

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 662 008**

51 Int. Cl.:

**G01P 13/00** (2006.01)  
**F03D 80/40** (2006.01)  
**F03D 17/00** (2006.01)  
**F03D 7/00** (2006.01)  
**G01M 9/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.12.2009 PCT/EP2009/008934**  
87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2010 WO10069534**  
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.12.2009 E 09801662 (9)**  
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018 EP 2374010**

54 Título: **Sensor de turbulencia y sistema sensor del estado de la pala**

30 Prioridad:

**16.12.2008 GB 0822930**  
**16.12.2008 US 122974 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**05.04.2018**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**  
**Hedeager 42**  
**8200 AARHUS N, DK**

72 Inventor/es:

**OLESEN, IB**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 662 008 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**

Sensor de turbulencia y sistema sensor del estado de la pala

5 La presente invención se refiere a un sensor de turbulencia como parte de un sistema sensor del estado de la pala, y en particular a un sistema sensor para la instalación en una turbina eólica para detectar la materia acumulada tal como suciedad y hielo sobre componentes de la turbina eólica.

10 La Figura 1 ilustra una turbina eólica 1, que comprende una torre 2 de turbina eólica sobre la que se monta una góndola 3 de turbina eólica. Se monta un rotor 4 de turbina eólica que comprende al menos una pala 5 de turbina eólica sobre un buje 6. El buje 6 se conecta a la góndola 3 a través de un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde el frente de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la Figura 1 puede ser un modelo pequeño indicado para utilización doméstica o de iluminación, o puede ser un modelo grande usado, tal como los que son adecuados para su uso en generación de electricidad, a gran escala en una granja eólica por ejemplo. En este último caso, el diámetro del rotor podría ser tan grande como 100 metros o más.

15 Las turbinas eólicas se localizan frecuentemente en áreas en las que las condiciones son severas, tales como marinas, litorales, o áreas elevadas, y durante la operación puede acumularse frecuentemente materia no deseada, tal como hielo y suciedad, sobre la superficie de los componentes de la turbina eólica. El hielo en particular puede acumularse muy rápidamente como resultado de cambios bruscos en las condiciones climáticas.

20 La acumulación de dicha materia es indeseable dado que puede reducir la vida útil de un componente, bien por corrosión, desgaste incrementado, o bien por esfuerzos mecánicos incrementados resultantes del peso extra de la materia. En el peor de los casos, dicha materia puede dar como resultado un fallo prematuro y completo de un componente de turbina.

25 Debido a la localización frecuentemente inaccesible de las turbinas eólicas, los presentes solicitantes han entendido que es deseable una forma de detectar la acumulación de materia indeseable sobre los componentes de la turbina eólica, de modo que el mantenimiento de los componentes de la turbina eólica pueda llevarse a cabo más eficientemente, y mejorarse la vida útil de los componentes.

30 Adicionalmente, en la mayor parte de las turbinas eólicas, tales como aquellas que operan usando control de paso o de pérdida se controla cuidadosamente el paso de las palas del rotor con relación a la dirección del viento para extraer la potencia óptima del viento, y evitar sobrecargas peligrosas en el generador. Una acumulación de materia sobre las palas puede hacerlas menos eficientes en la extracción de potencia del viento, y puede hacer adicionalmente más difícil controlar con precisión su paso para regulación de potencia y seguridad. Es por lo tanto particularmente deseable una forma de detección de la acumulación de materia no deseada sobre las palas de la turbina eólica.

35 El documento DE 31 06 624 divulga un método de control de la caja de engranajes de una turbina eólica. El documento US 2004/252290 divulga métodos de uso de un medidor de tensiones óptico, que incluye un dispositivo de medición del viento. El documento DE 199 23 087 divulga un dispositivo para la medición de presión, sonidos, y/o vibración, particularmente para análisis de flujo sobre misiles. El documento GB 2105846 divulga un caudalímetro de vórtice. El documento GB 2335108 divulga un micrófono óptico que comprende una fuente de luz, un fotodetector y una membrana sensible al sonido con una superficie reflectora. El documento US 7355720 divulga un sensor de desplazamiento óptico que usa un láser de emisión superficial de cavidad vertical acoplado a una cavidad óptica formada por una membrana móvil.

**Sumario de la invención**

50 De acuerdo con una realización de la invención, se proporciona una pluralidad de sensores de turbulencia para un componente de turbina eólica que tiene una cavidad en un sistema de sensores para detectar el estado superficial del componente de la turbina eólica. El sistema de sensores también comprende una memoria y un procesador. Cada sensor de turbulencia comprende: una membrana del sensor, para detección de la turbulencia del flujo de aire que pasa por una superficie del componente de la turbina eólica, en el que la membrana del sensor es parte integral de la superficie, y cubre al menos parte de la cavidad; una fuente de luz localizada en la cavidad del sensor para la iluminación de la superficie de la membrana del sensor dentro de la cavidad; un detector de luz localizado en la cavidad para la detección de la luz reflejada desde la superficie de la membrana, y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a través de la membrana del sensor.

60 El procesador determina un estado de la superficie del componente a partir de la salida recibida desde los sensores de turbulencia, la memoria registra las salidas recibidas desde los sensores de turbulencia a lo largo de un período de tiempo, y el procesador determina un estado de la superficie del componente basándose en un cambio en las salidas comparadas con salidas pasadas. En particular, el estado detectado es la acumulación de materia sobre la superficie del componente.

La invención proporciona un sistema de sensores sensible debido al hecho de que pueden detectarse pequeños desplazamientos de la membrana del sensor usando la fuente de luz y detector. Además, el sensor es relativamente fácil de instalar y puede situarse en la pala de la turbina eólica para protección, y para asegurar que la presencia del sensor no interfiere con la medición. Dado que hay pocas partes móviles, el sensor es resistente a cambios extremos de temperatura.

Los cambios en un estado del componente de la turbina eólica, tales como deterioro de una superficie de la pala o la acumulación de materia tal como suciedad o hielo, afectarán grandemente al flujo de aire a través de la superficie de la pala. Los sensores de turbulencia descritos proporcionan una forma fiable y barata de detectar cambios en el estado de la pala.

