

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 573 288**

51 Int. Cl.:

F03D 80/00 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

G01S 7/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.06.2013** **E 13731676 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.04.2016** **EP 2864632**

54 Título: **Detección de vibración de palas de turbinas eólicas y calibración de radar**

30 Prioridad:

26.06.2012 DK 201270363

26.06.2012 US 201261664175 P

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

07.06.2016

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

VANGEN, KNUT;

MEUM, ERIK y

PLEYM, JAN ROAR

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 573 288 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

Detección de vibración de palas de turbinas eólicas y calibración de radar

Campo de la invención

5 Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un sistema o aparato y a un procedimiento correspondiente para la detección de vibraciones de palas de rotor de turbinas eólicas.

Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a un procedimiento para realizar el diagnóstico y la calibración en una red de antenas.

Antecedentes de la invención

10 La figura 1 ilustra una turbina eólica 1 típica; La turbina eólica comprende una torre de turbina eólica 2 sobre la que se monta una góndola de turbina eólica 3. Sobre un buje 6 está montado un rotor de turbina eólica 4 que comprende al menos una pala de turbina eólica 5. El buje 6 está conectado a la góndola 3 por medio de un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte delantera de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la figura 1 puede ser un modelo pequeño destinado a un uso doméstico o de utilidad ligera, o puede ser un modelo grande, tal como los que se utilizan en la generación de electricidad a gran escala o en un parque eólico, por ejemplo. En el último caso, el diámetro de las palas podría ser tan grande como de 100 metros o más.

En relación con un primer aspecto de la invención, como la turbina eólica es sometida a impulsos del viento, u otras condiciones meteorológicas, pueden establecerse oscilaciones en las palas del rotor, y las vibraciones suceden dentro y fuera del plano de rotación del rotor. Es deseable monitorizar estas vibraciones, ya que una vibración excesiva puede causar daños a las palas, al buje del rotor o a otros componentes estructurales.

20 Los procedimientos existentes para medir tales vibraciones dependen de acelerómetros o dispositivos similares montados directamente sobre o dentro de la pala, o en el buje de la turbina eólica. Tales disposiciones son difíciles de mantener debido a la dificultad para acceder a los sensores, y a la dificultad de proporcionar rutas de comunicación para los sensores para devolver datos a una unidad de procesamiento central. Un ejemplo de un procedimiento de la técnica anterior se puede encontrar, por ejemplo, en el documento US 2008/0101930A1.

25 Hemos apreciado que sería deseable proporcionar un sistema alternativo y un procedimiento para la detección de las vibraciones de la pala.

En relación con realizaciones de un segundo aspecto de la invención, anteriormente se han propuesto sistemas de radar para evitar la colisión entre una aeronave y un obstáculo en tierra. Por ejemplo, el documento EP-A-1.486.798 describe un sistema de prevención de colisiones de obstáculos (OCAS) que comprende un sistema de radar que explora continuamente un área de cobertura para aeronaves en movimiento. Al detectar una aeronave dentro del área de cobertura, el radar está adaptado para seguir a la aeronave como un objetivo definido. El curso, la altura y la velocidad del objetivo se calculan, y si los parámetros son tales que existe un peligro de colisión de la aeronave con el obstáculo, el sistema se activa para emitir una señal de aviso al piloto de la aeronave que se aproxima.

30 El sistema OCAS descrito en el documento EP-A-1.486.798 incluye una o más unidades de campo que están montadas en, o adyacentes al obstáculo u obstáculos de los cuales se debe advertir. Cada unidad de campo incorpora el sistema de radar descrito anteriormente y uno o más dispositivos de advertencia para la emisión de señales de advertencia a las aeronaves que se aproximan. Una unidad central de procesamiento procesa la información del sistema de radar y controla los dispositivos de advertencia sobre la base de la información procesada. En realizaciones preferidas, el dispositivo de aviso comprende una luz de advertencia que se ilumina después de la detección de una aeronave. Además, o como alternativa a la luz de aviso, la unidad de campo puede comprender un dispositivo de alarma de audio, tal como una radio, para emitir señales de alarma acústica para el piloto. Los dispositivos de advertencia son operados con el fin de activar una advertencia a su debido tiempo antes de una posible colisión, de tal manera que el piloto tiene tiempo suficiente para percibir el obstáculo, tomar una acción evasiva y maniobrar lejos del obstáculo.

35 Cada unidad de campo del sistema de prevención de colisiones de obstáculos de un parque eólico está equipada preferiblemente con una antena de radar como se describe en el documento EP-A-1.486.798, que permite la exploración deseada que se va a realizar, como se describió anteriormente. La antena del radar comprende preferiblemente una pluralidad de paneles de la antena montados en un marco, de tal manera que los paneles miran hacia afuera desde el marco en diferentes direcciones. Preferiblemente, los paneles de antena están dispuestos como los lados de un octágono.

40 Cada panel de antena comprende una pluralidad de elementos de antena que se seleccionan según la frecuencia, los requisitos de cobertura vertical, etc. Con la disposición de los paneles de antena descrita anteriormente, los elementos de antena forman una matriz que se extiende a lo largo tanto un eje horizontal (azimut) como un eje vertical (elevación) para proporcionar la cobertura deseada del radar. En el documento WO-A-2011/085237 se describe una disposición de antena de radar adecuada para su uso en las unidades de campo de la presente

invención.

Hemos podido apreciar que sería conveniente ser capaz de realizar comprobaciones de diagnóstico en un sistema de red radares similares a las utilizadas en la disposición OCAS.

Sumario de la invención

- 5 Un primer aspecto de la invención se define en las reivindicaciones independientes 1 y 16, a las que se hace referencia a continuación. En las reivindicaciones dependientes se presentan características preferidas.

Las realizaciones del primer aspecto de la invención pueden proporcionar una turbina eólica, que tiene una torre de turbina eólica y al menos una pala giratoria, y que comprende además un sistema para la medición de las vibraciones de las palas del rotor de dicha turbina eólica. El sistema comprende al menos una unidad de radar Doppler configurada operativamente para emitir y recibir señales de radar, estando la unidad de radar montada en la torre de la turbina eólica en una posición por encima de la posición más baja de al menos una pala, estando la unidad de radar situada para medir las reflexiones de una señal de radar emitida desde la pala de la turbina. Una unidad de procesamiento está configurada para recibir los datos de medición desde la unidad de radar y para determinar, mediante análisis de desplazamiento Doppler en las señales de radar recibidas respecto a las señales transmitidas debido al movimiento de la pala hacia o alejándose de la torre de turbina, la velocidad de la pala hacia o alejándose de la torre de la turbina. El uso de una unidad de radar para medir la velocidad de la pala permite realizar una determinación de las vibraciones que se producen en la pala sin necesidad de un sensor interno en la pala. Esto reduce los costes de fabricación y de mantenimiento de las palas, dado que los sensores en las palas no necesitan ser reemplazados, y los sensores situados en la torre son más fáciles de reemplazar en el campo.

20 Preferiblemente, la unidad de radar es una unidad de radar de onda continua de frecuencia modulada (FMCW) que tiene un período de modulación de frecuencia t_1 de duración de tal manera que la pala del rotor, cuando pasa a través del haz del radar, se encuentra dentro de dicho haz durante la duración de al menos dos períodos de modulación de frecuencia. Las unidades de radar FMCW permiten un haz de transmisión continua mediante el uso de componentes seguros y rentables. La configuración del período de modulación de frecuencia para permitir al menos dos exploraciones de frecuencia de la pala que pasa permite obtener la determinación del desplazamiento Doppler debido al movimiento relativo de la pala mediante la comparación de los desplazamientos Doppler entre las exploraciones. El período de modulación de frecuencia puede, por ejemplo, ser de entre 0,5 y 0,01 milisegundos, y más específicamente entre 0,2 y 0,05 milisegundos.

La unidad de procesamiento puede configurarse entonces para procesar los datos medidos de la unidad de radar obtenidos durante un primer período de la modulación de frecuencia y un período de modulación de frecuencia posterior para determinar el desplazamiento Doppler debido al movimiento de la pala hacia o alejándose de la torre de turbina. En particular, la unidad de radar puede medir una respuesta de frecuencia, y la unidad de procesamiento está configurada para procesar las respuestas de frecuencia obtenidas para la primera y posteriores modulaciones de frecuencia y determinar los respectivos perfiles de alcance indicativos del alcance que va desde la unidad de radar a la pala; procesar los perfiles de alcance para obtener la respectiva información de Doppler; y comparar la información de Doppler para determinar la velocidad de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina.

Los perfiles de alcance pueden incluir una pluralidad de acumuladores de alcance, cada uno correspondiente a un conjunto o propagación de alcances. La unidad de procesamiento está configurada para procesar los componentes de frecuencia que caen en los acumuladores de alcance correspondientes a la posición de la pala para obtener la información de Doppler correspondiente a la pala y no a otros objetos que se encuentran en lugares diferentes. El procesamiento de solo aquellas frecuencias correspondientes a la pala, o a los objetos detectados en el alcance de la pala, evita un procesamiento innecesario de los objetos detectados no relacionados.

Preferiblemente, la unidad de procesamiento está configurada para determinar la velocidad del lado de la torre (o lado de succión) y del lado opuesto (el lado de presión) de la pala mediante la identificación de señales/reflexiones recibidos de los lados correspondientes de la pala. La unidad de procesamiento puede procesar los perfiles de alcance para obtener la información de Doppler correspondiente, tanto para el lado de la torre como el lado opuesto de la pala y comparar la información de Doppler para las dos partes de la pala para determinar la velocidad de cada lado de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina. La detección de las velocidades de las dos superficies principales de la pala permite realizar una comparación para determinar si la estructura de la propia pala es variable, siendo éste el caso si la velocidad de uno de los lados es diferente de la velocidad del otro.

Preferiblemente, la unidad de radar se monta en una posición tal que la señal de radar se refleja desde la punta de la pala al pasar por el punto más bajo en su rotación. El control de la punta de la pala, o una parte de la pala en la proximidad de la misma, en lugar de más hacia la raíz de la pala, permite la medición del punto de mayor deflexión probable debido a la vibración.

Se puede utilizar una serie de unidades de radar Doppler, cada una montada en la torre de la turbina. Se pueden disponer varias unidades de radar Doppler alrededor de la circunferencia de la torre de turbina eólica a una altura común. La distribución de las unidades de radar alrededor de la circunferencia permite tomar lecturas en cualquier

posición de guiñada. De manera alternativa o adicional, se pueden disponer una pluralidad de unidades de radar Doppler de forma lineal a lo largo de la longitud de la torre entre el centro de rotación de la pala y la posición más baja de la pala, lo que permite mediciones de la velocidad de la pala en una pluralidad de puntos a lo largo de la longitud de la pala para construir un perfil de velocidad para toda la pala.

- 5 En lugar de proporcionar una pluralidad de unidades de radar Doppler alrededor de la circunferencia de la torre, una unidad de radar se puede montar de forma giratoria sobre la torre, de modo que pueda girar alrededor del eje de la torre. La unidad de radar incluye además un controlador de rotación para controlar la posición de rotación de la unidad de radar sobre el eje de la torre. Preferiblemente, se puede proporcionar un sistema de control de guiñada para hacer girar la góndola de la turbina eólica, y la pala, alrededor del eje de la torre para orientar la pala/el rotor. El controlador de rotación puede acoplarse al sistema de control de guiñada con el controlador de rotación, que es accionable para recibir los datos de guiñada indicativos de la posición de guiñada de la turbina eólica y para controlar la posición de rotación de la unidad de radar para posicionarla orientada sustancialmente perpendicular al plano de rotación de la pala del rotor en respuesta a los datos de guiñada. Mediante el control de la posición circunferencial de la unidad de radar para que coincida con el ángulo de guiñada de la turbina eólica, la unidad de radar puede recibir datos para calcular la velocidad de la pala en cualquier ángulo de guiñada.

La unidad de procesamiento puede estar configurada para emitir una señal de apagado para apagar la turbina eólica cuando la velocidad detectada de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina excede un valor predeterminado.

- 20 La unidad de radar puede incluir una serie de elementos del tipo descrito en relación con un segundo aspecto de la invención. La unidad de radar, por lo tanto, puede incluir una matriz en fase.

- Un procedimiento correspondiente puede proporcionarse para la medición de las vibraciones de la pala del rotor en una turbina eólica que comprende una torre de turbina eólica y al menos una pala giratoria. El procedimiento comprende proporcionar al menos una unidad de radar Doppler configurada operativamente para emitir y recibir una señal de radar montada en la torre de turbina eólica en una posición por encima de la posición más baja de al menos una pala, estando colocada la unidad de radar de manera que pueda medir las reflexiones de una señal de radar emitida desde la pala de la turbina. Las señales del radar se emiten y las reflexiones se reciben desde la pala. El procedimiento incluye además analizar el desplazamiento Doppler de las señales de radar recibidas con relación a las señales transmitidas para determinar la velocidad del movimiento de la pala hacia o alejándose de la torre de turbina.

- 30 Un segundo aspecto de la invención se define en las reivindicaciones independientes 18 y 38, a las que se hace referencia a continuación. En las reivindicaciones dependientes se presentan características preferidas.

- Las realizaciones del segundo aspecto de la invención pueden proporcionar un procedimiento para calibrar un sistema de radar que comprende una pluralidad de elementos de antena dispuestos en una matriz, comprendiendo cada elemento un transmisor y un receptor para transmitir y recibir señales, siendo accionables los elementos de antena para funcionar en un modo de transmisión o un modo de recepción y para ajustar la amplitud y la fase de la señal. El procedimiento comprende activar el modo de transmisión en un primer elemento de antena de la matriz para transmitir una señal y activar el modo de recepción en un segundo elemento de antena de la matriz próximo al primer elemento de antena, siendo seleccionado el segundo elemento de antena para ser colocado con el fin de recibir radiación procedente de un lóbulo lateral del primer elemento de antena. Una determinación se hace entonces en cuanto a si el segundo elemento de antena recibe la señal procedente del primer elemento de radar.

- Preferiblemente, el modo de recepción se activa en al menos otro elemento más de la antena de la matriz, próximo al primer elemento de antena, de manera que el segundo elemento de antena y cada uno de los demás elementos de antena funcionan en modo de recepción, mientras que el primer elemento de radar funciona en modo de transmisión. El procedimiento puede incluir entonces la etapa de determinar la fase relativa y/o la amplitud del segundo elemento de antena y cada uno de los elementos de antena adicionales. Preferiblemente, el procedimiento comprende además seleccionar el segundo elemento de antena y cada uno de los elementos de antena adicionales para ser activados en el modo de recepción, seleccionándose el segundo elemento y cada elemento adicional de tal manera que se encuentren en una posición relativa al primer elemento de antena, de manera que la señal esperada del primer elemento de antena en la posición de los elementos segundo y adicionales es equivalente. Preferiblemente, el segundo elemento y cada uno de los elementos adicionales se seleccionan de tal manera que se encuentran en posiciones en las que pueden recibir la radiación de los lóbulos laterales equivalente desde el primer elemento de radar. El segundo elemento y cada elemento adicional pueden estar situados en lados diferentes del primer elemento, y equidistantes del mismo. El segundo elemento y cada uno de los elementos adicionales pueden estar situados de forma simétrica o reflejados alrededor de un eje a través del primer elemento.

- 55 La matriz comprende preferiblemente una pluralidad de paneles de sub-matriz dispuestos para formar una estructura tridimensional a partir de la cual los elementos irradian. Cada panel tiene una pluralidad de elementos sobre el mismo, donde el primer elemento de antena se encuentra en un panel diferente al segundo y siguientes elementos de antena. El segundo elemento de antena y el elemento o elementos de antena adicionales están situados preferiblemente en un panel común. El primer elemento de radar está situado preferiblemente en posición diagonal

desde el segundo elemento de antena y desde el elemento o elementos de antena adicionales en la matriz.

