento asociadas con el evento de viento 755. Además, la etapa 820 puede incluir una etapa 828 de estimación de otras propiedades de impacto espacial, tales como extensión espacial y estructura espacial para el evento de viento 755. Se entiende que la dirección del viento y/o la velocidad del viento pueden variar a lo largo del evento de viento 755, y que la dirección/velocidad del viento del evento de viento 755 puede ser espacial o temporalmente dependiente.

Sin apartarse del alcance de la misma, la etapa 820 puede estimar otras propiedades del evento de viento 755. Las propiedades del evento de viento 755 estimadas en la etapa 820 pueden incluir una o más de las siguientes:

(1) Velocidad de una parcela de viento asociada con el evento de viento 755, tal como una parcela de viento a punto de impactar en la estructura aeromecánica 730, y una hora de llegada asociada de la parcela de viento.

(2) El perfil de velocidad del viento resuelto espacialmente para el evento de viento 755.

(3) Velocidad máxima del viento para el evento de viento 755.

(4) Un primer momento del perfil de velocidad del viento resuelto espacialmente (es decir, la velocidad media del viento) para el evento de viento 755.

(5) Un segundo momento del perfil de velocidad del viento resuelto espacialmente (es decir, la desviación estándar, o ancho espectral del lidar, del perfil de viento medido) para el evento de viento 755.

(6) Una tasa de disipación de remolinos para el evento de viento 755.

5 (7) Una función de estructura de velocidad promedio $[v(r+\Delta r) - v(r)]^2$ para el evento de viento 755, donde $v(r)$ es la velocidad del viento medida en el rango r , y Δr es la resolución espacial local, o una forma alternativa de la función de estructura de velocidad promedio $[(v(r+\Delta r) - v(r)) / \Delta r]^2$.

(8) Un gradiente de velocidad $v(r)$, o una magnitud del gradiente de velocidad $|\nabla v(r)|$ o $(\nabla v(r))^2$, para el evento de viento 755 y promedios de conjunto de estas métricas basadas en gradientes.

10 (9) Métricas de estabilidad atmosférica asociadas con el evento de viento 755 y basadas en perfiles de temperatura medidos, tal como el gradiente de temperatura $T(r)$, donde $T(r)$ es el perfil de temperatura medido, o el Número de Richardson, Ri .

(10) Métricas del régimen de flujo atmosférico asociadas con el evento de viento 755 y basadas en mediciones localizadas de velocidad, temperatura y presión, tal como el Número de Reynolds.

(11) Una tasa de disipación de energía mecánica

15
$$\varepsilon = 2\nu \left\{ \left\langle \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)^2 \right\rangle + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right\}$$

para el evento de viento 755, en el que ν es la viscosidad cinemática, u_i y x_i son las velocidades y direcciones de los componentes, respectivamente. Se asume la suma sobre índices repetidos (ejes) y los corchetes denotan promedios espaciales.

20 (12) Un n-ésimo momento del perfil de velocidad del viento resuelto espacialmente para el evento de viento 755, definido como $\zeta_n = ([\delta u(r)]^n) = C_n \varepsilon^{n/3} r^{n/3}$, en donde $\delta u(r) = u(x + r) - u(x)$, y r denota un desplazamiento espacial desde x .

En ciertas realizaciones, el método 800 incluye una etapa 830 de cuantificación de la severidad del impacto del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. La etapa 830 se realiza mediante el módulo de determinación de gravedad 716, por ejemplo. La etapa 830 incluye una etapa 832 para calcular la desviación de la velocidad del viento, asociada con el evento de viento 755 y estimada en la etapa 826, a partir de una velocidad del viento normal predefinida. La etapa 832 incluye además una etapa 834 de cuantificación de la gravedad del impacto del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730, basándose en (a) la desviación determinada en la etapa 832 y (b) el efecto del tipo de evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. La etapa 834 puede utilizar el conocimiento de las propiedades de la estructura aeromecánica 730, como el par o la carga asociados con el impacto del evento de viento 755 en una determinada porción espacial de la estructura aeromecánica 730. Por ejemplo, en el caso de una turbina eólica, la gravedad del impacto del evento de viento 755 en una pala de rotor de la turbina eólica es mayor cerca de la punta de la pala del rotor que cerca de la góndola de la turbina eólica. En este ejemplo, la etapa 834 puede utilizar una función o vector de ponderación del rotor como se discutió anteriormente.

35 En una etapa opcional 840, el método 800 comunica la información de llegada 790 a la estructura aeromecánica 730. La información de llegada 790 puede incluir datos determinados en las etapas 810, 820 y/o 830, tal como la hora de llegada para el evento de viento 755, el tipo de evento de viento 755 y/o la gravedad del impacto del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730. En un ejemplo de la etapa 840, la unidad de predicción del viento 710 comunica la información de llegada 790 a la estructura aeromecánica 730.

40 El sistema 700 puede repetir el método 800, por ejemplo, a intervalos regulares, para actualizar la información de llegada 790.

Las figuras 9A y 9B ilustran un escenario de ejemplo, en el que el lidar 720 mide las velocidades del viento para un volumen atmosférico 750 que se mueve generalmente hacia una turbina eólica 930. El volumen atmosférico 750 se mueve generalmente hacia la turbina eólica 930, como se indica mediante las flechas 950. Aunque las flechas 950 se muestran rectas, se entiende que las parcelas de viento individuales de volumen atmosférico 750 pueden propagarse a lo largo de trayectorias que no son rectas. La turbina eólica 930 es una realización de la estructura aeromecánica 730 e incluye una góndola 934 y una pluralidad de palas de rotor 932. La turbina eólica 930 puede incluir una, dos, tres o más palas de rotor 932. Para mayor claridad de la ilustración, no todas las palas de rotor 932 están etiquetadas en las figuras 9A y 9B. El lidar 720 está montado en la góndola 934 y está en comunicación óptica con el volumen atmosférico 750. El lidar 720 escanea una superficie cónica 960 en un volumen atmosférico 750. La turbina eólica 930 es, por ejemplo, WTG 206.

La figura 9A muestra una turbina eólica 930 y una superficie cónica 960 en una vista en perspectiva a lo largo de una dirección de visión horizontal que es casi paralela al plano del rotor 940 de la turbina eólica 930. Un sistema de coordenadas 905 define la dirección de propagación general del volumen atmosférico 750 a lo largo del eje x , mientras

que el plano del rotor 940 está en el plano y-z. La figura 9B muestra la proyección de la superficie cónica 960 sobre el plano del rotor 940 de la turbina eólica 930. Las figuras 9A y 9B se ven mejor juntas.

A medida que las parcelas de viento de volumen atmosférico 750 se propagan hacia la turbina eólica 930, por ejemplo, como se indica mediante las flechas 950, estas parcelas de viento pasan a través de la superficie cónica 960. Por lo tanto, las mediciones de la velocidad del viento realizadas por lidar 720 a través de la superficie cónica 960 incluyen mediciones de la velocidad del viento de estas parcelas de viento. La superficie cónica 960 tiene un diámetro máximo 972 en una longitud 990 a lo largo del eje x desde el lidar 720. El diámetro 972 es al menos tan grande como el diámetro 980 del plano del rotor 940. Las parcelas de viento indicadas por las flechas 950 (i) pasan a través del cono en las posiciones 952(i) proyectadas sobre el plano y-z.

En un ejemplo, el diámetro 972 está en el intervalo de 50 a 200 metros, y la longitud 990 está en el intervalo de 100 a 400 metros.

En una realización, la turbina eólica 930 utiliza el sistema 700 y el método 800 para determinar la estructura espacial del evento de viento 755, en el plano y-z, con una resolución no más gruesa que un tercio o un cuarto del diámetro 980.

La figura 10 ilustra un escenario de ejemplo, en el que el lidar 720 mide las velocidades del viento para un volumen atmosférico 750 que se mueve generalmente hacia una aeronave 1030, según se ve desde el marco de referencia de la aeronave 1030. El escenario de la figura 10 es similar al escenario de las figuras 9A y 9B, excepto por ser aplicable a una aeronave en lugar de a una turbina eólica. El lidar 720 está montado en la aeronave 1030 y está en comunicación óptica con el volumen atmosférico 750. El plano de rotor 940 se reemplaza por una superficie geométrica 1040 ubicada en la aeronave 1030. La figura 10 representa una vista similar a la de la figura 9A.

En una realización, la aeronave 1030 utiliza el sistema 700 y el método 800 para determinar la estructura espacial del evento de viento 755, a lo largo del eje x, con una resolución no más gruesa que la mitad de la longitud 1080 de la aeronave 1030.

Las figuras 11A-D ilustran geometrías de superficies de exploración de ejemplo que pueden ser utilizadas por el lidar 720 para realizar la etapa 801 del método 800. Cada una de las figuras 11A-D muestra la superficie de escaneo respectiva como una sección transversal en el plano y-z (ver el sistema de coordenadas 905). Aunque no es visible en las figuras 11A-D, cada una de estas superficies de escaneo se expande cónicamente desde la ubicación del lidar 720.

La figura 11A ilustra una superficie cónica 960. La superficie cónica 960 es particularmente adecuada para la medición de vientos zonales, es decir, eventos de viento con velocidades principalmente en la dirección x. La superficie cónica 960 también mide las velocidades del viento con componente(s) en el plano y-z. Las turbinas eólicas son particularmente sensibles a los vientos zonales, pero los vientos horizontales en el plano y-z pueden causar daños severos a una turbina eólica si no se ajustan adecuadamente antes del impacto. Por lo tanto, el sistema 700 puede aplicar ventajosamente la superficie cónica 960 para medir la serie temporal 780 cuando la estructura aeromecánica 730 es una turbina eólica.

La figura 11B ilustra una superficie de roseta 1110 que se expande radialmente a modo de ejemplo con una porción de superficie 1112 orientada predominantemente de manera vertical y una porción de superficie 1114 orientada predominantemente de manera horizontal. Sin apartarse del alcance de la misma, la superficie de roseta 1110 que se expande radialmente puede incluir más porciones de superficie que las mostradas en la figura 11B y/o tiene orientaciones de las porciones de superficie diferentes de las mostradas en la figura 11B. La superficie de roseta 1110 que se expande radialmente es muy adecuada para la medición de eventos de viento asociados con una alta velocidad del viento en el plano y-z. Dado que las aeronaves son particularmente sensibles a los vientos cruzados, el sistema 700 puede aplicar ventajosamente una superficie de roseta 1110 que se expande radialmente para medir la serie de tiempo 780 cuando la estructura aeromecánica 730 es una aeronave.

La figura 11C ilustra una superficie 1120 en forma de cruz de expansión radial de ejemplo con una porción de superficie 1122 orientada predominantemente de manera vertical y una porción de superficie 1124 orientada predominantemente de manera horizontal. Sin apartarse del alcance de la misma, la superficie 1120 en forma de cruz que se expande radialmente puede incluir más porciones de superficie que las mostradas en la figura 11C y/o tiene orientaciones de las porciones de superficie diferentes de las mostradas en la figura 11C. Por las mismas razones expuestas en referencia a la figura 11B, el sistema 700 emplea ventajosamente la superficie 1120 en forma de cruz que se expande radialmente cuando se implementa en una aeronave.

La figura 11D ilustra una superficie 1130 de escaneo de ráster de expansión radial de ejemplo. La superficie 1130 de escaneo de ráster que se expande radialmente proporciona una cobertura espacial relativamente densa del volumen atmosférico 750 para obtener una medición directa más completa de las velocidades del viento en las mediciones 785 de la velocidad del viento distribuidas espacialmente.

La figura 12 ilustra un método 1200 de ejemplo para predecir la llegada de un evento de viento 755 a una estructura aeromecánica 730. El método 1200 determina una evolución en el tiempo de un mapa de viento volumétrico completo

para el volumen atmosférico 750 para predecir la llegada del evento de viento 755 basado en este mapa de viento volumétrico completo. El método 1200 es una realización del método 800.

En una realización, el método 1200 incluye una etapa 1201 de usar un lidar, colocado en la estructura aeromecánica 730, para escanear repetidamente una superficie en el volumen atmosférico 750 para obtener una serie de tiempo 780 de mediciones de la superficie de la velocidad del viento a través de esta superficie. Estas mediciones superficiales de la velocidad del viento son realizaciones de mediciones 785 de la velocidad del viento distribuidas espacialmente. En una realización, la etapa 1201 mide las velocidades del viento solo a lo largo de la línea de visión del haz del lidar. En un ejemplo de la etapa 1201, el lidar 720 escanea repetidamente una superficie, tal como una de las superficies 960, 1110, 1120 y 1130, en el volumen atmosférico 750 para obtener la serie temporal 780. En otro ejemplo de la etapa 1201, el lidar 720 escanea repetidamente un subconjunto de una de las superficies 960, 1110, 1120 y 1130, por ejemplo, excluyendo la porción de superficie más cercana a la estructura aeromecánica 730. En otra realización, el método 1200 recibe la serie de tiempo 780, pero no incluye la etapa 1201 de generar la serie de tiempo 780. La etapa 1201 es una realización de la etapa 801 del método 800.

En una etapa 1210, el método 1200 determina la presencia y el tipo de evento de viento 755 a partir de la serie de tiempo 780 de mediciones de la superficie de la velocidad del viento. La etapa 1210 se realiza mediante el módulo de identificación de eventos de viento 712, por ejemplo.

La etapa 1210 incluye las etapas 1212 y 1214. En la etapa 1212, el método 1200 propaga cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento, a través del espacio y el tiempo, de una manera mutuamente consistente. Esta propagación se realiza de una manera que garantiza una consistencia óptima entre los diferentes puntos de tiempo de la serie de tiempo 780. Por ejemplo, para cada punto de tiempo, las mediciones de la superficie de la velocidad del viento asociadas con el punto de tiempo se propagan en el espacio y el tiempo para concordar de manera óptima con las mediciones de la superficie de la velocidad del viento para el siguiente punto de tiempo. Esta propagación da como resultado la determinación de una evolución en el tiempo del campo de viento volumétrico completo asociado con el volumen atmosférico 750. La propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento no se limita al supuesto de turbulencia congelada, y la etapa 1212 puede propagar diferentes porciones del volumen atmosférico 750 a diferentes velocidades y en diferentes direcciones para lograr una consistencia óptima entre las mediciones de la superficie de la velocidad del viento obtenidas en diferentes momentos.

En la etapa 1214, el método 1200 evalúa al menos un punto temporal de la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo para detectar el evento de viento 755 y determinar el tipo de evento de viento 755. La etapa 1214 puede utilizar una o más de las propiedades (1) a (12) para determinar el tipo de evento de viento 755. En un ejemplo, se identifica una cizalladura vertical a partir de una porción superior del campo de viento volumétrico que tiene una velocidad del viento zonal más alta que una porción inferior del campo de viento volumétrico.

En una etapa 1220, el método 1200 rastrea el evento de viento 755 a través de al menos una porción de la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo, determinado en la etapa 1210, para estimar la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730. En una realización, el método 1220 realiza la etapa 1220 cuando se determina el evento de viento 755 en la etapa 1210. La etapa 1220 se realiza mediante el módulo de seguimiento 714, por ejemplo. La etapa 1220 es una realización de la etapa 820 del método 800.

La etapa 1220 incluye la etapa 822 y opcionalmente incluye una o más de las etapas 824, 826 y 828. Cuando se implementa en la etapa 1220, las etapas 822, 824, 826 y 828 se realizan basándose en el seguimiento del evento de viento 755 a lo largo de al menos una porción de la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo. Las propiedades del evento de viento 755 estimadas en la etapa 1220 pueden incluir una o más de las propiedades (1) a (12) discutidas con referencia a la figura 8.

En una realización, el método 1200 incluye una etapa 1240 de extraer, a partir de la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo, al menos un mapa de campo de viento futuro para una superficie asociada con la estructura aeromecánica 730, tal como el plano del rotor 940, una superficie geométrica que es coplanaria con el plano del rotor 940 o la superficie geométrica 1040. Cada uno de los al menos un mapa de campo de viento futuro indica el campo de viento estimado, por ejemplo, la velocidad tridimensional o la velocidad del viento zonal, en la superficie asociada con la estructura aeromecánica 730 en un punto de tiempo futuro. En un ejemplo, la etapa 1240 produce un conjunto de mapas de campos de viento futuros para una duración posterior a la hora actual, tal como un mapa de campos de viento futuros para cada 0,1 segundos después de la hora actual durante una duración de al menos tres o cinco segundos. En otro ejemplo, la etapa 1240 produce uno o más mapas de campos de viento futuros durante un tiempo que es al menos de tres a cinco segundos en el futuro.

Opcionalmente, el método 1200 incluye una etapa 1250 de cuantificación de la gravedad del impacto del evento de viento 755 sobre la estructura aeromecánica 730 basándose en al menos uno de los futuros mapas de campo de viento. La etapa 1250 es una realización de la etapa 830, que se basa en al menos un mapa de campo de viento futuro. La etapa 1250 puede implementar las etapas 832 y 834, como se describe en referencia a la figura 8.

