Proyecto Geovane

Candidatura XI Edición del Premio de Innovación Eolo 2021

Autores

Rafael Tallada Souto

José María Sanz Castiller

Kintech Ingeniería

2021

“Tecnología Geovane para la reducción de incertidumbre en la orientación de veletas, aerogeneradores y RSD”

RESUMEN EJECUTIVO

Objetivo

El proyecto Geovane de la empresa Kintech Engineering tiene como objetivo desarrollar un dispositivo capaz de obtener la orientación geográfica de veletas, aerogeneradores y sistemas de medición RSD (LiDar y SoDAR).

Descripción

La principal fuente de incertidumbre a la hora de medir la dirección del viento proviene del error de orientación del propio sensor en la instalación, comúnmente denominado “offset”. Hasta la fecha, este error ha sido imposible de cuantificar y ha provocado que muchos parques eólicos se diseñaran a partir de rosas de viento desviadas de la real, generando pérdidas millonarias durante su explotación. Para solucionarlo, Kintech Engineering ha desarrollado una tecnología de brújula solar, llamada Geovane, que establece con exactitud la orientación real de cualquier dispositivo a la que se acopla.

El principio de funcionamiento es sencillo: la Geovane calcula el ángulo del Sol con el Norte Geográfico (acimut), para ese instante y localización geográfica, y lo compara con el ángulo de las sombras generadas por su carcasa de rendijas. La diferencia entre ambos ángulos constituye la orientación respecto al Norte Geográfico de la veleta acoplada.

Elementos innovadores

La tecnología Geovane, basada en el concepto de brújula solar, presenta múltiples elementos innovadores:

1. Permite conocer la orientación de la veleta en su posición final, una vez instalada.
2. Proceso automático: se elimina la necesidad de orientar físicamente las veletas.
3. Medida continua: inmunidad de la medida de dirección del viento antes cambios de orientación de la veleta durante la campaña.
4. Tecnología solar: elevada precisión e inmunidad a las distorsiones magnéticas.
5. Funcionamiento en cualquier latitud geográfica: la geometría de rendijas y fotosensores permite localizar el Sol en cualquier lugar del mundo.
6. Se corrige matemáticamente las sombras para eliminar las distorsiones de la inclinación y la refracción.
7. Capacidad de alinearse de forma precisa con dispositivos eólicos mediante láser.

Perspectivas de mercado

La tecnología Geovane ha sido bien recibida por el mercado y está siendo usada por algunos de los principales desarrolladores eólicos en proyectos por todo el mundo.

Recientemente se ha extendido su uso al de turbinas en operación, encontrándose en fase de homologación por parte de varios fabricantes.

Índice

Índice **3**

Lista de abreviaturas **7**

1 Objetivos del proyecto Geovane **8**

1.1 Origen del proyecto y contexto 8

1.2 Estado de la técnica (previo a Geovane) 9

1.2.1 Imposibilidad de acceder al sensor 9

1.2.2 Orografía compleja 10

1.2.3 Problemas magnéticos 11

1.2.4 Cambios de orientación 12

1.2.5 Error humano 12

2 Descripción de la tecnología Geovane **14**

2.1 Concepto de brújula solar 14

2.2 Requerimientos tecnológicos 16

2.3 Flujo de funcionamiento 17

3 Elementos innovadores de la tecnología Geovane **19**

3.1 Orientación de veletas 19

3.1.1 Orientación in situ 19

3.1.2 Orientación automática 20

3.1.3 Medida continua 20

3.1.4 Medida solar 21

3.2 Automatización del concepto de brújula solar 21

3.2.1 Cálculo del acimut solar 22

3.2.2 Medida del acimut solar 22

3.2.2.1 Toma de la fotografía celeste 23

3.2.2.2 Corrección de la fotografía celeste 24

3.2.2.3 Análisis de la fotografía celeste 28

3.3 Alineamiento preciso con veletas mediante láser 30

3.3.1 Retos técnicos del alineamiento 31

3.3.2 Solución innovadora: láser de línea integrado 31

3.4 Diseño adaptado a las limitaciones de consumo 33

4 Hitos del proyecto Geovane **34**

4.1 Trabajos Fin De Grado (2014) 34
4.2 Proyecto CDTI (2015-2017) 36
4.3 Trabajo Fin de Máster (2017) 37
4.4 Lanzamiento al mercado (2018) 38
4.5 Ferias y conferencias (2017-2020) 40
4.6 Patente Europea (2019) 41
4.7 Homologación para su uso en turbinas (2021) 43
5 Aceptación en el mercado 44
5.1 Geovane MM para torres de medición eólica 44
5.2 Geovane WT para orientación de aerogeneradores en operación 45
6 Enlaces de interés 46

Índice de figuras

Fig. 1. Torre de medición eólica 8
Fig. 2. Imposibilidad de acceder al sensor para orientarlo 10
Fig. 3. Ejemplos de orografía compleja 10
Fig. 4. Mapa de la declinación magnética (2010, fuente: NOAA) 11
Fig. 5. Ejemplo de torsión de la torre: pérdida de la orientación del brazo 12
Fig. 6. Planteamiento del problema: el *gnomon* 14
Fig. 7. Gnomon: relación de ángulos 15
Fig. 8. Rendija: relación de ángulos 15
Fig. 9. Interior de la Geovane: generación de haces de luz para medir A_m 16
Fig. 10. Funcionamiento básico de la Geovane 17
Fig. 11. Elemento innovador: orientación in situ vs. orientación in directa 19
Fig. 12. Elemento innovador: orientación automática 20
Fig. 13. Inmunidad de la medida de dirección a cambios de orientación 20
Fig. 14. Elemento innovador: GPS integrado 22
Fig. 15. Toma de la fotografía celeste mediante rendijas y fotosensores 23
Fig. 16. Interior de la Geovane (8 de abril, 14:17:32 UTC, Zaragoza, θ = 72°) 24
Fig. 17. Medida de la inclinación del plano de los fotosensores (ejes X e Y) 25
Fig. 18. Calibración del acelerómetro: perfil de temperatura 26
Fig. 19. Compensación del sesgo de 0g frente a temperatura: eje Y 26
Fig. 20. Corrección de la fotografía celeste según la inclinación 27
Fig. 21. Refracción del haz de luz en el interior de la Geovane 28
Fig. 22. Fotografía celeste: 8 de abril, 14:17:32 UTC, Zaragoza, θ = 72° 29
Fig. 23. Indeterminación geométrica (soluciones posibles: rendijas 5 y 1) 30
Fig. 24. Ejemplos de marca al norte mediante adhesivos 31
Fig. 25. Laser integrado para alinear sin enlace mecánico 32
Fig. 26. Trabajos Fin de Grado sobre la Geovane (2014) 34
Fig. 27. Primer prototipo (2014, TFG) 35
Fig. 28. Segundo prototipo (2014, TFG) 35
Fig. 29. Cronograma del proyecto CDTI (2015) 36
Fig. 30. Primer prototipo de 8 rendijas (2015) 36
Fig. 31. Trabajos Fin de Máster sobre la Geovane (2017) 37

Fig. 32. Interior de la Geovane (prototipo 2017) 38
Fig. 33. Lanzamiento al mercado de la Geovane: 2018 (foto: Filipinas) 38
Fig. 34. Vista interna Geovane: 1024 píxeles (2018) vs 2048 píxeles (2020) 39
Fig. 35. Geovane WT (Wind Turbine) y sistema de alineamiento (2020) 40
Fig. 36. Presentación de la Geovane en la China Wind Power 2017 (Pekín). 41
Fig. 37. Fragmentos de la patente Europea de la Geovane (2019) 42
Fig. 38. Aplicación Geovane WT (orientación de aerogeneradores).....43
Fig. 39. Instalación de Geovane MM en Suecia.....45

Lista de abreviaturas

AEE: Asociación Empresarial Eólica

CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

CPU: Central Processing Unit

ESD: Electrostatic Discharge

GPS: Global Positioning System

I-D: Investigación y Desarrollo

MM: Met Mast

NMEA: National Marine Electronics Association

PCB: Printed Circuit Board

RSD: Remote Sensing Device

RTC: Real-time Clock

RTU: Remote Terminal Unit

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

TFG: Trabajo Fin de Grado

TFM: Trabajo Fin de Máster

UTC: Coordinated Universal Time

WT: Wind Turbine

1 Objetivos del proyecto Geovane

El presente capítulo recoge el contexto y los antecedentes técnicos sobre los que Kintech Engineering comenzó a desarrollar el proyecto Geovane.

1.1 Origen del proyecto y contexto

Hoy en día existe una gran conciencia de la trascendencia que tiene la obtención de mediciones de calidad del recurso eólico a explotar. El uso de instrumentación adecuada mejora los resultados obtenidos en la auditoría de viento y facilita la obtención de un "*project finance*" para el proyecto de construcción de un parque eólico.

La duración habitual de una campaña de medición de recurso eólico es de dos años. Los datos obtenidos se procesan y posteriormente se analizan para tratar de predecir de la forma más certera posible el rendimiento energético y económico del futuro parque. Es de vital importancia conseguir una alta disponibilidad de medidas y utilizar equipos fiables, a fin de reducir cualquier clase de incertidumbre y minimizar los riesgos de la inversión.

Los principales datos de interés en un emplazamiento eólico son la velocidad y la **dirección del viento**. Para obtener dichos datos se instalan mástiles de medición, como el mostrado en la Fig. 1. Los mástiles de medición suelen ser estructuras arriostradas, de entre 100 y 120m de altura, aunque cada vez son más altos, en los que se colocan, a varias alturas, anemómetros, para medir la velocidad, y veletas, para medir la dirección.

Fig. 1. Torre de medición eólica

El principio de funcionamiento de las **veletas** es sencillo: consta de un estator fijo y un rotor que gira libremente conforme lo hace el viento. Para que el sensor sea efectivo, se

debe referenciar la parte fija a una orientación conocida, usualmente el norte geográfico, con el fin de establecer fielmente la dirección del viento.

Kintech Engineering ha detectado un problema recurrente en el sector eólico: los **errores de orientación** de dichas veletas.

Un error en la orientación de la referencia de las veletas supone una medición de la dirección del viento incorrecta, lo que se traduce en un mal posicionamiento de los aerogeneradores, con la consiguiente pérdida de producción y una más que probable reducción de la vida útil de la máquina.

Todo ello tiene un notable **impacto económico** en la explotación del parque eólico.

1.2 Estado de la técnica (previo a Geovane)

El **estado de la técnica** previo a la tecnología Geovane ha venido introduciendo **errores** en las medidas de dirección de viento, de tipo ***offset***, cuyas causas pueden atribuirse a los siguientes cinco motivos:

1) La imposibilidad de acceder al sensor en su posición final.
2) Orografía compleja del emplazamiento.
3) Problemas asociados al magnetismo.
4) Cambios de orientación durante la campaña.
5) Errores humanos.

1.2.1 Imposibilidad de acceder al sensor

El instalador nunca va a poder acceder al sensor una vez instalado (ver Fig. 2), por lo que para tratar de orientar las veletas se ha de recurrir a complejos procedimientos que establezcan la **orientación** de manera **indirecta**.