En otras realizaciones, en lugar de apoyarse en un solo emisor y dos o más receptores, el procedimiento puede comprender la activación del modo de transmisión en por lo menos otro elemento más de la antena de la matriz, próximo al segundo elemento de antena, de manera que el primer elemento de antena y cada uno de los elementos del radar adicionales funcionen en modo de transmisión, mientras que el segundo elemento de radar funciona en modo de recepción. El procedimiento a continuación incluye además la determinación de la fase relativa y/o la ganancia/amplitud del segundo elemento de antena y cada uno de los elementos de antena adicionales de una manera similar a la anterior. El procedimiento comprende preferiblemente además la selección de la activación del segundo elemento de antena y cada uno de los elementos de antena adicionales en el modo de transmisión, seleccionándose el primer elemento y cada elemento adicional de manera que se encuentren en una posición relativa al segundo elemento de radar de tal forma que la señal esperada desde el primer elemento de antena y los elementos del radar adicionales en la posición del segundo elemento de radar sea equivalente. El primer elemento de antena y cada uno de los elementos adicionales se seleccionan preferiblemente de tal manera que se encuentran en una posición en la que pueden transmitir la radiación desde los lóbulos laterales equivalentes al segundo elemento de radar. El primer elemento y cada elemento adicional están situados preferentemente en lados diferentes del segundo elemento, y equidistantes del mismo. El primer elemento y cada uno de los elementos adicionales están situados preferiblemente simétricamente alrededor o reflejados alrededor de un eje a través del segundo elemento. Como se mencionó anteriormente, la matriz puede comprender una pluralidad de paneles, teniendo cada uno una serie de elementos. El segundo elemento de antena y el elemento o elementos de antena adicionales están situados preferiblemente en un panel común, y el primer y segundo elementos de antena están situados en paneles diferentes. Preferiblemente, el segundo elemento de antena está situado en diagonal desde el primer elemento de antena y el elemento o elementos de antena en la matriz. Alternativamente, el primer elemento de antena se acciona en el modo de recepción, y el modo de transmisión se activa en el segundo y al menos un elemento adicional más de la antena.

El procedimiento preferiblemente incluye además la etapa de ajustar la fase o ajuste de amplitud/ganancia del segundo y/o cada uno de los elementos de antena adicionales en respuesta a la fase relativa determinada o a la medición de la amplitud/ganancia.

Cuando las realizaciones del primer aspecto de la invención comprenden un sistema de radar que tiene una matriz en fase de elementos, los procedimientos descritos en relación con el segundo aspecto de la invención se pueden utilizar con el mismo para comprobar y calibrar dicha matriz.

Las realizaciones del segundo aspecto de la invención también pueden proporcionar un sistema o aparato que comprende un sistema de radar que incluye a su vez una pluralidad de elementos de antena dispuestos en una matriz, comprendiendo cada elemento consta de un transmisor de radar y un receptor para transmitir y recibir señales de radar, siendo los elementos de antena operables en modo de transmisión o en modo de recepción. También se proporciona una unidad de control, acoplada al sistema de radar, que está configurada para activar el modo de transmisión en un primer elemento de antena de la matriz para transmitir una señal del radar y para activar el modo de recepción en un segundo elemento de antena de la matriz próximo al primer elemento de antena, y posicionado de manera que recibe la radiación procedente de un lóbulo lateral del primer elemento de antena. La unidad de control está configurada además para determinar si el segundo elemento de antena recibe una señal del radar. La unidad de control puede estar configurada además para llevar a cabo cualquiera de los procedimientos descritos anteriormente o a continuación. También puede proporcionarse un programa de ordenador correspondiente que cuando se ejecuta en el sistema hace que la unidad de control lleve a cabo los procedimientos descritos anteriormente o a continuación.

Breve descripción de los dibujos

Los ejemplos de la invención se describirán ahora con más detalle en referencia a los dibujos, en los que:

La Figura 1 muestra una ilustración esquemática de una turbina eólica;

La Figura 2 es una ilustración esquemática de una turbina eólica que incluye una unidad de radar de acuerdo con una realización del primer aspecto de la invención;

La Figura 3 es un diagrama de un sistema de detección de vibraciones que incorpora una unidad de radar FMCW;

La Figura 4 es una serie de diagramas que muestran las diversas etapas en la extracción de datos de velocidad de los datos del radar recibidos;

La Figura 5 es una ilustración esquemática de una sección transversal a través de una turbina eólica que incluye una unidad de radar de acuerdo con una realización del primer aspecto de la invención;

La Figura 6 es una ilustración esquemática de una sección transversal a través de una turbina eólica de acuerdo con otra realización del primer aspecto de la invención;

La Figura 7 es un diagrama de un sistema de control para un sistema que incorpora un montaje giratorio para una unidad de radar;

La Figura 8 es una ilustración esquemática de una sección transversal a través de una turbina eólica de acuerdo con otra realización del primer aspecto de la invención que incorpora una pluralidad de unidades de radar;

- 5 La Figura 9 es una ilustración esquemática de una turbina eólica que incluye una pluralidad de unidades de radar de acuerdo con una realización adicional del primer aspecto de la invención;

La Figura 10 es un esquema de una matriz lineal en fase;

La Figura 11 es un diagrama de un elemento de antena y un sistema de unidad de control;

La Figura 12 es un diagrama de un ejemplo de patrón de radiación desde un elemento de radar;

- 10 La Figura 13 es un diagrama de una red de antenas usado para implementar realizaciones del segundo aspecto de la invención;

La Figura 14 es un diagrama que muestra los patrones de prueba de ejemplo;

La Figura 15 es otro diagrama que muestra los patrones de prueba de ejemplo;

La Figura 16 es otro diagrama que muestra los patrones de prueba de ejemplo;

- 15 La Figura 17 es otro diagrama que muestra los patrones de prueba de ejemplo;

La Figura 18 es otro diagrama que muestra los patrones de prueba de ejemplo.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

A continuación se describirán realizaciones de acuerdo con un primer aspecto de la presente invención.

- 20 La Figura 2 muestra una ilustración esquemática de una turbina eólica que incorpora una unidad de radar 7. La turbina eólica se muestra con una única pala a modo de ilustración. Se observará que una turbina eólica usualmente tiene más palas, y típicamente tendrá tres palas. La incidencia del viento en la pala causa una rotación en la dirección indicada por la flecha en la figura. La pala traza una trayectoria circular 8 y alcanza su punto más bajo 9 respecto a la base de la turbina cuando el eje mayor o longitudinal de la pala es vertical; es decir, la pala alcanza su punto más bajo en su rotación cuando su eje mayor coincide con el eje principal/vertical de la torre 2.

- 25 Una unidad de radar que comprende un emisor y un receptor está fijada a la torre. La unidad de radar se coloca por encima del punto más bajo 9 en el que la pala 5 pasa de tal forma que las señales de radar emitidas desde la unidad de radar se reflejan desde la pala y son detectadas por el receptor. El emisor y el receptor pueden ser el mismo componente, pero en ciertas realizaciones se separan preferiblemente en el espacio para evitar interferencias.

- Se puede proporcionar una unidad de procesamiento, acoplada a la unidad de radar para recibir datos de la misma. Las vibraciones hacen que la pala se mueva hacia o alejándose de la torre a medida que gira la pala. La unidad de procesamiento determina el desplazamiento Doppler de la señal del radar de retorno desde la pala a medida que vibra, en base a los datos recibidos desde la unidad de radar, para determinar la velocidad de la pala hacia o alejándose de la torre. Hay varias maneras de producir el efecto Doppler utilizando un dispositivo de radar. Los radares pueden ser de impulsos coherentes (CP), de impulsos Doppler, de onda continua (CW), o de frecuencia modulada (FM). El radar Doppler CW sólo proporciona una salida de velocidad, ya que la señal recibida del objetivo se compara en la frecuencia con la señal original, pero no hay ninguna señal temporal con la que extraer información del alcance. El radar FMCW mejora con respecto a este mediante el barrido de la frecuencia del transmisor periódicamente para permitir una determinación del alcance. Aunque las realizaciones del primer aspecto de la invención pueden utilizar cualquier tipo de radar, en este documento se utilizará el ejemplo específico de FMCW.

- 40 La Figura 3 muestra un esquema de un sistema de detección de vibraciones que incorpora una unidad de radar FMCW. El transmisor de FM proporciona una señal de radar a la antena transmisora. La señal es una onda continua de una frecuencia particular que puede considerarse una onda portadora que se modula por el modulador. La modulación puede ser modulación de amplitud o de fase, pero el ejemplo que se utiliza es la modulación de frecuencia, por lo que la frecuencia de la señal CW portadora se modula en una frecuencia tal que varía con el tiempo.

- 45 Tres esquemas de modulación se utilizan comúnmente: una forma de onda sinusoidal, una forma de onda triangular o una forma de onda de diente de sierra.

- La señal de radar modulada se emite de forma continua desde la antena de transmisión o emisor. La señal se refleja desde la pala a medida que pasa a través del campo de cobertura del radar y la señal de retorno es detectada por la antena de recepción o receptor. Por lo general, se utiliza un mezclador para combinar la señal recibida con una

porción de la señal transmitida originalmente. La unidad de procesamiento recibe la señal mezclada y realiza el cálculo necesario para extraer de la señal recibida una medición Doppler indicativa de la velocidad de la pala del rotor, obteniendo una velocidad y una dirección ya sea hacia o alejándose de la torre.

La Figura 4 se utilizará para proporcionar un ejemplo particular de la manera en que se extrae la medición Doppler. Se observará que otros procedimientos computacionales pueden ser posibles, o que se pueden utilizar variaciones de este procedimiento.

La Figura 4, dibujo A, muestra una señal de radar CWFM de onda de diente de sierra representada como una línea continua. La línea de puntos indica una señal de retorno simplificado desde la pala. Como puede verse a partir de A, la señales transmitidas y recibidas se separan, en un momento dado, por una frecuencia δf que se debe tanto al alcance de la pala como al desplazamiento Doppler debido a la velocidad radial de la pala hacia o alejándose de la unidad de radar y, por lo tanto, también de la torre.

Los datos de la señal de retorno, que se pueden mezclar con una porción de la señal emitida, se someten entonces a una transformada de Fourier para extraer la información del alcance. La transformada de Fourier, a veces conocida como una FFT (Transformada Rápida de Fourier) de alcance, se aplica a cada señal de barrido para determinar una pluralidad de perfiles de alcance, identificando cada perfil de alcance los objetos detectados dentro de acumuladores de alcance particulares o células. El dibujo B de la Figura 4 muestra una transformada de Fourier de alcance de ejemplo para un barrido de frecuencia particular, que tiene una señal en el acumulador de alcance r2. El pico mostrado representa una pala detectada. Una transformada posterior, conocida a veces como una FFT de Doppler, se aplica entonces a las muestras de la misma célula del alcance de barridos de consecutivos para extraer información de Doppler indicativa de la velocidad del objeto detectado en ese acumulador de alcance. La información de Doppler incluye la velocidad de cambio de fase de la salida de cada acumulador de alcance de un barrido al siguiente, lo que permite determinar la velocidad, incluida la velocidad y la dirección radiales hacia o alejándose de la torre de turbina.

La Figura 5 es una sección transversal de la turbina eólica de la Figura 2 a lo largo de la línea A-A, como se ve desde arriba, con la pala del rotor en su punto más bajo en lugar de en la posición mostrada en la Figura 2. La góndola no se muestra por motivos de claridad. La pala pasa por delante de la torre 2, y por lo tanto también de la unidad de radar 7, a una distancia X, siendo la distancia perpendicular al eje de la torre. La unidad de radar emite un haz de radar 10 que tiene una anchura de haz α . La cantidad de tiempo que la pala pasa dentro del haz del radar depende del valor de α , X y la velocidad de rotación de la pala. Como se mencionó anteriormente, típicamente se situará una punta de la pala en el punto más bajo de la rotación, a aproximadamente 3-5 m de la torre de turbina. La pala puede girar a una velocidad de alrededor de 20 rpm. Un valor típico de ejemplo para α puede ser 10° o menos. Otros valores de ejemplo se proporcionan en la tabla 1 a continuación.

	77 GHz	10 GHz
Parámetros WT		
Velocidad de rotación/pala (rpm)	20	20
Número de palas	3	3
Distancia (m) de la pala a la torre	5	5
Longitud de la pala (m)	50	50
Ancho de la pala (m)	2	2
Velocidad de rotación/pala (grados/s)	120	120
Velocidad en la punta de la pala (m/s)	104,72	104,72
Parámetros del radar		
Frecuencia (GHz)	77	10
Longitud de onda (m)	0,0039	0,0300
Anchura del haz de la antena (grados)	4	4
Abertura de la antena (tamaño efectivo)	0,06	0,43
Tiempo máximo de observación/pala (s)	0,033333	0,033333
Ancho de banda de barrido (GHz)	20	20
Resolución del alcance (m)	0,0075	0,0075
Duración del barrido (ms)	0,1	0,1
Velocidad no ambigua (+/-) (m/s)	9,74	75,00
# barridos durante el tiempo de	333	333

Resolución de velocidad (m/s)	0,12	0,90
-------------------------------	------	------

Tabla 1: Una comparación de los parámetros del radar de ejemplo para los parámetros de la turbina eólica de ejemplo

Tal como se especifica en la tabla, por un valor de X de 5 metros, una pala con una longitud de 50 metros, y una velocidad de rotación de 20 rpm, la punta de la pala se desplaza a una velocidad de aproximadamente 105 m/s y pasa un total de alrededor de 0,03 segundos dentro del alcance angular del detector por revolución. Con el fin de ser capaz de obtener una medición fiable del valor Doppler para la pala se requieren al menos dos barridos de frecuencia, es decir, una exploración aproximadamente cada 0,015 segundos. Este es un ejemplo del número mínimo requerido de barridos. En la práctica, la frecuencia de los barridos puede ser considerablemente mayor, por ejemplo, un barrido se puede producir alrededor de cada 0,1 milisegundos, lo que proporciona considerablemente más que el número mínimo de barridos requerido para la supervisión de la velocidad de la pala.

La resolución del alcance de la unidad de radar depende del ancho de banda de frecuencia de barrido utilizado. Un ancho de banda grande proporciona una resolución más alta, lo que significa una mayor distancia entre los respectivos acumuladores de frecuencia en el contexto de dibujo B en la Figura 4. Para las turbinas eólicas típicas, la pala puede pasar alrededor de 3-5 m desde la torre de la turbina y, por lo tanto, desde la unidad de radar, durante el período de medición. Una variación de frecuencia mayor durante un intervalo de tiempo dado proporciona una medición más precisa del tiempo de tránsito y una mejor indicación del alcance. La ambigüedad de Doppler, es decir, la posibilidad de una medición de Doppler incorrecta, depende del número de barridos realizados durante un intervalo de tiempo dado. Cuantos más barridos de frecuencia se lleven a cabo durante el período de observación, y por lo tanto cuanto más corto sea el período de cada barrido de frecuencia, es más probable que la medición de Doppler sea inequívoca. Sin embargo, la resolución Doppler, es decir, las velocidades que se pueden resolver, depende del tiempo de observación, independientemente del número de barridos realizados, con un tiempo de observación más largo ofreciendo una resolución Doppler más alta. La resolución Doppler es también dependiente de la frecuencia de la señal portadora del FMCW, siendo mayor la resolución para frecuencias más altas. Como ejemplo, para el radar de frecuencia de 77 GHz se puede ver que un ancho de banda de barrido de frecuencia de 20 GHz da una resolución de alcance de alrededor de 7,5 mm, que es suficiente para la resolución de la posición de la pala de la turbina. Un tamaño de la antena de alrededor de 6 cm, que tiene una anchura de haz 4° da una resolución de velocidad de 0,12 m/s, que también está dentro del alcance deseado para el propósito actual. Dicha disposición debe permitir la medición no ambigua de velocidades de vibración en el alcance de +/- 9,74 m/s.

Es posible configurar la unidad de radar para detectar las señales del radar reflejadas tanto desde el lado de la torre como desde el lado opuesto de la pala, con la unidad de procesamiento configurada para determinar la velocidad del lado de la torre (o lado de succión) y el lado opuesto (el lado de presión) de la pala mediante la identificación de señales/reflexiones recibidos desde los respectivos lados de la pala. A condición de que el ancho de banda de la unidad de radar sea suficiente para resolver estas dos superficies, se puede obtener un perfil de alcance de la clase mostrada en el dibujo C de la Figura 4. Una resolución de alcance de alrededor de 7,5 mm como se ha mencionado anteriormente permite la resolución de los dos lados de la pala. La información de Doppler para los acumuladores de alcance correspondientes a ambas superficies de la pala puede entonces resolverse, ofreciendo información de la velocidad independiente de ambos lados de la pala. Esto se puede utilizar para determinar si diferentes patrones de vibración se producen en los dos lados de la pala, lo que puede indicar un fallo estructural. Si la resolución no es suficiente para resolver ambos lados de la pala entonces efectivamente se determina un valor medio Doppler para ambas superficies.