En una realización, el método 1200 incluye una etapa 1230 de extraer, a partir de la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo, un mapa de campo de viento actual para la superficie asociada con la estructura

aeromecánica 730, usando el mismo método que se describe en referencia a la etapa 1240. El mapa de campo de viento actual indica el campo de viento estimado, por ejemplo, la velocidad tridimensional o la velocidad del viento zonal, en la superficie asociada con la estructura aeromecánica 730 en el momento actual.

Cada una de las etapas 1230, 1240 y 1250 puede ser realizada por la unidad de predicción del viento 710.

- 5 En una etapa opcional 1260, el método 1200 comunica la información de llegada 790 a la estructura aeromecánica 730. La información de llegada 790 puede incluir datos determinados en las etapas 1210, 1220, 1230, 1240 y 1250, tal como la hora de llegada del evento de viento 755, el tipo de evento de viento 755, la gravedad del impacto del evento de viento 755 en la estructura aeromecánica 730, el(los) mapa(s) de campo de viento futuro(s), y/o el mapa actual del campo de viento. En un ejemplo de la etapa 1240, la unidad de predicción del viento 710 comunica la información de llegada 790 a la estructura aeromecánica 730.

Una estructura aeromecánica, tal como la estructura aeromecánica 730 o la estructura aeromecánica 2340 (ver la figura 23), puede utilizar tanto el mapa de campo de viento actual (determinado en la etapa 1230) como uno o más mapas de campo de viento futuros (determinados en la etapa 1240) para ajustar adecuadamente su funcionamiento de acuerdo con el cambio de las condiciones de viento actuales a las condiciones de viento futuras.

- 15 Las figuras 13-16 son una ilustración de ejemplo de ciertos aspectos del método 1200. Las figuras 13-16 se ven mejor juntas.

La figura 13 muestra un evento de viento local 1310 de ejemplo que se propaga en un volumen atmosférico 750 hacia una superficie 1340. El evento de viento 1310 es un ejemplo del evento de viento 755. La superficie 1340 es, por ejemplo, el plano del rotor 940 o la superficie geométrica 1040. El evento de viento 1310 se propaga a lo largo de una trayectoria 1320. En este ejemplo, la naturaleza compleja del campo de flujo asociado con el volumen atmosférico 750 hace que la trayectoria 1320 no sea recta y también hace que la velocidad del paquete del evento de viento 1310 cambie con el tiempo. Además, las propiedades del evento de viento 1310 cambian durante la propagación a lo largo de la trayectoria 1320. Un estado inicial del evento de viento 1310, en un momento t_1 , se muestra como un esquema etiquetado 1310. En los momentos posteriores t_2 , t_3 y t_4 , el evento de viento 1310 se muestra como contornos 1310', 1310" y 1310"', respectivamente. En el momento t_4 , el evento de viento 1310 alcanza la superficie 1340. Los momentos t_1 , t_2 , t_3 y t_4 son equidistantes. Es evidente que, en este ejemplo, la propagación matemática del evento de viento 1310 de acuerdo con un supuesto de turbulencia congelada conduciría a una predicción errónea, tanto del tiempo de llegada como de la posición del evento de viento 1310 en la superficie 1340. Por ejemplo, si la velocidad del evento de viento 1310 se midió en el momento t_1 y, en base a esta medición, se propagó matemáticamente a la superficie 1340 de acuerdo con una suposición de turbulencia congelada, la posición de llegada prevista sería la que muestra la flecha 1330. Además, dado que la velocidad del paquete del evento de viento 1310 aumenta con el tiempo, una propagación basada en el supuesto de turbulencia congelada predeciría una hora de llegada posterior a la hora de llegada real.

Las figuras 14A-C muestran mediciones de velocidad del viento de ejemplo a través de la superficie cónica 960, con el vértice en la superficie 1340, en los momentos t_1 , t_2 y t_3 , respectivamente. En cada uno de los momentos t_1 , t_2 y t_3 , al menos una porción del evento de viento 1310 se cruza con la superficie cónica 960, mientras que en algún momento después del tiempo t_3 , el evento de viento 1310 pierde contacto con la superficie cónica 960. La medición de la velocidad del viento, ilustrada esquemáticamente en las figuras 14A-C puede estar representada por una o más de las propiedades (1) a (12) discutidas con referencia a la figura 8, y el evento de viento se muestra en las mediciones de la superficie de la velocidad del viento para los tiempos t_1 , t_2 y t_3 como áreas 1410, 1410' y 1410". Las figuras 14A-C son ejemplos de mediciones de la velocidad del viento obtenidas en la etapa 1201. En un ejemplo, la superficie cónica 960 tiene una longitud de 990 (ver la figura 9A), en la dirección x , en el intervalo entre 100 metros y 400 metros, y la distancia entre la medición individual de la velocidad del viento en la superficie cónica 960 es de 10 metros o menos.

- 45 En la etapa 1212, el método 1200 propaga cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento para los momentos t_1 , t_2 y t_3 , respectivamente, a través del tiempo y el espacio de una manera que optimiza la consistencia mutua entre estas mediciones de la superficie de la velocidad del viento, como se describe en referencia a la figura 12. Para la propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento en t_1 , t_2 y t_3 (y opcionalmente más veces), la etapa 1212 determina la información de la velocidad del viento para el campo de viento volumétrico completo asociado con el volumen atmosférico 750. Específicamente, la etapa 1212 produce una evolución en el tiempo del campo de viento volumétrico completo.

Se entiende que la propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento no solo está determinada por las partes de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento asociadas con el evento de viento 1310. Otras porciones pueden aportar información a la propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento. En un ejemplo, cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento muestra una cizalladura vertical, de modo que la velocidad del viento medida para valores z más altos es mayor que la medida para valores z más bajos. Esta es una situación común para las turbinas eólicas, por ejemplo. Esta cizalladura vertical también debe propagarse con una consistencia óptima entre las mediciones de la superficie de la velocidad del viento y, por lo tanto, agrega información que ayuda a determinar la propagación del evento de viento local 1310.

Las figuras 15A-C muestran una evolución temporal de ejemplo del campo de viento volumétrico completo obtenido en la etapa 1212 a partir de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento mostradas en las figuras 14A-C. Las figuras 15A-C muestran mapas de campo de viento volumétrico 1560, 1560' y 1560" para el volumen atmosférico 750 en los momentos t1, t2 y t3, respectivamente. Los mapas de campo de viento volumétrico 1560, 1560' y 1560" estiman la evolución temporal del evento de viento 1310 como evento de viento estimado 1510, 1510' y 1510", respectivamente.

La figura 16 muestra la ubicación de llegada estimada 1610 del evento de viento 755 en la superficie 1340 en el momento t4, según se estima en la etapa 1220 en base a la evolución temporal del campo de viento volumétrico completo mostrado en las figuras 15A-C.

La figura 17A muestra un mapa de campo de viento futuro 1700 de ejemplo que muestra el viento zonal estimado para una superficie en la estructura aeromecánica 730, como se determina en la etapa 1240. El mapa de campo de viento futuro 1700 se obtiene realizando el método 1200 en un campo de viento modelado, utilizando mediciones de velocidad del viento basadas en lidar simuladas a través de la superficie cónica 960, donde las mediciones de velocidad del viento basadas en lidar son mediciones de velocidad en línea de visión. A modo de comparación, la figura 17B también muestra un mapa de campo de viento futuro simulado 1710 correspondiente, que puede considerarse el mapa de campo de viento real. La concordancia entre el mapa de campo de viento futuro 1700 y el mapa de campo de viento futuro simulado 1710 es excelente, lo que demuestra la viabilidad del método 1200.

La figura 18 ilustra un método 1800 de ejemplo para predecir la llegada de un evento de viento 755 a una estructura aeromecánica 730. El método 1800 resume las mediciones de la superficie de la velocidad del viento en mapas de superficie de parámetros de viento para predecir la llegada del evento de viento 755 basándose en los mapas de superficie de parámetros de viento. El método 1800 es una realización del método 800.

En una realización, el método 1800 incluye la etapa 1201.

En una etapa 1810, el método 1800 determina la presencia y el tipo de evento de viento 755 a partir de la serie de tiempo 780 de mediciones de la superficie de la velocidad del viento. La etapa 1810 se realiza mediante el módulo de identificación de eventos de viento 712, por ejemplo.

La etapa 1810 incluye las etapas 1812 y 1814. En la etapa 1812, el método 1800 resume la serie de tiempo de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento como una serie de tiempo correspondiente de mapas de superficie de parámetros de viento, cada uno indicando al menos un parámetro de campo de viento para una pluralidad de sectores de la superficie de medición. La etapa 1812 funciona para reducir la cantidad de datos. Cada sector está dimensionado para incluir una pluralidad de mediciones individuales de la velocidad del viento. Para cada sector, el al menos un parámetro de viento resume múltiples mediciones de velocidad del viento. En un ejemplo, cada sector resume entre 3 y 1000 mediciones individuales de la velocidad del viento. Los parámetros de viento de ejemplo incluyen las propiedades (1) a (12) discutidas con referencia a la figura 8. En un ejemplo, el parámetro del viento es una velocidad media del viento para cada sector. La etapa 1812 puede funcionar para reducir la cantidad de datos utilizados en las partes posteriores del método 1800. Además, la etapa 1812 puede funcionar para reformular las mediciones de la velocidad del viento en términos de uno o más parámetros del viento que destacan los eventos de viento de interés.

En la etapa 1814, el método 1800 evalúa al menos uno de los mapas de superficie de parámetros de viento para detectar el evento de viento 755 y determinar el tipo de evento de viento 755. La etapa 1214 puede utilizar una o más de las propiedades (1) a (12) para determinar el tipo de evento de viento 755. En un ejemplo, se identifica una cizalladura vertical a partir de una porción superior del campo de viento volumétrico que tiene una velocidad del viento zonal más alta que una porción inferior del campo de viento volumétrico.

En una etapa 1820, el método 1800 rastrea el evento de viento 755 a través de al menos una parte de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento, determinados en la etapa 1810, para estimar la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 730. En una realización, el método 1800 realiza la etapa 1820 cuando se determina el evento de viento 755 en la etapa 1810. La etapa 1820 se realiza mediante el módulo de seguimiento 714, por ejemplo. Similar a la discusión de la etapa 1212 y de las figuras 13-16, la etapa 1820 puede propagar cada uno de los mapas de superficie de parámetros de viento de una manera mutuamente coherente para estimar la llegada del evento de viento 755. Por ejemplo, cada mapa de superficie de parámetros de viento se propaga en el espacio y el tiempo para concordar de manera óptima con el mapa de superficie de parámetros de viento temporalmente posterior. La etapa 1820 es una realización de la etapa 820 del método 800.

La etapa 1820 incluye la etapa 822 y opcionalmente incluye una o más de las etapas 824, 826 y 828. Cuando se implementa en la etapa 1820, las etapas 822, 824, 826 y 828 se realizan basándose en el seguimiento del evento de viento 755 a través de al menos una porción de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento. Las propiedades del evento de viento 755 estimadas en la etapa 1820 pueden incluir una o más de las propiedades (1) a (12) discutidas con referencia a la figura 8.

En una realización, el método 1800 incluye una etapa 1840 de determinar, basándose en la serie de tiempo de mapas de superficie de parámetros de viento, al menos un mapa de campo de viento futuro para una superficie asociada con

la estructura aeromecánica 730, tal como el plano de rotor 940, una superficie geométrica que es coplanaria con el plano del rotor 940, la superficie geométrica 1040 o la superficie 1340. Cada uno de los al menos un mapa de campo de viento futuro indica el campo de viento estimado, por ejemplo, la velocidad tridimensional o la velocidad del viento zonal, en la superficie asociada con la estructura aeromecánica 730 en un punto de tiempo futuro. De manera similar a la discusión de la etapa 1220 y de las figuras 13-16, la etapa 1840 puede propagar cada uno de los mapas de superficie de parámetros de viento de una manera mutuamente consistente para determinar al menos un mapa de campo de viento futuro. En un ejemplo, la etapa 1840 produce un conjunto de mapas de campos de viento futuros para una duración posterior a la hora actual, tal como un mapa de campos de viento futuros para cada 0,1 segundos después de la hora actual durante una duración de al menos tres o cinco segundos. En otro ejemplo, la etapa 1840 produce uno o más mapas de campos de viento futuros durante un tiempo que es al menos de tres a cinco segundos en el futuro.

Opcionalmente, el método 1800 incluye una etapa 1850 de cuantificación de la gravedad del impacto del evento de viento 755 sobre la estructura aeromecánica 730 basándose en al menos uno de los futuros mapas de campo de viento. La etapa 1850 es una realización de la etapa 830, que se basa en al menos un mapa de campo de viento futuro. La etapa 1850 puede implementar las etapas 832 y 834, como se describe en referencia a la figura 8.

En una realización, el método 1800 incluye una etapa 1830 de determinar, basándose en la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento, un mapa de campo de viento actual para la superficie asociada con la estructura aeromecánica 730, usando el mismo método que se describe en referencia a la etapa 1840. El mapa de campo de viento actual indica el campo de viento estimado, por ejemplo, la velocidad tridimensional o la velocidad del viento zonal, en la superficie asociada con la estructura aeromecánica 730 en el momento actual.

Cada una de las etapas 1830, 1840 y 1850 puede ser realizada por la unidad de predicción del viento 710.

Opcionalmente, el método 1800 incluye la etapa 1240.

Las figuras 19-21 son una ilustración de ejemplo de ciertos aspectos del método 1800. Las figuras 19-21 se ven mejor juntas.

La figura 19 muestra una sección de ejemplo de la superficie cónica 960 en una pluralidad de sectores 1920, como se utiliza en una realización de la etapa 1812. La figura 19 muestra la superficie cónica 960 en relación con la superficie 1340 y en la misma vista que se utilizó para la figura 13. La superficie cónica 960 puede seccionarse en más sectores 1920 de los que se muestran en la figura 19 para proporcionar mayor resolución y/o mayor extensión espacial, o menos sectores 1920 que los mostrados en la figura 19 para reducir la resolución y/o la extensión espacial, sin apartarse del alcance del mismo. Asimismo, la forma de los sectores 1920 puede ser diferente de la mostrada en la figura 1920. Por ejemplo, diferentes sectores 1920 pueden tener diferentes formas y/o tamaños. Además, no toda la superficie cónica 960 necesita estar representada por los sectores 1920. Por ejemplo, una porción de la superficie cónica 960 más cercana a la superficie 1340 puede no estar incluida en los sectores 1920. Para mayor claridad de ilustración, no todos los sectores 1920 están etiquetados en las figuras 19-20C.

Las figuras 20A-C representan esquemáticamente mapas de superficie de parámetros de viento 1360, 1360' y 1360" de ejemplo de la superficie cónica 960, como se resume en la etapa 1812 usando los sectores 1920, para los momentos t1, t2 y t3, respectivamente. Los momentos t1, t2 y t3 son los discutidos con referencia a la figura 13. Cada sector 1920 de los mapas de superficie de parámetros de viento 2060, 2060' y 2060" puede indicar una o más de las propiedades (1) a (12) discutidas con referencia a la figura 8, según se deriva de las mediciones individuales de la velocidad del viento dentro del sector 1920 en la etapa 1812. Por ejemplo, en el mapa de superficie de parámetros de viento 2060, el evento de viento 1310 se muestra en el grupo de sectores 2010; en el mapa de superficie de parámetros de viento 2060', el evento de viento 1310 se muestra en el grupo de sectores 2010'; y en el mapa de superficie de parámetros de viento 2060", el evento de viento 1310 se muestra en el grupo de sectores 2010.

La etapa 1820 rastrea el evento de viento 1310 a través de mapas de superficie de parámetros de viento 2060, 2060' y 2060", para estimar la llegada del evento de viento 1310 a la superficie 1340. La etapa 1820 propaga temporal y espacialmente los mapas de superficie de parámetros de viento 2060, 2060' y 2060" de una manera que produce una coherencia óptima entre los mapas de superficie de parámetros de viento 2060, 2060' y 2060".

La figura 21 muestra la llegada estimada del evento de viento a la superficie 1340 en el momento t4. La superficie 1340 está seccionada en sectores 2120, por ejemplo, reflejando la proyección de los sectores 1920 sobre la superficie 1340. El evento de viento 1310 impacta la superficie 1340 en un sector 2110. La figura 21 también representa un mapa de campo de viento futuro 2100 de ejemplo, determinado en la etapa 1840 basado en mapas de superficie de parámetros de viento 2060, 2060' y 2060".

Se entiende que la propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento no solo está determinada por las partes de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento asociadas con el evento de viento 1310. Otras porciones pueden aportar información a la propagación de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento. En un ejemplo, cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento muestra una cizalladura vertical, de modo que la velocidad del viento medida para valores z más altos es mayor que la medida para valores z más bajos. Esta es una situación común para las turbinas eólicas, por ejemplo. Esta cizalladura vertical también debe

propagarse con una consistencia óptima entre las mediciones de la superficie de la velocidad del viento y, por lo tanto, agrega información que ayuda a determinar la propagación del evento de viento local 1310.