La metodología para la orientación de veletas "pre-Geovane" es variada, aunque la solución más comúnmente aceptada es la que se describe a continuación:

Las veletas se encuentran en el extremo de un brazo (boom), a unos 2.5 metros de la torre, situado éste a su vez a una altura de entre 40 y 120 metros. Como es imposible acceder a orientar el equipo en su posición definitiva, se establecen orientaciones relativas entre los diferentes elementos involucrados:

Veleta → Brazo → Torre / Anclajes → Brújula magnética o GPS, a nivel de suelo.

Cada eslabón de esta cadena de orientaciones relativas es susceptible de añadir **error** a la orientación de la veleta, hasta la fecha imposible de caracterizar.

Orientar veletas en una torre de tipo tilt-up es, si cabe, más difícil, puesto que la estructura entera, sensores incluidos, se iza desde el suelo hasta la posición vertical.

Fig. 2. **Imposibilidad de acceder al sensor para orientarlo**

1.2.2 Orografía compleja

En muchas ocasiones, los mástiles de medición se instalan en terrenos escarpados, o rodeadas de vegetación, ¡o incluso en el mar!, como puede verse en la Fig. 3. Esto dificulta enormemente la orientación a nivel de suelo, llegando a ser imposible.

Según la tecnología de orientación con la que se trabaje, la orografía compleja:

1) Impide establecer la orientación del brazo en el que está instalada la veleta alejándose en línea recta en la dirección del mismo con un GPS.
2) Impide alejarse lo suficiente de la torre para tratar de establecer la orientación del brazo por medio de una brújula con mirilla telescópica.

Fig. 3. **Ejemplos de orografía compleja**

1.2.3 Problemas magnéticos

Las brújulas magnéticas son artefactos cuyo uso se encuentra muy extendido desde hace siglos. Su principio de funcionamiento consiste en una aguja de material ferromagnético que flota sobre un líquido y se alinea en dirección de las líneas del campo magnético presentes en el lugar.

La orientación mediante brújula magnética presenta cinco inconvenientes:

1) Se debe conocer la declinación magnética del emplazamiento, es decir: la diferencia entre el Norte Geográfico y el Magnético en ese lugar. Dos brújulas magnéticas situadas en distintas partes del mundo habitado pueden divergir hasta 40° en su medida (ver Fig. 4).

2) Se debe aplicar la declinación magnética con el signo correcto. En muchas ocasiones se aplica con el signo contrario, duplicando el error.

3) Las condiciones magnéticas del emplazamiento se ven alteradas por cualquier material ferromagnético, ya sea artificial: la estructura de la torre de medición, como natural: la presencia de ciertos minerales en el subsuelo.

4) La declinación varía con el tiempo (el polo Norte Magnético se desplaza 9 km cada año): los mapas de declinación magnética del planeta tienen que ser actualizados de manera regular.

5) Existen anomalías para las cuales todavía no se tiene explicación científica, como la del Atlántico Sur, que se dirige hacia el oeste a razón de 1° de longitud cada 5 años (110 km aproximadamente). Con el tiempo esta anomalía pasará por Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay.

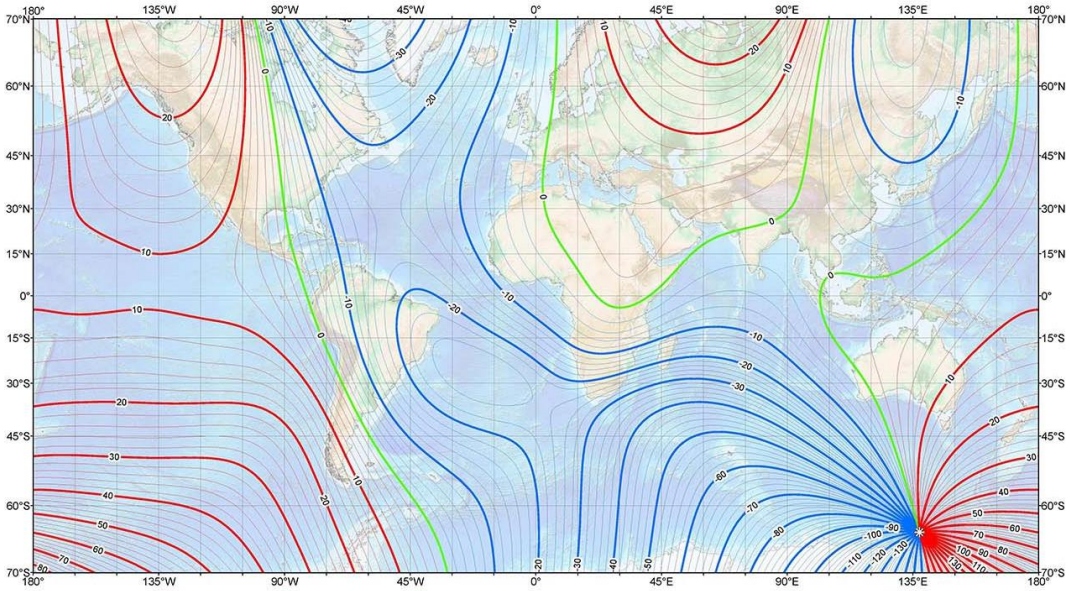


Fig. 4. Mapa de la declinación magnética (2010, fuente: NOAA)

1.2.4 Cambios de orientación

Aun asumiendo que las veletas hayan sido orientadas de manera perfecta, no es raro que la orientación con la que han sido instalada varíe a lo largo del tiempo:

1) Es muy común que los vientos de las torres arriostradas no estén perfectamente colocados y provoquen **tensiones** que hagan girar la estructura de la torre conforme se gana en altura, invalidando la orientación del brazo que se ha llevado a cabo a nivel de suelo. En la Fig. 5 puede verse un ejemplo de dos brazos a los que se les supone la misma orientación, pero cuya orientación se ha visto afectada por la torsión de la torre.

2) Los brazos soporte de las veletas pueden modificar su orientación por las durísimas condiciones meteorológicas a las que se ven sometidos: vientos extremos y caída de bloques de hielo desprendidos de la estructura de la torre o de brazos situados a más altura.

Fig. 5. Ejemplo de torsión de la torre: pérdida de la orientación del brazo

1.2.5 Error humano

El estado de la técnica de orientación de veletas previo a la Geovane es un compendio de métodos y procedimientos manuales que los instaladores deben ejecutar de manera escrupulosa. Como en cualquier procedimiento manual, el **factor humano** juega un papel determinante en el resultado final del mismo.

Dependiendo de la madurez del sector eólico de un país, las metodologías de orientación seguidas por los instaladores serán mejores o peores. Es muy común que, en países con una industria eólica incipiente, los equipos de instalación de mástiles eólicos todavía no estén especializados y los errores de orientación sean generalizados

y cuantiosos. Además, será más difícil detectar que algo va mal, ya que, por lo general, se disponen de menos datos reales con los que comparar.

Otro factor que juega en contra de los instaladores a la hora de orientar veletas es la **climatología adversa** que suele darse con mucha frecuencia en los emplazamientos eólicos: el frío, los fuertes vientos o la lluvia dificultan enormemente cualquier trabajo de campo, tanto en la propia instalación como en un mantenimiento.

En su día, los promotores eólicos optaron por añadir más veletas a sus mástiles de medición, con la falsa esperanza de que, si las veletas no presentaban offset entre ellas, significaría que estaban bien orientadas hacia el Norte. Esto es totalmente equivocado: si bien es cierto que **añadir más veletas** mejora la disponibilidad, en caso de que alguna de ellas falle, **no asegura en modo alguno que las medidas sean correctas**.

2 Descripción de la tecnología Geovane

La tecnología Geovane es una implementación técnica del concepto de **brújula solar**, adaptada a las particularidades de la aplicación eólica.

2.1 Concepto de brújula solar

La salida del Sol por un punto del horizonte y su desaparición por el punto opuesto permitió al hombre disponer de dos referencias con las que ubicarse para poder seguir un rumbo determinado, con las que poder "orientarse". Orientación significa "determinación del oriente".

La Fig. 6 muestra el planteamiento inicial del problema de orientación para el caso más sencillo: un palo rígido clavado al suelo de forma vertical o *gnomon*. La sombra proyectada por el *gnomon*, situado en el centro de la circunferencia, varía en función de la posición del Sol. La línea granate representa una referencia que ha sido girada arbitrariamente un ángulo desconocido respecto de la línea Norte-Sur.

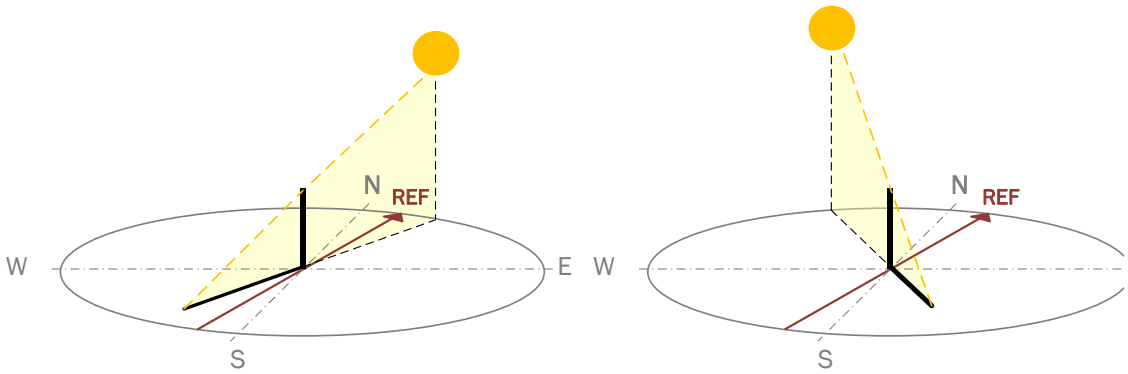


Fig. 6. Planteamiento del problema: el *gnomon*

En la Fig. 7 se definen los ángulos que relacionan la posición del Sol con la orientación de nuestra referencia (REF), definidos como positivos si se toman en sentido horario. A saber:

- **Ψ**: acimut del Sol respecto del Norte. Es decir, el ángulo que forman sobre el horizonte del observador el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro, en este caso el Sol. Junto con la altura solar α, constituyen las denominadas coordenadas horizontales.
- **A_m**: ángulo formado por la referencia del sistema y la sombra del *gnomon*.
- **θ**: ángulo que define la **orientación**, formado en este caso por el punto cardinal Norte (Norte Geográfico) y la propia referencia.