La unidad de procesamiento puede procesar los perfiles de alcance para obtener la información de Doppler correspondiente, tanto para el lado de la torre como el lado opuesto de la pala y comparar la información de Doppler para las dos partes de la pala para determinar la velocidad de cada lado de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina. La detección de las velocidades de las dos superficies principales de la pala permite realizar una comparación para determinar si la estructura de la propia pala es variable, siendo éste el caso si la velocidad de uno de los lados es diferente de la velocidad del otro.

Haciendo de nuevo referencia a la Figura 2, una única unidad de radar 7 está fijada a la torre por encima del punto 9 más bajo por el que pasa la pala 5. En particular, la unidad de radar puede estar situada a una altura tal que la punta de la pala pase a través del campo de visión de la señal de radar, de tal forma que la velocidad de la punta hacia o alejándose de la torre se mida. Sin embargo, la unidad de radar puede estar situada a cualquier altura a la que se desea medir las vibraciones de la pala.

Aunque se puede utilizar una única unidad de radar fijada a la torre, sería preferible ser capaz de medir las propiedades de la vibración de la pala a medida que la turbina se mueve a diferentes posiciones de guiñada. Se apreciará que si la turbina fuera a orientarse desde la posición indicada en la Figura 2, o sugerida por la Figura 5, el plano de rotación de la pala se movería desde la posición perpendicular a la dirección de emisión/detección de la unidad de radar, lo que resultaría en que la pala abandonaría el campo de visión de la unidad de radar.

La Figura 6 muestra una realización de la invención que incorpora una unidad de radar móvil. La Figura 6 se toma de

la misma vista que la Figura 5, mostrando la unidad de radar 7 fijada a la torre 2 a través de un montaje giratorio 10. El montaje giratorio permite que la unidad de radar gire alrededor del eje de la torre, alrededor de la superficie de la torre, a una altura constante respecto a la base de la torre. El montaje giratorio permite la rotación de la unidad de radar ya sea en el sentido horario o anti-horario. La posición de rotación del montaje giratorio se controla mediante un accionador que puede recibir señales de una unidad de control. El movimiento de la unidad de radar alrededor de la torre se puede ajustar en respuesta a un cambio en la guiñada de la turbina.

La Figura 7 muestra un sistema de control de ejemplo para el montaje giratorio. Se suministra un controlador de rotación de la unidad de radar 71 para el envío de señales de control al accionador del montaje giratorio 72. El controlador de rotación de la unidad de radar está acoplado a un controlador de guiñada 73 que está configurado para enviar señales de control a un sistema de orientación de la turbina 74 y recibir datos de guiñada del mismo. El controlador de guiñada recibe o calcula los datos indicativos de la posición de guiñada de la turbina, y controla los cambios de orientación. El controlador de rotación de la unidad de radar está configurado para recibir datos de posición de guiñada y datos de variación de guiñada, y para determinar si la posición de rotación de la unidad de radar necesita alterarse en respuesta. Cuando se determina que la posición de guiñada de la turbina corresponde a que las palas están fuera del alcance de visualización de la unidad de radar cuando están en su posición más baja el controlador de rotación de la unidad de radar controla el accionador del montaje giratorio para hacer girar la unidad de radar hasta que transmite/recibe sustancialmente de la misma dirección que el ángulo de guiñada de la turbina. El controlador de rotación de la unidad de radar forma parte preferiblemente de la unidad de radar en sí.

El accionador del montaje giratorio en sí puede ser cualquier construcción apropiada para permitir la rotación necesaria de la unidad de radar alrededor de la circunferencia de la pala de la turbina a la altura requerida. Esto puede ser en forma de dos anillos, estando un primer anillo 11 fijado a la torre de la turbina alrededor de su circunferencia, y un segundo anillo 12 que también se extiende alrededor de la circunferencia de la torre de la turbina, a la que la unidad de radar está fijada, estando el segundo anillo acoplado al primer anillo mediante cojinetes 13 para permitir la rotación relativa entre los dos anillos y, por lo tanto, entre la unidad de radar y la torre de la turbina.

Una alternativa a la disposición descrita en relación a las Figuras 6 y 7 se proporciona en la Figura 8, que también se toma de la misma vista que la Figura 5. La Figura 8 muestra de nuevo una torre de turbina 2, pero en este ejemplo una pluralidad de unidades de radar 7 están fijadas alrededor de la circunferencia de la misma a una altura común. Las unidades de radar se distribuyen a intervalos regulares. Es posible que haya más o menos unidades de las que se muestran en la Figura. Proporcionar una pluralidad de unidades alrededor de la circunferencia tiene la ventaja de que no requiere partes móviles. Dado que pueden utilizarse unidades de bajo coste, tales como las que se encuentran en aplicaciones de radar en vehículos como las aplicaciones de control de cruce, el uso de una serie de unidades distribuidas alrededor de la circunferencia de la torre de la turbina puede ser más atractiva que disponer de un mecanismo de rotación.

El círculo 81 en la Figura 8 indica la distancia aproximada de la torre a las palas de la turbina, en el plano de la unidad de radar, donde no se está produciendo la vibración para todas las posibles posiciones de guiñada. Las unidades de radar se pueden distribuir alrededor de la torre, de manera que sus campos de visión se superponen a una distancia horizontal predeterminada de la torre de la turbina. En particular, las unidades de radar se pueden distribuir de tal manera que los ángulos de visión horizontal hacen que sus campos de visión 82 se junten o se superpongan a una distancia desde la torre correspondiente a la posición esperada de la pala en el punto más bajo en su rotación, como se muestra en la Figura 8 para tres unidades de radar. La distancia a la que los campos de visión se superponen puede estar en, o a una distancia predeterminada más allá de, la distancia prevista de la pala cuando no se produce vibración más la distancia máxima esperada de la vibración, de manera que la pala se puede detectar en todas las posiciones de guiñada durante todas las distancias esperadas razonablemente causadas por las vibraciones.

La Figura 9 muestra cómo una pluralidad de unidades de radar también se pueden distribuir a lo largo de la altura de la torre de la turbina eólica para proporcionar mediciones a diferentes alturas, en caso necesario. Cada unidad de radar se puede montar en un montaje giratorio, tal como de la manera descrita para las Figuras 6 y 7, o alternativamente una pluralidad de unidades de radar se puede distribuir alrededor de la circunferencia en cada altura como se describe para la Figura 8. Las alturas a lo largo de la torre pueden ser intervalos regulares, o podrían ser puntos de interés particular, tales como la punta de la pala a medio camino, y/o tan cerca de la raíz de la pala como sea posible.

Cuando se utiliza una pluralidad de unidades de radar tal como el ejemplo descrito en relación a la Figura 9, puede ser necesario asegurar que las unidades de radar correspondientes están suficientemente separadas en el espacio, la frecuencia o el tiempo para evitar la interferencia o el ruido de unidades vecinas. En particular, cada unidad puede configurarse para transmitir, recibir o transmitir y recibir, como es posible con FMCW, en un intervalo de tiempo particular. Por lo tanto, las unidades pueden estar configuradas para transmitir/recibir durante diferentes rotaciones respectivas de la pala/rotor. En el ejemplo de una sola pala, una primera unidad de radar en una primera altura a lo largo de la torre puede estar configurada para enviar/recibir señales de radar cuando la pala pasa a través de su campo de visión y luego cesa la transmisión. Una segunda unidad de radar en una segunda altura a lo largo de la torre, diferente de la primera altura, puede configurarse después para comenzar a enviar/recibir señales del radar,

dejando de transmitir una vez que la pala ha pasado a través de su campo de visión. Esto se puede repetir para todas las unidades de radar distribuidas a diferentes alturas. La coordinación de la activación de cada unidad de radar se puede realizar mediante una unidad de control central acoplada a cada unidad de radar.

A medida que las unidades de radar establecen la velocidad de cada pala a lo largo de un período de tiempo, se puede establecer un perfil de velocidad, identificando la variación de la velocidad de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre con el tiempo. Esto permite determinar el período de vibración de la pala. Los parámetros de seguridad se pueden introducir, y si el período de vibración de la pala, o la velocidad de la pala, excede un valor predeterminado, entonces la turbina se puede cerrar automáticamente. Esto se puede lograr mediante el controlador central, que puede estar dispuesto para recibir los datos de cada unidad de radar para determinar los perfiles de velocidad para cada pala. El controlador central también puede contener la unidad de procesamiento configurada para recibir datos de medición de la unidad de radar, de tal forma que el análisis del desplazamiento Doppler se lleva a cabo centralmente, de manera remota desde el transmisor y el receptor. Alternativamente, la unidad de procesamiento puede estar situada en una carcasa común con el transmisor y el receptor.

Se han descrito realizaciones de la aplicación de un radar Doppler montado en una turbina eólica para detectar la velocidad de la pala hacia o alejándose de la torre, y para calcular las propiedades de vibración de la pala fuera del plano de rotación, tal como el período de vibración, la amplitud de la vibración, etc. Un radar Doppler montado en la turbina también se puede usar para otras aplicaciones. Una de tales aplicaciones es la detección de aeronaves como se ha descrito anteriormente, y a continuación, en relación con el sistema de OCAS.

En el sistema de OCAS el radar Doppler es preferiblemente una matriz en fase FMCW montada debajo del punto más bajo de la pala en la torre de turbina. Los parámetros de ejemplo para el sistema OCAS son una frecuencia de 1,325 GHz, una anchura de haz de la antena de unos 24° y un tamaño efectivo de la abertura de la antena de 0,54 m. El ancho de banda de barrido de 0,035 permite una resolución de alcance de 4,2857 m, una velocidad Doppler no ambigua de 566,04 m. Esto permite la resolución de aeronaves y otros objetos en el entorno de una turbina eólica. También permite, utilizando las mediciones Doppler de velocidad descritas anteriormente, la determinación del movimiento relativo de las partes del objeto en el aire en relación a su dirección de desplazamiento. Por ejemplo, el perfil de la rotación de una pala de helicóptero puede detectarse y analizarse para que el sistema OCAS pueda identificar que un objeto detectado es un helicóptero. Asimismo, la hélice de un avión o similar se puede identificar utilizando la firma Doppler. Además, de esta manera, la medida de Doppler permite la identificación del perfil de Doppler de aleteo de las alas de un ave.

Así, el sistema OCAS, u otros tipos de sistemas de radar, se pueden configurar para detectar la señal Doppler de los objetos en movimiento y analizarla para producir un perfil de Doppler, determinando la velocidad relativa de las partes del objeto que se mueven respecto a la dirección del objeto. Esto permite que el sistema de radar identifique y clasifique los diferentes objetivos y ajuste las medidas adoptadas sobre la base de estas clasificaciones. Si un objeto se determina que es un pájaro, o una bandada de pájaros, entonces puede ocurrir que el sistema OCAS no active las señales de advertencia. Si el objeto se determina que es un helicóptero, entonces puede usarse un tiempo de aviso o patrón de aviso diferente del que se utilizaría para un avión.

A continuación se describirán realizaciones de acuerdo con un segundo aspecto de la invención.

Una matriz en fase es una antena directiva que comprende antenas radiantes individuales, o elementos, que generan un patrón de radiación cuya forma y dirección se determina por las fases y amplitudes relativas de las corrientes en los elementos individuales. Variando correctamente las fases relativas es posible controlar la dirección de la radiación emitida por la matriz. Los elementos radiantes pueden ser dipolos, guías de onda de tipo abierto, ranuras cortadas por la guía de ondas, o cualquier otro tipo de la antena. Las antenas de matriz en fase permiten la orientación del haz mediante control electrónico.

Una antena de matriz comprende una serie de elementos radiantes individuales espaciados adecuadamente entre sí. La amplitud y fase relativas de las señales aplicadas a cada elemento se controlan electrónicamente para obtener el patrón de radiación deseado a partir del efecto combinado de todos los elementos. Típicamente, las matrices pueden ser lineales, con un conjunto de elementos dispuestos en una línea recta, o superficie plana, que comprende una configuración de elementos de dos dimensiones. La radiación máxima emitida puede ser perpendicular a la línea o plano de la matriz (matriz andanada), o en paralelo a la matriz (matriz de radiación longitudinal).

La Figura 10 muestra una matriz en fase lineal 1001 que comprende una serie de elementos 1002 en una disposición lineal. La separación entre cada elemento es la misma. Cada elemento comprende tanto un emisor como un receptor, de manera que la radiación emitida por el emisor y, posteriormente, reflejada por un objeto dentro del campo de visión del emisor es detectada por el receptor. Con el fin de implementar una disposición de este tipo, en la que el emisor y el receptor se encuentran efectivamente en el mismo lugar, es preferible que cada elemento funcione únicamente en el modo de transmisión o únicamente en el modo de recepción en cualquier momento dado, ya que la transmisión y la recepción simultáneas causan interferencias. En disposiciones en las que las funciones de los componentes de la antena como radiador y receptor, la función está controlada por la electrónica de emisión y recepción, sólo puede utilizarse una de las funciones de transmisión o de recepción en cada momento.

Con el fin de producir un patrón de radiación deseado, cada elemento de la matriz tiene una fase particular de la corriente aplicada al emisor. La fase de cada elemento se selecciona de tal manera que la matriz produce un patrón de radiación deseado. Esto se ilustra en la Figura 10, en la que cada elemento tiene una fase determinada $\Phi 1 - \Phi 4$. Una o más de estas fases pueden ser iguales, o todas ellas pueden ser diferentes, pero el factor importante es sus valores relativos unas con otras para lograr el patrón de radiación deseado. En lugar de un conjunto lineal de una matriz de dos dimensiones, se puede usar como ejemplo una matriz de elementos de 3 por 4.

En la Figura 11 se ilustra un sistema de control, que muestra un esquema de una porción de la matriz y del sistema de control. Un elemento de antena 1101 está acoplado para transmitir y recibir la electrónica 1102 configurada para accionar el elemento de antena en los modos de transmisión o de recepción. Una unidad de control 1103 se proporciona para determinar cuándo el elemento de antena debería funcionar en modos de transmisión o de recepción. La unidad de control comprende un procesador, acoplado a una memoria o RAM 1105 y, preferiblemente, acoplado a un dispositivo de almacenamiento, tal como una unidad de disco duro 1106. La unidad de control está acoplada a los otros elementos de antena en la matriz, o a su electrónica de transmisión/recepción correspondiente. La unidad de control y el procesador están configurados para realizar los procedimientos de diagnóstico y de calibración descritos en el presente documento. La unidad de control está acoplada también a un dispositivo de interfaz de usuario 1107 para proporcionar datos al mismo, incluyendo las señales de alerta cuando los elementos se identifican como defectuosos, o cuando se determina que el perfil de la fase o de amplitud/ganancia de un elemento dado está fuera de los parámetros de funcionamiento deseados.

Por lo general, la matriz se calibrará en el punto de construcción para asegurar las correctas relaciones de fase entre los elementos. Sin embargo, las relaciones de fase relativas entre elementos son sensibles a la desviación a lo largo del tiempo debido a las condiciones durante el uso, tales como la temperatura, la humedad y así sucesivamente. Como la fase relativa entre elementos define la dirección del haz, es importante ser capaz de asegurar que estos valores son correctos o dentro de una tolerancia deseada. El factor de amplitud o ganancia aplicado por cada receptor es también un factor importante. Además, también es deseable poder comprobar si cada elemento está funcionando realmente, ya que una matriz puede contener muchos elementos y comprobar todos individualmente puede ser laborioso.