La figura 22 ilustra un ordenador 2200 de ejemplo que implementa la unidad de predicción del viento 710. El ordenador 2200 incluye un procesador 2210, una memoria 2220 e interfaces 2260 y 2270. La memoria 2220 incluye instrucciones 2230 legibles por máquina codificadas en una porción no volátil de la memoria 2220. Las instrucciones 2230 implementan el módulo de identificación de eventos de viento 712, el módulo de seguimiento 714 y, opcionalmente, el módulo de determinación de gravedad 716. En determinadas realizaciones, la memoria 2220 incluye además los parámetros 2240 utilizados por uno o más del módulo de identificación de eventos de viento 712, el módulo de seguimiento 714 y el módulo de determinación de la gravedad 716. Los parámetros 2240 pueden incluir al menos un parámetro de condición de viento normal 2242, como se describe en referencia a la etapa 832 del método 800. Además, los parámetros 2240 pueden incluir al menos un parámetro de estructura aeromecánica 2244, como se describe en referencia a la etapa 834 del método 800. En una realización, la memoria 2220 incluye además un almacenamiento de datos 2250.

En funcionamiento, el ordenador 2200 recibe la serie de tiempo 780 a través de la interfaz 2260. El procesador 2210 ejecuta las instrucciones 2230, opcionalmente usando los parámetros 2240 y/o el almacenamiento de datos 2250, para generar la información de llegada 790. El ordenador 2200 puede implementar el método 800, el método 1200 y/o el método 1800.

Sin apartarse del alcance del mismo, las instrucciones 2230 y, opcionalmente, los parámetros 2240, pueden proporcionarse como un producto de software configurado para su implementación en un sistema informático de terceros.

La figura 23 ilustra un aparato aeromecánico 2300 de ejemplo con control de respuesta basado en predicciones al evento de viento 755. El aparato aeromecánico 2300 integra el sistema 700 y una estructura aeromecánica 2340. La estructura aeromecánica 2340 incluye un módulo de control 2320, uno o más accionadores 2330 y una o más partes móviles 2350. La estructura aeromecánica 2340 es una realización de la estructura aeromecánica 730. La estructura aeromecánica 2340 es, por ejemplo, una turbina eólica 930 o una aeronave 1030. El(los) accionador(es) 2330 regula(n) el acoplamiento entre la estructura aeromecánica 2340 y el volumen atmosférico 750. En el aparato aeromecánico 2300, el sistema 700 se coloca en la estructura aeromecánica 2340. El lidar 720 puede colocarse en la estructura aeromecánica 2340, en la estructura aeromecánica 2340 o cerca de la estructura aeromecánica 2340. Se muestran ejemplos en las figuras 9A y 10. Sin apartarse del alcance del mismo, la unidad de predicción del viento 710 puede colocarse lejos de la estructura aeromecánica 2340, por ejemplo, en un centro de control remoto.

La figura 24 ilustra un método 2400 de ejemplo para ajustar el funcionamiento de la estructura aeromecánica 2340, según se implementa en el aparato aeromecánico 2300, basándose en la predicción de la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 2340. El método 2400 incluye la etapa 801, en la que el lidar 720 detecta la velocidad del viento en el volumen atmosférico 750 para obtener la serie temporal 780. En una etapa posterior 2410, la unidad de predicción del viento 710 predice la llegada del evento de viento 755 a la estructura aeromecánica 2340 basándose en la serie de tiempo 780 y determina la información de llegada 790. La etapa 2410 puede implementar uno o más de los métodos 800, 1200 y 1800. La unidad de predicción del viento 710 comunica la información de llegada 790 al módulo de control 2320. En una etapa 2420, el módulo de control 2320 ajusta al menos un accionador 2330 para mover al menos una parte móvil 2350 en previsión de la llegada del evento de viento 755, para optimizar el funcionamiento de la estructura aeromecánica 2340 en presencia del evento de viento 755 o reducir el daño potencial a la estructura aeromecánica 2340 causada por el evento de viento 755.

La figura 25 ilustra una turbina eólica 2500 de ejemplo con control de respuesta basado en predicciones al evento de viento 755. La turbina eólica 2500 es una realización del aparato aeromecánico 2300 e implementa el método 2400. La turbina eólica 2500 incluye el sistema 700, un módulo de control 2520, las palas de rotor 932, accionadores de cabeceo de palas 410, la góndola 934 y engranajes y motores de control de guiñada 420. El módulo de control 2520 es una realización del módulo de control 2320. Los accionadores de cabeceo de las palas 410 y/o los engranajes y motores de control de guiñada 420 forman una realización de los accionadores 2330. La góndola 934 y/o las palas de rotor 932 forman una realización de las partes móviles 2350. La turbina eólica 2500 es un ejemplo de la turbina eólica 930, que integra el sistema 700. En una realización, el módulo de control 2520 está configurado para ajustar los engranajes de control de guiñada y los motores 420 para mover la góndola 934 de acuerdo con la información de llegada 790. En otra realización, el módulo de control 2520 está configurado para ajustar al menos uno de los accionadores de cabeceo de pala 410 para mover al menos una pala de rotor 932 respectiva de acuerdo con la información de llegada 790. En esta realización, los accionadores de cabeceo de pala 410 pueden incluir un mecanismo de control de cabeceo separado para cada una de las palas de rotor 932, de modo que los accionadores de cabeceo de pala 410 pueden ajustar cada pala de rotor 932 independientemente para regular el acoplamiento entre la turbina eólica 2500 y el evento de viento 755 de una manera óptima. En otra realización más, el módulo de control 2520 está configurado para ajustar uno o ambos engranajes de control de guiñada y motores 420 y al menos uno de los accionadores de cabeceo de pala 410 para mover la góndola 934 y/o al menos una pala de rotor 932 respectiva, respectivamente.

La figura 26 ilustra una aeronave 2600 de ejemplo con control de respuesta basado en predicciones al evento de viento 755. La aeronave 2600 es una realización de la aeronave 1040 e implementa el método 2400. La aeronave 2600 incluye (a) el sistema 700, (b) el módulo de control 2620, (c) uno o más motores 2635 y uno o más accionadores de empuje 2630 respectivos que accionan o ajustan los respectivos motores 2635 para cambiar la velocidad de desplazamiento de la aeronave 2600, (d) uno o más elevadores 2645 y uno o más respectivos accionadores de ángulo de ataque 2640 que mueven respectivos elevadores 2645 para ajustar el ángulo de ataque de la aeronave 2600, (e) al menos un timón 2655 y al menos un respectivo accionador de guiñada 2650 que mueven un respectivo timón 2655 para ajustar la orientación de la aeronave 2600, y (f) uno o más alerones 2665 y uno o más accionadores de balanceo 2660 respectivos para mover los alerones 2665 respectivos para balancear la aeronave 2600 o ajustar el balanceo de la aeronave 2600. Opcionalmente, la aeronave 2600 incluye además uno o más de otros dispositivos 2675 y uno o más de otros accionadores 2670 respectivos que mueven otros dispositivos 2675, respectivamente, para cambiar las propiedades de vuelo de la aeronave 2600. Otros dispositivos 2675 pueden incluir uno o más flaps y/o spoilers, por ejemplo. Los motores 2635 pueden incluir una o más turbinas, hélices, motores de pistón y/o motores de cohetes.

El módulo de control 2620 es una realización del módulo de control 2320. El(los) accionador(es) de empuje 2630, el(los) accionador(es) de ángulo de ataque 2640, el(los) accionador(es) de guiñada 2650, el(los) accionador(es) de balanceo 2660 y, opcionalmente, otro(s) accionador(es) 2670, forman una realización de los accionadores 2330. El(los) motor(es) 2635, el(los) elevador(es) 2645, el timón 2655, el(los) alerón(es) 2665 y, opcionalmente, otro(s) dispositivo(s) 2675 forman una realización de las partes móviles 2350. La aeronave 2600 es un ejemplo de la aeronave 1030, que integra el sistema 700.

En una realización, el módulo de control 2620 está configurado para controlar al menos uno de los accionadores de ángulo de ataque 2640, el(los) accionador(es) de guiñada 2650, el(los) accionador(es) de balanceo 2660 y otro(s) accionador(es) 2670 para mover al menos uno de los elevadores 2645, el timón 2655, el(los) alerón(es) 2665 y otro(s) dispositivo(s) 2675, respectivamente, en relación con el volumen atmosférico 750 de acuerdo con la información de llegada 790. En esta realización, cada superficie de control individual incluida en el(los) elevador(es) 2645, el timón 2655, el(los) alerón(es) 2665 y otros dispositivos 2675 pueden moverse de forma independiente mediante el(los) accionador(es) de ataque 2640, el(los) accionador(es) de guiñada 2650, el(los) accionador(es) de balanceo 2660, y otro(s) accionador(es) 2670, respectivamente, para regular de manera óptima el acoplamiento entre la aeronave 2600 y el evento de viento 755.

En otra realización, el módulo de control 2520 está configurado para controlar al menos un accionador de empuje 2630 para ajustar al menos un motor de aeronave 2635 respectivo de acuerdo con la información de llegada 790. En esta realización, el(los) accionador(es) de empuje 2630 puede(n) incluir un mecanismo de control separado para cada motor 2635, de manera que los accionadores de empuje 2630 pueden ajustar cada motor 2635 independientemente para regular el acoplamiento entre la aeronave 2600 y el evento de viento 755 de una manera óptima. El motor o los motores de desaceleración o aceleración 2635 pueden permitir que la aeronave 2600 maneje la turbulencia y la cizalladura del viento de manera más eficaz, por ejemplo, para mejorar la comodidad de conducción. En las realizaciones de la aeronave 2600 que incluyen al menos una hélice, el(los) accionador(es) de empuje 2630 pueden mover el cabeceo de las palas individuales de la hélice.

En otra realización más, el módulo de control 2520 está configurado para controlar uno o ambos de (a) al menos uno de los accionadores de ángulo de ataque 2640, el(los) accionadores de guiñada 2650, el(los) accionador(es) de balanceo 2660 y otro(s) accionador(es) 2670, y (b) al menos un accionador de empuje 2630, como se discutió anteriormente, de acuerdo con la información de llegada 790.

La figura 27 ilustra una turbina eólica 2700 de ejemplo con control de respuesta basado en predicciones al evento de viento 755. La turbina eólica 2700 es una realización de la turbina eólica 2700 e implementa el método 2400. La turbina eólica 2700 incluye la góndola 934, tres palas 932 y una torre 2710. La turbina eólica 2700 incluye además el lidar 720, la unidad de predicción de viento 710 y el módulo de control 2520. El lidar 720 está montado en la góndola 934. Además, la turbina eólica 2700 incluye tres accionadores de cabeceo de pala 410 que pueden mover las palas 932, respectivamente, para ajustar el cabeceo de las palas 932 según lo dictado por el módulo de control 2520 basado en la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710. La turbina eólica 2700 también incluye engranajes de control de guiñada y motores 420 que pueden girar la góndola 934 alrededor del eje vertical de la torre 2710 según lo dictado por el módulo de control 2520 basado en la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710. Cuando se considere necesario en base a la información de llegada 790, el módulo de control 2520 comunica una señal de control a través de una línea de control 2720 a uno o más de los accionadores de cabeceo de pala 410 y engranajes y motores de control de guiñada 420, para efectuar el ajuste de la(s) pala(s) 932 y/o la góndola 934. Para mayor claridad de la ilustración, no todas las líneas de control 2720 se muestran en la figura 27.

Sin apartarse del alcance de la misma, la turbina eólica 2700 puede incluir menos o más palas 932 que las que se muestran en la figura 27.

La figura 28 ilustra una aeronave 2800 de ejemplo con control de respuesta basado en predicciones al evento de viento 755. La aeronave 2800 es una realización de la aeronave 2600 e implementa el método 2400. La aeronave 2800 incluye el lidar 720, la unidad de predicción de viento 710 y el módulo de control 2520. El lidar 720 está montado

cerca del morro de la aeronave 2800 para orientarse generalmente en la dirección de desplazamiento de la aeronave 2800. La aeronave 2800 incluye dos motores 2635 y dos accionadores de empuje 2630 asociados respectivamente, que pueden ajustar los motores 2635 según lo dictado por el módulo de control 2620 en base a la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710. La aeronave 2800 incluye además (a) dos elevadores 2645 y dos accionadores de ángulo de ataque 2640 asociados respectivamente que pueden ajustar los elevadores 2645 según lo dictado por el módulo de control 2620 en base a la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710, (b) un timón 2655 y un accionador de guiñada 2650 que puede ajustar el timón 2655 según lo dictado por el módulo de control 2620 basado en la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710, y (c) dos alerones 2665 y dos accionadores de balanceo 2660 asociados respectivamente que pueden ajustar los alerones 2665 según lo dictado por módulo de control 2620 basado en la predicción del evento de viento 755 por la unidad de predicción del viento 710. Cuando se considere necesario según la información de llegada 790, el módulo de control 2620 comunica una señal de control a través de una línea de control 2820 a uno o más de el(los) accionador(es) de empuje 2630, el(los) accionador(es) de ángulo de ataque 2640, el(los) accionador(es) de guiñada 2650 y el(los) accionador(es) de balanceo 2660, para efectuar el ajuste del motor(es) 2635, el(los) elevador(es) 2645, el timón 2655 y/o el(los) alerón(es) 2665. Para mayor claridad de la ilustración, no todas las líneas de control 2820 se muestran en la figura 28.

Sin apartarse del alcance de la misma, la aeronave 2800 puede incluir uno o más de otros dispositivos 2675 y uno o más de otros accionadores 2670. También sin apartarse del alcance del presente documento, la aeronave 2800 puede estar equipada con menos o más de cada uno de los accionadores de empuje 2630, motores 2635, accionadores de ángulo de ataque 2640, elevadores 2645, timón 2655, accionadores de guiñada 2650, accionadores de balanceo 2660 y alerones 2665; y la ubicación de estos componentes puede diferir de la que se muestra en la figura 28.

REIVINDICACIONES

1. Un método para predecir la llegada de un evento de viento (755) a una estructura aeromecánica (730), que comprende:

5 escanear repetidamente, con un lidar, una superficie geométrica tridimensional en un volumen atmosférico (750) que se mueve hacia la estructura aeromecánica (730) para medir una serie de tiempo (780) de mediciones de velocidad del viento distribuidas espacialmente (785) en la superficie geométrica tridimensional, teniendo la superficie geométrica tridimensional una ubicación fija con respecto a la estructura aeromecánica, estando el método caracterizado por:

10 propagar espaciotemporalmente cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento temporal y espacialmente de una manera mutuamente consistente, de manera que se asegure una consistencia óptima entre los diferentes puntos de tiempo de las series de tiempo para determinar una evolución en el tiempo del campo de viento volumétrico completo asociado con el volumen atmosférico (750);

evaluar al menos un punto temporal de la evolución del tiempo para detectar el evento de viento;

15 antes de la llegada del evento de viento (755) a la estructura aeromecánica, rastrear el evento de viento a lo largo de al menos una porción de la evolución del tiempo para estimar el tiempo de llegada del evento de viento a la estructura aeromecánica (730); y

comunicar datos de control de prealimentación que permiten el ajuste de la estructura aeromecánica en previsión del evento de viento, comprendiendo además el método:

20 en la etapa de propagación espaciotemporal, resumir la serie de tiempo de la velocidad del viento distribuida espacialmente como una serie de tiempo correspondiente de mapas de superficie de parámetros de viento, indicando cada uno de los mapas de superficie de parámetros de viento al menos un parámetro de campo de viento para una pluralidad de sectores, estando cada uno de los sectores asociado con varias mediciones individuales de la velocidad del viento;

en la etapa de evaluar, evaluar al menos uno de los mapas de superficie de parámetros de viento para detectar el evento de viento y determinar el tipo de evento de viento; y

25 en la etapa de seguimiento, seguir la propagación del evento de viento a través de al menos una porción de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento para estimar el tiempo de llegada; y comprendiendo además el método:

30 determinar, a partir de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento, (a) un mapa de parámetros de viento de los valores actuales del al menos un parámetro de campo de viento en una segunda superficie geométrica ubicada en la estructura aeromecánica, y (b) al menos mapa de campo de viento de valores futuros del al menos un parámetro de campo de viento asociado con el evento de viento en la segunda superficie geométrica, para proporcionar datos de control de prealimentación que permitan el ajuste de la estructura aeromecánica en previsión del evento de viento.

2. El método de la reivindicación 1, comprendiendo la etapa de seguimiento:

35 determinar, a partir de la evolución temporal, la velocidad del paquete del evento de viento; y

estimar el tiempo de llegada basado en la velocidad del paquete.

40 3. El método de la reivindicación 1, comprendiendo la etapa de propagación espaciotemporal, para cada punto temporal de la serie temporal, optimizar la concordancia entre (a) las mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente, asociadas con el punto temporal, según se propaga al siguiente punto temporal de la serie de tiempo y (b) las mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente, asociadas con el siguiente punto de tiempo, según lo medido.