La memoria registra las salidas recibidas desde los sensores de turbulencia a lo largo de un período de tiempo, y el procesador determina un estado de la superficie de la pala basándose en un cambio en las salidas comparadas con salidas pasadas. Esto permite que las salidas pasadas de los sensores de turbulencia actúen como una referencia para comparación con las lecturas instantáneas o actuales que se están tomando. La acumulación de suciedad por ejemplo, puede manifestarse a sí misma como un incremento gradual en la turbulencia detectada. La acumulación de hielo por otro lado puede ocurrir rápidamente a lo largo de un cierto número de horas. Por tanto, también puede deducirse la naturaleza de la materia. Preferentemente, el sistema de sensores comprende una pluralidad de sensores sobre los lados de barlovento y sotavento de la pala, de modo que se obtiene una visión completa desde los sensores.

En una realización, la fuente de luz y el detector de luz en la cavidad son fibras ópticas conectadas a una fuente de luz electro-óptica. Esto permite que se evite el uso de componentes eléctricos en el sensor, y significa que el sensor será resistente a descargas de rayos. Estas son especialmente comunes para las palas de la turbina eólica. Cualesquiera componentes eléctricos para el sensor pueden alojarse en una parte de la turbina eólica que esté eléctricamente apantallada.

Preferentemente, el sensor comprende un sumador para añadir la luz reflejada desde la superficie de la membrana a una señal de luz de referencia para dar un patrón de interferencia que indique el desplazamiento de la membrana. El uso de un patrón de interferencia proporciona la forma más precisa de interpretar el desplazamiento de la membrana, dado que pueden usarse pequeños desplazamientos de la membrana para dar grandes variaciones en intensidad. Para desplazamientos mayores, se produce un patrón de intensidad sinusoidal, significando que la información acerca de la velocidad a la que el desplazamiento está ocurriendo así como la dirección de desplazamiento puede obtenerse a partir del análisis de la frecuencia sinusoidal y de la tasa de ocurrencia.

En una realización, el sumador comprende un espejo parcial situado en la cavidad del sensor para reflejar una parte de luz desde la fuente de luz al detector de luz y proporcionar la señal de luz de referencia. Por tanto, todos los componentes del sensor se proporcionan localmente dentro de la cavidad del sensor para facilidad de sustitución y mantenimiento.

En una realización adicional, la cavidad del sensor está sellada. Esto permite que el entorno de la cavidad sea mantenido con niveles de humedad y temperatura tales que aseguren un buen funcionamiento de la membrana del sensor. Además, la cavidad puede llenarse con un gas distinto del aire, tal como un gas inerte.

En una realización, la membrana del sensor puede formarse de un material diferente de aquel con el que se forma la superficie del componente de la turbina eólica. Esto permite que se adapte con más precisión a su función como un sensor, en términos de tensión y capacidad de respuesta. Dependiendo de la instalación, la membrana del sensor puede formarse alternativamente por la superficie de la pala en sí misma.

En una realización, el sensor de turbulencia comprende un procesador para el análisis de las variaciones sinusoidales en el patrón de interferencia a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado para determinar si el flujo de aire es turbulento. El procesador puede analizar el patrón usando un reconocimiento de patrón o técnicas estadísticas y dar una determinación con un nivel asociado de confianza. El análisis durante un período de tiempo más largo puede dar un grado más alto de confianza en el rendimiento del sensor.

En una realización adicional, el procesador compara las salidas de los sensores de turbulencia de una pala de turbina eólica con las de otra. Esto permite al procesador dar una indicación de si las palas están montadas y funcionando correctamente, y proporciona datos adicionales por comparación del estado de la pala. El sistema de sensor detecta la acumulación de materia sobre la superficie de la pala.

El procesador determina un estado de la superficie de la pala, en la que la materia ha ido acumulándose sobre la superficie de la pala, con un número predeterminado de sensores de turbulencia indicando persistentemente turbulencia.

La invención también proporciona una turbina eólica que comprende un sensor de turbulencia o un sistema de sensores del estado de la pala tal como se ha descrito anteriormente.

**Breve descripción de los dibujos**

Se describirán ahora con más detalle realizaciones preferidas de la invención, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos en los que:

- 5 la Figura 1 ilustra una turbina eólica;
- la Figura 2 ilustra un primer ejemplo de un sensor de turbulencia de acuerdo con la invención;
- 10 la Figura 3 ilustra un segundo ejemplo de un sensor de turbulencia de acuerdo con la invención;
- la Figura 4 ilustra un sistema de sensores de ejemplo que incorpora sensores tales como los mostrados en las Figuras 2 o 3;
- 15 la Figura 5 es una realización de un patrón de intensidad de ejemplo desarrollado a partir de señales de sensores;
- la Figura 6 es una ilustración de una tabla de resultados de sensores usados en un sistema de control y alarma.

**Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

20 La figura 2 ilustra un primer ejemplo de un sensor de turbulencia de acuerdo con una realización preferida de la invención. El sensor de turbulencia se muestra in situ integrado dentro de la pala de un rotor de turbina eólica, o de otro componente.

25 El sensor 10 comprende una carcasa de sensor 11, que tiene paredes laterales 12 que definen una cavidad 13. En la cavidad 13, se sitúa el aparato sensor, indicado generalmente por el número de referencia 14. Una superficie de la carcasa del sensor 11 está provista con una membrana de sensor 15. En la práctica, el sensor 10 se monta en la pala 5 de modo que la membrana del sensor 15 separe la cavidad 13 del aire exterior, y de modo que la membrana 15 esté en contacto con el flujo de aire a través de la superficie de la pala. La cavidad está totalmente sellada frente al ambiente exterior por las paredes laterales 12 y la membrana 15, de modo que el movimiento de la superficie de la membrana puede considerarse totalmente atribuible a variaciones en el flujo de aire a través de la superficie de la pala 5. El sellado de la cavidad actúa también para mantener la superficie interna de la membrana limpia, y permite que el entorno interno de la cavidad esté regulado para evitar la acumulación de humedad que podría afectar a la membrana del sensor 15 y al aparato 14. La cavidad 13 puede rellenarse por ejemplo con un gas distinto del aire, tal como un gas inerte, que proporcione un mejor entorno operativo para la membrana.

40 Preferentemente, la superficie de la pala 5 y la membrana 15 se disponen de modo que formen una superficie de pala suavemente continua. Es indeseable tanto para las propiedades aerodinámicas de la pala como para la sensibilidad del sensor que la conexión entre la membrana 15 y la superficie de la pala no sea continua dado que esto puede introducir obstrucciones o impedimentos al flujo de aire.