Se describirán procedimientos generales de calibración, diagnóstico o mantenimiento. El principio general empleado por realizaciones del segundo aspecto de la invención es utilizar el canal de fuga de un elemento para transmitir la radiación en el canal de fuga de otros elementos de la matriz. Usualmente es conveniente minimizar cualquier fuga entre los elementos dentro de una matriz, pero como se verá este efecto secundario puede ser objeto de un uso ventajoso. La radiación de los lóbulos laterales emitida por un elemento emisor puede ser detectada por la antena de recepción a través de un lóbulo lateral. Los lóbulos laterales pueden ser considerados como los máximos locales del patrón de radiación de campo lejano de una antena distinta de la del lóbulo principal. La mayoría de las antenas tienen patrones de radiación, o por el contrario, recepción, y un número de estos lóbulos en varios ángulos en direcciones donde la intensidad de la señal radiada o detectada alcanza un máximo y otros ángulos en los que la intensidad de la señal radiada o detectada cae a cero. La densidad de potencia en los lóbulos laterales es generalmente considerablemente menor que en el lóbulo principal. El lóbulo principal y los lóbulos laterales ocurren en ambos modos de transmisión y recepción.

La Figura 12 pone de relieve cómo puede ocurrir la superposición de los lóbulos laterales para una matriz del tipo mostrado en la Figura 10, con la Figura 12 mostrando una vista lateral de la matriz que incluye un patrón de emisión/detección de ejemplo para cada elemento. Debido a que los elementos son idénticos, los patrones de emisión/detección son también equivalentes. Como se muestra en la Figura 12, el elemento transmisor B irradia generalmente en la dirección perpendicular al plano del elemento a través del lóbulo principal 1201. Además, una cierta cantidad de radiación se escapa a través del lóbulo lateral 1202. Los elementos vecinos A y C están colocados de tal manera que sus lóbulos principales no interactúan con el lóbulo principal del elemento B para evitar una interferencia. Sin embargo, existe una superposición entre el lóbulo lateral del elemento B y el lóbulo lateral correspondiente de los elementos A y C. La Figura 12 es una ilustración simplificada, y pueden estar presentes más lóbulos laterales, algunos o todos los cuales se utilizan como un canal de fuga entre los elementos.

Las realizaciones del segundo aspecto de la invención proporcionan una forma simple de determinar si los elementos de una matriz están funcionando. Un primer elemento se pone en modo de transmisión. Un segundo elemento, próximo al primer elemento, se pone en modo de recepción. El segundo elemento se selecciona en relación con el primer elemento, de tal manera que existe un canal de fuga entre los dos elementos. Si se recibe una señal, entonces se puede establecer que el primer elemento es operable para transmitir y el segundo elemento es operable para recibir, en cuyo caso las funciones de transmisión y recepción pueden invertirse entonces para comprobar las funciones correspondientes en los elementos. En el ejemplo de la Figura 10, esto podría implicar el uso del elemento de A como un transmisor, y del elemento B como receptor, y después viceversa. Este proceso se puede repetir para todos los elementos, seleccionando cada vez un elemento de transmisión y un elemento de recepción próximo. El término «próximo» pretende hacer referencia al hecho de que los elementos de recepción están dentro del alcance de un lóbulo del canal/lateral de fuga del elemento de transmisión.

Si no se recibe señal en el segundo elemento, entonces se puede establecer que o bien el elemento emisor, o el elemento de recepción, o ambos, son defectuosos. En este caso, se puede enviar un mensaje de alerta, a través de

una unidad de control acoplada a la matriz del radar, al operador para investigar más a fondo. Sin embargo, es posible concretar aún más qué elemento o elementos en particular es/son defectuosos mediante la realización de comparaciones adicionales. Estas comparaciones adicionales requieren que el proceso iterativo de la activación sucesiva de elementos vecinos o próximos ya sea en el modo de transmisión o recepción establezca qué elementos están funcionando y cuáles no.

Como un ejemplo, en el caso de que no se recibe señal en la situación anterior, el procedimiento puede incluir la selección de un elemento receptor diferente, o de un elemento transmisor diferente, para determinar si uno o ambos de los elementos no son funcionales. Si conmutar el elemento receptor a un tercer elemento da lugar a la detección de una señal en el tercer elemento, se establece entonces que el segundo elemento era defectuoso, y esta información se transmite al operador en el mensaje de alerta. Si conmutar el elemento receptor a un tercer elemento da lugar a la no detección de señal alguna, un nuevo cambio se realizará para seleccionar un cuarto elemento, próximo al tercer elemento, para ponerlo en modo de transmisión. Si se recibe entonces una señal a través del tercer elemento, esto indica que el primer elemento, el elemento de transmisión original, era defectuoso. Si no se recibe ninguna señal, esto significa que se requiere una mayor investigación. Se observará que en lugar de cambiar el elemento receptor a un tercer elemento, el elemento transmisor puede en cambio cambiarse a un tercer elemento.

El uso de este tipo de enfoque iterativo de alterar selectivamente uno de un par de elementos a la vez es posible establecer, para cada elemento, si es operable para transmitir y recibir.

Como se mencionó anteriormente, las relaciones de fase relativas entre cada elemento de la matriz en la Figura 10 se conocen a partir de mediciones de fábrica, o de las especificaciones teóricas. Con el fin de determinar la relación de fase entre los parches, los elementos seleccionados de la matriz se ponen en modo de transmisión y de recepción. En un ejemplo sencillo, un primer elemento B se pone en modo de transmisión, y los elementos vecinos A y C, ambos localizados en la proximidad del elemento B, se ponen en modo de recepción. La fase de la señal del radar recibida por los elementos A y C se compara, mediante una unidad de procesamiento situada preferentemente en la unidad de control, que se puede conseguir mediante la comparación o suma de la señal de salida del elemento A con la señal de salida del elemento C para determinar la diferencia de fase. Si la diferencia de fase entre los dos elementos no es igual a la diferencia de fase deseada, o no está dentro de la tolerancia deseada, entonces se requiere una calibración. El proceso anterior se puede repetir tantas veces como sea necesario hasta que las fases relativas de cada par de elementos se han comparado con la de al menos otro elemento.

Una vez que la unidad de procesamiento ha establecido las frecuencias relativas entre todos los posibles pares vecinos, en el caso de la Figura 10 esto equivale a los pares A/C y B/D, se puede generar un perfil de fase relativa, identificando la diferencia relativa en la fase de cada par probado de elementos, y la calibración se puede realizar en los elementos necesarios para llegar a las relaciones de fase correctas.

Las fases de elementos próximos separados del elemento radiante por uno o más elementos también se pueden realizar si se encuentran lo suficientemente cerca el uno al otro para la señal desde el elemento de transmisión para llegar a la señal del elemento de recepción. Por lo tanto, en un ejemplo no simétrico, las fases relativas de los elementos A y D se pueden obtener cambiando el elemento B a transmisión, y a continuación cambiando el elemento C a transmisión. Esto permite entonces el cálculo de una fase relativa entre A y D, y por lo tanto también entre A y B.

Es preferible que el procedimiento se lleve a cabo poniendo un elemento en modo de transmisión, y al menos dos elementos vecinos en modo de recepción. Los elementos de recepción están en posiciones geométricamente relacionadas en comparación con el elemento de transmisión. Preferiblemente, los elementos de recepción tienen canales de fuga geométrica similares o equivalentes en el modo de recepción entre sí. Esto podría describirse como el hecho de que los elementos receptores están equidistantes del elemento radiante y están situados ambos en una posición que, para un patrón de radiación esperado o previsto, recibiría una señal equivalente del mismo. Puesto que típicamente existe simetría del patrón radiante alrededor del eje que se extiende verticalmente desde el plano del elemento, el posicionamiento de los elementos de recepción en los canales de fuga geométricos equivalentes podría lograrse garantizando la existencia de simetría en el posicionamiento de los elementos de recepción alrededor de un eje que pasa a través del elemento de transmisión, estando el eje en el plano del panel en el que se encuentra el elemento, y los elementos también equidistantes del elemento emisor. Como se describió anteriormente y se verá a continuación, sin embargo, las disposiciones no simétricas también tienen sus usos.

La matriz sólo requiere relaciones de fase relativas para operar, no valores absolutos. Lo mismo ocurre con las relaciones de amplitud o ganancia. Sin embargo, es deseable encontrar los valores de amplitud máxima y de la fase mínima establecidos que cumplan con los requisitos relativos. Los valores de calibración de los ensayos de fabricación pueden también ser útiles como referencia para verificar la función de la antena.

El procedimiento de medición implica preferiblemente la medición de la fase relativa de la señal del radar del lóbulo lateral del elemento de transmisión tal como se recibió en los dos receptores. La salida de los dos elementos del receptor estará en un máximo cuando dichos elementos están en fase y en un mínimo cuando están en fase opuesta. Esto es cierto incluso si la amplitud de cada elemento receptor no es igual. Al utilizar un transmisor y dos elementos receptores, la señal del transmisor se divide para los dos receptores, ya que se transmite por el aire. La

suma de las señales de los dos receptores se realiza en la unidad de procesamiento acoplada a la matriz. El ajuste de fase de los dos receptores se puede cambiar hasta que la señal de suma esté al máximo o al mínimo para identificar cuándo los receptores están en fase (0 grados) o fuera de fase (180 grados). Esto se puede hacer para toda la gama de ajustes de fase para verificar también si hay no linealidades en el control de fase entre los dos elementos bajo prueba. También es posible cambiar la amplitud del transmisor para verificar si hay no linealidades en la amplitud frente a la relación de fase entre los dos receptores. El elemento individual utilizado para la transmisión, o en otras realizaciones para la recepción, se puede ajustar en cualquier amplitud o fase, ya que la misma señal se divide o se combina a partir de los dos elementos bajo prueba.

De la misma manera, la unidad del procesador o de control acoplada a la matriz puede cambiar el ajuste de ganancia de los dos receptores y encontrar el punto en el que la intensidad de la señal de los dos elementos es la misma. Si el nivel de la señal de referencia es 1,0 entonces una variación de un factor de ganancia en un 10% debería producir un cambio de un 5% en la suma de ajustes de ganancia iguales, por ejemplo. Si la ganancia entre los elementos es desigual, el cambio del 10% en la ganancia de un elemento dará un resultado diferente. Si uno tiene un factor de ganancia de 1,1 y el otro 0,9, por ejemplo, el cambio ya no sería exactamente 5%, sino un valor mayor o menor dependiendo de qué elemento se trate, es decir, el elemento con el que el factor de ganancia, un cambio del 10%.

Los ajustes de ganancia y de fase en los elementos pueden ser controlados mediante la unidad de control. Esto se puede utilizar para compensar automáticamente las mediciones de fase relativa o ganancia que indican que estos valores están fuera de una tolerancia deseada. Los ajustes de ganancia y de fase de los elementos serán susceptibles de un control digital, de tal manera que los ajustes reales tienen una resolución limitada (por ejemplo, 8 bits), lo que significa que el cambio que se aplica a los factores de ganancia y de fase estaría en una serie de etapas digitales hacia arriba o hacia abajo.

Aunque en el presente documento se han descrito los procedimientos que utiliza un transmisor y dos o más receptores, es posible hacer lo contrario, el uso de dos (o más) transmisores y un receptor, debido a la equivalencia de una antena de transmisión y recepción. En contraste con los procedimientos que usan múltiples receptores, la suma de las señales se produciría durante la transmisión por el aire. Las mediciones de fase y de amplitud se realizan entonces de la misma manera descrita anteriormente, salvo que las relaciones de fase y de amplitud/ganancia se encuentran para elementos en modo de transmisión.

Las realizaciones de la invención encuentran un uso particular en los sistemas de prevención de colisiones del tipo descrito anteriormente. La Figura 13 muestra una disposición de ejemplo para una antena de matriz en fase usada en un sistema de prevención de colisiones de este tipo, como se puede encontrar en el documento EP-A-1.486.798. La matriz 1301 comprende un número de matrices lineales que incluyen elementos de radar 1303 formados en los paneles 1302 combinados para formar una matriz que puede proporcionar una cobertura de radar 360°. El conjunto lineal forma una columna a lo largo de la longitud del panel; los elementos forman filas con los elementos de paneles vecinos, y las filas se extienden alrededor de la circunferencia de toda la matriz. En la disposición de la Figura 13 hay ocho paneles juntos que forman una disposición octogonal, pero pueden ser utilizados más o menos paneles. Cada panel cuenta con una pluralidad de elementos, del tipo descrito anteriormente, que se pueden poner en modo de transmisión o de recepción como se requiera. En la disposición de la Figura 13 hay ocho elementos, pudiendo utilizarse un número par o impar de elementos. Preferiblemente, la matriz es tipo de radar de onda continua de frecuencia modulada (FMCW), con cada elemento teniendo una antena acoplada para recibir y transmitir la electrónica y a una unidad de control como se describe en relación con la Figura 11. El radar FMCW es preferentemente una versión interrumpida de FMCW que transmite el 50% del tiempo y recibe el 50% del tiempo.

A continuación se describirá la manera en que se realizan pruebas para una disposición de este tipo, incluyendo un ejemplo de la posible disposición de los canales de fuga utilizados. Se apreciará que estas pruebas pueden no estar limitadas a la disposición octogonal descrita, y se pueden aplicar a cualquier disposición compuesta por una pluralidad de paneles. También se observará que las combinaciones de elementos utilizadas en los patrones de prueba son ejemplos, y que se pueden utilizar otras combinaciones de patrones de prueba.

La Figura 14 muestra una comprobación inicial realizada para determinar si los elementos dados dentro de un panel están funcionando. Esta prueba se puede considerar una prueba 1:1 de pares horizontales dentro de la misma fila de la matriz. Como puede observarse, cada elemento en un panel dado se prueba girando el elemento a modo de transmisión, y el elemento correspondiente en el panel vecino para recibir y viceversa. Esto se puede realizar para cada elemento en cada panel. De la misma manera descrita anteriormente para una matriz lineal, si se encuentra que un elemento que empezó en el modo de recepción no está recibiendo una señal, se pueden seleccionar otras combinaciones de elementos de recepción/transmisión para determinar si hay un fallo en el elemento de transmisión, el elemento de recepción, o ambos. La comprobación automática se puede realizar con los vecinos horizontales y puede que solamente sea necesaria la determinación de una señal recibida de un vecino de transmisión, o puede que se comparen los valores de amplitud y de fase con los valores de referencia almacenados.

Una vez que se ha llevado a cabo la comprobación automática entre los elementos de un panel n , y un panel vecino $n+1$, el procedimiento puede proceder a la porción de calibración. La porción de calibración consiste en comparar las fases relativas de los elementos en un panel poniendo dos o más elementos en el modo receptor y la comparación

de la señal detectada de un elemento de transmisión de una manera similar a la descrita anteriormente.

La Figura 15 muestra una primera etapa de calibración del panel en la que los elementos de un panel $n+1$ se comparan con los vecinos próximos excepto con uno en el mismo panel mediante el establecimiento de un primer elemento y un segundo elemento (ambos designados R1) en un panel en particular en el modo de recepción, estando los elementos primero y segundo separados por un elemento intermedio en dicho panel. Esto se puede considerar una prueba 1:2 de pares simétricos separados de una etapa. Un elemento (T1) en un panel adyacente n se establece en modo de transmisión, estando dicho elemento situado en la matriz diagonalmente desde los elementos primero y segundo, estando situado en la misma fila que el elemento intermedio. Una vez que esta comprobación se ha realizado, el patrón puede repetirse moviéndolo hacia abajo del panel mediante un conjunto de elementos. El siguiente par de elementos (R2) se conmuta al modo de recepción, con el elemento posterior (T2) en el panel n fijado en el modo de transmisión. Esto puede repetirse hasta que todos los elementos en el panel $n+1$ se hayan comparado con al menos un elemento adicional en ese panel.

Se ha observado que los canales de fuga son bastante diferentes en los elementos en los bordes superior e inferior del panel, tal como los elementos 1501 y 1502, en comparación con los elementos intermedios. Debido a esto se utilizan las soluciones diagonales, para las cuales los canales de fuga son menos dependientes de si el elemento receptor está en los bordes superior o inferior de un panel.

En la Figura 16 se muestra una segunda etapa de calibración del panel. Una vez más, los elementos en un panel $n+1$ se comparan con los vecinos, pero aquí los vecinos están separados por más de un elemento intermedio. En particular, para conservar la simetría, los elementos receptores se separan, en el panel, por tres elementos intermedios. Esto se puede considerar una prueba 1:2 de pares diagonales separados de dos etapas. El elemento de transmisión en el panel adyacente n se encuentra en la misma fila de la matriz que el elemento intermedio central, siendo equidistante de los dos elementos de recepción. Este canal extendido de fuga diagonal proporciona una comprobación adicional de la calibración, y se puede repetir de tal manera que cada elemento del panel $n+1$ se compara con al menos otro elemento, que recibiendo la señal de un elemento de transmisión situado a dos filas de distancia.