4. El método de la reivindicación 1, que comprende, además:

45 extraer, a partir de la evolución temporal, (a) un mapa de campo de viento de los valores actuales del campo de viento volumétrico en una segunda superficie geométrica ubicada en la estructura aeromecánica, y (b) al menos un mapa de campo de viento de valores futuros del viento volumétrico campo asociado con el evento de viento en la segunda superficie geométrica de la estructura aeromecánica, para proporcionar al menos una porción de los datos de control de prealimentación.

5. El método de la reivindicación 1, que comprende, además:

50 en la etapa de evaluar, determinar el tipo de evento de viento a partir del al menos un punto temporal de la evolución del tiempo;

en la etapa de seguimiento, seguir la velocidad del viento del evento de viento para determinar una velocidad del viento estimada del evento de viento al llegar a la estructura aeromecánica;

calcular la desviación de la velocidad del viento estimada de una velocidad del viento normal predefinida; y

5 cuantificar, en base a la desviación y al efecto del impacto del tipo de evento de viento en la estructura aeromecánica, la severidad del impacto del evento de viento en la estructura aeromecánica.

6. El método de la reivindicación 5, que comprende, además:

en la etapa de comunicación, comunicar, a la estructura aeromecánica, el tiempo de llegada, el tipo y una métrica de severidad que indique la severidad; y

10 ajustar el funcionamiento de la estructura aeromecánica de acuerdo con el tiempo de llegada, el tipo y la métrica de severidad.

7. El método de la reivindicación 1, comprendiendo la etapa de escanear repetidamente:

escanear repetidamente la superficie geométrica tridimensional, con el lidar colocado en la estructura aeromecánica, para obtener la serie de tiempo de las mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente como mediciones de la velocidad del viento a lo largo de la línea de visión del haz del lidar.

15 8. El método de la reivindicación 7, comprendiendo la etapa de escanear repetidamente escanear repetidamente una superficie cónica, que tiene un vértice en el lidar, para obtener la serie de tiempo de las mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente.

20 9. El método de la reivindicación 7, siendo la estructura aeromecánica una aeronave, y teniendo el evento de viento un componente de velocidad predominantemente ortogonal a la dirección de desplazamiento de la aeronave, comprendiendo la etapa de escanear repetidamente escanear repetidamente tanto una superficie predominantemente orientada de manera vertical como una superficie predominantemente orientada de manera horizontal para obtener la serie de tiempo de las mediciones de la velocidad del viento distribuidas espacialmente.

10. Un sistema para predecir la llegada de un evento de viento a una estructura aeromecánica, que comprende:

25 un lidar para escanear repetidamente una superficie geométrica tridimensional en un volumen atmosférico que se mueve hacia la estructura aeromecánica para medir una serie de tiempo de mediciones de velocidad del viento distribuidas espacialmente en la superficie geométrica tridimensional, teniendo la superficie geométrica tridimensional una ubicación fija con respecto a la estructura aeromecánica, caracterizado por que el sistema comprende, además:

30 un módulo de identificación de eventos de viento para (a) propagar espaciotemporalmente cada una de las mediciones de la superficie de la velocidad del viento temporal y espacialmente de una manera mutuamente consistente, de modo que se asegure una consistencia óptima entre los diferentes puntos de tiempo de las series de tiempo para determinar una evolución en el tiempo del campo de viento volumétrico total asociado con el volumen atmosférico (750), y (b) evaluar al menos un punto temporal de la evolución del tiempo para detectar el evento de viento;

35 un módulo de seguimiento para, antes de la llegada del evento de viento a la estructura aeromecánica, rastrear el evento de viento durante al menos una porción de la evolución del tiempo para estimar el tiempo de llegada del evento de viento a la estructura aeromecánica; y

una interfaz para comunicar datos de control de prealimentación que permite el ajuste de la estructura aeromecánica en previsión del evento de viento, incluyendo los datos de control de prealimentación al menos la hora de llegada,

40 estando configurado el módulo de identificación de eventos de viento para, en la etapa de propagación espaciotemporal, resumir la serie de tiempo de la velocidad del viento distribuida espacialmente como una serie de tiempo correspondiente de mapas de superficie de parámetros de viento, indicando cada uno de los mapas de superficie de parámetros de viento al menos un parámetro de campo de viento para una pluralidad de sectores, estando cada uno de los sectores asociado con varias mediciones individuales de la velocidad del viento;

en la etapa de evaluar, evaluar al menos uno de los mapas de superficie de parámetros de viento para detectar el evento de viento y determinar el tipo de evento de viento; y

45 en la etapa de seguimiento, seguir la propagación del evento de viento a través de al menos una porción de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento para estimar el tiempo de llegada; y el módulo de identificación de eventos de viento está configurado además para:

50 determinar, a partir de la serie temporal de mapas de superficie de parámetros de viento, (a) un mapa de parámetros de viento de los valores actuales del al menos un parámetro de campo de viento en una segunda superficie geométrica ubicada en la estructura aeromecánica, y (b) al menos mapa de campo de viento de valores futuros del al menos un parámetro de campo de viento asociado con el evento de viento en la segunda superficie geométrica, para

proporcionar datos de control de prealimentación que permitan el ajuste de la estructura aeromecánica en previsión del evento de viento.

5 11. El sistema de la reivindicación 10, estando el lidar configurado para escanear repetidamente una superficie de roseta que se expande radialmente para obtener la serie temporal de mediciones de velocidad del viento distribuidas espacialmente a partir de mediciones del viento en la superficie de roseta que se expande radialmente, teniendo la superficie de roseta que se expande radialmente un vértice en el lidar.

10 12. El sistema de la reivindicación 10, estando configurado el módulo de identificación de eventos de viento para determinar el tipo de evento de viento a partir de al menos una de las mediciones de velocidad del viento distribuidas espacialmente, comprendiendo el sistema además un módulo de determinación de severidad para generar, al menos en base al tipo, una métrica de severidad que indica la severidad del efecto del evento de viento en la estructura aeromecánica.

15 13. El sistema de la reivindicación 12, que incluye además (a) al menos un primer parámetro que caracteriza al menos una propiedad respectiva de la estructura aeromecánica y (b) al menos un segundo parámetro que caracteriza la condición normal del viento, estando configurado el módulo de determinación de severidad para utilizar el al menos un primer parámetro y el al menos un segundo parámetro para generar la métrica de gravedad.