45 La membrana 15 se dispone de modo que sea susceptible a cambios en el flujo de aire en la superficie del componente de la turbina eólica. Por lo tanto es relativamente delgada, en algunas realizaciones entre 0,5 y 2 mm, y se tensa de modo que el flujo de aire turbulento dé como resultado solamente un pequeño movimiento de la superficie de la membrana. Se produce un patrón de interferencia dirigiendo luz sobre la membrana para medir el desplazamiento de la membrana. En la práctica, por lo tanto, se ha hallado ventajoso un intervalo de movimiento de la membrana del orden de varios micrómetros, debido a la longitud de onda de la luz usada. La elección del material de la membrana es crítica para asegurar que es adecuado para la medición. Un material que sea demasiado ligero y flexible será demasiado sensible a cambios en el flujo de aire incluso en condiciones laminares por lo que no será adecuado para distinguir el flujo turbulento y el laminar. Preferentemente, el material es por tanto suficientemente fuerte y rígido para asegurar que solo fuertes vibraciones (digamos en el intervalo de 10 a 100 Hz) del flujo de aire turbulento darán una señal de interferencia suficiente.

55 Es posible usar la superficie exterior de la pala del rotor en sí como la membrana 15. En este caso, el aparato sensor 14 puede instalarse en la pala del rotor 5 bajo la superficie exterior, con o sin la carcasa del sensor 11 creando una cavidad sellada para el aparato. Si se instala el sensor 10 dentro de la pala del rotor 5 u otro componente de la turbina eólica, como una unidad separada, entonces se ha visto como adecuado un orificio de 30 a 100 mm de diámetro para alojar la carcasa del sensor 11 y el aparato 14.

60 Se explicará ahora con mayor detalle la construcción interna del aparato sensor 14. El aparato sensor 14 comprende una fuente de luz 16 dirigida a la membrana 15. En donde es posible, es ventajoso evitar el uso de componentes eléctricos en las palas del rotor dado que son más susceptibles a daños por descargas de rayos. Por tanto, la fuente de luz 16 comprende preferentemente una fibra óptica 17 conectada a una fuente de luz opto-electrónica, tal como un fotodiodo o láser, localizado de modo remoto en el buje de la pala del rotor. En la presente realización la fuente de luz 16 constituye el extremo expuesto de la fibra óptica 17 y un montaje adecuado para soportar la fibra en la cavidad del sensor y asegurar que se dirige con seguridad hacia la membrana 15.

En la Figura 2, la fuente de luz 16 que comprende la fibra óptica 17 actúa también como un receptor para la luz que es reflejada de vuelta desde la membrana 15. La fuente de luz 16 se dispone por lo tanto perpendicularmente a la membrana 15 de modo que al menos parte de la luz reflejada desde la membrana incidirá sobre el extremo abierto de la fibra óptica. El aparato 14 comprende opcionalmente una o más lentes 18 proporcionadas entre la fibra óptica 17 y la membrana 15. De este modo, un haz de luz 19 emitido desde la fibra 17 puede enfocarse dentro de un haz más ajustado incidente sobre la membrana y el haz reflejado de vuelta puede enfocarse al menos parcialmente sobre el extremo de la fibra 17.

El aparato 14 puede comprender también un espejo parcialmente reflector 20, localizado entre la membrana y la fibra óptica 17. De este modo, la fibra óptica recibirá luz reflejada de vuelta desde tanto el plano del espejo 20 como también desde el plano de la membrana 15. Si se instalan una o más lentes 18, el espejo parcialmente reflector 20 puede localizarse ventajosamente entre la membrana 15 y las una o más lentes 18. El aparato 14 se sujetará dentro de la cavidad 13 mediante conexiones adecuadas a las paredes de la carcasa 12.

Se apreciará que tendrá lugar alguna reflexión interna de la luz de la fibra óptica 17 en la interfaz de fibra a aire en la fibra 17. Como resultado, incluso sin el espejo parcial 20, puede producirse un patrón de interferencia usando solamente la fibra óptica 17 y la superficie de la membrana 15. Sin embargo, la cantidad de luz sometida a reflexión interna es solamente de aproximadamente el 4 % del total. Aunque esto es suficiente para producir una señal de referencia útil para interferir con la señal de sensor desde la membrana 15, en algunas realizaciones es útil proporcionar una señal de referencia no reflejada más fuerte. Dado que la reflexión desde el espejo parcial es de aproximadamente del 40 al 50 % y la reflexión desde la membrana 15 de un orden de magnitud similar, el espejo parcial proporciona una referencia y señal de sensor de magnitudes similares. También permite que se usen fuentes de luz que no sean especialmente potentes, haciendo así al sensor más fácil de producir. En este caso, la interferencia más significativa tiene lugar en el espejo parcial, aunque como anteriormente, tendrán también lugar interferencias en la interfaz fibra a aire.

La localización del espejo parcialmente reflector 20 en la cavidad del sensor 13 es ventajosa, dado que significa que todos los componentes que es probable que requieran instalación y mantenimiento se localizan juntos en la misma localización del componente. Alternativamente, el espejo parcialmente reflector puede suprimirse de la cavidad y localizarse en su lugar en la trayectoria de la fibra óptica 17, tal como se describirá más adelante. Esto puede ser útil si se desea ahorrar espacio en la cavidad del sensor 13.

En el sensor descrito anteriormente con referencia a la Figura 2, se usa una única fibra óptica 17 de modo que forme un único par de fuente de luz y sensor del receptor. La interferencia puede tener lugar en la cavidad 13 como se ha descrito anteriormente, tanto en la interfaz de espejo como de fibra, o incluso en una localización separada de la cavidad, si la señal de retorno es interferida con una señal de luz de referencia.

Se describirá ahora una realización alternativa con referencia a La Figura 3. En la Figura 3 el aparato sensor 14 comprende una fibra óptica fuente de luz 21 y 23 y una fibra óptica receptora de luz 22 y 24. Las fibras ópticas están típicamente en ángulo de modo que el haz desde una fibra 21, sea reflejado por la membrana 15, y posteriormente incida sobre la otra fibra 22. Como anteriormente, la luz que incide sobre la membrana 15 se somete a un cambio en la longitud de la trayectoria como resultado del movimiento de la membrana con respecto a la cavidad del sensor. Esta luz es recibida a continuación por la otra fibra 22 y es interferida con una parte no reflejada, o de referencia de la luz, para producir un patrón de interferencia. En la Figura 3, la luz se transmite a y desde la cavidad del sensor por medio de diferentes fibras ópticas 23 y 24.