En la Figura 17 se muestra una tercera etapa de calibración del panel. Esta etapa proporciona, a diferencia de las otras etapas tratadas, una comprobación no simétrica mediante la cual los elementos de recepción que van a compararse están separados por dos elementos intermedios, con el elemento de transmisión situado más cerca de uno de los elementos de recepción que de otro. Esto se puede considerar una prueba asimétrica 1:2 de pares diagonales separados de una y dos etapas, tratándose de una combinación de las etapas primera y segunda de la calibración del panel mencionada anteriormente. El elemento de transmisión, que se encuentra situado de nuevo en un panel adyacente a los dos elementos de recepción, se encuentra a una fila de distancia de uno de los elementos de recepción y a dos filas de distancia del otro elemento receptor. Una vez más, esta calibración no simétrica se puede repetir de tal manera que cada elemento del panel $n+1$ se compare con al menos otro elemento más. A diferencia de las etapas primera y segunda se requieren al menos dos comparaciones separadas mediante el uso de diferentes elementos de transmisión para el mismo par de elementos receptores (T1 y T2 se utilizan aquí) para proporcionar al menos dos conjuntos de resultados. Esto es necesario debido a la precisión inferior causada por el uso de canales de fuga asimétricos.

Las tres etapas de calibración del panel proporcionan comparaciones para la calibración de los paneles. La relación conocida entre los canales de fuga diagonales de la primera etapa y de la segunda etapa, utilizando la relación establecida por la prueba no simétrica en la etapa tres, permite establecer una conexión para las relaciones entre los elementos impares y pares.

En la Figura 18 se muestra una cuarta etapa de calibración, que constituye una calibración de matriz, ya que permite la calibración de múltiples paneles, en lugar de una calibración del panel interno. Para calibrar la matriz (las relaciones entre los módulos o paneles verticales), se muestran algunos patrones diagonales u horizontales. En esta calibración se comparan al menos dos elementos de dos paneles separados por un panel intermedio; esto es, un elemento en un panel se compara con un elemento en otro panel, estando los dos paneles separados por un panel intermedio. En este caso, un elemento del panel $n+1$ se compara con un elemento desde el panel $n-1$ utilizando un elemento de transmisión del panel n . Los dos elementos de recepción se distribuyen simétricamente alrededor del panel de transmisión de tal manera que se encuentran en canales de fuga geométrica equivalentes. La colocación de elementos de recepción en los canales de fuga geométrica equivalentes se puede lograr asegurando que existe simetría en el posicionamiento de los elementos de recepción sobre un eje que pasa a través del elemento de transmisión, encontrándose el eje en el plano del panel en el que se encuentra el elemento, y siendo los elementos también equidistantes del elemento emisor.

Puede utilizarse un número de posibles relaciones entre los elementos de recepción y transmisión, como se muestra en la Figura 18. Esto puede incluir los elementos de recepción y transmisión que se encuentran en una fila común, siendo adyacentes entre sí. Alternativamente, se puede utilizar una disposición en diagonal de una etapa o una disposición diagonal de dos etapas. Se prefiere alguna forma de promedio para establecer las relaciones de fase y amplitud entre paneles vecinos y para toda la matriz.

Aunque las diversas etapas de calibración se han descrito en un orden particular preferido, cualquier etapa de los procedimientos de calibración descritos puede llevarse a cabo en cualquier orden, y en cualquier combinación con algunas, todas o ninguna de las etapas descritas anteriormente. También pueden utilizarse otras etapas que implican diferentes combinaciones de elementos de transmisión y recepción.

- 5 A medida que se llevan a cabo una serie de calibraciones, puede establecerse un perfil de fase relativa y de amplitud/ganancia, que contiene las fases relativas y los valores de ganancia entre todos los conjuntos de elementos analizados. Este conjunto de valores, que puede incluir los valores de fábrica medidos o teóricamente esperados, puede ser utilizado en futuras calibraciones y para controlar o ajustar los valores de fase y/o ganancia de cada elemento para asegurar que están dentro de los parámetros aceptables para la obtención del perfil y la dirección del haz que se desea. Los perfiles de fase y de amplitud pueden ser almacenados en el almacén/memoria 1106 acoplada a la unidad de control.
- 10

REIVINDICACIONES

1. Una turbina eólica (1) que comprende una torre de turbina eólica, al menos una pala giratoria (5) y un sistema para la medición de las vibraciones de la pala del rotor en dicha turbina eólica, comprendiendo el sistema:
 - al menos una unidad de radar Doppler (7), configurada de manera operativa para emitir y recibir señales de radar, montada en la torre de la turbina eólica (2) en una posición por encima de la posición más baja de al menos una pala, estando colocada la unidad de radar (7) de manera que mida las reflexiones de una señal de radar emitida desde la pala de la turbina (5); y
 - una unidad de procesamiento configurada para recibir los datos de medición de la unidad de radar (7) para determinar, mediante el análisis del desplazamiento Doppler en las señales del radar recibidas con relación a las señales transmitidas debido al movimiento de la pala (5) hacia o alejándose de la torre de la turbina (2), la velocidad de la pala (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2);caracterizada por que:

la unidad de procesamiento está configurada para calcular las propiedades de vibración de la pala sobre la base de la velocidad determinada de la pala (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2), dentro y fuera del plano de rotación del rotor.
2. Una turbina eólica según la reivindicación 1, en la que la unidad de radar (7) es una unidad de radar de onda continua de frecuencia modulada (FMCW) de radar que tiene un período de modulación de frecuencia t_1 de duración tal que una pala del rotor (5) que pasa a través del haz del radar está dentro de dicho haz durante la duración de al menos dos períodos de modulación de frecuencia.
3. Una turbina eólica según la reivindicación 2, en la que el período de modulación de frecuencia está entre 0,5 y 0,01 milisegundos, y preferiblemente entre 0,2 y 0,05 milisegundos.
4. Una turbina eólica según la reivindicación 2 o 3, en la que la unidad de procesamiento está configurada para procesar los datos medidos de la unidad de radar (7) obtenidos durante un primer período de modulación de frecuencia y un período de modulación de frecuencia posterior para determinar el desplazamiento Doppler.
5. Una turbina eólica según la reivindicación 4, en la que la unidad de radar (7) mide, o la unidad de procesamiento determina, una respuesta de frecuencia de la señal de radar de retorno, y en la que la unidad de procesamiento está configurada para:
 - procesar las respuestas de frecuencia obtenidas para la primera y posteriores modulaciones de frecuencia para determinar los perfiles de alcance respectivos indicativos del alcance desde la unidad de radar (7) a la pala (5);
 - procesar los perfiles de alcance para obtener la información de Doppler respectiva;
 - comparar la información de Doppler para determinar la velocidad de la pala (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2).
6. Una turbina eólica según la reivindicación 4 o 5, en la que los perfiles de alcance incluyen una pluralidad de acumuladores de alcance, cada uno correspondiente a un conjunto de alcances, estando configurada la unidad de procesamiento para procesar los datos que caen dentro de los acumuladores de alcance correspondientes a la posición de la pala (5) para obtener la información de Doppler respectiva.
7. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que la unidad de procesamiento está configurada para determinar la velocidad del lado de la torre y del lado opuesto de la pala (5) mediante la identificación de las señales recibidas desde los lados de la pala respectivos.
8. Una turbina eólica según la reivindicación 7 cuando depende de la reivindicación 5, en la que la unidad de procesamiento procesa los perfiles de alcance para obtener la información de Doppler correspondiente para tanto el lado de la torre como el lado opuesto de la pala (5), y compara la información de Doppler para ambos lados de la pala con el fin de determinar la velocidad de cada lado de la pala en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2).
9. Una turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que una unidad de radar (7) está montada en una posición tal que la señal de radar se refleja desde la punta de la pala al pasar por el punto más bajo de su rotación.
10. Una turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende una pluralidad de unidades de radar Doppler (7), cada una montada en la torre de la turbina (2).
11. Una turbina eólica según la reivindicación 10, en la que una pluralidad de unidades de radar Doppler (7) están dispuestas alrededor de la circunferencia de la torre de la turbina eólica (2) a una altura común.

12. Una turbina eólica según la reivindicación 10 o 11, en la que una pluralidad de unidades de radar Doppler (7) están dispuestas linealmente a lo largo de la longitud de la torre (2) entre el centro de rotación de la pala y la posición más baja de la pala.
- 5 13. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en la que al menos una unidad de radar Doppler (7) está montada de forma giratoria en la torre (2), de manera que puede girar alrededor del eje de la torre (2), comprendiendo además la unidad de radar (7) un controlador de rotación para controlar la posición de rotación de la unidad de radar sobre el eje de la torre (2).
- 10 14. Una turbina eólica (1) según la reivindicación 13, teniendo la turbina eólica (1) una góndola (3) a la que se acopla al menos una pala de rotor (5), teniendo la góndola (3) un sistema de control de guiñada para hacer girar la góndola (3) y la pala (5), alrededor del eje de la torre (2) para orientar la pala, de la siguiente forma:
- el controlador de rotación está acoplado al sistema de control de guiñada, siendo operable para recibir datos de guiñada indicativos de la posición de guiñada de la turbina eólica (1), y para controlar la posición de rotación de la unidad de radar (7), situándola considerablemente perpendicular al plano de rotación de la pala del rotor (5) en respuesta a los datos de guiñada.
- 15 15. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el controlador está configurado para emitir una señal de apagado para apagar la turbina eólica cuando la velocidad detectada de la pala (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina excede un valor predeterminado.
16. Un procedimiento para medir la vibración de una pala de rotor en una turbina eólica (1) que comprende una torre de turbina eólica (2) y al menos una pala giratoria (5), comprendiendo el procedimiento:
- 20 - proporcionar al menos una unidad de radar Doppler (7) configurada operativamente para emitir y recibir una señal de radar montada en la torre de turbina eólica (2) en una posición por encima de la posición más baja de al menos una pala (5), estando colocada la unidad de radar (7) para medir las reflexiones de una señal de radar emitida desde la pala de la turbina (5);
- emitir una señal de radar y recibir las reflexiones de la misma desde la pala (5);
- 25 - analizar el desplazamiento Doppler de las señales de radar recibidas con relación a las señales transmitidas para determinar la velocidad del movimiento de la pala (5) hacia o alejándose de la torre de la turbina (2);
- caracterizado por que:
- 30 el procedimiento comprende el cálculo de las propiedades de vibración de la pala sobre la base de la velocidad determinada de la pala (5) en la dirección hacia dentro o hacia fuera de la torre de la turbina (2), dentro y fuera del plano de rotación del rotor.
17. Un subsistema para su uso en una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, que comprende:
- 35 - al menos una unidad de radar Doppler (7) operativamente configurada para emitir y recibir una señal de radar, que puede montarse en la torre de la turbina eólica (2) en una posición por encima de la posición más baja de al menos una pala (5); y
- una unidad de procesamiento configurada para recibir los datos de medición de la unidad de radar (7) y para determinar, mediante el análisis del desplazamiento Doppler en las señales de radar recibidas con relación a las señales transmitidas debido al movimiento de la pala (5) hacia o alejándose de la torre de la turbina (2), la
- 40 velocidad de una pala de turbina eólica (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2);
- caracterizada por que:
- la unidad de procesamiento está configurada para calcular las propiedades de vibración de la pala sobre la base de la velocidad determinada de la pala (5) en la dirección hacia o alejándose de la torre de la turbina (2), dentro y fuera del plano de rotación del rotor.