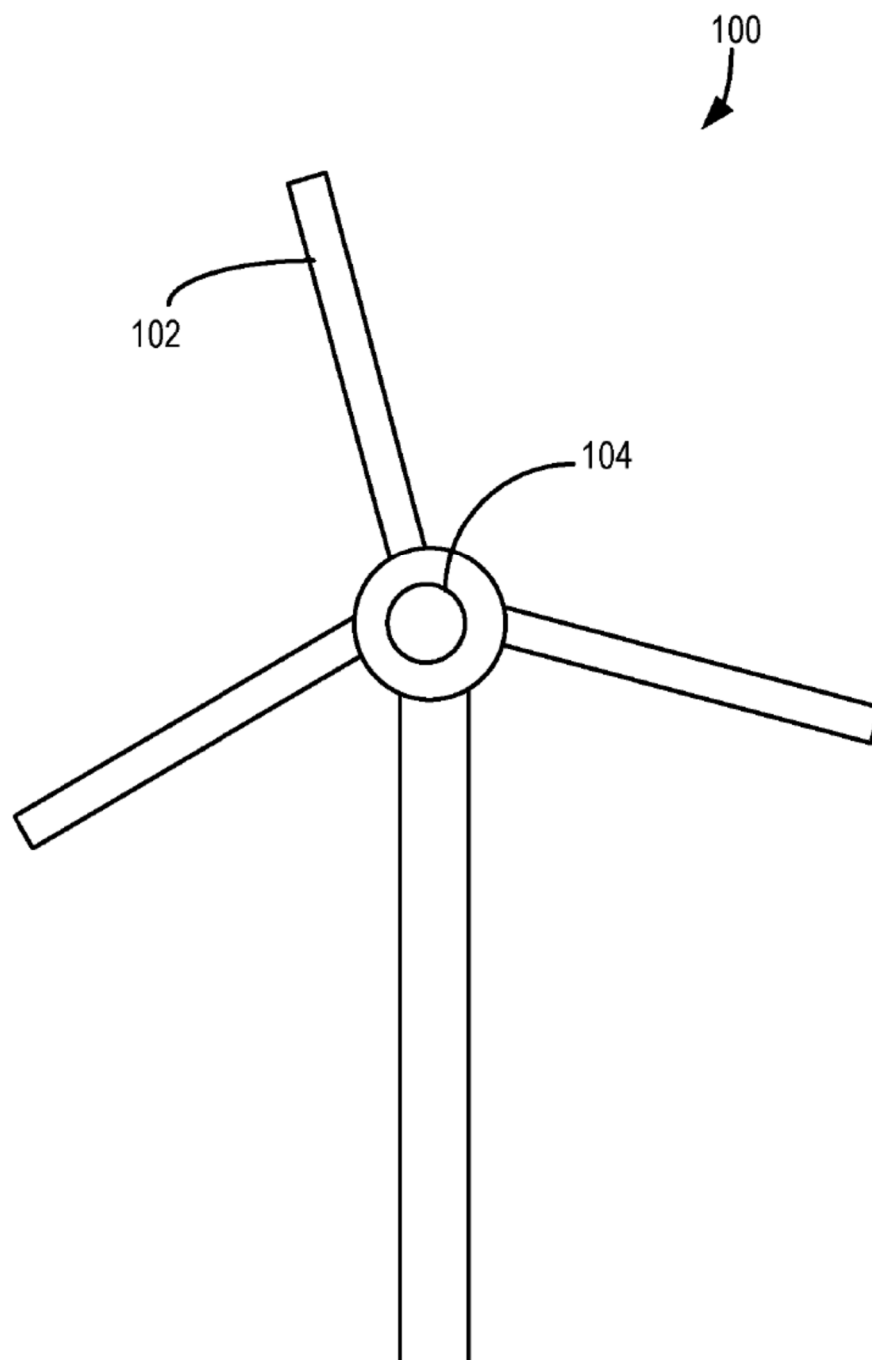


FIG. 1

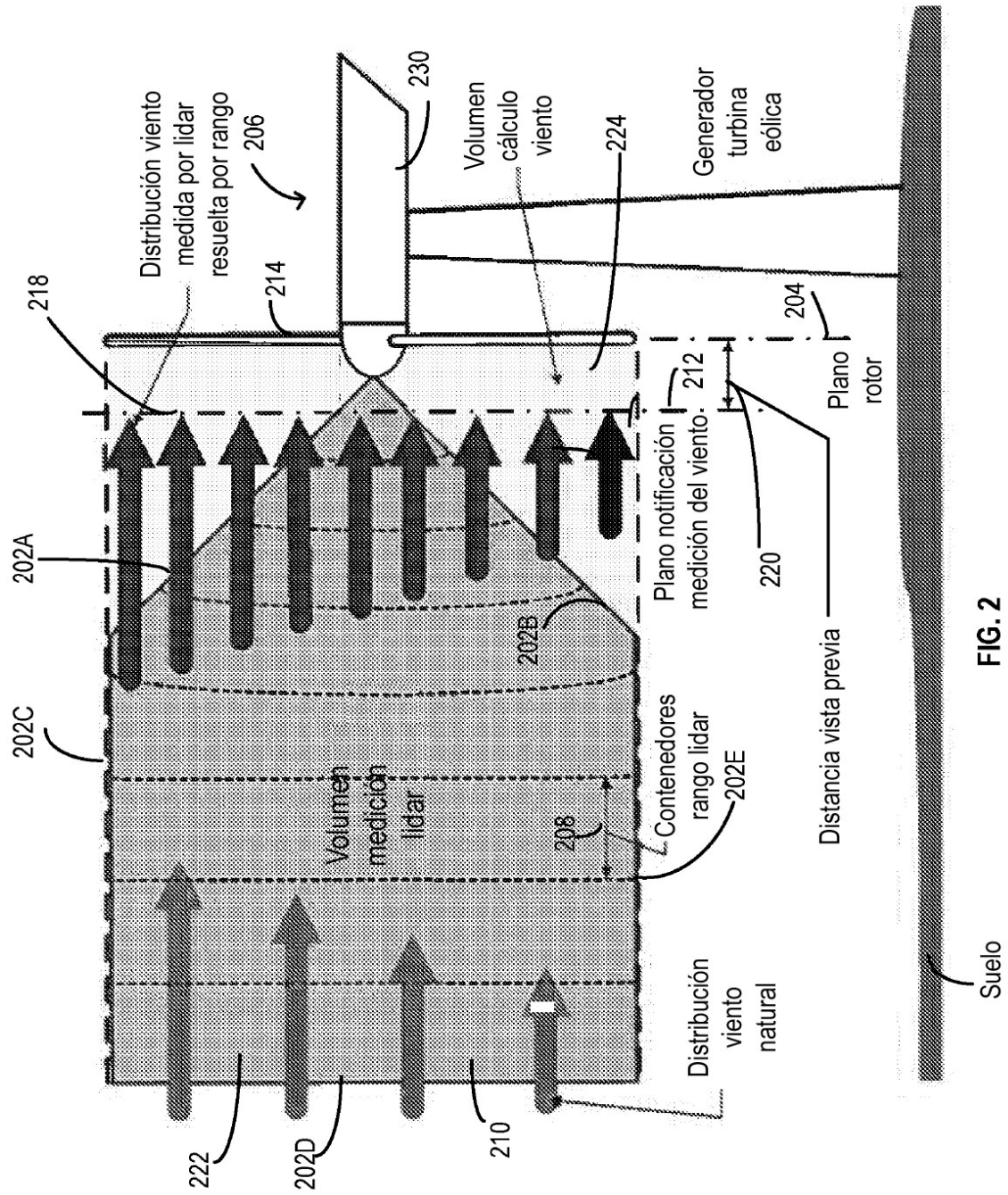


FIG. 2

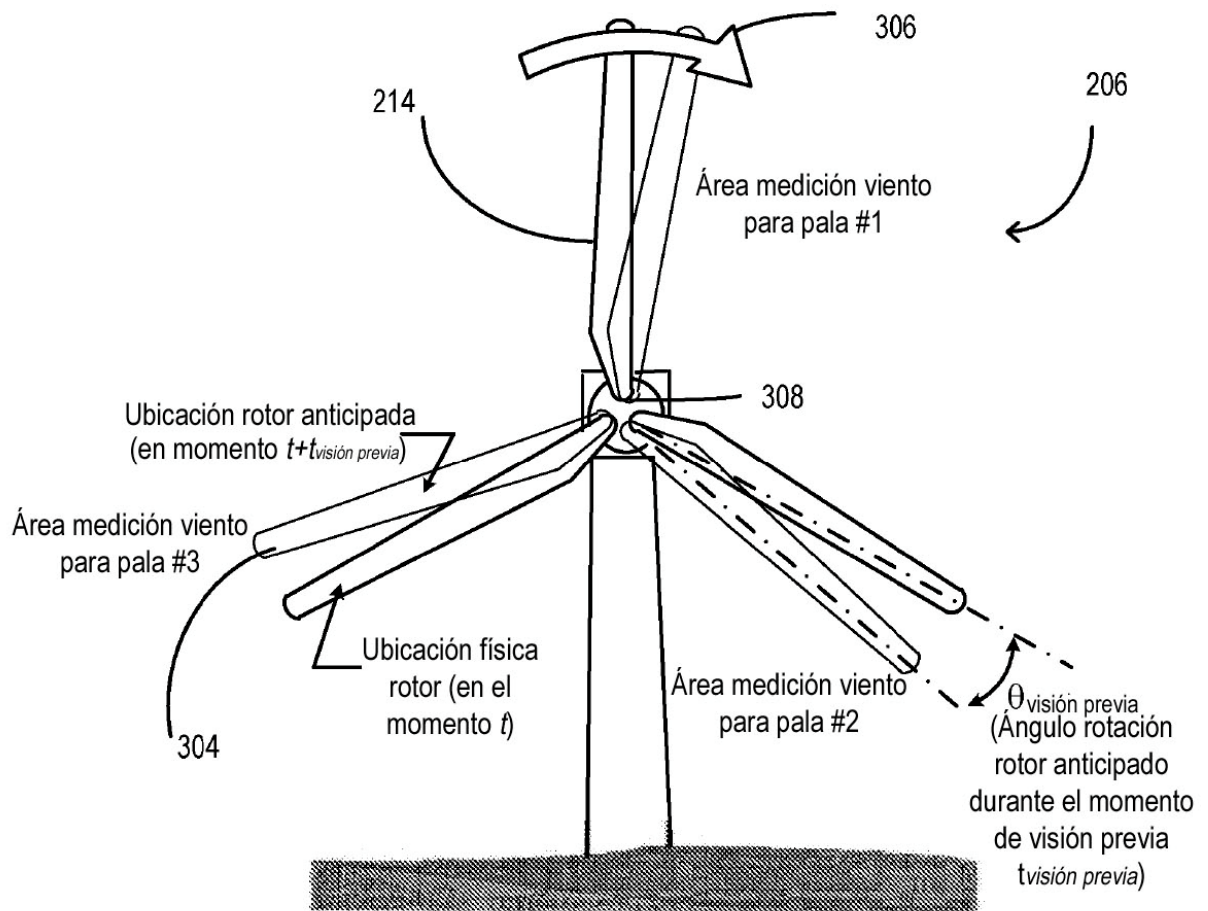


FIG. 3

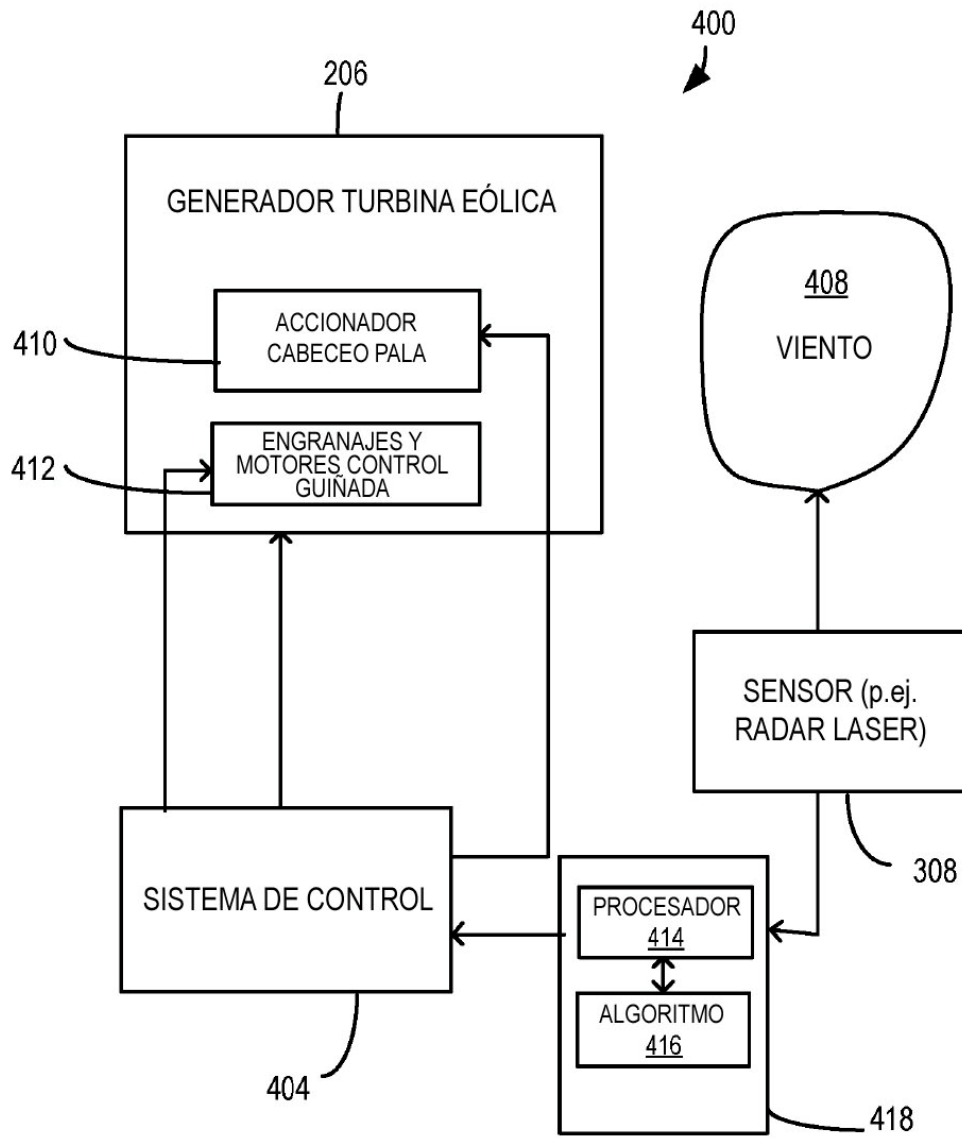


FIG. 4

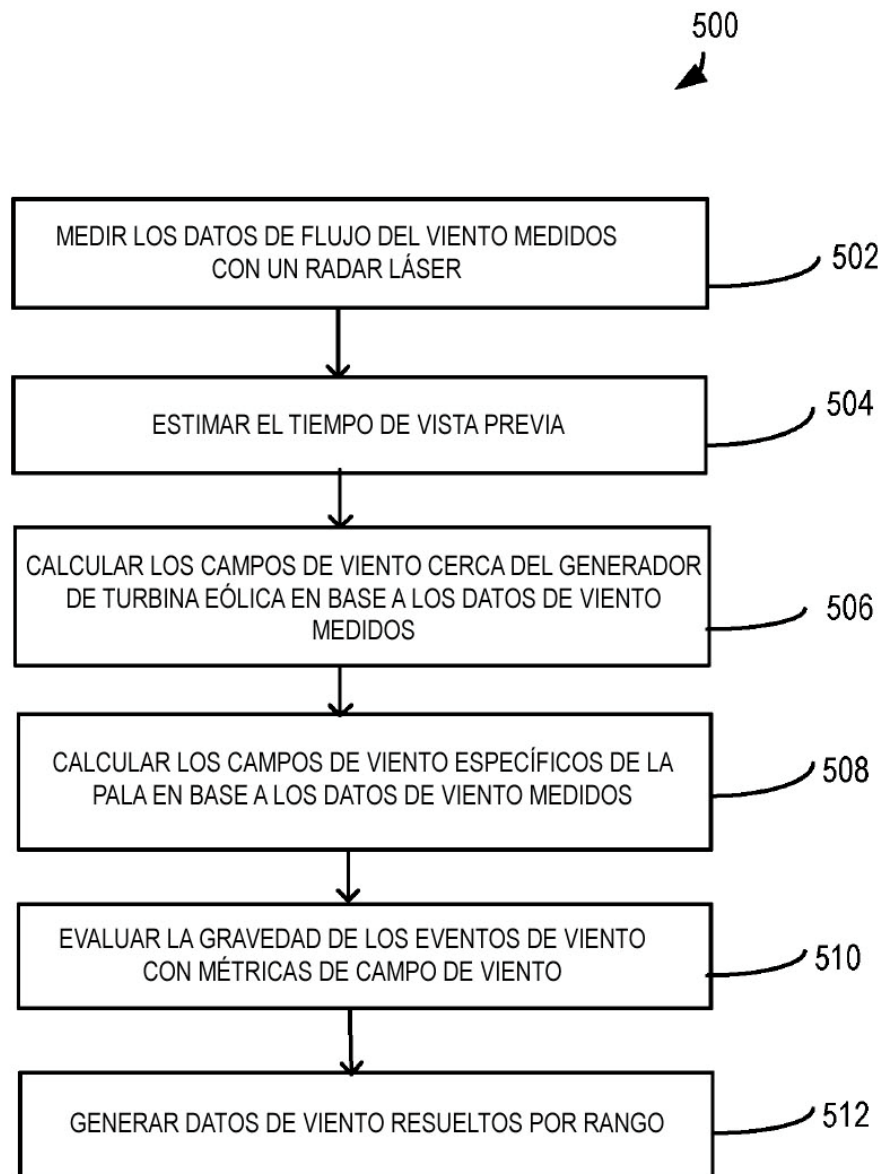


FIG. 5

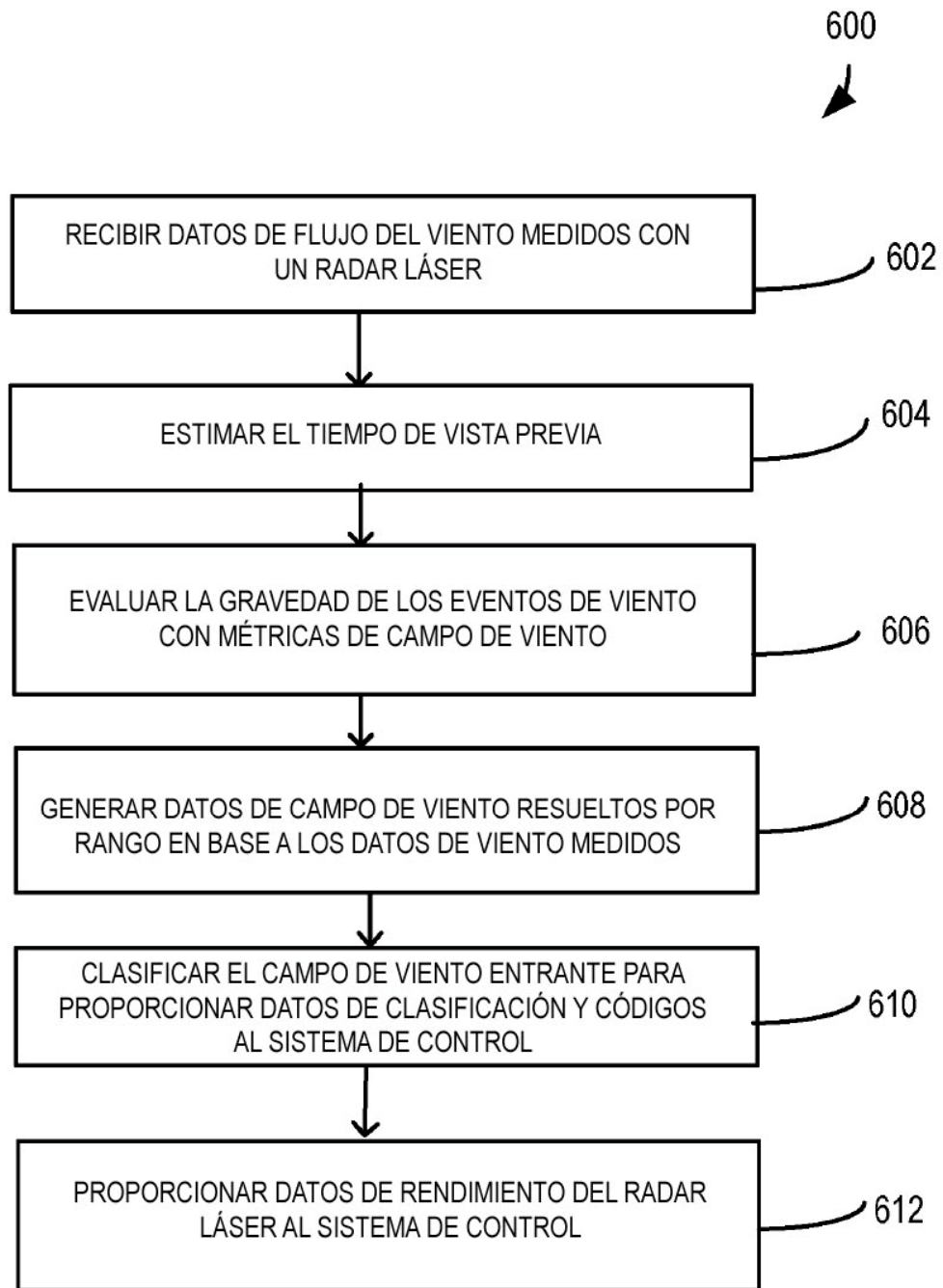


FIG. 6

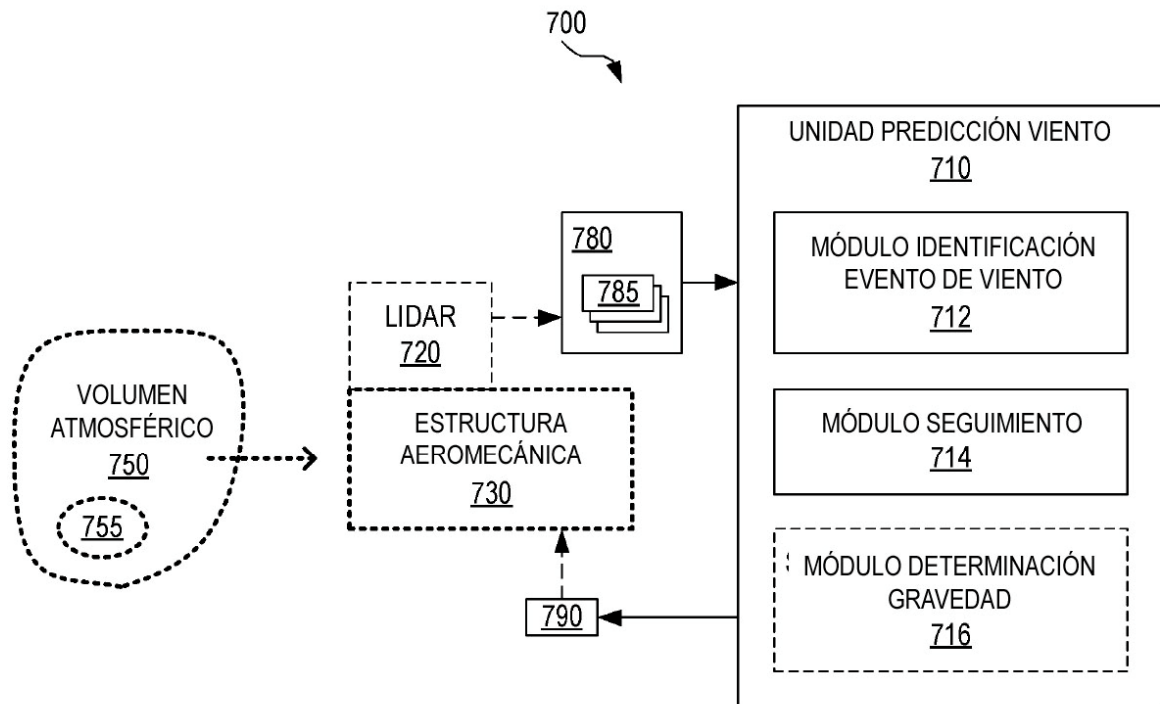


FIG. 7

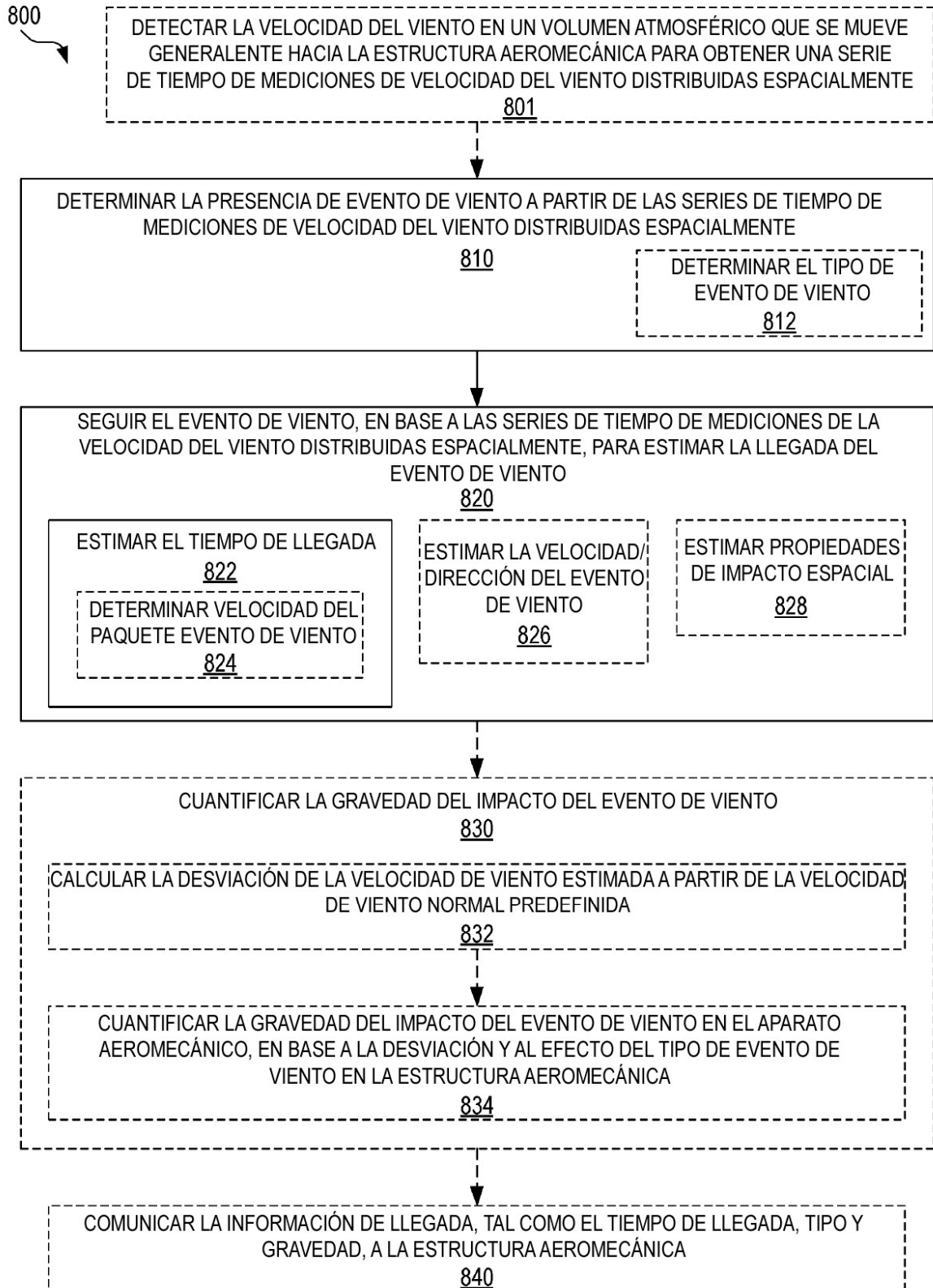
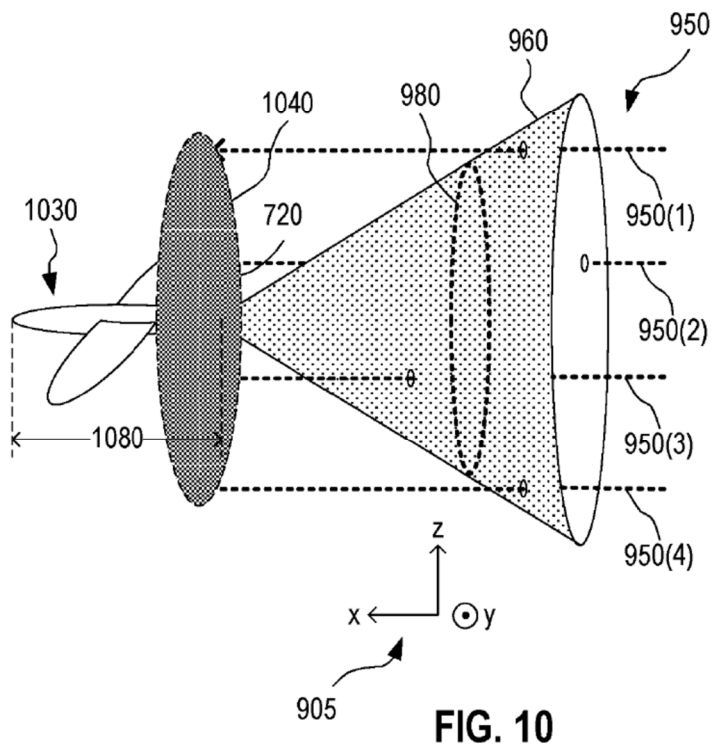
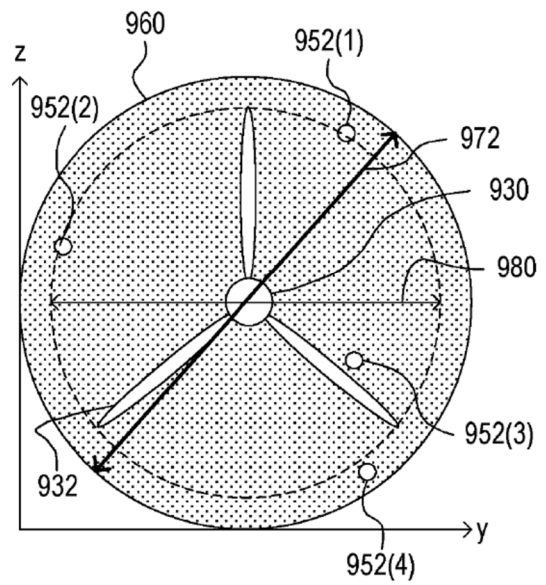
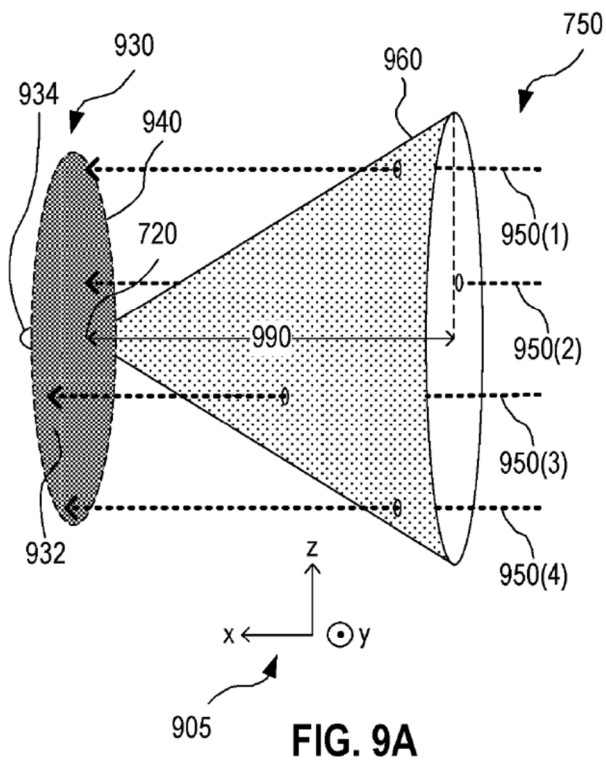


FIG. 8



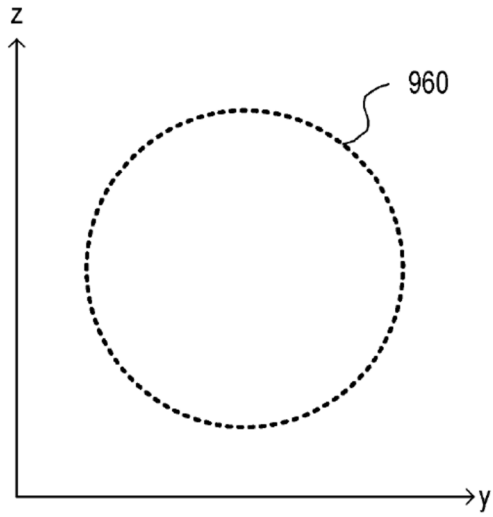