Podrían implementarse y se les ocurrirán a los expertos en la materia otras disposiciones adecuadas del sensor.

Los sensores de turbulencia mostrados en las Figuras 2 o 3 son parte de un sistema más grande de detección y control 40 de la turbina eólica, tal como se muestra en la Figura 4. El sistema de detección y control 40 de la turbina comprende una o más fuentes de luz 41, tal como un láser o fotodiodos, acoplados a uno o más mezcladores ópticos 42. El mezclador óptico puede usarse por ejemplo para proporcionar una mezcla de la luz de la señal reflejada, y de la luz de referencia no reflejada en casos en los que no se usa en la cavidad del sensor el espejo parcial 20.

Se conectan fibras ópticas 43 entre los uno o más mezcladores ópticos 42 y los sensores de turbulencia 44 respectivos. Los sensores de turbulencia 44 pueden ser, por ejemplo, los ilustrados en las Figuras 2 y 3 anteriores, en cuyo caso las fibras 43 corresponden a las fibras 17, 23 y 24 tal como se muestra en las figuras. Adicionalmente, las fibras 43 transportan las señales de luz reflejada desde los sensores de turbulencia de vuelta al mezclador óptico 42.

Como se muestra en la Figura 4, se distribuye preferentemente una pluralidad de sensores 44 en un número de localizaciones diferentes a través de las superficies de sotavento o barlovento de las palas de la turbina eólica. El número de sensores por pala puede ser de tres o mayor, por superficie de pala, por ejemplo. De este modo, las variaciones en el flujo de aire provocadas por la acumulación de materia pueden detectarse por comparación de las diferentes señales. Esto se explicará con mayor detalle a continuación.

El mezclador óptico 42 se acopla al dispositivo de detección de luz 45. Para cada sensor de turbulencia, el dispositivo de detección de luz 45 recibe al menos dos señales de luz, siendo la primera una señal que se ha reflejado desde la membrana 15, y siendo la segunda una señal de referencia. Como se ha indicado anteriormente, la señal de referencia puede haberse reflejado, no por la membrana 15, sino por el espejo parcialmente reflector 20, o la interferencia de fibra a aire en la cavidad del sensor 13. Alternativamente, la señal de referencia puede ser luz recibida directa o indirectamente desde la fuente de luz 41 bien en el dispositivo de detección de luz 45, en el mezclador óptico 42, o bien en otro mezclador óptico en la trayectoria de la luz. El mezclador óptico 42 es preferible dado que una parte de la luz desde la fuente de luz puede entonces simplemente separarse directamente hacia el sensor de luz 45.

El sensor de luz 45 se conecta a su vez a un Conversor Analógico a Digital (ADC) 46 que se conecta a un procesador 47 para el procesamiento de los resultados. El procesador 47 tiene acceso preferentemente a una unidad temporizadora 48 y a una memoria 49.

Muchas turbinas eólicas, especialmente las instaladas en parques eólicos, se supervisan y controlan mediante sofisticados sistemas de control, tal como el Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos SCADA. Se apreciará por lo tanto que en la práctica, el procesador 47 se conectará típicamente a un sistema de control mayor, y puede tener acceso a datos o información recogida en la turbina eólica distinta de la recibida desde el sensor de turbulencia. Esto no necesita ser siempre el caso, sin embargo, tal como en donde las turbinas se instalan como unidades individuales independientes.

Preferentemente la fuente de luz 41, el sensor de luz 45, el ADC 46 y el procesador 47 se alojan separadamente respecto a la pala del rotor, bien en el buje de la pala del rotor, o bien en la góndola, en donde pueden estar protegidos frente a descargas de rayos mediante una disposición adecuada de conductores de luz o apantallado eléctrico.

Se apreciará que la fase de la señal de referencia, incluso en las disposiciones en las que se usa el espejo parcialmente reflector en la cavidad, se determinará únicamente por la fase de la fuente de luz 41. En general, las diferencias en las longitudes de las fibras ópticas (a menos que estas se realicen deliberadamente largas) pueden ignorarse. La fase de la señal que se ha reflejado por la membrana variará sin embargo de acuerdo con la longitud de la trayectoria óptica entre las fibras ópticas emisora y receptora 17, 23 o 24 en la cavidad del sensor 13. A su vez, esta longitud de trayectoria es afectada por el movimiento o vibración de la membrana 15 provocado por el flujo de aire pasando por la superficie exterior de la pala 5. Por ello, permitiendo que las dos señales interfieran entre sí y detectando cambios en la fase de las dos señales, puede generarse información acerca de la calidad del flujo de aire.

En condiciones de operación ideales, el flujo de aire a través de la superficie de la pala del rotor será laminar, dando como resultado una perturbación pequeña o nula de la membrana 15. El flujo de aire turbulento provocado por la acumulación de materia sobre la superficie de la pala del rotor o por el cambio del paso de la pala que induce estados similares a pérdida dará como resultado un movimiento brusco e impredecible de la membrana 15 y un cambio asociado en la fase de la luz reflejada de vuelta desde la membrana con relación a la fase de referencia.

La Figura 5 es un gráfico lineal que ilustra esquemáticamente una señal de sensor desarrollada por el procesador 47 a lo largo del tiempo, basándose en la interferencia entre las señales de referencia y de luz del sensor. Comenzando a la izquierda del diagrama, la zona plana del gráfico corresponde a períodos en los que la membrana no se está moviendo. La diferencia de fase entre la señal del sensor y la señal de referencia es por lo tanto constante, y el gráfico de la línea es plano. Un suave movimiento de la membrana bajo la influencia de la presión atmosférica externa se reflejará por pequeños cambios en la fase y cambios asociados en la intensidad de la señal de luz resultante debido a la interferencia.

Si la membrana se mueve adicionalmente, entonces la fase entre la señal de referencia y la señal de sensor cambiará y dará como resultado cambios adicionales en la intensidad. Si la magnitud del movimiento de la membrana es suficientemente grande, se verá una variación sinusoidal de la intensidad de la luz cuando la diferencia de fase se incrementa a lo largo de oscilaciones de fase completa. La variación sinusoidal continuará durante el periodo en el que la membrana se está moviendo, e invertirá la dirección cuando la dirección de movimiento de la membrana se invierta. El tiempo que transcurre en la variación de la intensidad de pico a pico indica adicionalmente el tiempo que le lleva a la membrana moverse la mitad de la distancia indicada por la longitud de onda de la señal de luz.