En estas condiciones, la orientación θ se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$\theta = \psi - A_m \tag{1}$$

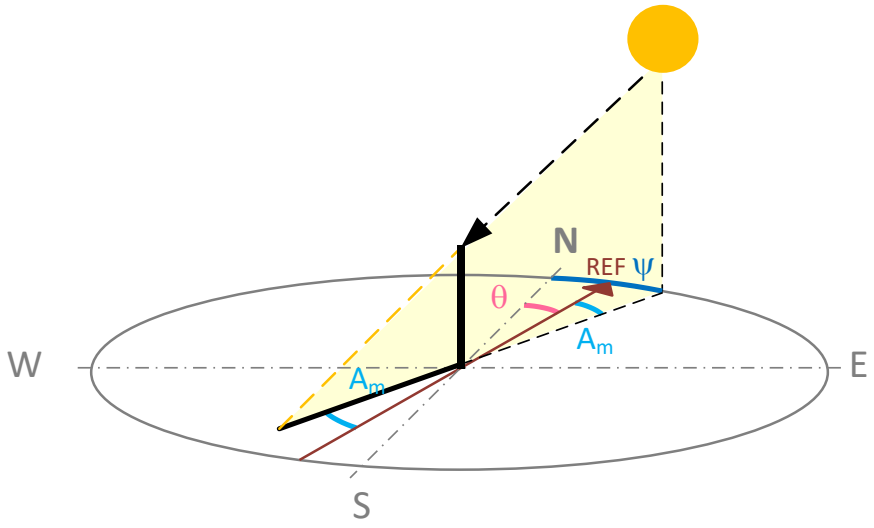


Fig. 7. Gnomon: relación de ángulos

La determinación de la orientación θ exige, por lo tanto:

1) Calcular el acimut ψ.
2) Medir el ángulo A_m.

El cálculo del acimut Ψ lo lleva a cabo la CPU del sensor, en cuyo firmware se implementan las ecuaciones de cálculo astronómico que determinan la posición del Sol en el firmamento, dadas una localización geográfica, fecha y hora UTC.

La Fig. 7 define A_m como el ángulo formado por la sombra del gnomon y la referencia del sistema, pero en la práctica A_m se obtiene mediante un mecanismo distinto al *gnomon*. La tecnología Geovane extrae A_m a partir del **haz de luz** que genera una **rendija** vertical. La rendija equivale a construir "el negativo" del *gnomon*. El ángulo A_m pasa entonces a definirse como el formado por el haz de luz que se filtra a través de la rendija y la referencia, tal y como se muestra en la Fig. 8.

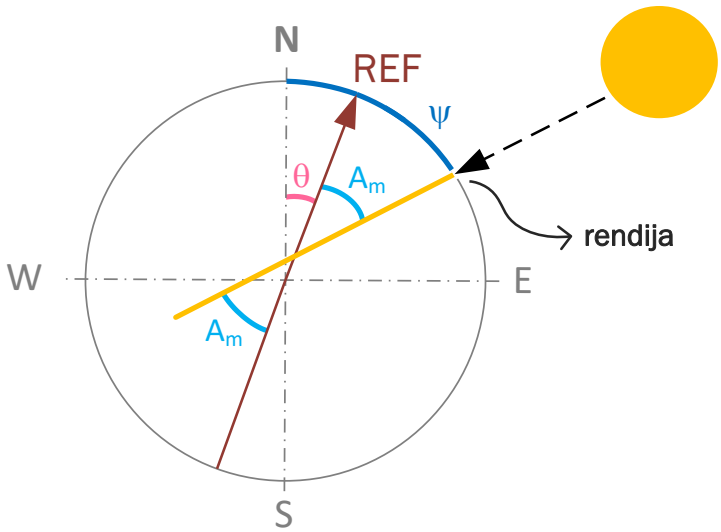


Fig. 8. Rendija: relación de ángulos

La **omnidireccionalidad** característica del gnomon a la hora de proyectar sombra se logra mediante un diseño de ocho rendijas equidistribuidas perimetralmente en la pared lateral de una carcasa cilíndrica, tal y como puede verse en la Fig. 9.

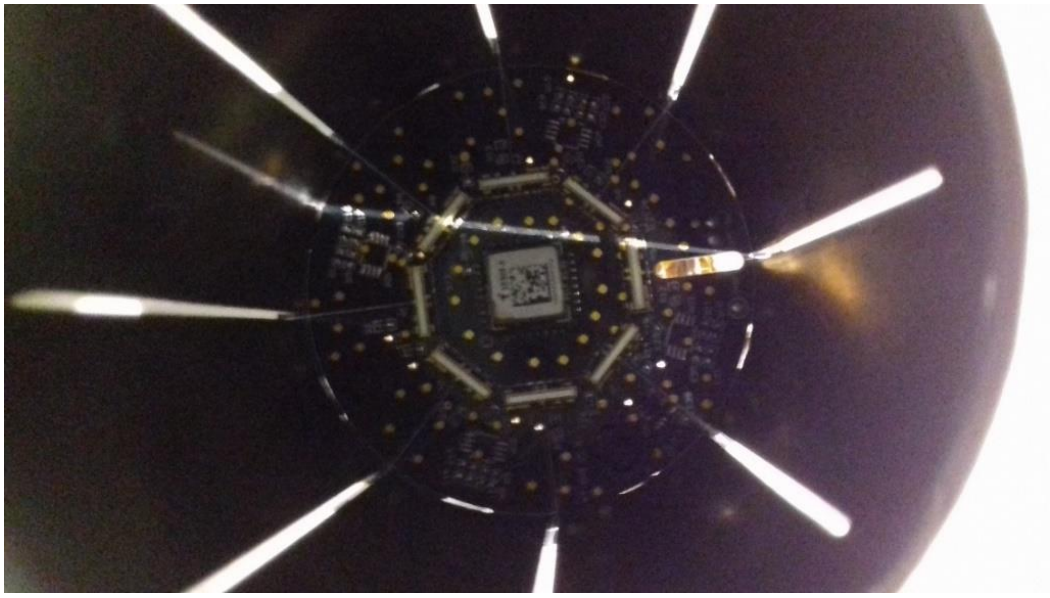


Fig. 9. Interior de la Geovane: generación de haces de luz para medir A_m

2.2 Requerimientos tecnológicos

Los requerimientos tecnológicos que la tecnología Geovane ha de satisfacer son:

1. Conocer la fecha y hora UTC del momento con precisión.
2. Ubicarse geográficamente.
3. Calcular las coordenadas solares, acimut Ψ y altura, respecto del plano horizontal, para los puntos 1 y 2 anteriormente mencionados.
4. Medir con precisión el ángulo A_m que forma el Sol respecto de su propia orientación desconocida, para cualquier latitud geográfica y para cualquier orientación con la que haya sido instalada.
5. Conocer su inclinación respecto del plano horizontal, para poder corregir la medida del ángulo del punto 4.
6. Acoplarse al sensor o dispositivo cuya orientación se quiere conocer.
7. Alinearse de forma precisa con el sensor o dispositivo a orientar.
8. Resistir las inclemencias meteorológicas propias de un emplazamiento eólico.
9. Resistir los esfuerzos mecánicos propios de la vibración de la torre de medición.
10. Comunicarse con los principales sistemas de adquisición de datos.
11. Adaptarse a las limitaciones de consumo eléctrico propias de un emplazamiento eólico (sin acceso a red).

2.3 Flujo de funcionamiento

La Geovane sigue un ciclo de funcionamiento día – noche que se repite de manera indefinida, según el diagrama de flujo de la Fig. 10:

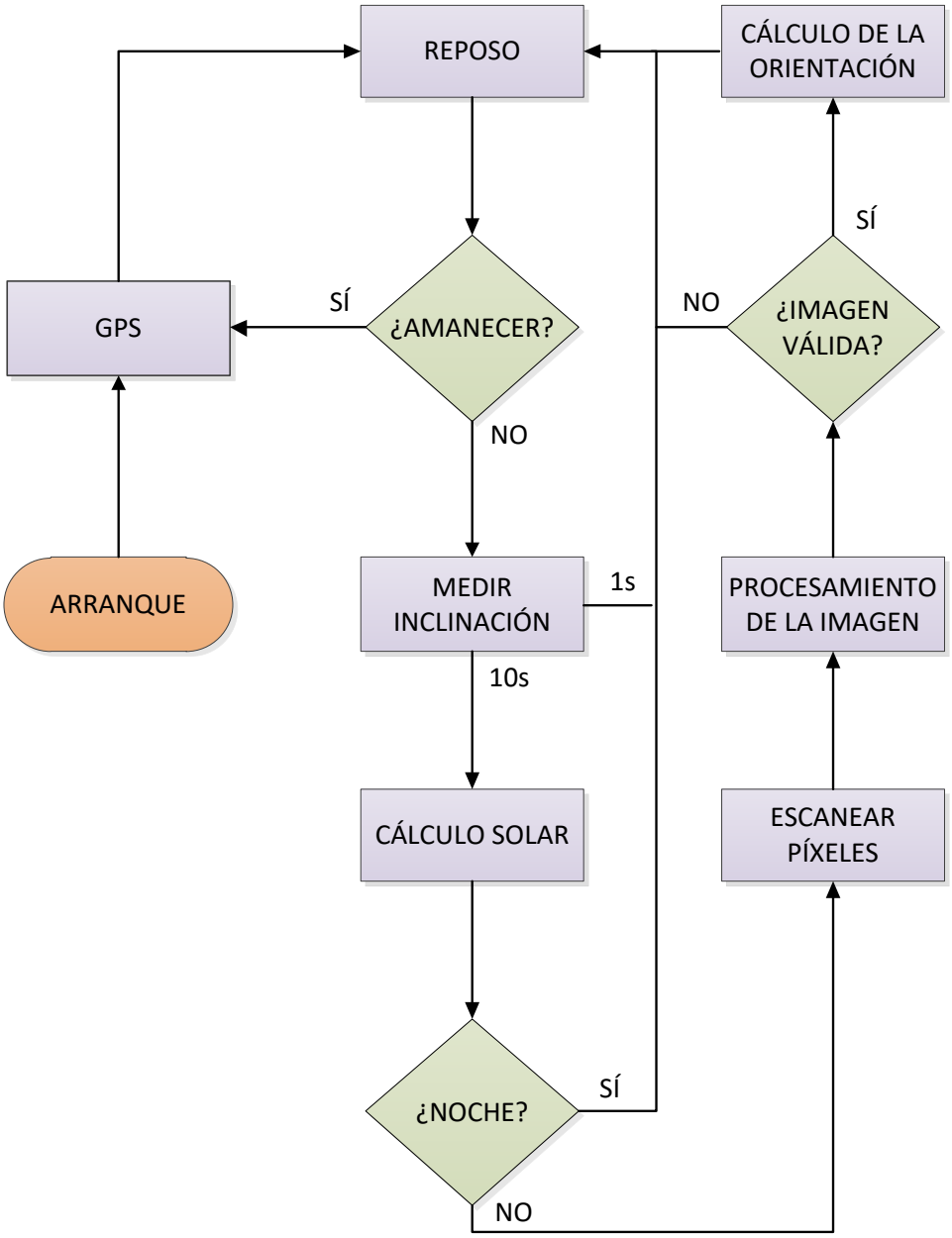


Fig. 10. Funcionamiento básico de la Geovane

Nada más arrancar, la Geovane enciende su módulo GPS integrado y le solicita la fecha y hora UTC, así como la localización geográfica. Una vez obtiene esos datos, pasa a medir su inclinación con respecto a la horizontal a razón de una vez por segundo. El dato de inclinación será posteriormente utilizado en el procesamiento de imagen para trasladar el ángulo medido del plano inclinado al plano horizontal.