FIG. 11A

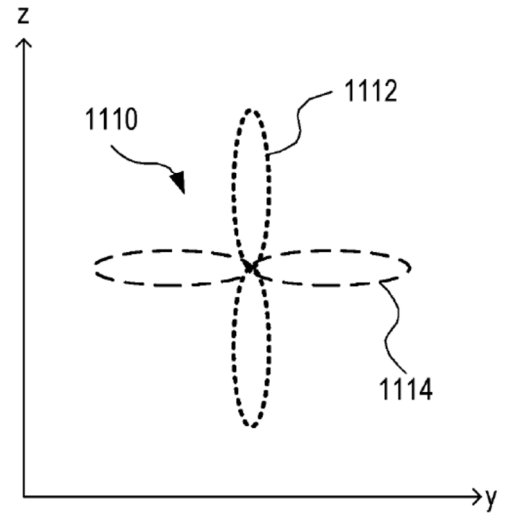


FIG. 11B

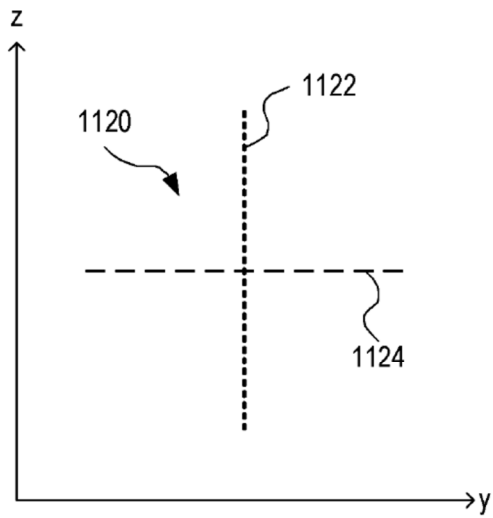


FIG. 11C

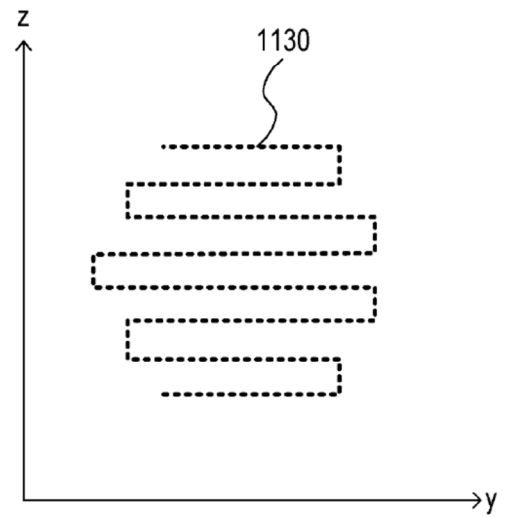


FIG. 11D

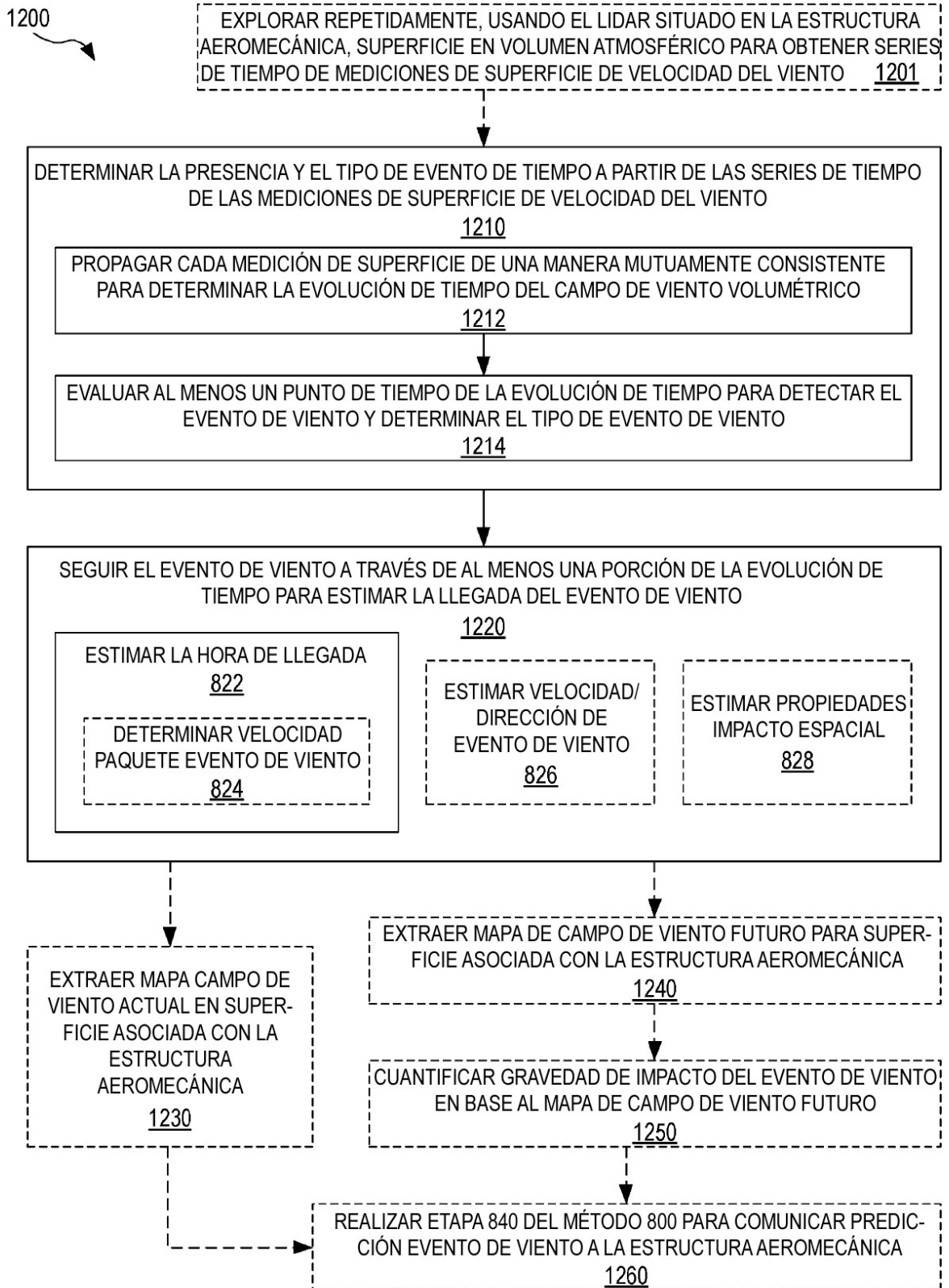
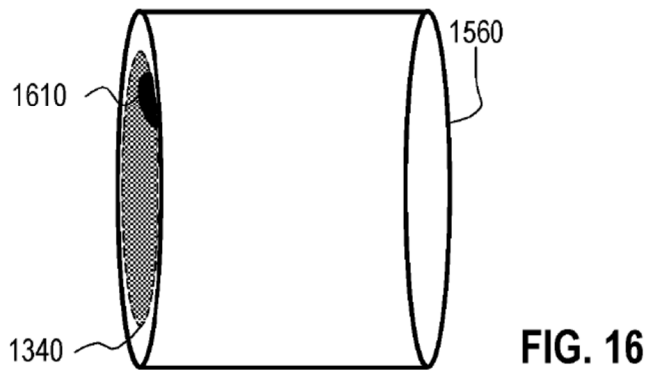
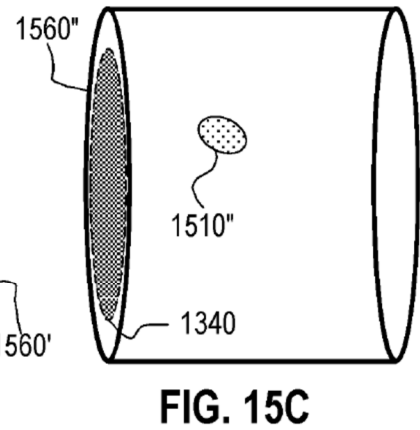
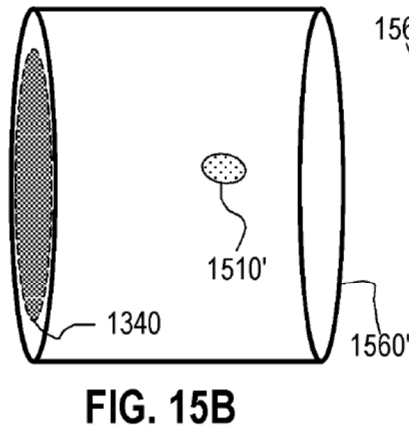
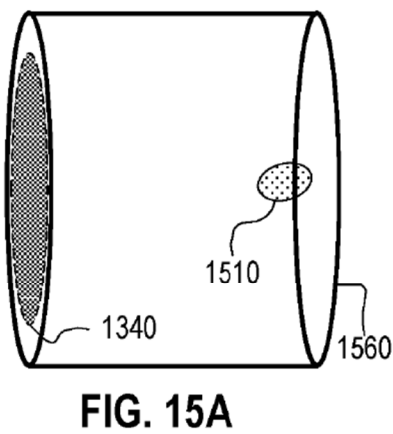
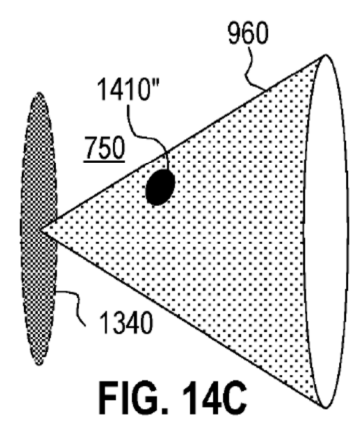
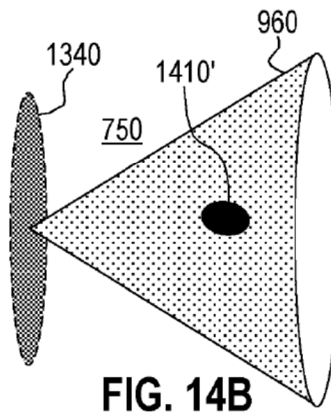
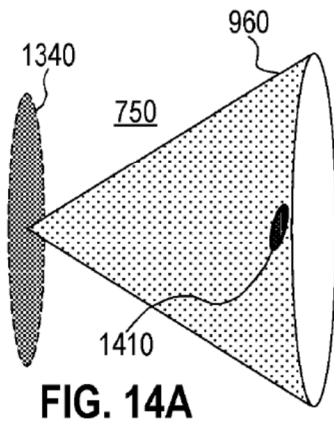
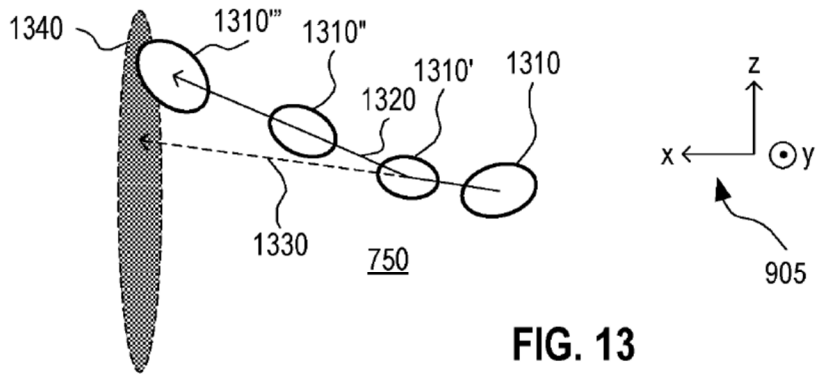