El gráfico de intensidad de la Figura 5 que se desarrolla por el procesador puede usarse por lo tanto para dar una indicación de las condiciones del flujo de aire a través de la superficie de la pala. El flujo de aire turbulento dará como resultado el zarandeo de la pala y de la membrana del sensor, y el gráfico correspondiente de intensidad indicará movimientos frecuentes y caóticos de la membrana. Esto se caracterizará por muchas apariciones de variaciones sinusoidales de la señal, y relativamente pocos periodos en los que la intensidad está esencialmente sin cambios o cambia lentamente. Adicionalmente las variaciones sinusoidales por sí mismas es probable que tengan frecuencias de oscilación más altas, indicando un movimiento más rápido de la membrana que en otros momentos.

El flujo de aire laminar o condiciones de base no turbulentas, por otra parte, darán como resultado un movimiento pequeño o menor de la membrana. El gráfico de intensidad se caracterizaría por lo tanto por más periodos y más largos de líneas planas, variaciones suaves, o periodos en los que aunque se ve una variación sinusoidal, esta tiene una longitud de onda larga indicando que está teniendo lugar de modo relativamente lento.

5 Las zonas de línea plana del gráfico que representan movimiento nulo de la membrana pueden indicar o no siempre la misma intensidad de luz. En la práctica, aunque la posición de reposo de la membrana puede determinarse fundamentalmente al menos en parte por la tensión de la membrana y el material del que está fabricada la membrana, la fuerza instantánea ejercida por el flujo de aire determinará finalmente la posición instantánea.

10 El procesador 47 analiza la intensidad de las señales de luz recibidas en el ADC 46, para determinar la calidad actual del flujo de aire a través de la pala. Puede hacer esto usando cualquier técnica de procesamiento matemático adecuada para determinar la cantidad de variación en la señal de interferencia de la luz, como se muestra en la Figura 5. En otras realizaciones, puede usar técnicas de redes neuronales para desarrollar una memoria del aspecto visual de los patrones de intensidad para flujo de aire turbulento y laminar, y determinar las condiciones actuales del flujo de aire por comparación con patrones de modelos previamente desarrollados. Dichos patrones pueden almacenarse en la memoria 49.

15 Así como la identificación de si los resultados desde un sensor individual 44 indican turbulencia, el procesador 47 tiene la función adicional de evaluar el rendimiento de la operación actual de las palas de la turbina eólica basándose en los resultados recogidos desde la pluralidad de sensores 44 a lo largo del tiempo. Se apreciará que podría proporcionarse un procesador separado para esta finalidad, pero que por razones de simplicidad de la presente descripción, se supone que el procesador 47 realiza ambos papeles.

20 Preferentemente el procesador toma lecturas de modo continuo o periódico desde los sensores de turbulencia 44 para desarrollar un registro temporal de cambios en el flujo de aire sobre la pala. En cualquier caso, para determinar con precisión la calidad del flujo de aire necesita construirse a lo largo de un periodo mínimo de tiempo un patrón de intensidad tal como el que se muestra en la Figura 5. Suponiendo que el viento está soplando de modo suficientemente fuerte, puede ser suficiente un periodo de medición de unos pocos segundos a varios minutos. Los periodos de medición más largos pueden proporcionar sin embargo un grado mayor de certidumbre para la evaluación.

25 Para detectar la acumulación de material no deseada sobre los componentes de la turbina eólica, pueden requerirse por ejemplo mediciones periódicas solamente en un número limitado de veces por día. En este caso, los sensores de luz se activan durante periodos de tiempo discretos, y se desactivan posteriormente cuando no se requiere que estén en uso. En donde los sensores se activan continuamente, el procesador divide las lecturas continuas en ventanas de tiempo discretas para cada sensor.

30 El procesador 47 recibe la señal de intensidad de luz desde cada sensor durante el periodo de medición, y almacena esto en la memoria 49 con una indicación del periodo de tiempo. Se analiza entonces cada señal para determinar si es característica o no de un flujo de aire turbulento o laminar, y se registra el resultado de la determinación. Se apreciará que el resultado puede ser un valor discreto, tanto una indicación positiva como una negativa de turbulencia, o puede ser un valor continuo indicando el grado en el que el flujo de aire es turbulento.

35 Al comienzo de la operación de una turbina eólica, las palas y otros componentes de la turbina eólica estarán en gran parte libres de suciedad, pero dependiendo del momento del año, y condiciones climáticas, puede o no haberse acumulado hielo. En la instalación, por lo tanto, y suponiendo que no se ha cambiado el paso de las palas para provocar un flujo de aire similar al de pérdida, las lecturas desde los sensores 44 deberían indicar en gran medida flujo laminar. No obstante, unos sensores particulares en momentos particulares pueden indicar un flujo de aire turbulento, como resultado de variaciones instantáneas e impredecibles en el flujo de aire. Dichas indicaciones serían esporádicas y sin patrón.

40 Los resultados desde los sensores se registran y supervisan por el procesador para determinar cambios a mayor escala que son indicativos de problemas con el componente. Por ejemplo, si durante la operación normal tres sensores sobre una superficie de pala indican ocasional y esporádicamente flujo de aire turbulento pero dan en gran medida una lectura consistente con el flujo de aire laminar, entonces un cambio en el sistema a una lectura persistente de turbulencia desde dos o más sensores podría indicar que el flujo de aire a través de la pala ha quedado afectado por la acumulación de materia, y que se necesita adoptar una acción. Dicha situación se ilustra en la Figura 6, en la que los periodos de tiempo del sensor se indican en columnas y las lecturas de sensores individuales se indican en filas. En este diagrama, se representan dos conjuntos de tres sensores localizados sobre los lados de barlovento y sotavento de una pala de turbina eólica.

45 Las primeras cuatro columnas muestran una detección de turbulencia ocasional desde un sensor, pero no indican ninguna tendencia a escala mayor. Las columnas después del punto A muestran sin embargo un cambio permanente a indicaciones de turbulencia desde la mayoría de los sensores y son indicativas de un problema con el estado de la pala. El procesador puede detectar por lo tanto dichos problemas simplemente contando el número de

indicaciones de turbulencia a lo largo de un periodo de tiempo o ventana predeterminado, digamos cuatro o más. Si se sobrepasa un umbral de conteo, el procesador envía una alarma indicando que es necesaria una atención.