Cada 10 segundos (valor configurable por el usuario) la Geovane calcula las coordenadas solares: altura y acimut (ángulo Ψ de la Fig. 8). Si la altura solar es negativa significa que es de noche y vuelve al estado de reposo.

Si por el contrario la altura solar es positiva, la Geovane toma una "fotografía" del cielo mediante una lectura de sus píxeles fotosensores y analiza la imagen a la búsqueda del ángulo que forma el Sol con la referencia de la Geovane (ángulo A_m de la Fig. 8). Cuando la Geovane se encuentra inclinada, se llevan a cabo las operaciones matemáticas necesarias para trasladar A_m del plano inclinado al plano horizontal.

Finalmente, se calcular el valor de la orientación sustrayendo el acimut medido A_m del acimut calculado Ψ, según la $\theta = \psi - A_m$ y se vuelve al estado de reposo para llevar a cabo una nueva iteración del algoritmo.

3 Elementos innovadores de la tecnología Geovane

El estado de la técnica para orientar veletas, previos a la tecnología Geovane, se reduce a procedimientos manuales e indirectos, dependientes de la pericia del instalador, de las limitaciones del terreno y de las distorsiones magnéticas locales (ver apdo. 1.2).

El desarrollo de un dispositivo que se acople a una veleta, o cualquier otro dispositivo, y obtenga su orientación de manera directa, sin intervención humana, y sin verse afectado por los problemas inherentes a los métodos magnéticos, supone una importante innovación tecnológica **a nivel internacional**. No existe un producto tecnológicamente equivalente en el mercado.

En este capítulo se expondrán los principales elementos innovadores del proyecto.

3.1 Orientación de veletas

Los **elementos innovadores** del proyecto Geovane en lo que respecta a la aplicación puramente **eólica** son cuatro:

1) Orientación **in situ** (vs. orientación indirecta).
2) Orientación **automática** (vs orientación manual).
3) Medida **continua** de orientación (vs. medida puntual, en la instalación).
4) Medida **solar** (vs. medida magnética o GPS).

3.1.1 Orientación in situ

El principal elemento innovador de la tecnología Geovane, en lo que respecta al sector eólico, radica en que **por primera vez** se puede conocer la **orientación real** de una veleta ***in situ***, de manera directa y de forma repetible.

Al no tener acceso físico a la veleta (apdo. 1.2.1), la única forma de establecer la orientación de veletas con anterioridad a la Geovane era mediante alineamientos sucesivos de los elementos intervinientes: la veleta al brazo, el brazo a la torre y la torre (o los vientos) respecto de una brújula o GPS, a nivel de suelo.

Fig. 11. **Elemento innovador: orientación in situ vs. orientación in directa**

3.1.2 Orientación automática

La tecnología Geovane **elimina la necesidad de orientar las veletas**. Se automatiza completamente el proceso de orientación, puesto que el instalador sólo tiene que colocar el conjunto Geovane – veleta en posición vertical y conectar ambos sensores al data logger. Exactamente igual que si se tratara de un anemómetro.

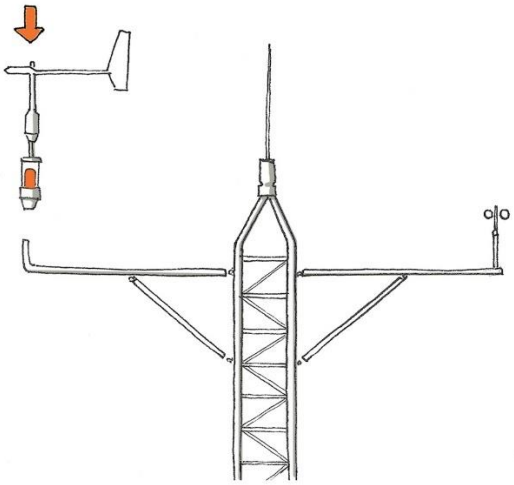


Fig. 12. **Elemento innovador: orientación automática**

3.1.3 Medida continua

La tecnología Geovane mide de manera continua la orientación de la veleta que tiene acoplada. Esto constituye un elemento innovador respecto al estado de la técnica: una veleta con Geovane va a entregar una **medida** de dirección del viento **inmune a cambios de orientación** devenidos durante la campaña (apdo. 1.2.4).

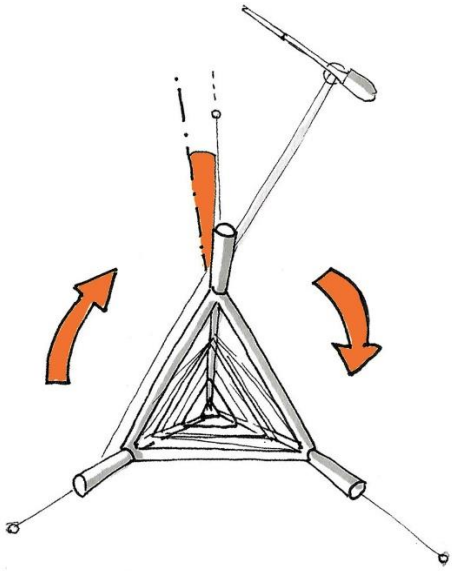


Fig. 13. **Inmunidad de la medida de dirección a cambios de orientación**

3.1.4 Medida solar

La tecnología solar es mucho más compleja de implementar que la magnética. A cambio, su **precisión** y **robustez** frente a perturbaciones son notablemente mayores.

La razón por la que el uso de brújulas solares tradicionales (mecánicas) por parte de los instaladores es nulo se debe a dos motivos:

1. Complejidad de manejo → personal altamente cualificado (apdo. 3.2).
2. Necesidad de que haya sol para medir la orientación.

El punto 1 no supone inconveniente alguno para una máquina, capaz de llevar a cabo las tareas para las que ha sido diseñada, sin equivocarse y de manera repetible.

El punto 2 tampoco supone ningún inconveniente debido a la naturaleza de la aplicación: basta con esperar a que salga el sol para que la Geovane pueda entregar un nuevo valor de orientación. Hay que tener en cuenta que la duración de la campaña de medición suele ser de dos años. Incluso en los emplazamientos más grises y menos soleados en algún momento va a salir el sol.

3.2 Automatización del concepto de brújula solar

Las brújulas solares tradicionales permiten al usuario obtener la orientación mediante la comparación del acimut solar calculado Ψ y el acimut solar medido A_m.

Un **elemento innovador** de la tecnología Geovane ha consistido en **automatizar** la secuencia de pasos que dichas brújulas solares requerían, por parte de un operador formado. A saber:

1. Conocer la hora UTC (tiempo solar medio en el meridiano de Greenwich).
2. Conocer la longitud geográfica para poder calcular el desfase horario respecto de la hora UTC y obtener el tiempo solar medio local.
3. Conocer la ecuación de tiempo para obtener el tiempo solar aparente a partir del tiempo solar medio local del punto 2.
4. Conocer la latitud geográfica para ajustar el ángulo de la alidada de la brújula.
5. Conocer el ángulo acimutal sobre el plano horizontal tangente a la superficie terrestre entre la brújula y el Sol. Para ello el operador tenía que girar la pínula y apuntarla hacia el Sol.

Estos cinco pasos se pueden condesar en dos operaciones:

1. **Calcular** el ángulo que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador, medido sobre el horizonte celeste. Esta operación podría ser denominada: “calcular el acimut del Sol Ψ”, y englobaría las acciones de los pasos 1 a 4.
2. **Medir** el ángulo que forman la referencia de la brújula y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador, medido sobre el horizonte celeste. Esta operación podría ser denominada: “medir el acimut del Sol” A_m, y correspondería con el punto 5 de la anterior secuencia.

3.2.1 Cálculo del acimut solar

La Geovane tiene que poder **calcular** el acimut solar Ψ de manera **autónoma**.

En la secuencia de pasos descrita anteriormente, la obtención de la hora solar local quedaba en manos del operador. La persona debía disponer de un reloj ajustado a la hora local y aplicarle la corrección de la ecuación de tiempo, tabulada en documentos que debía llevar consigo, para obtener la hora solar local. Asimismo, el operador necesitaba conocer la latitud en la que se encontraba y configurar dicho valor en la brújula por medio de un dial mecánico.

La Geovane automatiza estos dos procesos, lo que supone una innovación tecnológica en el ámbito de las brújulas solares: un **GPS integrado** en el propio hardware del dispositivo proporciona la hora UTC, así como la latitud y longitud geográficas.

El **procesador** de la Geovane utiliza entonces los datos que proporciona para obtener la hora solar local, corrigiendo la hora UTC según la longitud geográfica y la ecuación de tiempo, implementada también en el código de la Geovane.

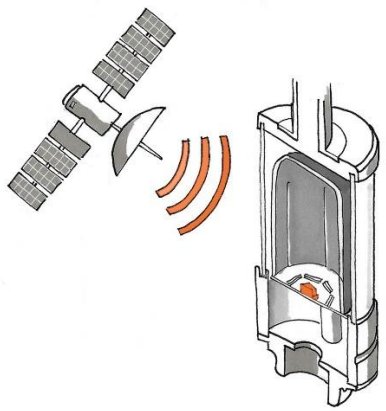


Fig. 14. Elemento innovador: GPS integrado

Una vez conocida la hora solar local, la Geovane debe calcular la posición del Sol respecto del Norte Geográfico (acimut Ψ), para ese momento y localización geográfica.

En las brújulas solares tradicionales, la propia construcción mecánica de la brújula, junto con la posición de los diferentes diales que el operador había ajustado manualmente, embebían el cálculo del acimut solar. La tecnología Geovane, sin mecanismos, calcula el acimut solar mediante **ecuaciones implementadas en su firmware**. Dichas ecuaciones necesitan como variables de entrada los datos GPS anteriormente citados.

3.2.2 Medida del acimut solar

Una vez que la Geovane ha calculado el acimut solar Ψ (ángulo del Sol con el Norte Geográfico) lo debe comparar con el "acimut medido" A_m (ángulo del Sol con la Geovane), obteniendo entonces la orientación geográfica mediante la ecuación del apartado 2.1 $\theta = \psi - A_m$.

La Geovane es capaz de **medir** el acimut solar de manera totalmente innovadora respecto de las brújulas solares tradicionales, pues aúna precisión, ausencia de partes móviles y respeta las restricciones de consumo energético y, por ende, de potencia de procesamiento.

Localizar el Sol en el firmamento requiere:

1) Tomar una **fotografía** del cielo.
2) Corregir la fotografía para eliminar las distorsiones geométricas que producen la inclinación del plano de los fotosensores y la refracción del vidrio.
3) Analizar dicha fotografía para determinar dónde se encuentra el Sol.

La toma y análisis de la fotografía celeste son procesos íntimamente ligados y no es posible diseñar una solución técnica que ejecute uno de ellos sin tener en consideración el otro.