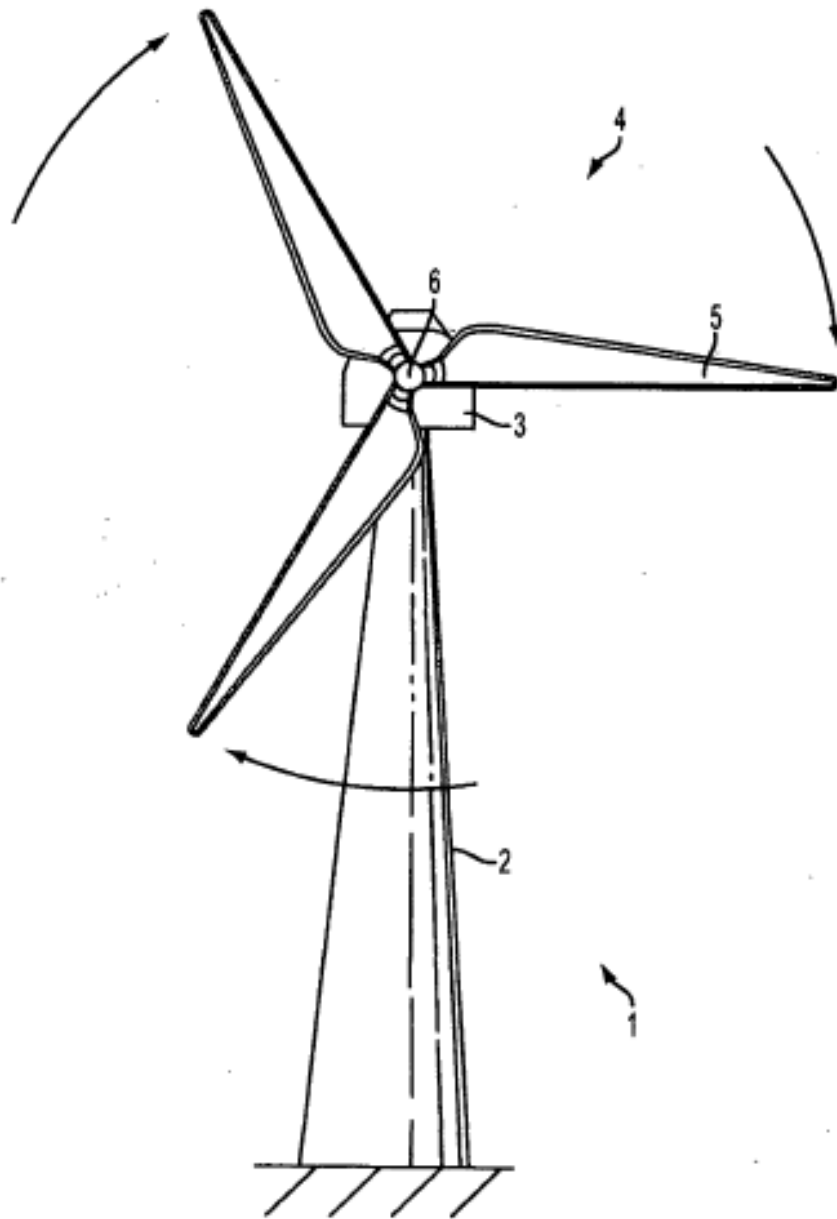


FIG. 1

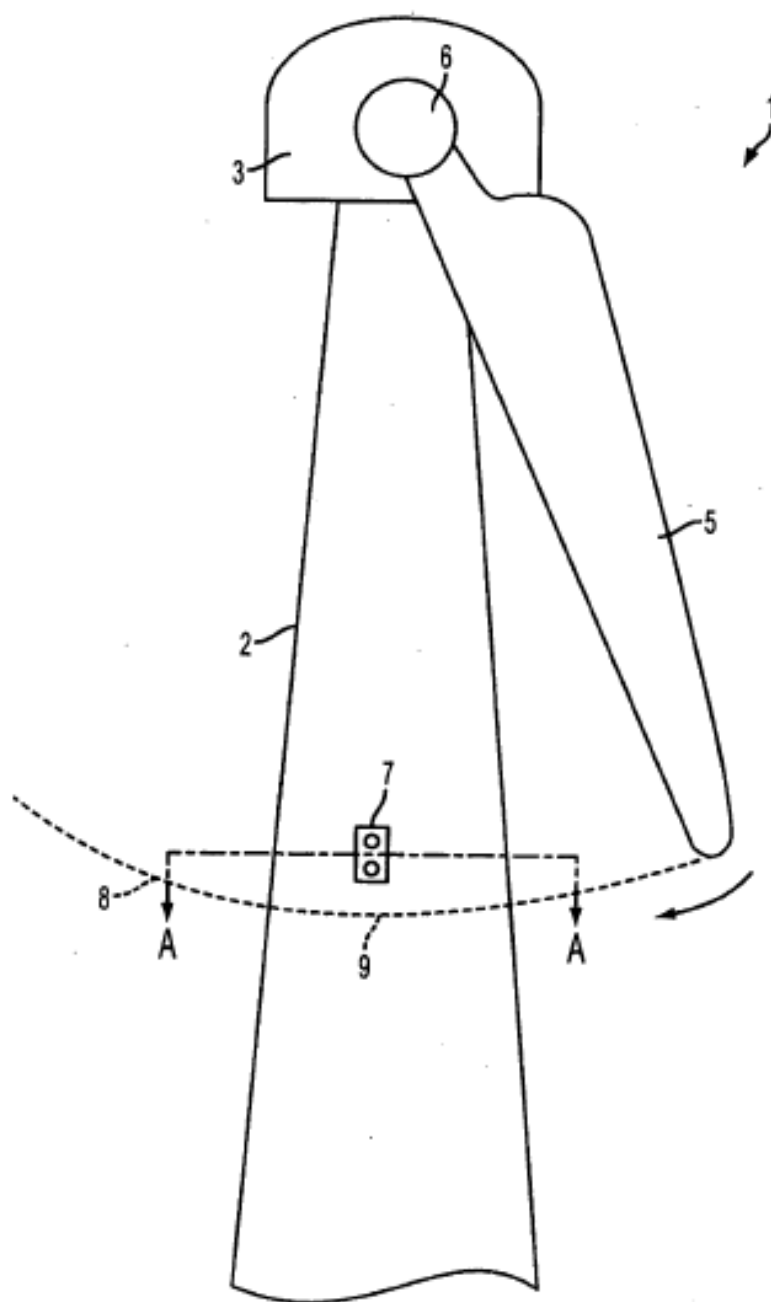


FIG. 2

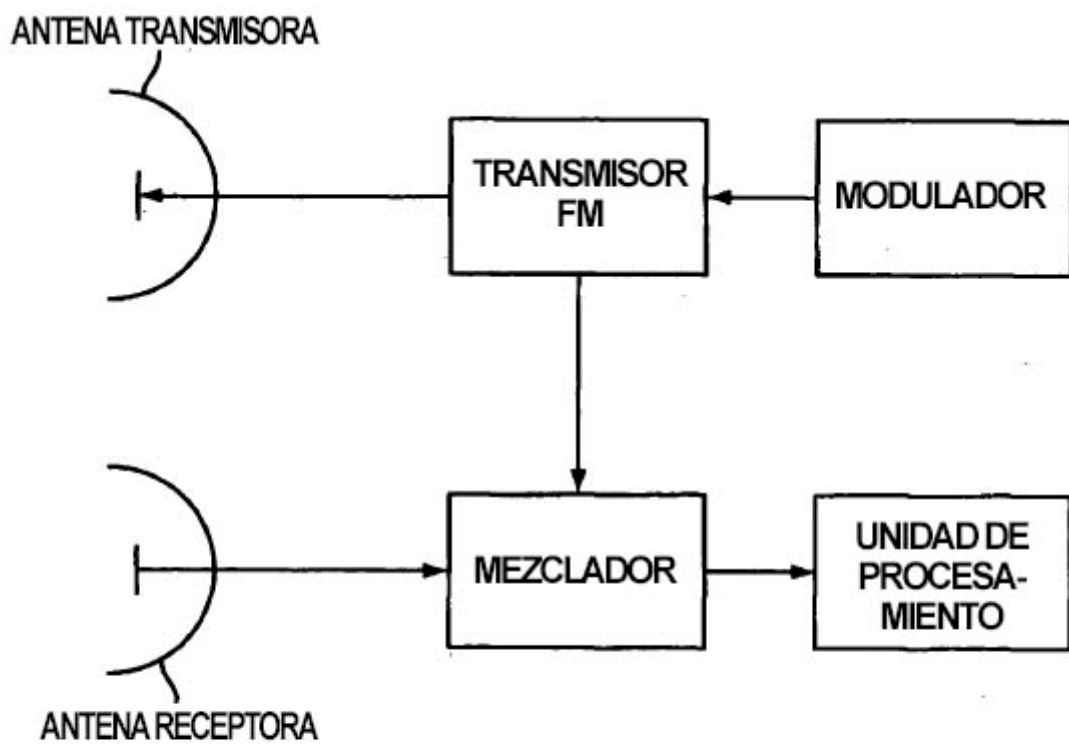


FIG. 3

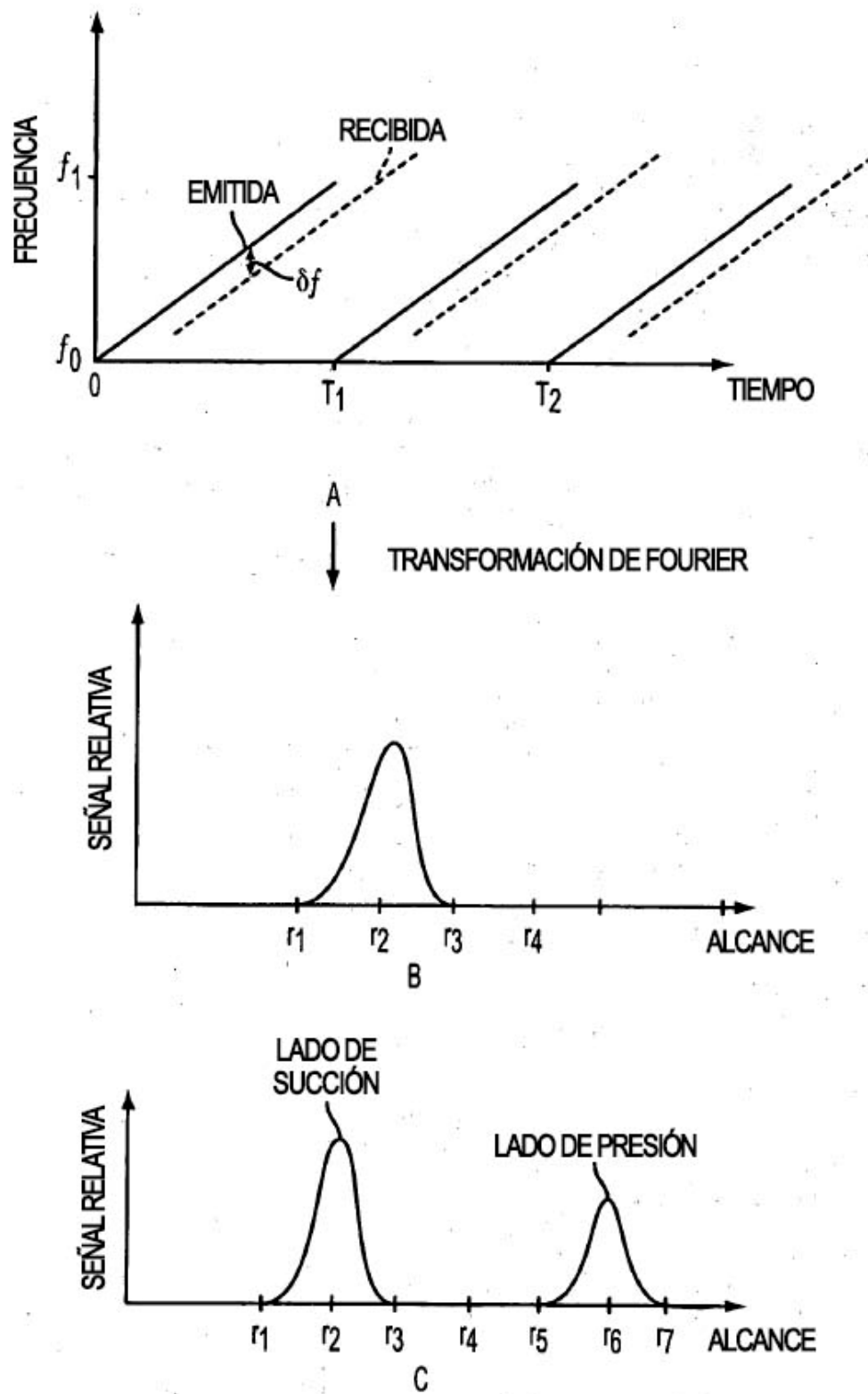


FIG. 4

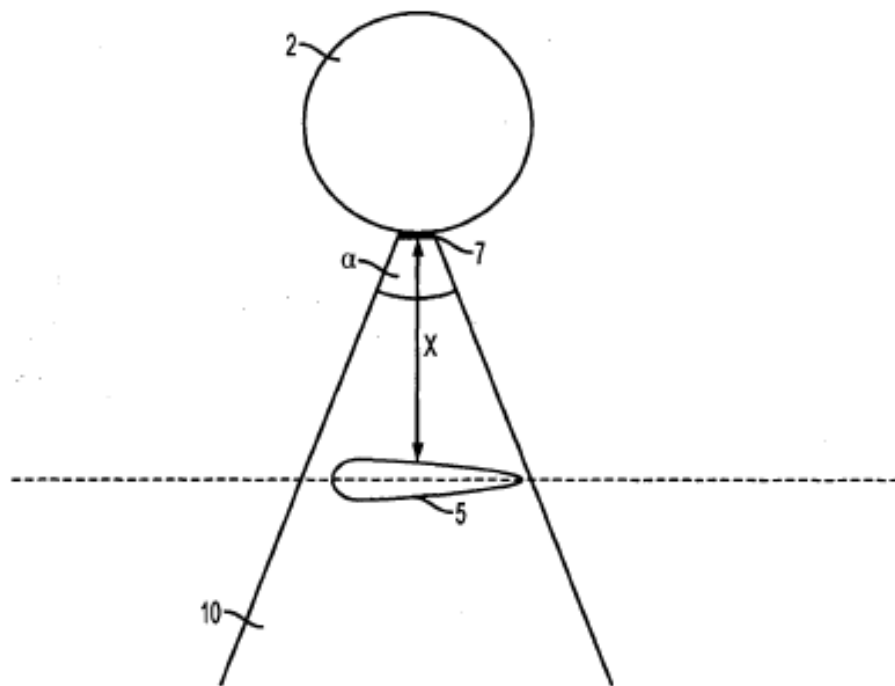


FIG. 5

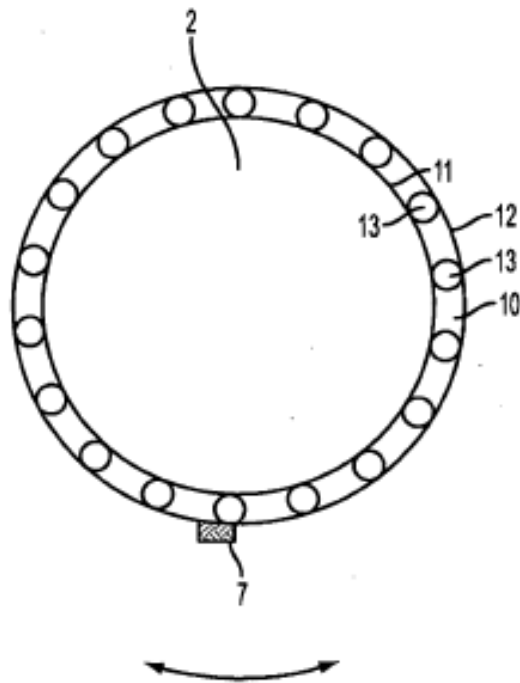


FIG. 6