5 Preferentemente, la función de alarma funciona de forma continua de modo que si ya no se detectan condiciones de turbulencia se cancelará la alarma. En el punto B por ejemplo, es posible que los sensores de turbulencia en el lado de sotavento de la pala vuelvan a indicar de manera predominante una condición normal. Como se ha indicado anteriormente la turbulencia puede ser resultado del cambio de paso de pala y no necesariamente de acumulación de materia no deseada. Por tanto, si se detecta turbulencia durante un período de tiempo extendido, puede configurarse el procesador para ensayar la determinación mediante la reducción del paso de la pala y reduciendo la probabilidad de que la turbulencia sea debida únicamente al ángulo de la pala. Si al hacer esto da como resultado la cancelación de la señal de alarma, puede cambiarse el paso de las palas hacia el viento como antes para reanudar la operación.

15 El incremento de la acumulación de materia sobre las palas es probable que conduzca a un ángulo de pérdida reducido de las palas. El ensayo de las palas mediante la variación del ángulo de paso una vez se ha detectado una situación de turbulencia proporciona por lo tanto una prueba adicional del grado en el que se ha acumulado materia sobre las palas. Si el ángulo de pérdida de las palas se reduce gravemente por la materia acumulada, entonces puede ser necesaria la atención por un ingeniero de mantenimiento.

20 En una realización, además de comparar las indicaciones de los sensores individuales sobre una pala, el procesador 47 compara los resultados de una pala con los de otra. Un rendimiento de turbulencia subóptimo de una pala en comparación con las otras palas puede indicar que el montaje de la pala sobre el buje del rotor necesita ajuste, o que la pala no está comportándose bien, debido a esfuerzos u otros factores. El procesador puede, si se detecta un rendimiento subóptimo persistente, enviar una alarma para dirigir la atención al estado de la pala.

25 El sensor descrito anteriormente es relativamente barato de producir y fácil de montar. Por tanto, pueden instalarse de modo relativamente fácil sistemas sensores que comprendan un número mayor de sensores tanto en turbinas nuevas como en existentes. Además, la membrana puede pintarse del mismo color que la superficie del componente que la rodea para asegurar que el aspecto visual de la turbina eólica no se perjudica. La pintura del área después del montaje del sensor también tiene el efecto de que no puede entrar humedad en la pala a lo largo del lateral de la cavidad del sensor 12 y 13 y la pala 5.

35 La descripción anterior está dirigida solamente a ser ilustrativa de la invención definida por las reivindicaciones. Se les ocurrirán a los expertos en la materia técnicas alternativas para implementar la invención. En una realización alternativa, el ADC 46 y la parte de detección de turbulencia del procesador puede sustituirse por un filtro analógico que pase las frecuencias altas asociadas con la flexión rápida de la membrana 15 y un circuito que active una salida si la cantidad de señal dentro de estas frecuencias excede un cierto límite o tasa de aparición.

40 Dado que las palas del rotor son susceptibles a las descargas de rayos, el dispositivo preferido emplea fibras ópticas tanto como fuente de luz como detector de luz en la carcasa del sensor. Sin embargo en realizaciones alternativas, pueden usarse directamente dispositivos opto-electrónicos tales como diodos emisores de luz y foto-detectores dentro de la carcasa del sensor, con conexiones eléctricas y de señalización apropiadas a un control y fuente de alimentación. En ciertas realizaciones puede ser naturalmente apropiado instalar la electrónica de control y sistemas de alimentación localmente o en el sensor en sí.

45 Adicionalmente, aunque la explicación ha considerado en gran medida el uso de sensores sobre las palas de turbina eólica, los sensores podrían instalarse en cualquier componente de la turbina eólica. Además, aunque el sistema sensor está dirigido a indicar si se ha acumulado sobre la pala materia no deseada, tal como suciedad o hielo, se apreciará que el sistema sensor puede usarse para indicar el estado general de la superficie de la pala.

50



**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema sensor para detectar el estado superficial de un componente de turbina eólica que tiene una cavidad 13, que comprende:
- 5 una pluralidad de sensores de turbulencia 10 para dar una salida que indique flujo de aire turbulento a través de una superficie del componente de la turbina eólica;  
una memoria; y  
un procesador;
- 10 en el que cada sensor de turbulencia comprende:  
una membrana del sensor 15, para detección de la turbulencia del flujo de aire que pasa por una superficie del componente de la turbina eólica, en el que la membrana del sensor 15 es parte integral de la superficie, y cubre al menos parte de la cavidad 13;
- 15 una fuente de luz 16 localizada en la cavidad del sensor 13 para la iluminación de la superficie de la membrana del sensor 15 dentro de la cavidad 13; y  
un detector de luz localizado en la cavidad 13 para detección de la luz reflejada desde la superficie de la membrana 15, y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a través de la membrana del sensor;
- 20 en el que el procesador está adaptado para determinar un estado de la superficie del componente a partir de la salida recibida desde los sensores de turbulencia 10;  
en el que la memoria está adaptada para registrar las salidas recibidas desde los sensores de turbulencia 10 a lo largo de un período de tiempo, y el procesador está adaptado para determinar un estado de la superficie del componente basándose en un cambio en las salidas comparadas con salidas pasadas; y  
en el que el sistema sensor está adaptado para detectar la acumulación de materia sobre la superficie del
- 25 componente mediante la determinación de si un número predeterminado de sensores de turbulencia indican persistentemente turbulencia.
2. El sistema sensor de la reivindicación 1, en el que la fuente de luz 16 y el detector de luz en la cavidad 13 son fibras ópticas conectadas a una fuente de luz opto-eléctrica.
- 30 3. El sistema sensor de la reivindicación 1 o 2, que comprende un sumador para añadir la luz reflejada desde la superficie de la membrana 15 a una señal de luz de referencia para dar un patrón de interferencia que indique el desplazamiento de la membrana 15.
- 35 4. El sistema sensor de la reivindicación 3, en el que el sumador comprende un espejo parcial situado en la cavidad del sensor para reflejar una parte de luz desde la fuente de luz al detector de luz y proporcionar la señal de luz de referencia.
- 40 5. El sistema sensor de cualquier reivindicación anterior, en el que la cavidad 13 está sellada.
6. El sistema sensor de la reivindicación 5, en el que la cavidad 13 se llena con un gas distinto del aire.
7. El sistema sensor de cualquier reivindicación anterior, en el que la membrana 15 del sensor se forma de un material diferente de aquel con el que se forma la superficie del componente de la turbina eólica.
- 45 8. El sistema sensor de la reivindicación 3, que comprende un procesador para el análisis de las variaciones en el patrón de interferencia a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado para determinar si el flujo de aire es turbulento.
- 50 9. El sistema sensor de cualquier reivindicación anterior, en el que el componente de la turbina eólica es una pala de turbina eólica.
10. El sistema sensor de la reivindicación 9, que comprende una pluralidad de sensores 10 sobre los lados de barlovento y sotavento de la pala.
- 55 11. El sistema sensor de la reivindicación 9 o 10, en el que el procesador compara las salidas de los sensores de turbulencia 10 de una pala de turbina eólica, con las de otra.
- 60 12. Una turbina eólica que comprende el sistema sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