FIG. 12



1700

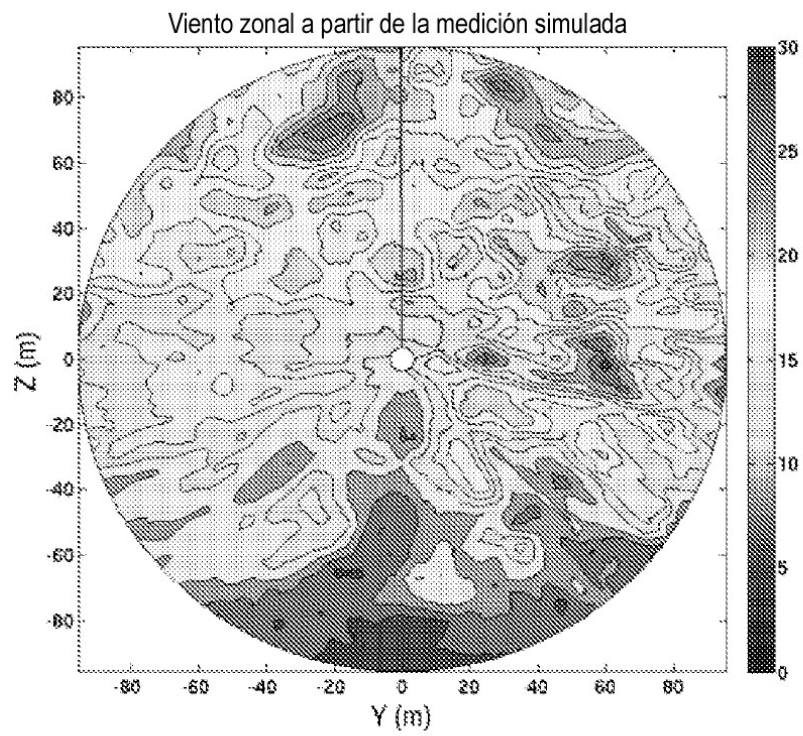


FIG. 17A

1710

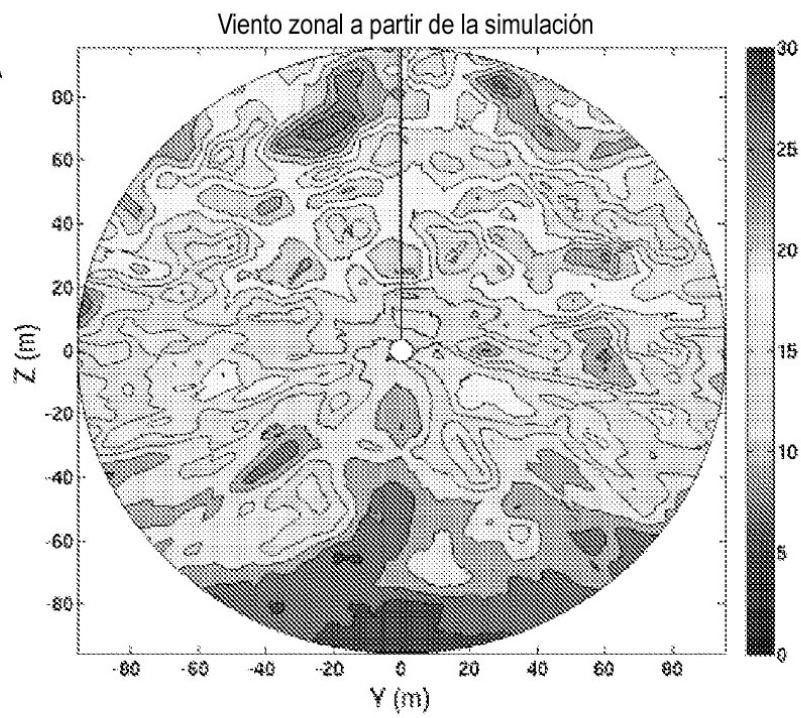
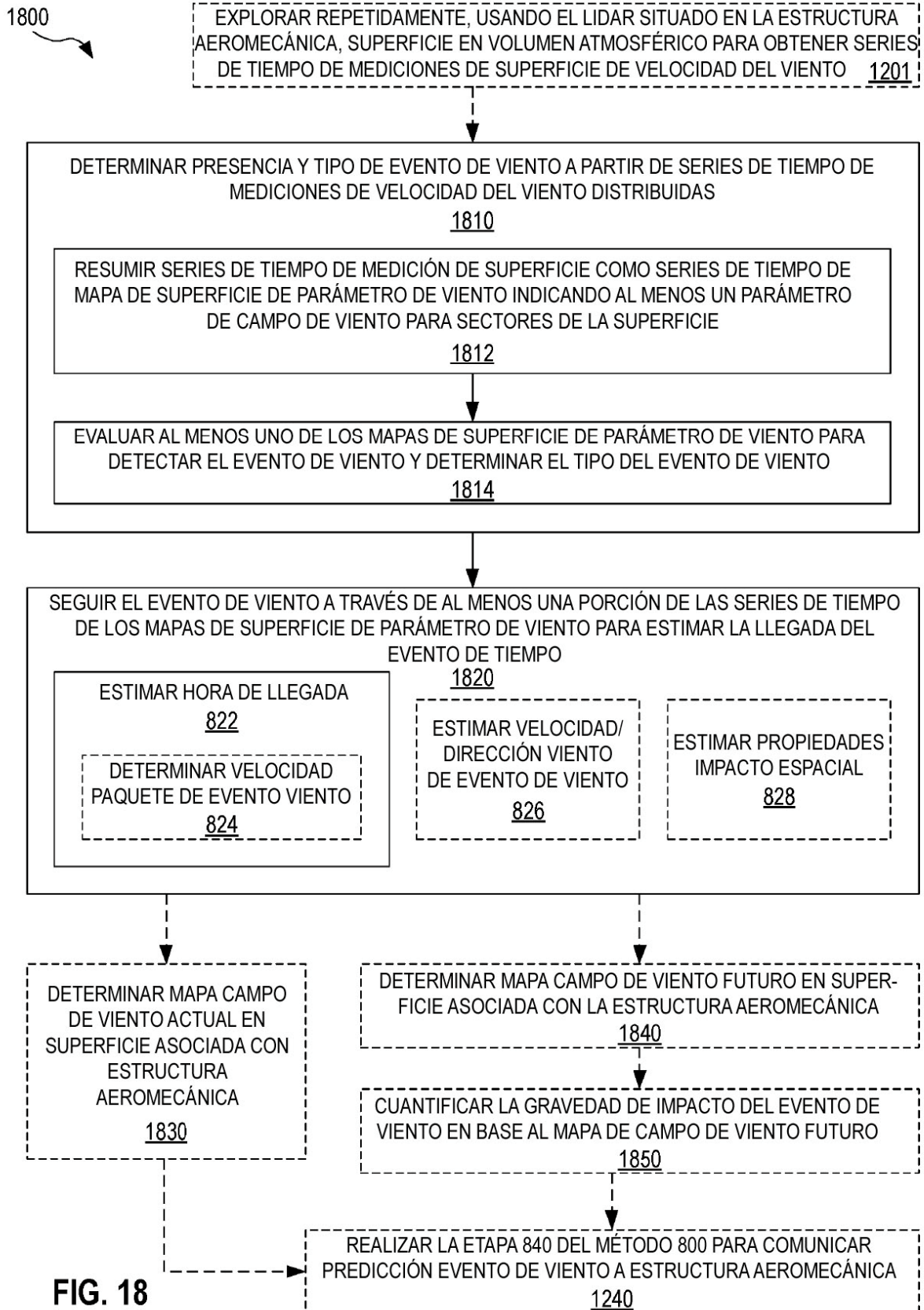
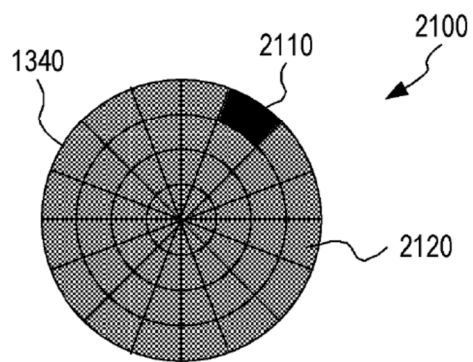
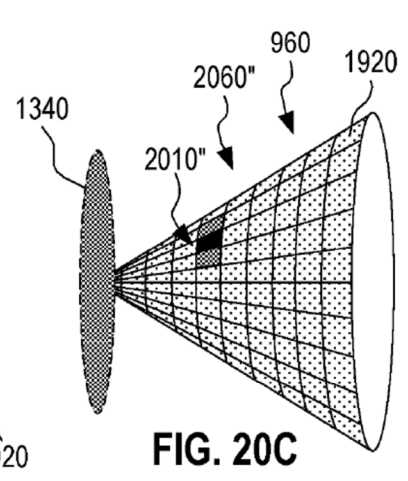
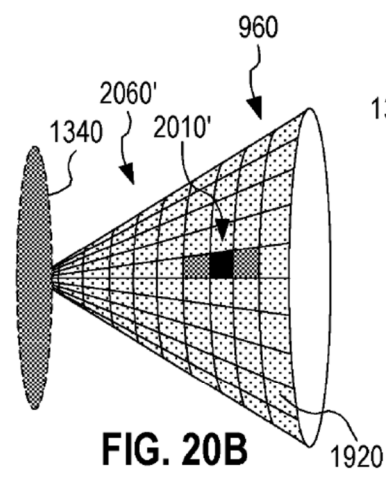
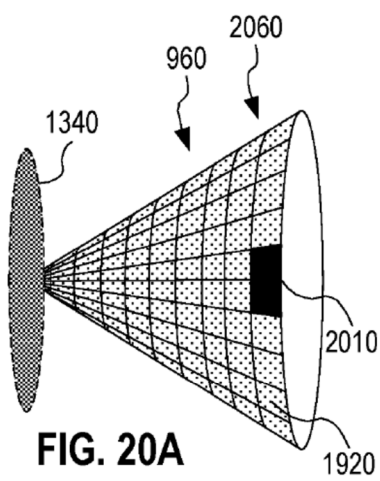
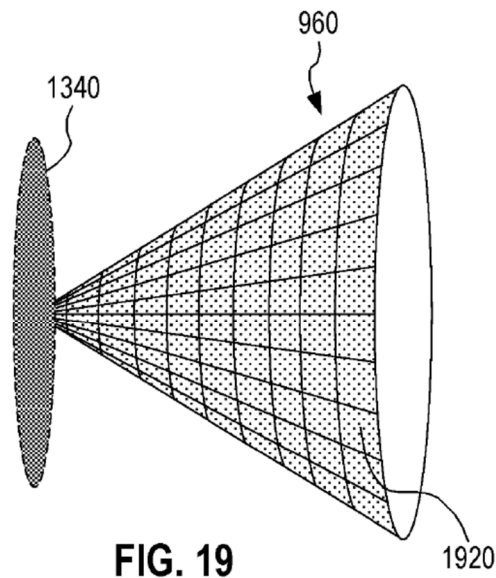


FIG. 17B





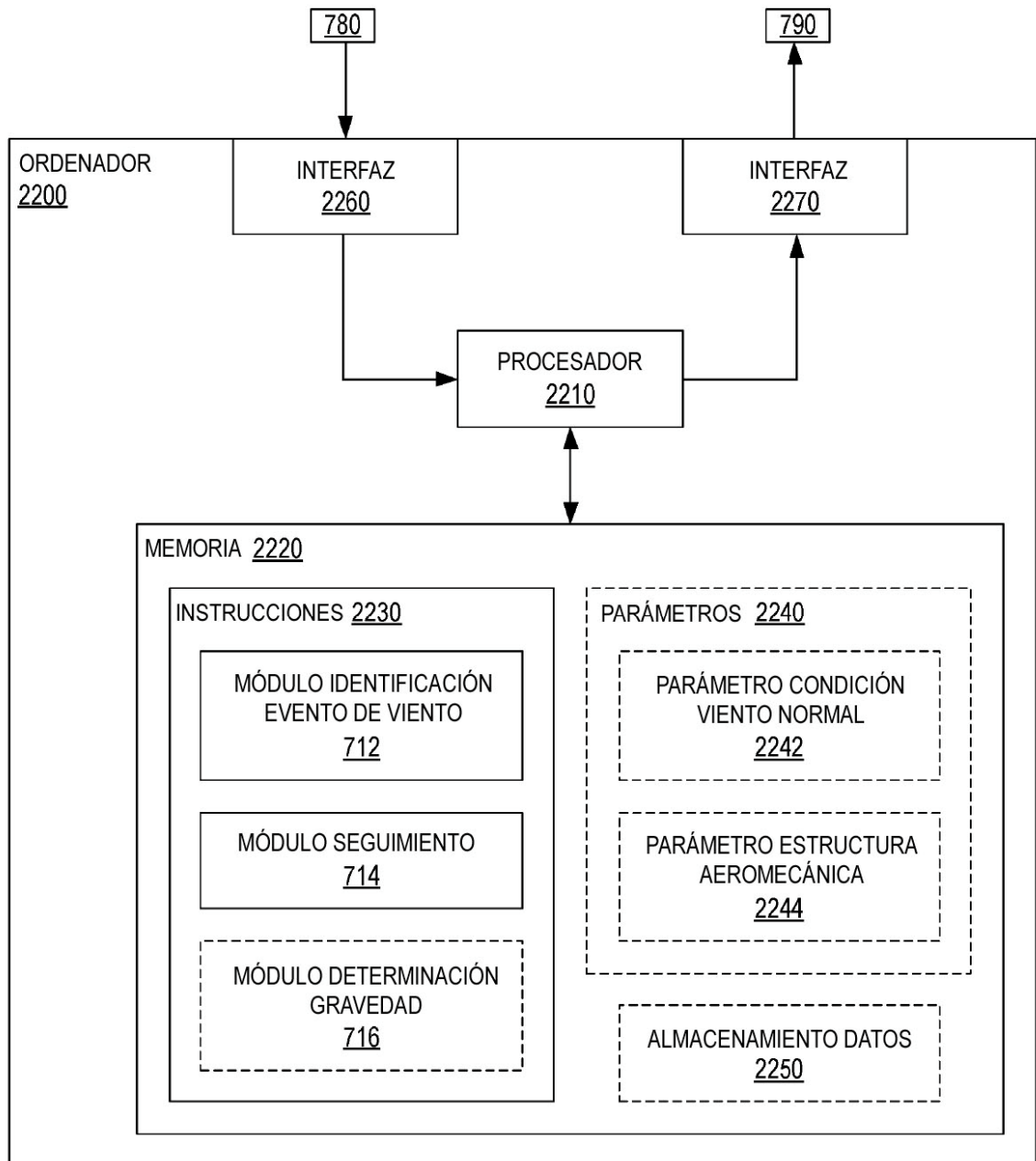
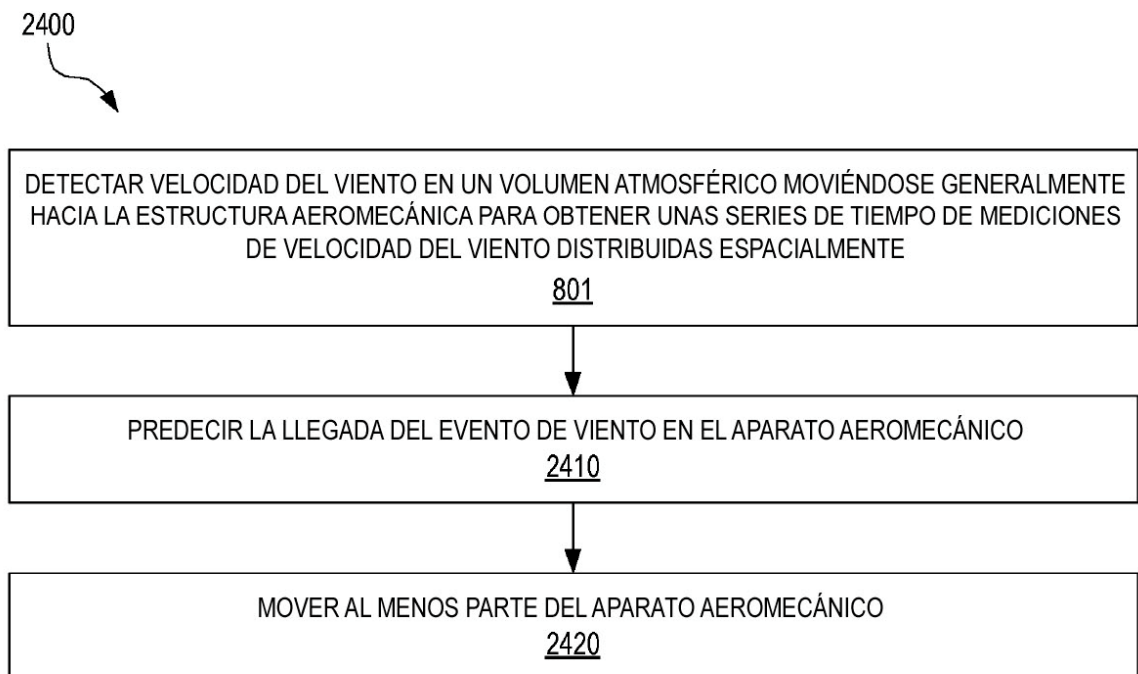
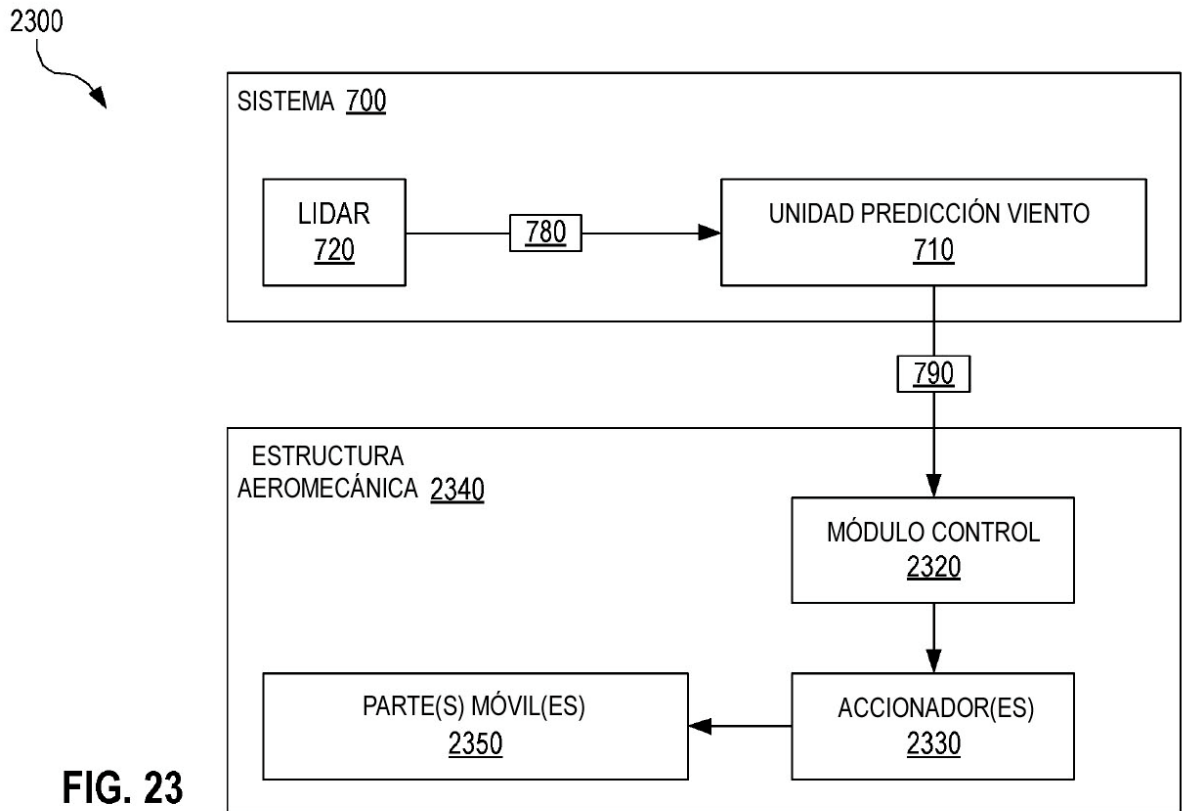