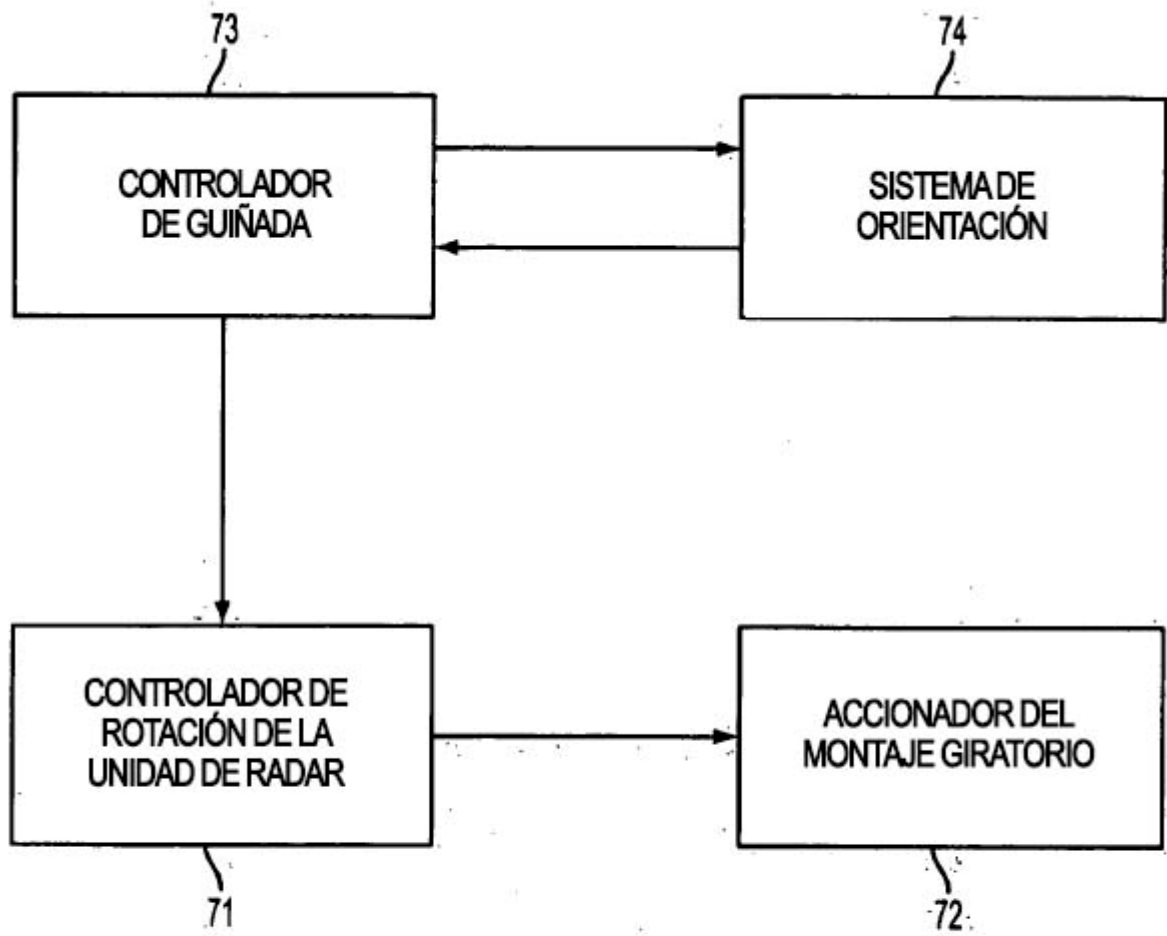


FIG. 7

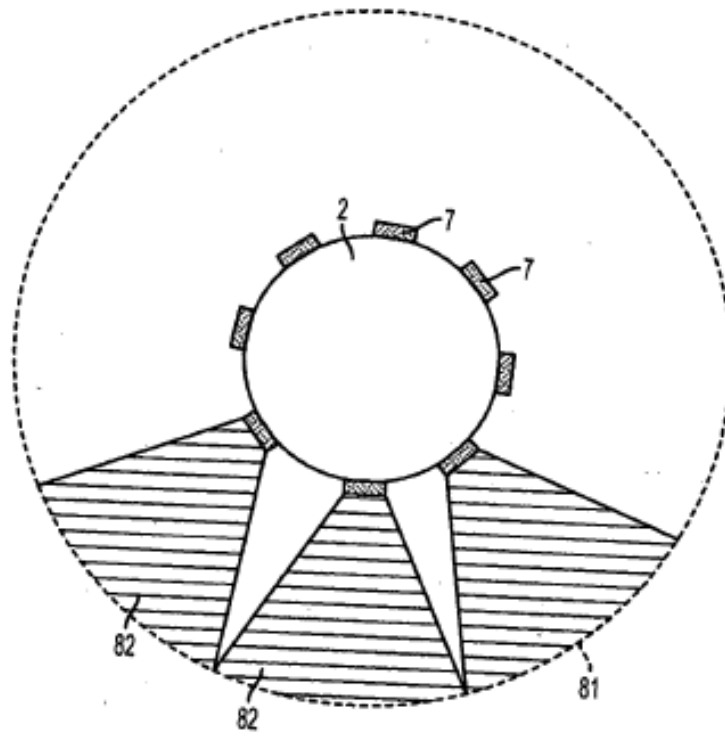


FIG. 8

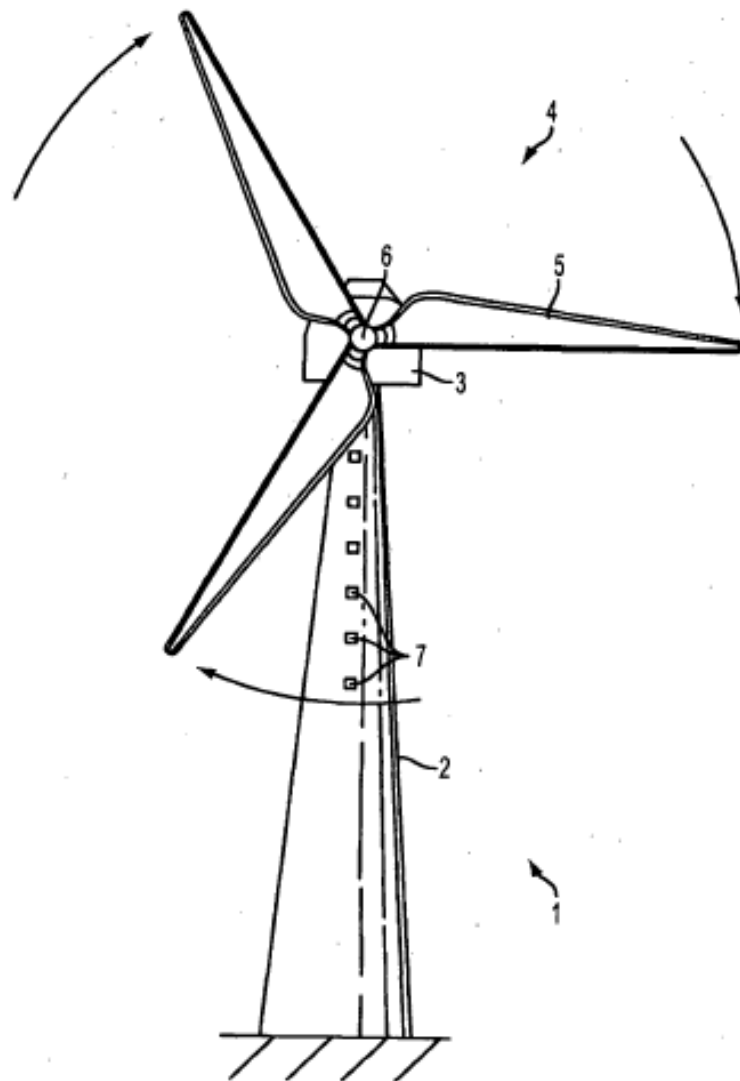


FIG. 9

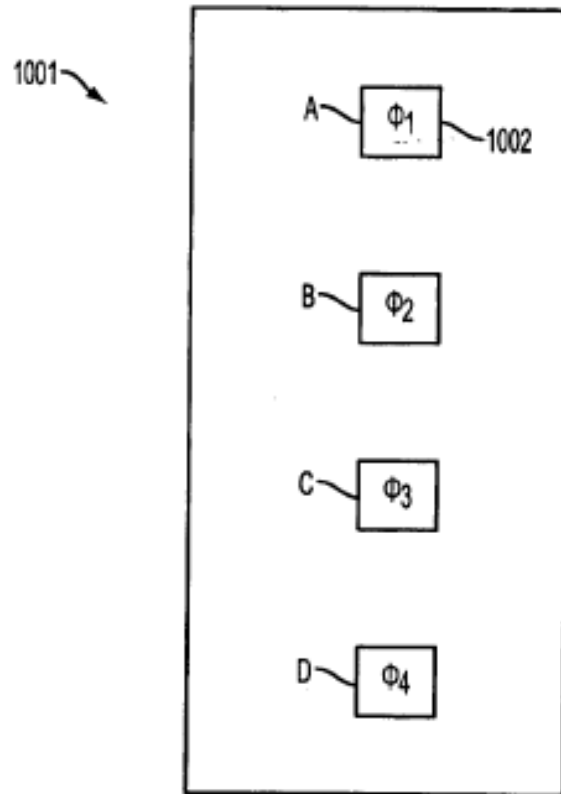


FIG. 10

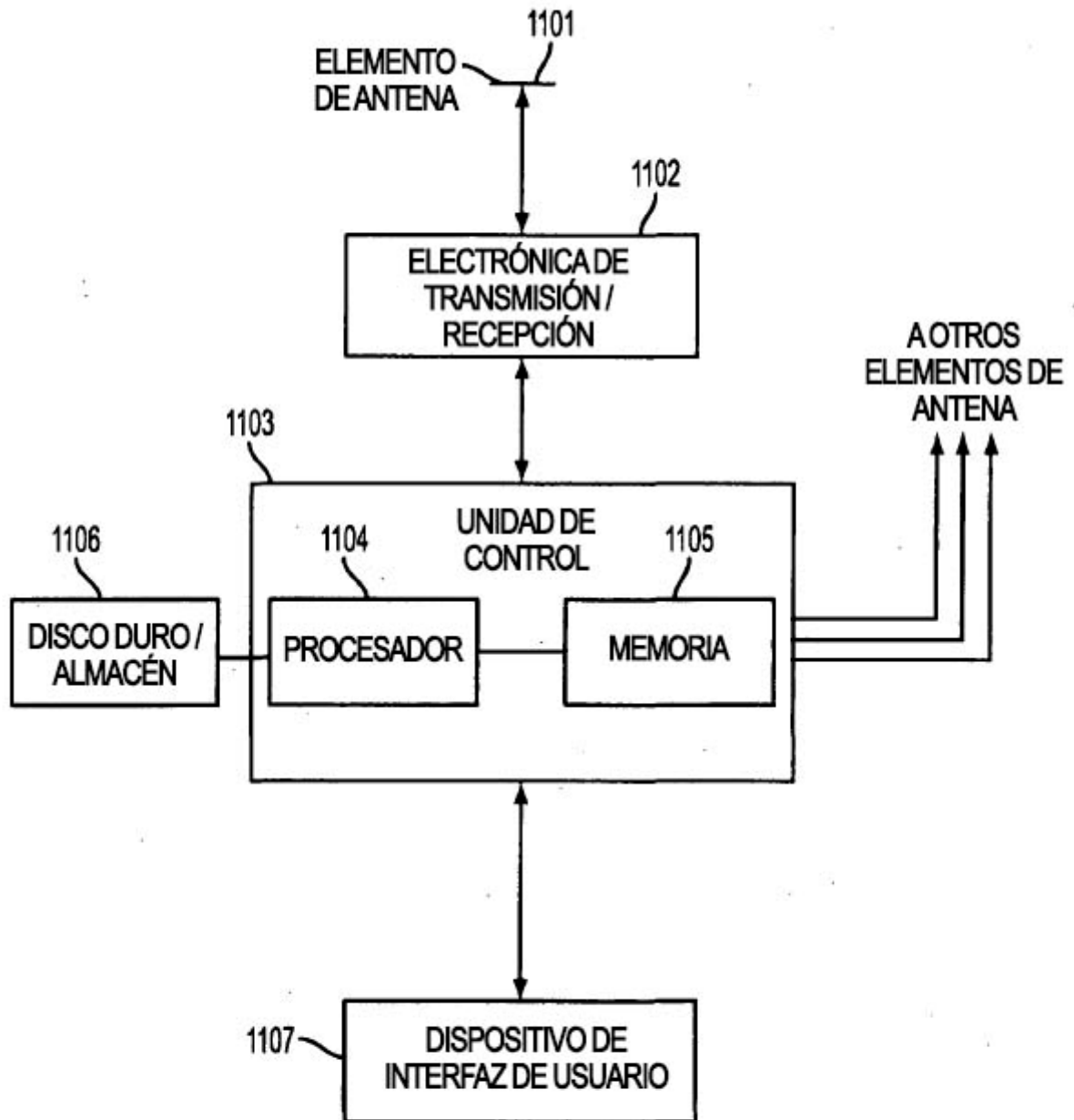


FIG. 11

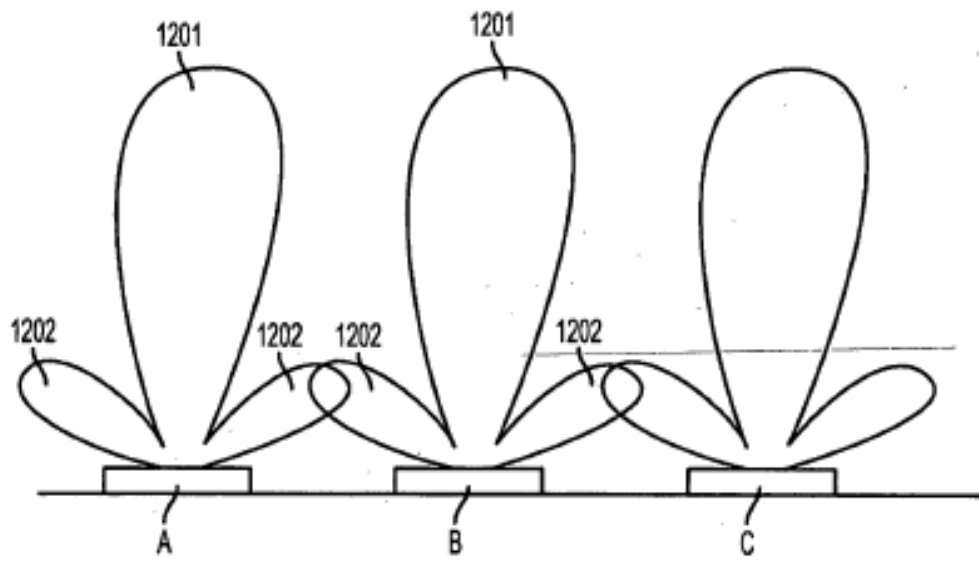


FIG. 12