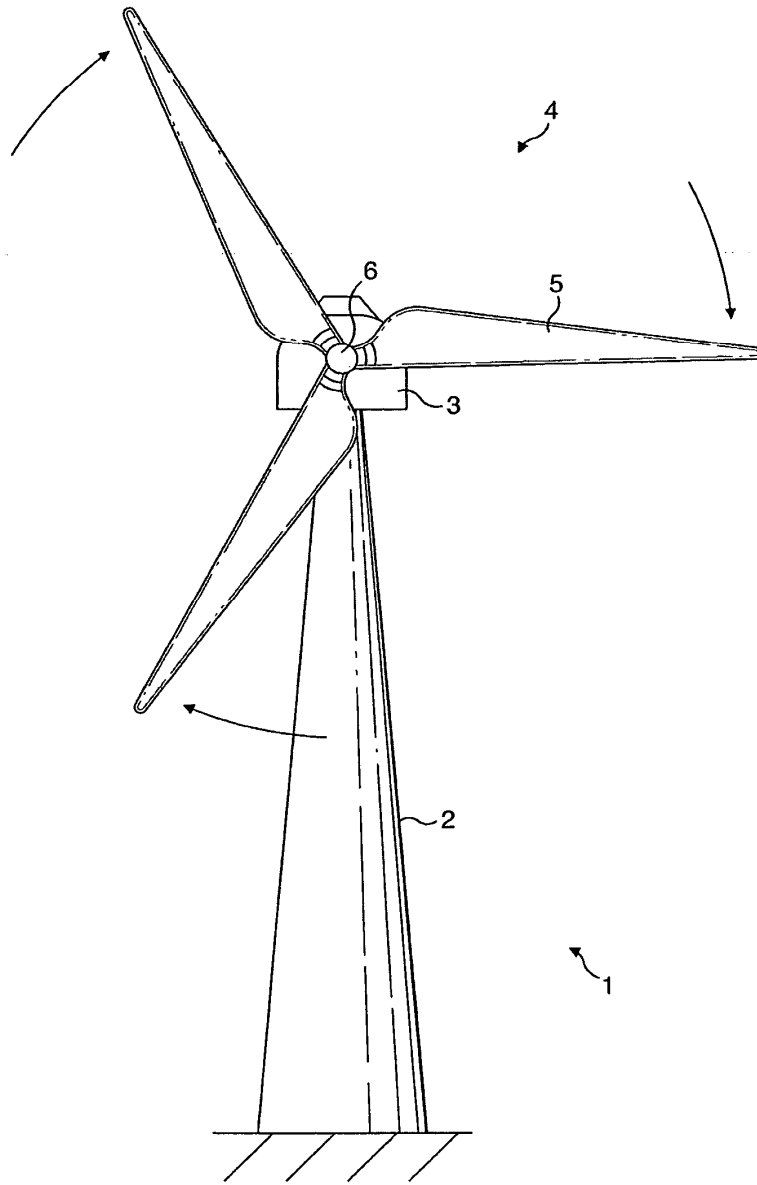


FIG. 1

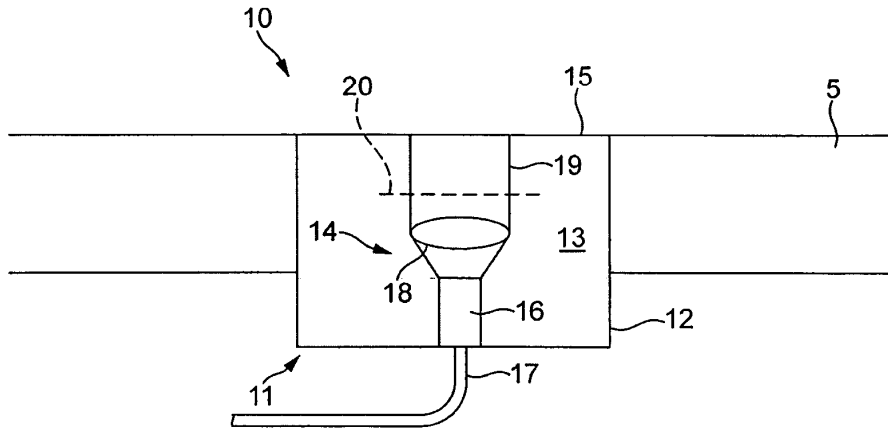


FIG. 2

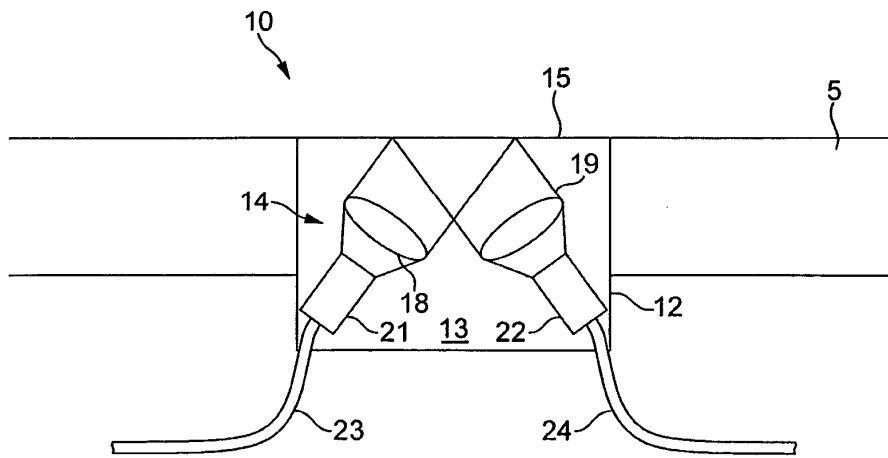


FIG. 3