3.2.2.1 Toma de la fotografía celeste

Tomar una fotografía consiste en obtener una imagen fija de la realidad mediante la acción de la luz sobre una superficie sensible. Las cámaras fotográficas, por lo general, tienen un ángulo de visión limitado, por lo que tienen que ser orientadas hacia el objeto que se desea fotografiar. Esta restricción no es aceptable para la aplicación eólica, ya que la Geovane ha de ser capaz de medir el sol independientemente de la orientación con la que sea instalada. Tampoco puede hacer uso de partes móviles para auto orientarse hacia el objeto que pretende fotografiar.

En resumen, se requiere desarrollar un sistema de **captación de imágenes** con un ángulo de visión acimutal de 360°, de bajo consumo, y con la mínima cantidad de píxeles que permita combinar una **alta precisión con** un **bajo coste computacional** del análisis de la imagen. Además, ha de ser capaz de detectar el Sol aun cuando éste se encuentra a gran altura, como ocurre durante el verano y especialmente en las zonas intertropicales.

La solución innovadora desarrollada se basa en la combinación de una carcasa cilíndrica con ocho rendijas verticales distribuidas perimetralmente de manera equidistante. En el interior de la carcasa se sitúan anillos de elementos fotosensores adaptados para recibir la luz que pasa a través de las rendijas, permitiendo establecer, mediante procesado de la posición de la región iluminada de los fotosensores, la orientación del Sol respecto de la Geovane ("acimut medido" A_m).

Fig. 15. Toma de la fotografía celeste mediante rendijas y fotosensores

La Fig. 16 muestra es una vista cenital del interior de la Geovane, donde puede verse como la luz del Sol se filtra a través de las rendijas 5 y 6, generando sendos haces de luz dentro de la Geovane que atraviesan varios fotosensores. En otras ocasiones, el sol entra por una única rendija, generando un único haz de luz.

Cada uno de los 16 fotosensores, que aparecen en la imagen en color rojo, está compuesto por alineaciones de 128 píxeles sensibles a la luz (fotodiodos). Se dispone por consiguiente de 2048 píxeles estratégicamente dispuestos para poder medir el acimut solar en prácticamente cualquier combinación posicional Sol-Geovane.

El usuario configura de antemano la frecuencia de toma de las fotografías celestes (*scan rate*), con un rango que va desde una vez por minuto a una vez por segundo.

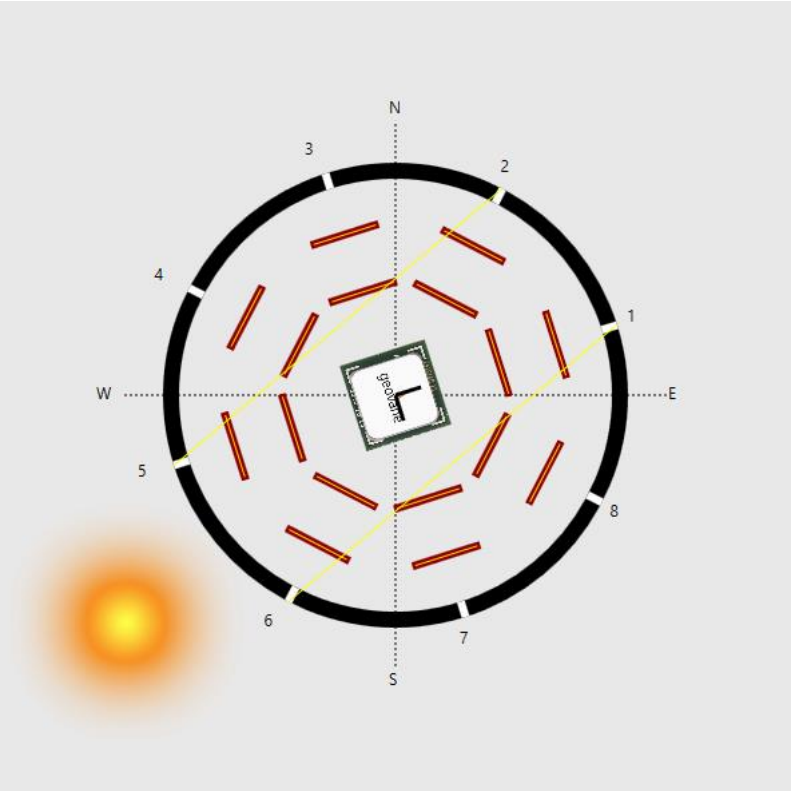


Fig. 16. Interior de la Geovane (8 de abril, 14:17:32 UTC, Zaragoza, θ = 72°)

3.2.2.2 Corrección de la fotografía celeste

Las ecuaciones solares permiten calcular el acimut Ψ para un plano perfectamente horizontal, tangente a la superficie terrestre. Para que el acimut A_m que miden los fotosensores pueda ser comparado con el acimut calculado, ambos ángulos deben compartir el mismo plano.

Esta situación de coplanariedad nunca se da en el mundo real, ya que la Geovane siempre va a ser instalada con algo de inclinación respecto de la vertical, provocando ligeras inclinaciones sobre la horizontal del plano que alberga los fotosensores, así como de las rendijas que encastran a 90° respecto de dicho plano.

Una **innovación** de la Geovane, de alta complejidad técnica y matemática, consiste en medir con precisión la inclinación del plano de fotosensores y usar ese dato para **corregir**

la fotografía celeste, obteniendo así la imagen que hubiera resultado de haber estado perfectamente horizontal.

Parte de la complejidad técnica deriva de la necesidad de medir inclinaciones de muy pequeña magnitud, en el entorno de 0° a ±3°, de manera precisa. A tal efecto, la Geovane integra un acelerómetro de precisión de dos ejes, X e Y.

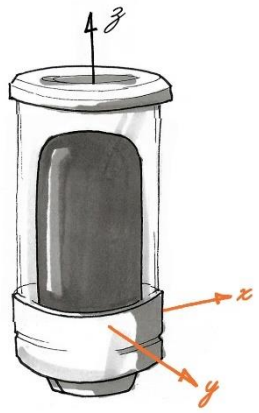


Fig. 17. Medida de la inclinación del plano de los fotosensores (ejes X e Y)

Todas las tecnologías de acelerómetros exhiben un sesgo de su medida respecto de la horizontal, también conocido como "sesgo de 0g". Este sesgo, además, varía con la temperatura y es distinto para cada unidad. En nuestra aplicación, la magnitud del sesgo de muchas de las unidades de acelerómetro es mayor que la magnitud de la propia inclinación que interesa medir. Por lo tanto, si no se elimina dicho sesgo, la medida entregada por el acelerómetro carece por completo de utilidad práctica.

La solución a este problema consiste en **calibrar cada acelerómetro de manera individual**, para el rango de temperatura de operación: -10°C a 60°.

El sesgo o *bias* de 0g de la tecnología de acelerómetros utilizada, para cada uno de los ejes, puede caracterizarse de la forma:

$$Bias_{0g_x} = a_x + b_x \cdot T + c_x \cdot T^2$$
$$Bias_{0g_y} = a_y + b_y \cdot T + c_y \cdot T^2$$

Donde a, b y c son constantes únicas para cada acelerómetro y cada eje, y T es la temperatura interna del acelerómetro.

El acelerómetro de cada Geovane se calibra siguiendo este procedimiento:

1) Se nivela la unidad por medio de un nivel de burbuja de alta precisión.
2) Con el acelerómetro perfectamente horizontal, se lleva a cabo un barrido controlado de temperatura de -10° a 60°, a la vez que se toman muestras de la medida de inclinación X, inclinación Y, y de la temperatura que registra el termómetro (cada acelerómetro integra un termómetro en su encapsulado para poder ser calibrado y posteriormente poder aplicar la corrección a la medida instantánea).

La Fig. 18 muestra la curva de temperatura de la calibración, con los tres puntos de temperatura que se seleccionan como representativos para los calcular las constantes de compensación a, b y c.

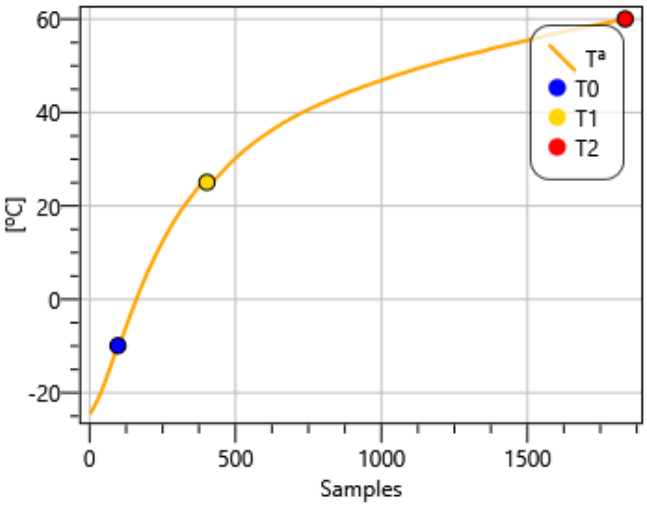


Fig. 18. Calibración del acelerómetro: perfil de temperatura

En la Fig. 19 pueden verse dos gráficas. La gráfica azul es la medida que entrega el acelerómetro, perfectamente horizontal gracias al nivel de burbuja, durante la calibración cuya curva de temperatura aparece en la Fig. 18. Es decir, la medida sin aplicar la corrección del sesgo de 0g.

En ausencia de calibración, la medida presenta, para una misma inclinación, una divergencia de 4° de inclinación entre el valor medido a -10°C y el valor medido a 60°C. Una vez calibrada, la medida compensada del acelerómetro, para la misma curva de temperatura, resulta como se muestra en la gráfica amarilla.

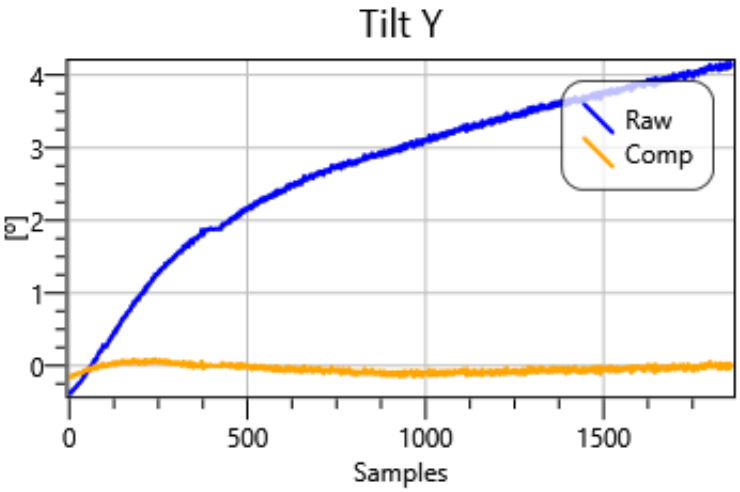


Fig. 19. Compensación del sesgo de 0g frente a temperatura: eje Y

En funcionamiento normal, cada vez que la Geovane mida su inclinación X e Y para corregir la fotografía celeste, va a compensar la lectura del acelerómetro ACC_{raw} según la temperatura a la que se encuentre en ese momento, según la siguiente ecuación:

$$ACC_{comp} = ACC_{raw} - Bias_{og} = ACC_{raw} - (a + b \cdot T + c \cdot T^2)$$

Sólo mediante una calibración de este tipo se puede lograr la precisión necesaria para corregir la fotografía celeste a su equivalente horizontal.