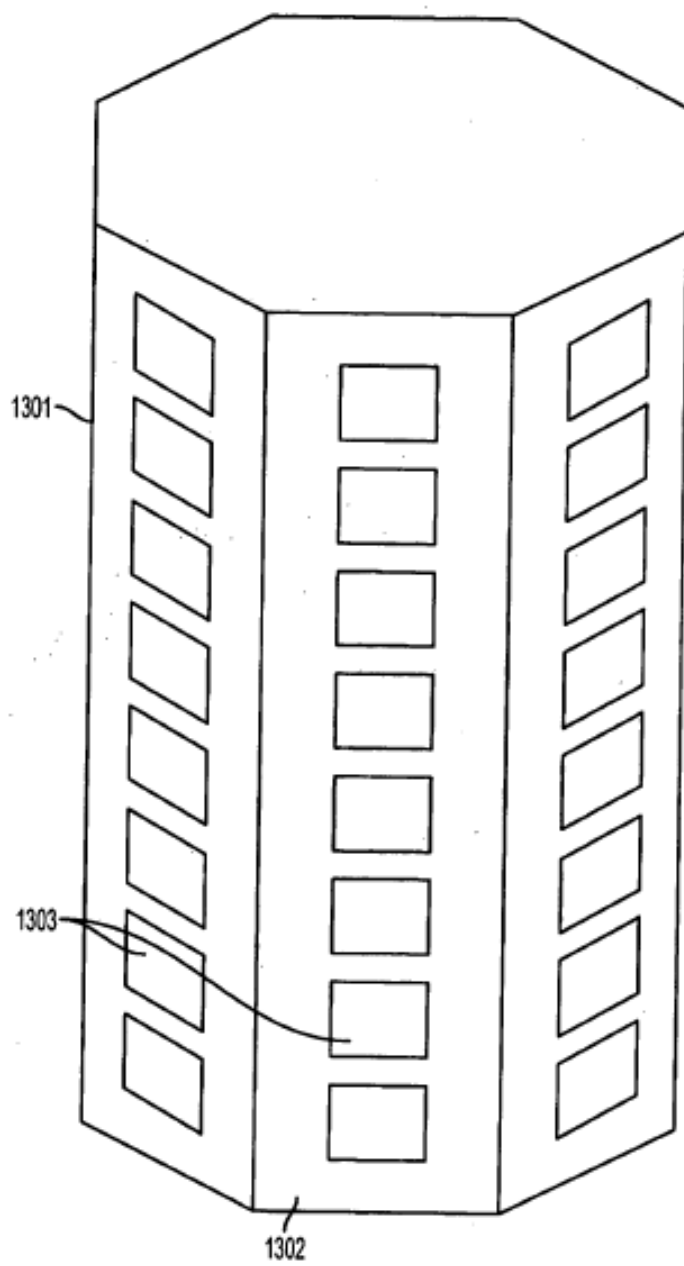


FIG. 13

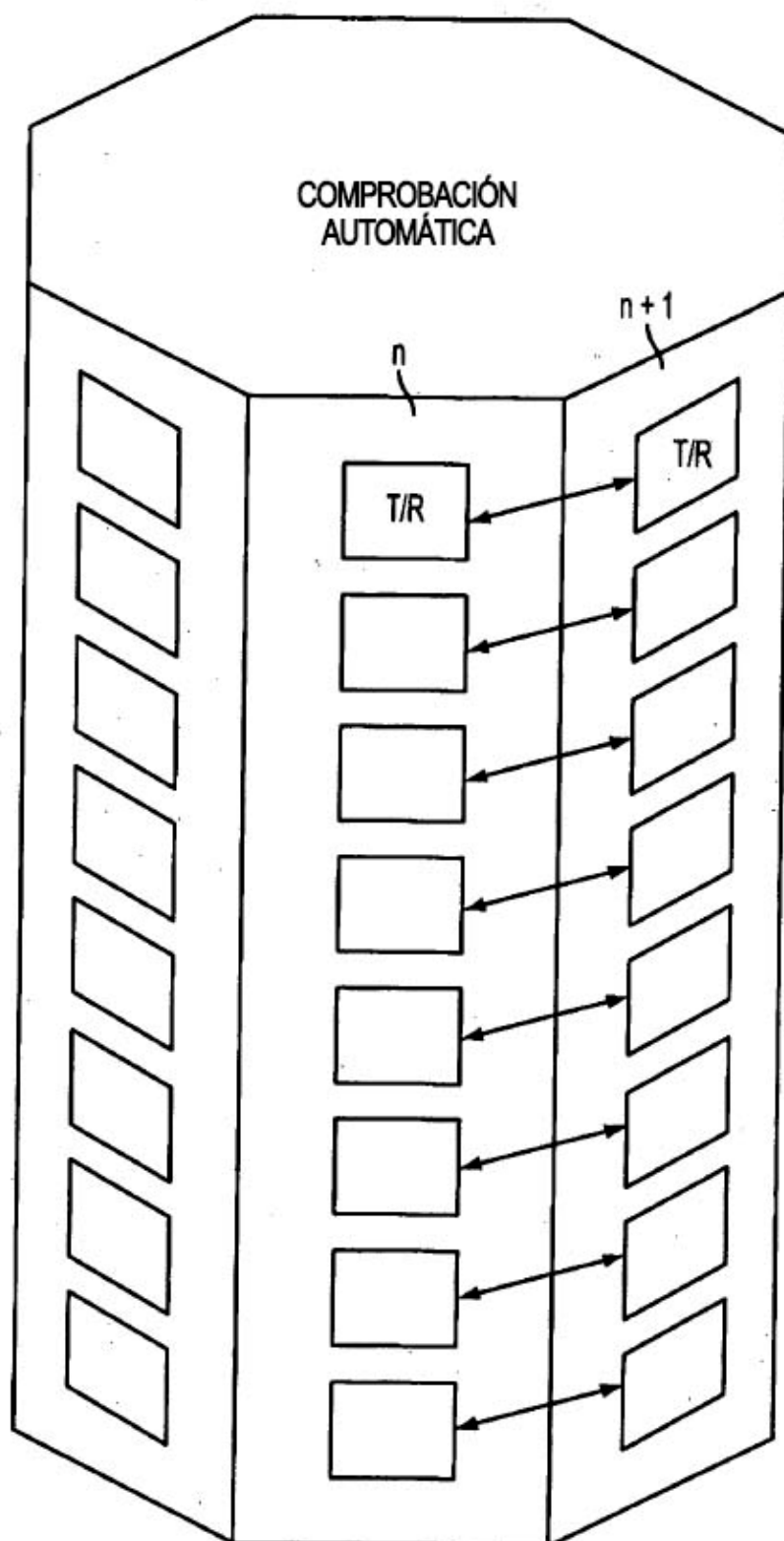


FIG. 14

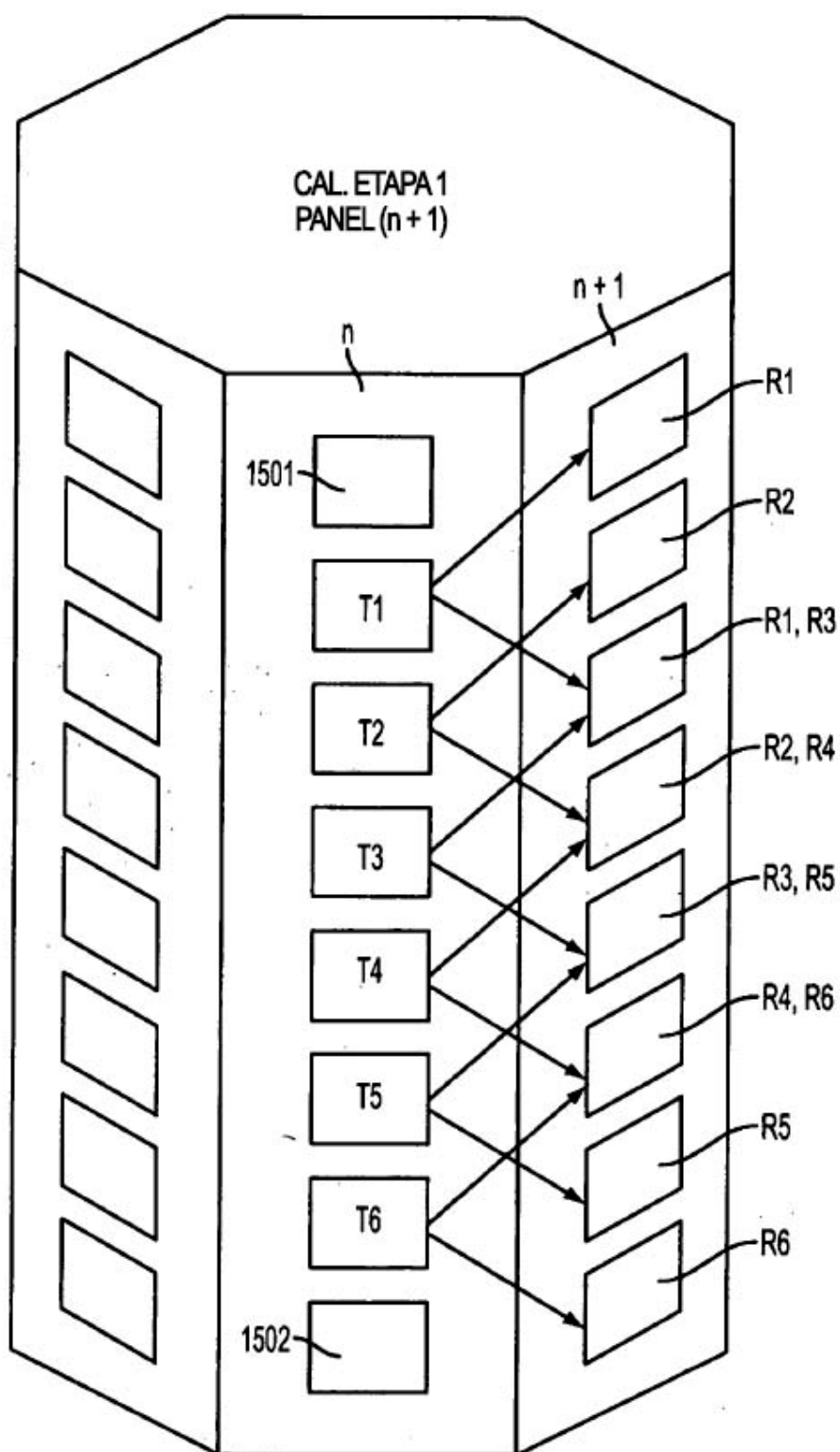


FIG. 15

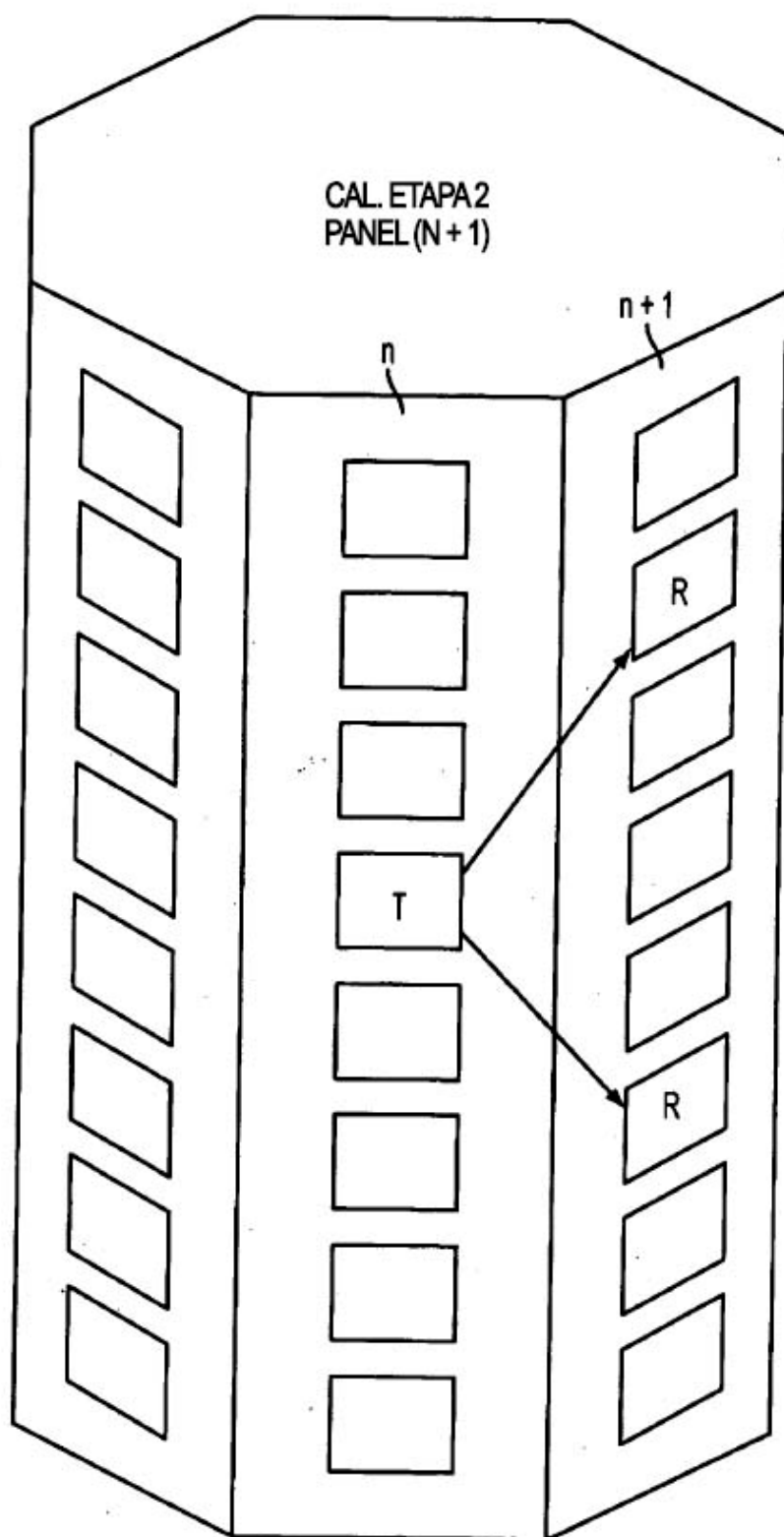


FIG. 16

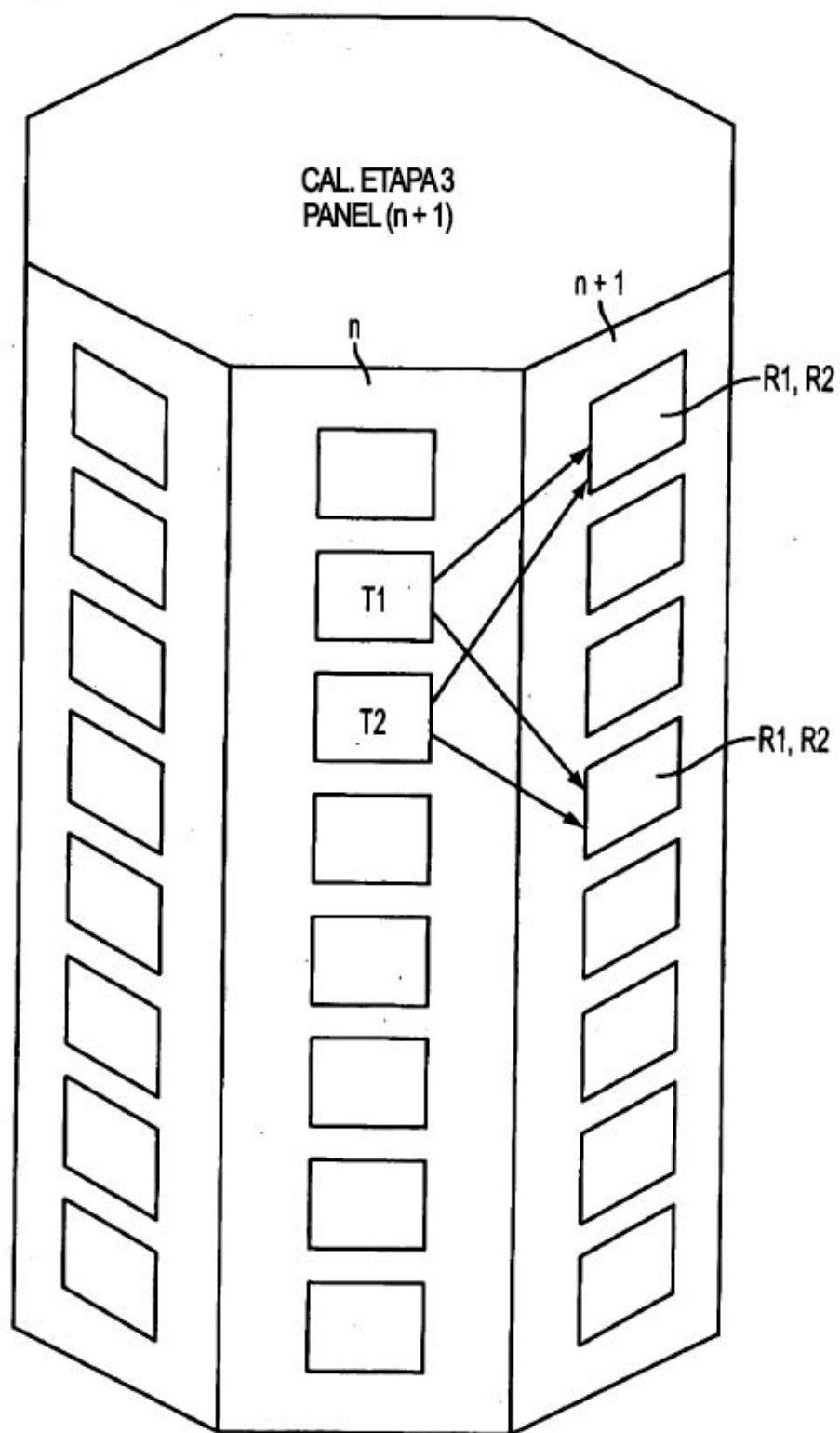


FIG. 17

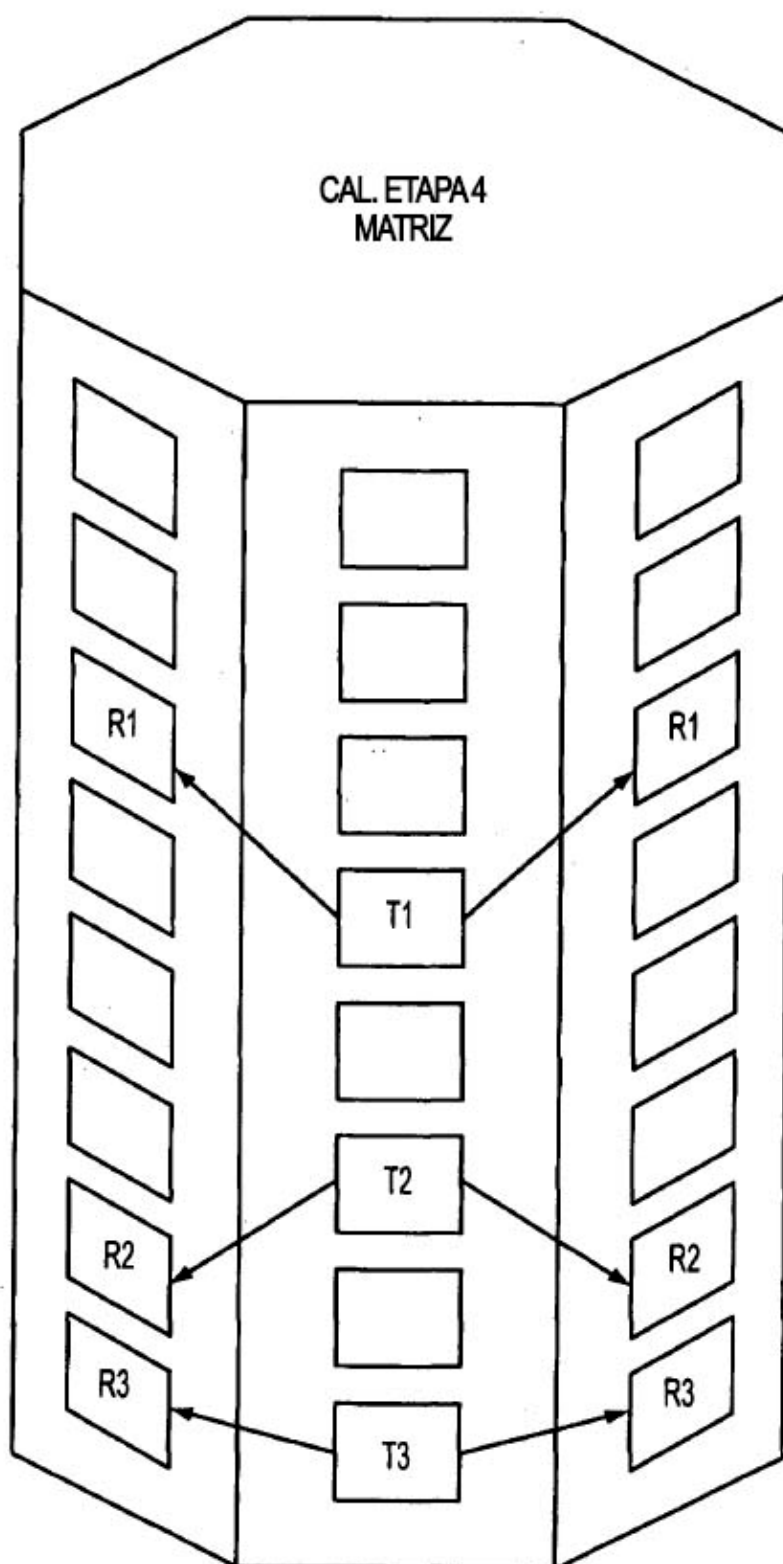


FIG. 18