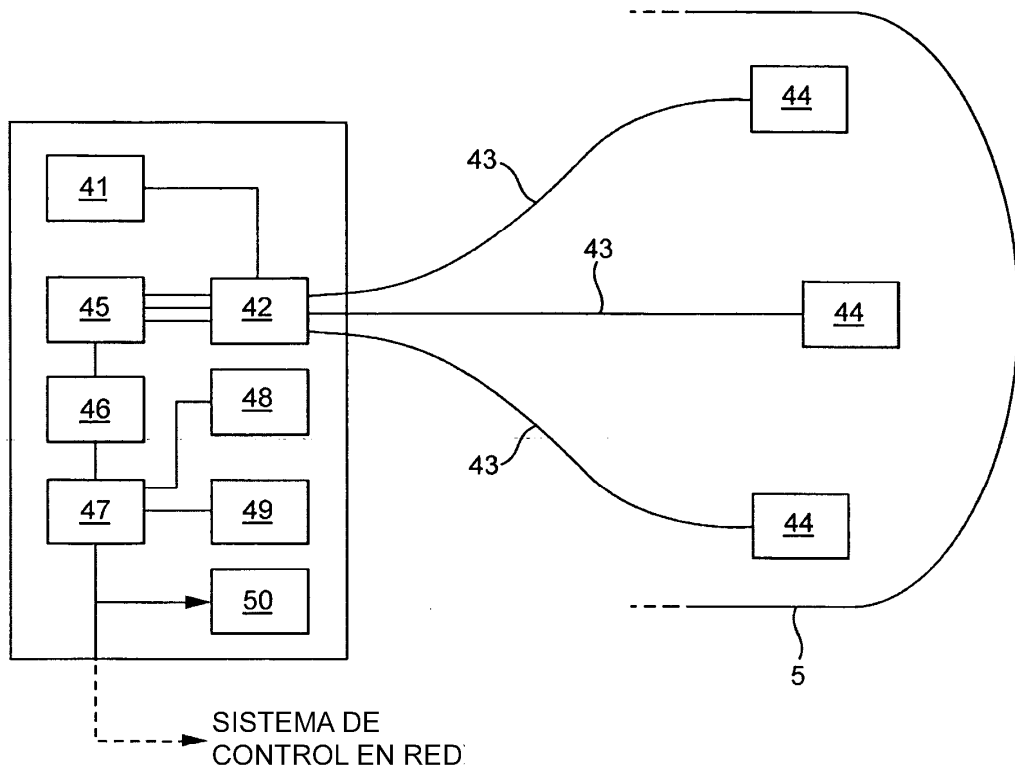


FIG. 4

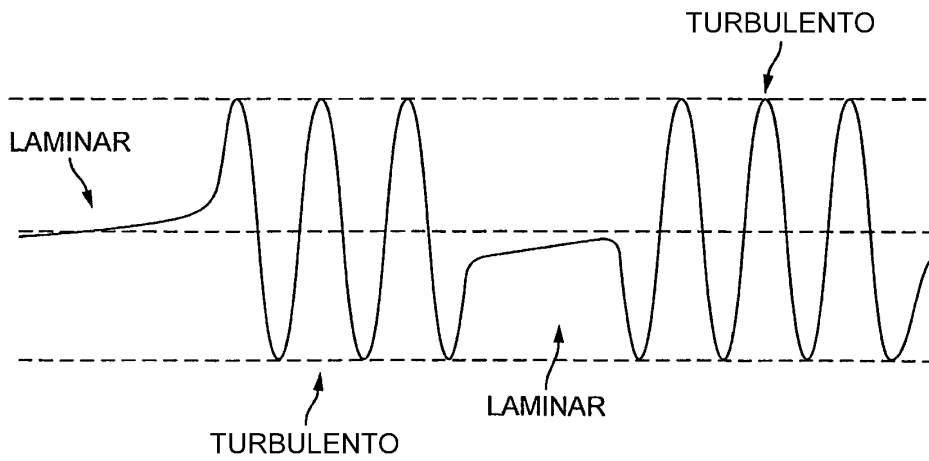


FIG. 5

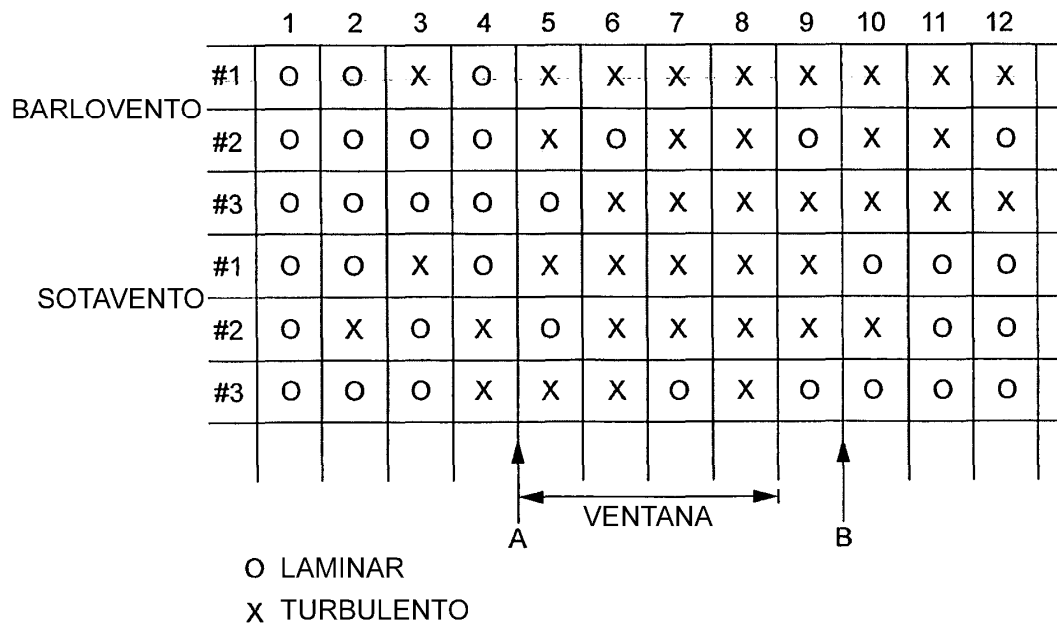


FIG. 6