La ecuación que relaciona la inclinación que se desea medir con la aceleración estática (gravedad) es la siguiente:

$$tilt = \sin^{-1}\left({}^{ACC_{static}}/_{1g}\right)$$

En una torre de medición, la aceleración estática, que nos sirve para obtener la inclinación, se superpone con la aceleración dinámica, fruto de la vibración del brazo en el que está instalada la Geovane, así como del movimiento del propio mástil. Para filtrar la medida de aceleración dinámica y quedarse únicamente con la estática, la Geovane implementa el siguiente filtro pasobajo digital:

$$tilt_{DC_t} = tilt_t \cdot \alpha + tilt_{DC_{t-1}} \cdot (1 - \alpha)$$

Siendo $tilt_{DC_t}$la medida filtrada actual, $tilt_t$ la medida instantánea, $tilt_{DC_{t-1}}$la medida filtrada anterior y α un coeficiente de filtrado que toma el valor 0.1.

Los valores de inclinación del eje X (ángulo de giro λ) y del eje Y (ángulo de giro Υ) se utilizan para llevar a cabo la transformación de las coordenadas XYZ del plano inclinado en el que sitúan los píxeles iluminados (ver apartado 3.2.2.3, análisis de la fotografía celeste) en las coordenadas X'Y'Z' del plano tangente a la superficie terrestre, para su subsecuente comparación con el acimut solar calculado.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_y(\Upsilon) \cdot R_x(\lambda) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Upsilon & \sin\Upsilon \cdot \sin\lambda & \sin\Upsilon \cdot \cos\lambda \\ 0 & \cos\lambda & -\sin\lambda \\ -\sin\Upsilon & \cos\Upsilon \cdot \sin\lambda & \cos\Upsilon \cdot \cos\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

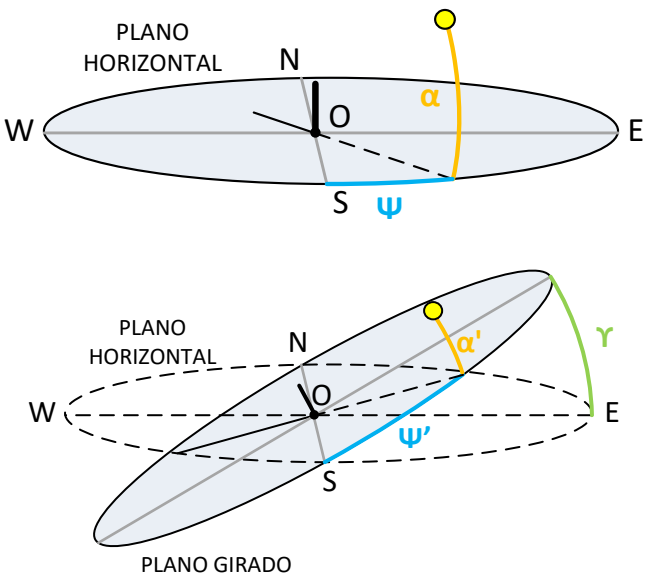


Fig. 20. Corrección de la fotografía celeste según la inclinación

Al reto técnico de corregir la fotografía celeste cuando el plano de fotosensores y rendijas se encuentra inclinado respecto de la horizontal, se suma el reto de corregir el error que el tubo de vidrio que protege al sensor introduce mediante la **refracción**.

El ángulo solar medido en el interior de la Geovane se encuentra distorsionado por la lente menisco que constituye la envolvente de vidrio, según la Fig. 21. La Geovane ha de corregir mediante ecuaciones el A_m que mide en su interior para obtener el A_m real que se obtendría si la fotografía celeste se hubiera tomado en ausencia del vidrio.

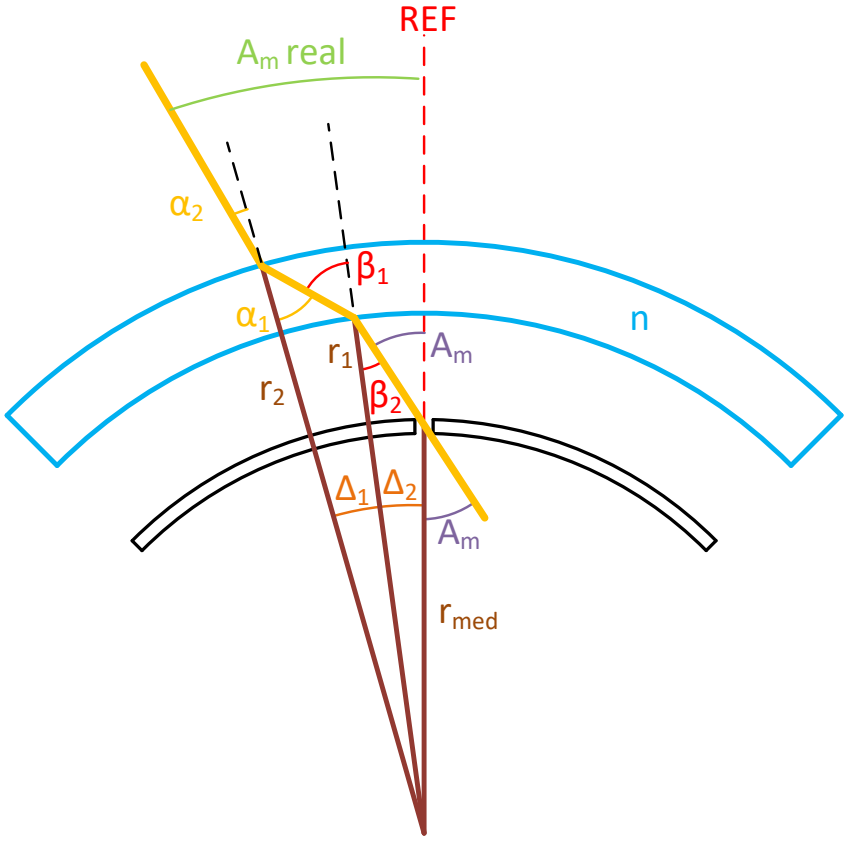


Fig. 21. Refracción del haz de luz en el interior de la Geovane

3.2.2.3 Análisis de la fotografía celeste

La fotografía celeste correspondiente a la Fig. 16 se muestra en la Fig. 22. Cada gráfica representa el perfil de voltajes de los 128 píxeles de cada uno de los 16 fotosensores. El nivel de tensión de cada píxel es proporcional a la luz que recibe.

Si el array es atravesado por un haz de luz proveniente de las rendijas, su perfil presenta una prominencia. Si, por el contrario, quedan en sombra, su perfil de tensión es plano, con un nivel dependiente de la radiación difusa que le llega a través de las rendijas.

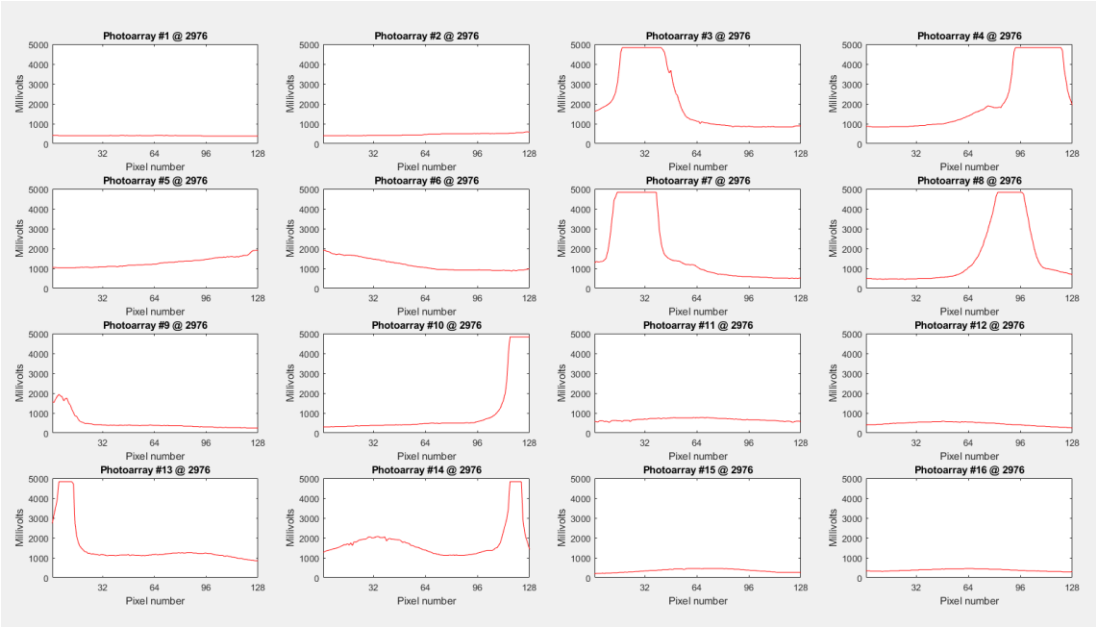


Fig. 22. Fotografía celeste: 8 de abril, 14:17:32 UTC, Zaragoza, θ = 72°

A partir de una fotografía celeste, la Geovane ha de ser capaz de extraer el ángulo solar (acimut medido, A_m). El procesador analiza individualmente cada perfil de tensión de los fotosensores tratando de establecer la posición del píxel que queda en el centro de la zona iluminada.

Siguiendo con el ejemplo de la fotografía celeste de la Fig. 22, el algoritmo de procesamiento obtiene los siguientes píxeles sobre los que se centran los haces de luz:

Anillo interno								
Fotoarray	1	2	3	4	5	6	7	8
Píxel (1 a 128)	-	-	30.5	107.5	-	-	27	90
Anillo externo								
Fotoarray	1	2	3	4	5	6	7	8
Píxel (1 a 128)	5	-	-	-	9.5	119.5	-	-

La Geovane conoce con precisión las coordenadas cartesianas XY de cada uno de sus 2048 píxeles fotosensores, así como las de las ocho rendijas, las cuales se corrigen en función de la inclinación de la Geovane según lo explicado en el apdo. 3.2.2.2.

El algoritmo de análisis empareja iterativamente los puntos XY correspondientes a los píxeles de la anterior tabla (columnas amarillas) según se encuentre contenidos en un mismo haz de luz, y obtiene entonces el ángulo A_m.

Cada vez que el análisis de la fotografía celeste arroja un valor de A_m, la Geovane calcula un nuevo valor de orientación según $\theta = \psi - A_m$.

Existen situaciones particulares, como la mostrada en la Fig. 23, en las que el análisis geométrico de la fotografía celeste arroja dos resultados válidos. En estas situaciones, las posiciones XY de los píxeles iluminados no permiten medir el acimut del Sol de forma unívoca, obteniéndose dos posibles soluciones, separadas 180°.