FIG. 22



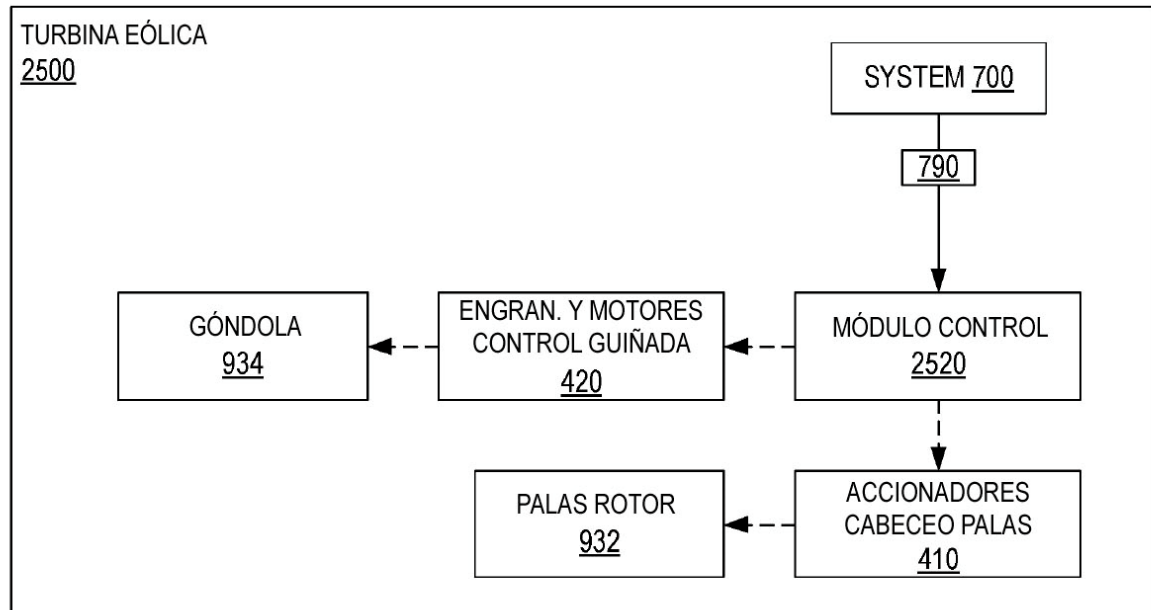


FIG. 25

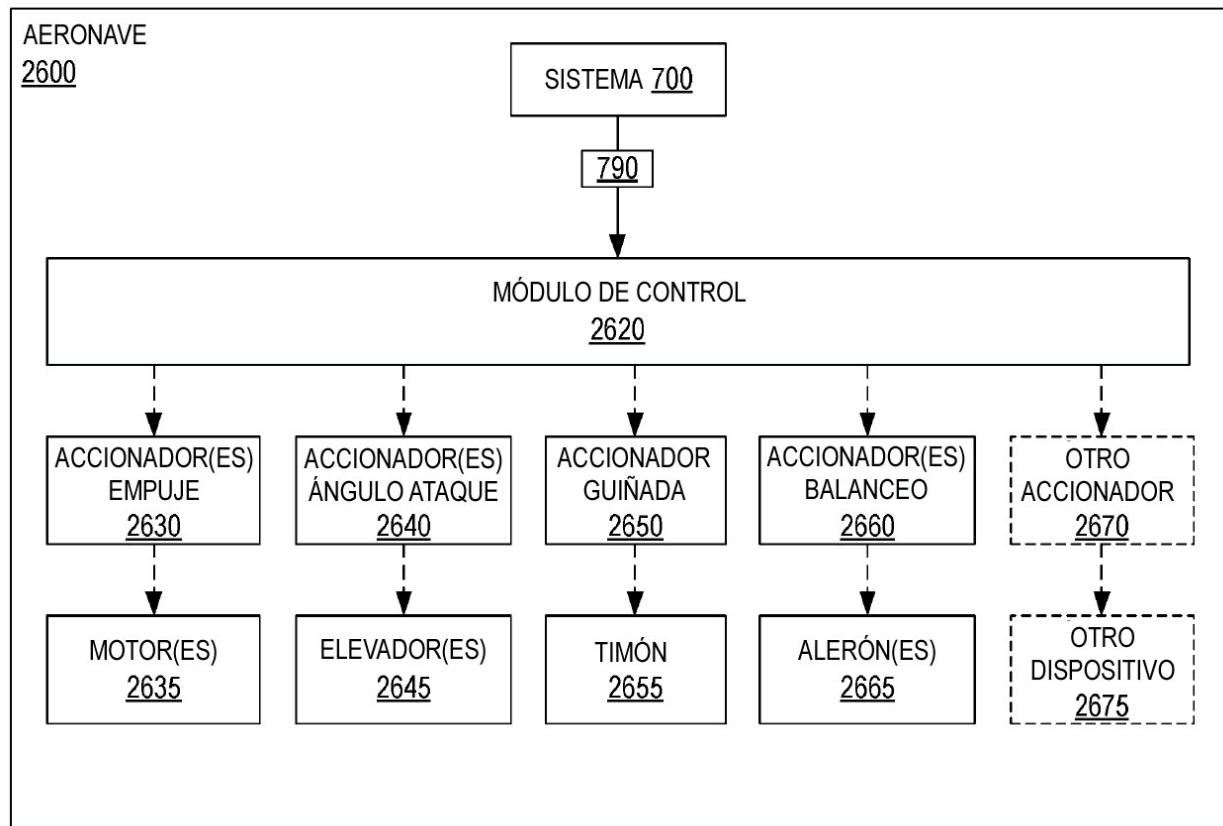


FIG. 26

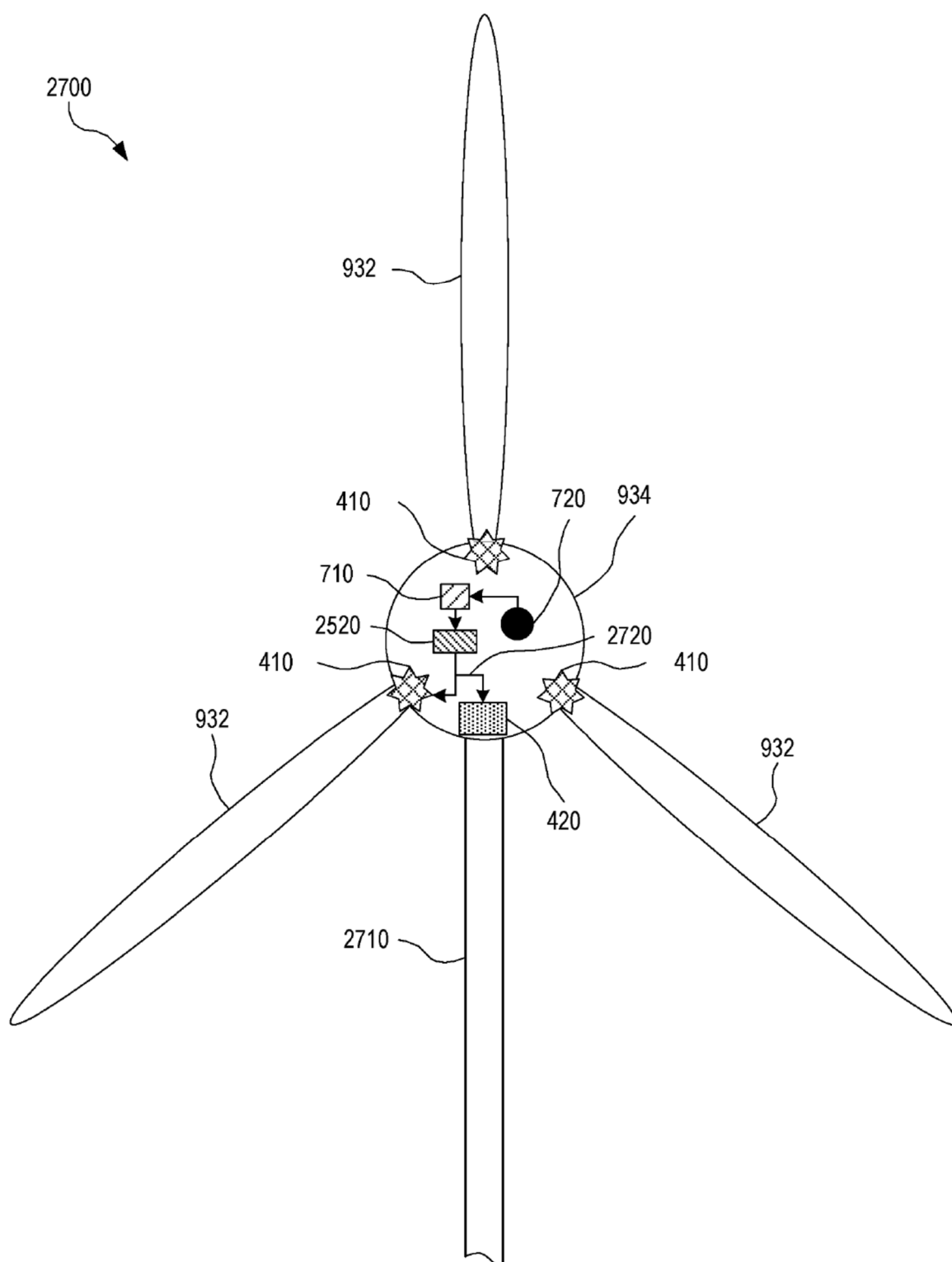


FIG. 27

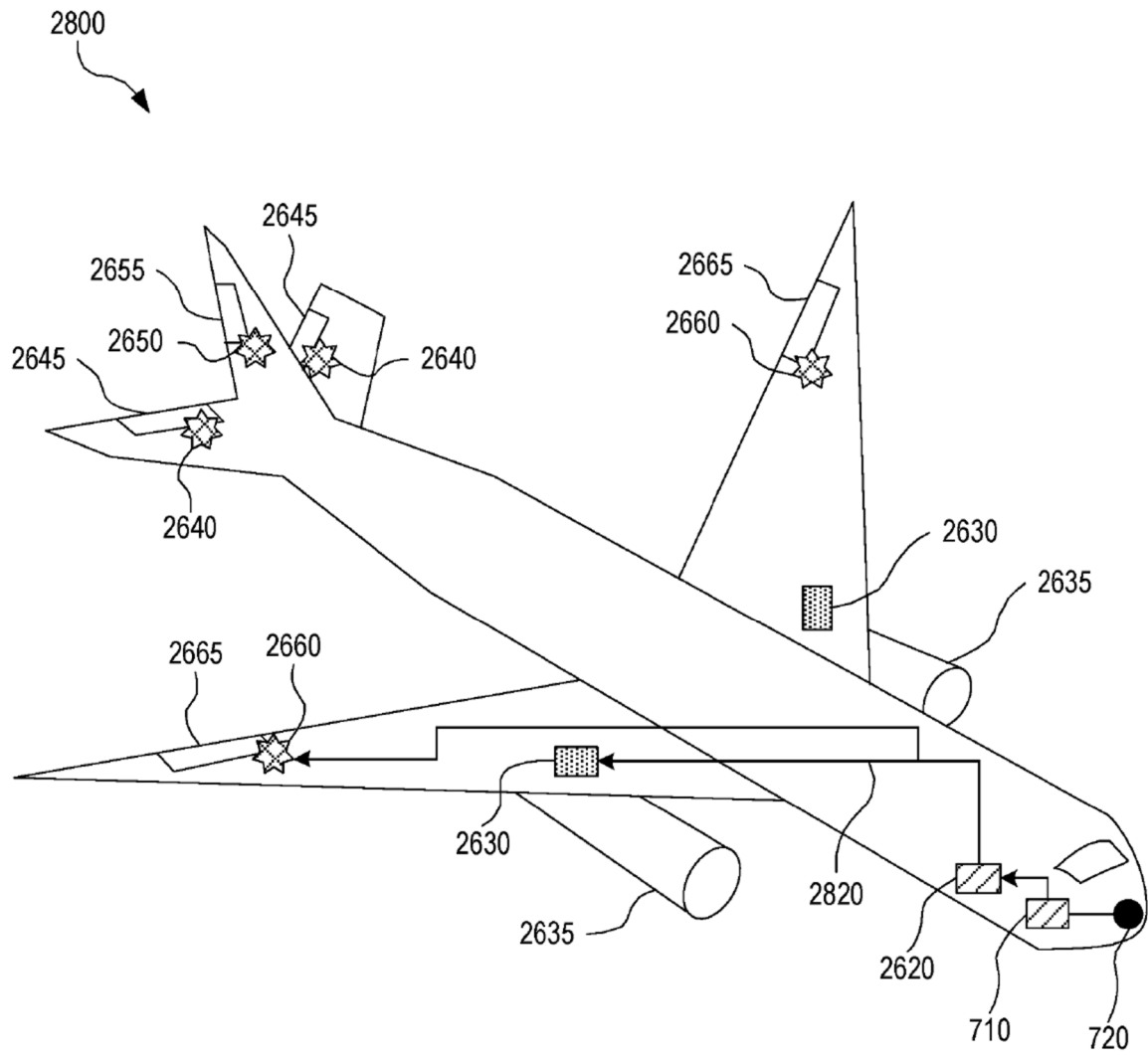


FIG. 28