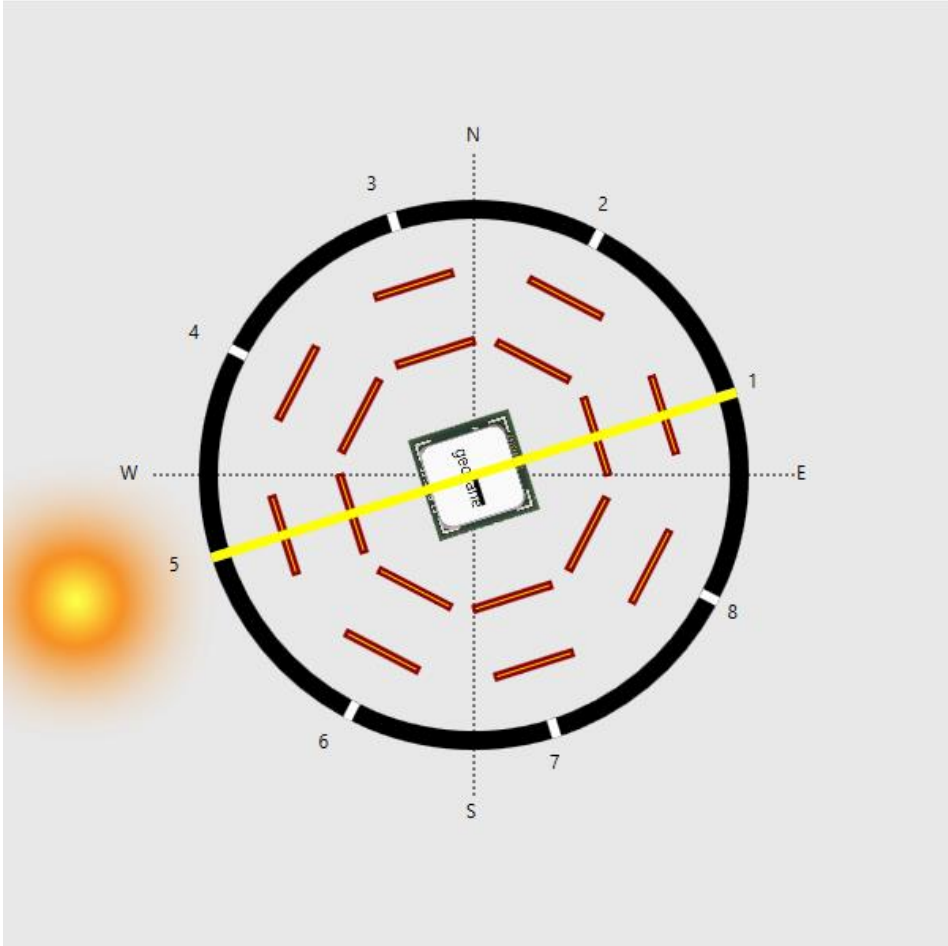


Fig. 23. **Indeterminación geométrica (soluciones posibles: rendijas 5 y 1)**

La Geovane escoge una de las dos soluciones geométricamente viables gracias a dos elementos de carácter innovador:

1) Análisis de la radiación difusa que se filtra por las rendijas y es captada por los fotosensores. En un principio este análisis era llevado a cabo por una **red neural** del tipo perceptrón multicapa de una capa intermedia y 78 neuronas, siguiendo la arquitectura 40-30-8. En versiones posteriores del diseño (16 fotosensores), el análisis se lleva a cabo mediante algoritmo.
2) Inclusión de un sensor auxiliar del tipo *absolute orientation* que, cuando ocurre una indeterminación geométrica, decide cuál de las dos rendijas es la correcta.

3.3 Alineamiento preciso con veletas mediante láser

Hasta el momento, ha quedado de manifiesto que la Geovane es capaz de obtener su propia orientación a partir del Sol, de manera autónoma. Sin embargo, no es la orientación de la Geovane la que interesa al promotor eólico, sino la de las veletas encargadas de medir la dirección del viento. La aplicación requiere que la tecnología Geovane sea acoplable y alienable con el elemento cuya orientación se desea conocer.

Un **elemento innovador** de la tecnología Geovane radica en su **capacidad de alinearse** de manera muy precisa con veletas, aerogeneradores y RSD, sin trasladar la referencia de orientación por medios mecánicos, sino ópticos.

3.3.1 Retos técnicos del alineamiento

Los retos técnicos en lo que respecta al alineamiento de la Geovane con la veleta cuya orientación se desea establecer son los siguientes:

1. La Geovane se debe poder alinear con **distintos modelos de veleta**, cada uno con una mecánica particular.
2. Se debe evitar hacer uso de la marca al norte de la veleta. En muchos casos se trata de un adhesivo que establece en fábrica un operario. Un error de colocación de la etiqueta se convierte directamente en un error de la medida si dicha etiqueta se utiliza como referencia para alinear el sensor.

Fig. 24. **Ejemplos de marca al norte mediante adhesivos**

3. La parte central de la envolvente de la Geovane es de vidrio, para dejar pasar la luz del Sol. Esto dificulta la traslación de una referencia desde la base hasta la tapa por medios mecánicos.
4. La precisión final de la medida de dirección del viento depende de la precisión con la que la veleta se alinea a la Geovane. De nada sirve medir la orientación con un error <1° si luego se introduce un error por un alineamiento deficiente.

3.3.2 Solución innovadora: láser de línea integrado

La solución innovadora desarrollada para superar los cuatro retos técnicos del apartado 3.3.1 consiste en trasladar la referencia angular de la Geovane a la veleta mediante un **enlace óptico**, basado en un láser de línea integrado en el propio sensor.

La Geovane enciende su láser de línea después de cada arranque, durante 5 minutos. El láser proyecta una línea que debe coincidir con la veleta cuando ésta da una lectura de 180°. Si estas dos condiciones se cumplen, significa que ambos sensores se encuentran

perfectamente alineados y que la posición relativa entre la veleta y la Geovane puede entonces ser fijada mediante los mecanismos de apriete con los que cuenta la veleta.

Nótese que el procedimiento no hace uso alguno de la pegatina de marca al norte de la veleta, sino que hace uso de la propia medida del transductor, con lo que se elimina un potencial error en el pegado de la misma por el operario.

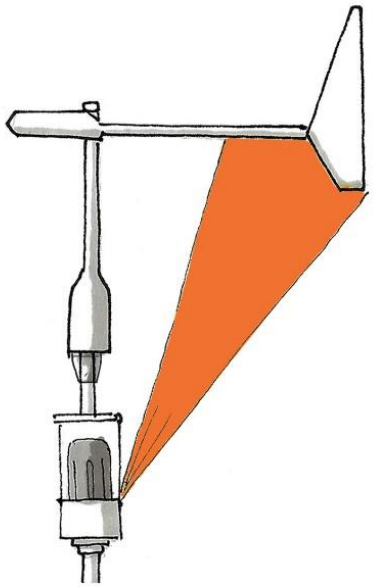


Fig. 25. **Laser integrado para alinear sin enlace mecánico**

Una vez alineados y fijados, ambos dispositivos tienen que ser instalados en el mástil de medición como si de un único ente se tratara.

3.4 Diseño adaptado a las limitaciones de consumo

Otra especificación que debe (o que debería) cumplir todo sensor que vaya a ser instalado en una torre de medición eólica alimentada mediante panel solar y batería es el **bajo consumo**. La única manera de lograr un bajo consumo es tener en cuenta dicha limitación desde muy temprano, en la misma fase de diseño conceptual.

El proyecto Geovane ha hecho un gran esfuerzo de I+D en optimizar el consumo de energía, sin renunciar a ninguna funcionalidad:

- Microprocesador de bajo consumo.
- Todas las secciones del hardware se desconectan mediante interruptores electrónicos controlados por el procesador para eliminar su consumo, incluido el *quiescent* (inactivo), cuando no se está haciendo uso de ellas.
- Durante la noche, la Geovane entra en un modo "*sleep*", de muy bajo consumo (aproximadamente 1.5mA). En este modo nocturno, únicamente se mide la inclinación, se atiende a las encuestas RS-485 y se mantienen activas las salidas.
- La hora se mantiene durante todo el día mediante un chip RTC, para evitar tener encendido el GPS, que sólo se enciende en el arranque y al amanecer.
- La frecuencia de trabajo del microcontrolador se ajusta a la mínima necesaria para llevar a cabo las operaciones, cumpliendo por supuesto con las restricciones de tiempo. Por ejemplo, para escanear los píxeles, la velocidad se multiplica por ocho y, una vez leídos, se vuelve a la frecuencia de clock original.
- Fuente de alimentación de tipo conmutado, con eficiencias altas para cualquier combinación tensión-corriente.
- Protecciones ESD con bajas corrientes de fuga.

Gracias a esta cuidadosa planificación del consumo, la Geovane se puede añadir a la configuración de cualquier estación meteorológica o torre de medición eólica sin necesidad de revisar el dimensionamiento del sistema de alimentación.

4 Hitos del proyecto Geovane

El proyecto Geovane arranca en 2013, con los Trabajos Fin de Grado que José María Sanz y Rafael Tallada realizan en el seno de unas prácticas en Kintech Engineering. A lo largo de estos años, el proyecto ha ido superado diversos **hitos**, incluyendo la propia comercialización, los cuales pasan a relatarse en el presente capítulo.

4.1 Trabajos Fin De Grado (2014)

En 2013, Kintech Engineering oferta unas prácticas para llevar a cabo proyectos fin de carrera en algunas de las líneas de desarrollo de la empresa. Una de estas líneas es el proyecto Geovane, consistente en desarrollar un dispositivo capaz de establecer la orientación de veletas por medio de la posición del Sol.

Debido a la envergadura del proyecto, se lleva a cabo una división de tareas que culmina con la presentación de **dos Trabajos Fin de Grado**, bajo la dirección de Íñigo Vázquez Pulido (Kintech Engineering) y Carlos Bernal Ruiz (Universidad de Zaragoza):

a) TFG: "Diseño e implementación de una brújula solar electrónica: algoritmos de cálculo astronómico y desarrollo firmware" (José María Sanz Castiller, 2014).

b) TFG: "Diseño e implementación de una brújula solar electrónica: hardware y diseño mecánico" (Rafael Tallada Souto, 2014).

Universidad Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño e implementación de una brújula solar electrónica: algoritmos de cálculo astronómico y desarrollo firmware

José María Sanz Castiller

Director:
Íñigo Vázquez Pulido

Ponente:
Carlos Bernal Ruiz

Graduado en Ingeniería Electrónica y Automática
Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)
Universidad de Zaragoza
Septiembre 2014

Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Diseño e implementación de una brújula solar electrónica: hardware y diseño mecánico

Autor
Rafael Tallada Souto

Director
Íñigo Vázquez Pulido

Ponente
Carlos Bernal Ruiz

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

Fig. 26. Trabajos Fin de Grado sobre la Geovane (2014)

Uno de los objetivos del proyecto consistió en construir un primer prototipo funcional que sirviera de **prueba de concepto** y pudiera ser evolucionado (Fig. 27 y Fig. 28).

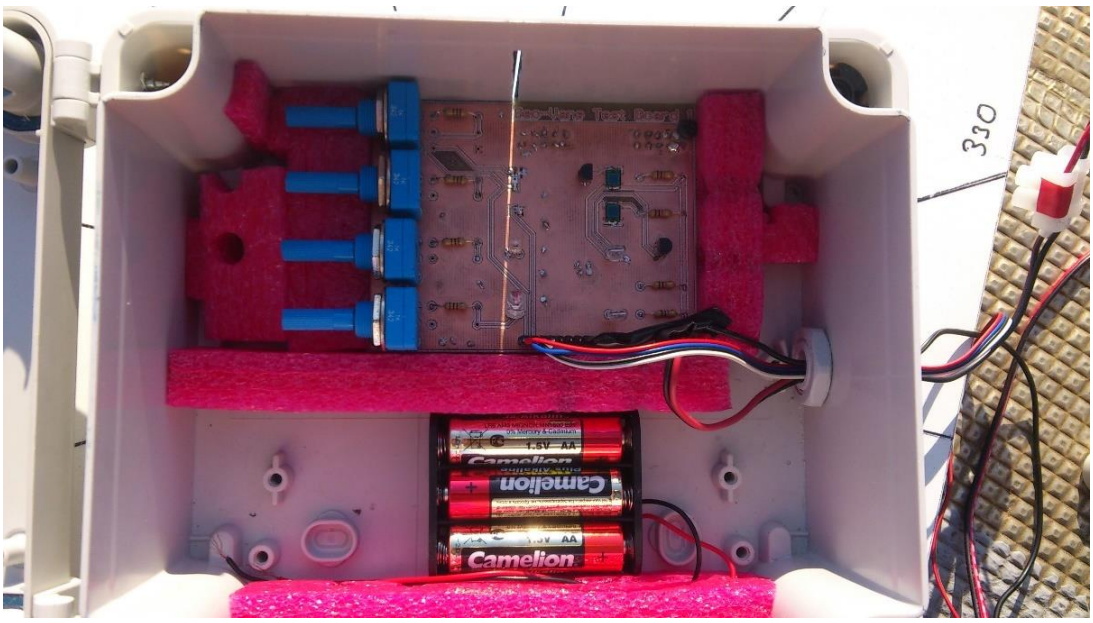


Fig. 27. **Primer prototipo (2014, TFG)**

El primer prototipo cuenta con **un único píxel** fotosensible, y una rendija, por lo que para establecer la orientación se tenía que dar tiempo a que el haz de luz solar lo recorriera de manera completa.

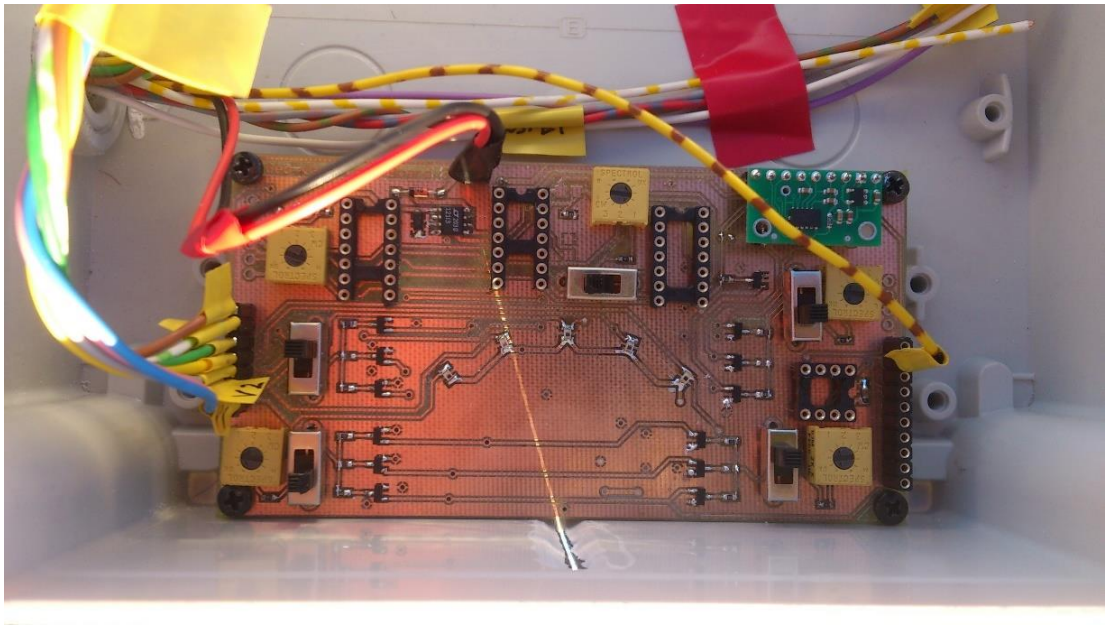


Fig. 28. **Segundo prototipo (2014, TFG)**

El segundo prototipo cuenta con **cinco píxeles** fotosensibles, una rendija e implementa un ajuste de ganancia variable para tratar de resolver el problema del enorme rango dinámico que presenta la radiación solar.

Fruto del trabajo realizado durante dichas prácticas, ambos ingenieros pasan a formar parte de la plantilla de Kintech Engineering de manera indefinida, para continuar desarrollando el proyecto Geovane.

4.2 Proyecto CDTI (2015-2017)

Durante 2015 se sigue avanzando en el desarrollo de la Geovane y se decide optar a financiación CDTI para proyectos de investigación y desarrollo, con resultado favorable.

Tras aprobarse la solicitud, el proyecto de CDTI se articula en dos hitos, repartidos a lo largo de 24 meses. Los hitos deben satisfacer una serie objetivos parciales planificados:

ACTIVIDADES, PLAZO PREVISTO	2015											2016											
	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DISEÑO DE UN PRIMER PROTOTIPO DE ORIENTADOR Y PRIMERA VERIFICACIÓN EN LABORATORIO																							
REDISEÑO, VERIFICACIÓN, VALIDACIÓN FINAL																							
SUBTAREAS																							
ESPEFICICACIONES, ESTUDIO ASTRONÓMICO Y GEOMÉTRICO												X											
DESARROLLO HARDWARE ELECTRÓNICO																							
DESARROLLO FIRMWARE																							
DISEÑO OPTO-MECÁNICO																	O	O	O				
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL											O	O	O										
CERTIFICACIONES Y SOLICITUD DE PATENTE	X	X								X	X								?	?	?	?	?
	Hito 1												Hito 2										

Fig. 29. **Cronograma del proyecto CDTI (2015)**

En 2015 el diseño hardware encargado de tomar la fotografía celeste experimenta un cambio cualitativo: de una única rendija se pasa a una carcasa cilíndrica con **ocho rendijas** verticales equidistribuidas perimetralmente que proyectan haces de luz sobre un **anillo de fotosensores** de línea situados en un plano perpendicular a las mismas.

Fig. 30. **Primer prototipo de 8 rendijas (2015)**

Ya no es necesario esperar a que el Sol barra el píxel de principio a fin porque se pueden tomar fotografías celestes instantáneas. Podría decirse que se pasa de grabar vídeos con un píxel de resolución a tomarse fotografías celestes de **1024 píxeles** fotosensibles. El concepto de ocho rendijas se ha mantenido hasta la actualidad.

Es el primer prototipo que integra el procesador y el GPS en el propio hardware, y a cuya mecánica se puede acoplar una veleta, aunque todavía no se puede alinear.

4.3 Trabajo Fin de Máster (2017)

En 2017 se realiza un Trabajo Fin de Máster que tiene por objetivo la optimización por medio de algoritmos genéticos del *placement* de la PCB de la Geovane sobre el que se sueldan los sensores de luz que toman la fotografía celeste para medir el acimut del Sol (ver apartado 3.2.2.1):

- TFM: "Optimización del diseño hardware y layout de la PCB de un sensor solar mediante algoritmos genéticos" (Rafael Tallada Souto, 2017).

La optimización pretende **maximizar** el número de posiciones solares para las que la Geovane es capaz de capturar dicho acimut, o lo que es lo mismo, el **factor de disponibilidad** de medidas del sensor, a la vez que se minimiza su direccionalidad, ángulos muertos y coste económico.

Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Electrónica

Optimización del diseño hardware y layout de la PCB de un sensor solar mediante algoritmos genéticos

Optimization of hardware design and PCB layout for a sun sensor using genetic algorithms

Autor

Rafael Tallada Souto

Director

Julio David Buldain Pérez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2017

Fig. 31. Trabajos Fin de Máster sobre la Geovane (2017)

4.4 Lanzamiento al mercado (2018)

En 2017 se lleva a cabo una **miniaturización** del sensor, manteniendo el concepto de 8 rendijas. Es el primer prototipo al que se le puede **alinear con veletas**. También es el primero que se instala en una torre de medición real.

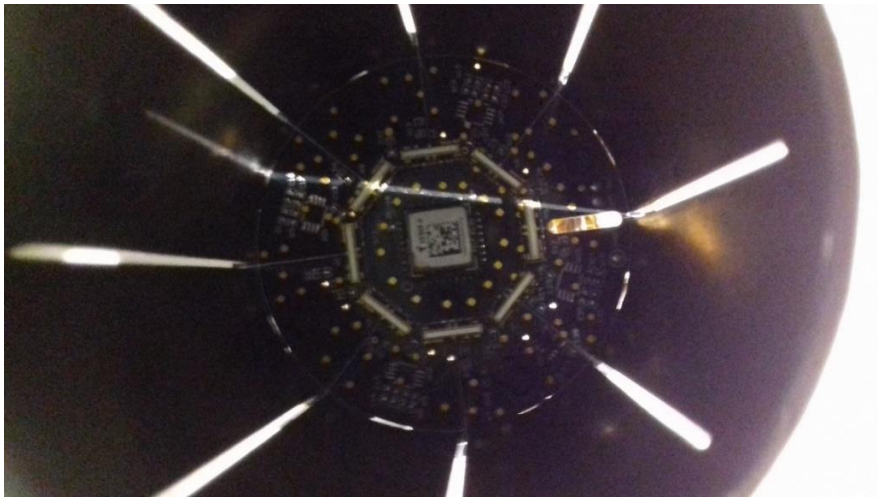


Fig. 32. **Interior de la Geovane (prototipo 2017)**

En **2018** se lanza la Geovane al mercado, con una electrónica y mecánicas revisadas, pero de apariencia muy similar a los prototipos de 2017. Al diseño que sale al mercado le han antecedido cinco generaciones de prototipos.

Las primeras unidades vendidas se destinan a proyectos que promotores europeos desarrollan en países como Sudáfrica, Filipinas, Chile, México, Corea del Sur, Vietnam… corroborando lo expuesto en el apartado 1.2.5.

Fig. 33. **Lanzamiento al mercado de la Geovane: 2018 (foto: Filipinas)**

En 2020 se comienza a fabricar la evolución de la tecnología Geovane que optimiza su funcionamiento en áreas intertropicales y en dispositivos que necesitan una alta tasa de refresco de la medida (aerogeneradores), según lo abordado en el TFM del apartado 4.3.

Dicha evolución duplica el número de píxeles fotosensibles: de 1024 a 2048, dispuestos en dos anillos concéntricos de 8 fotosensores cada uno.

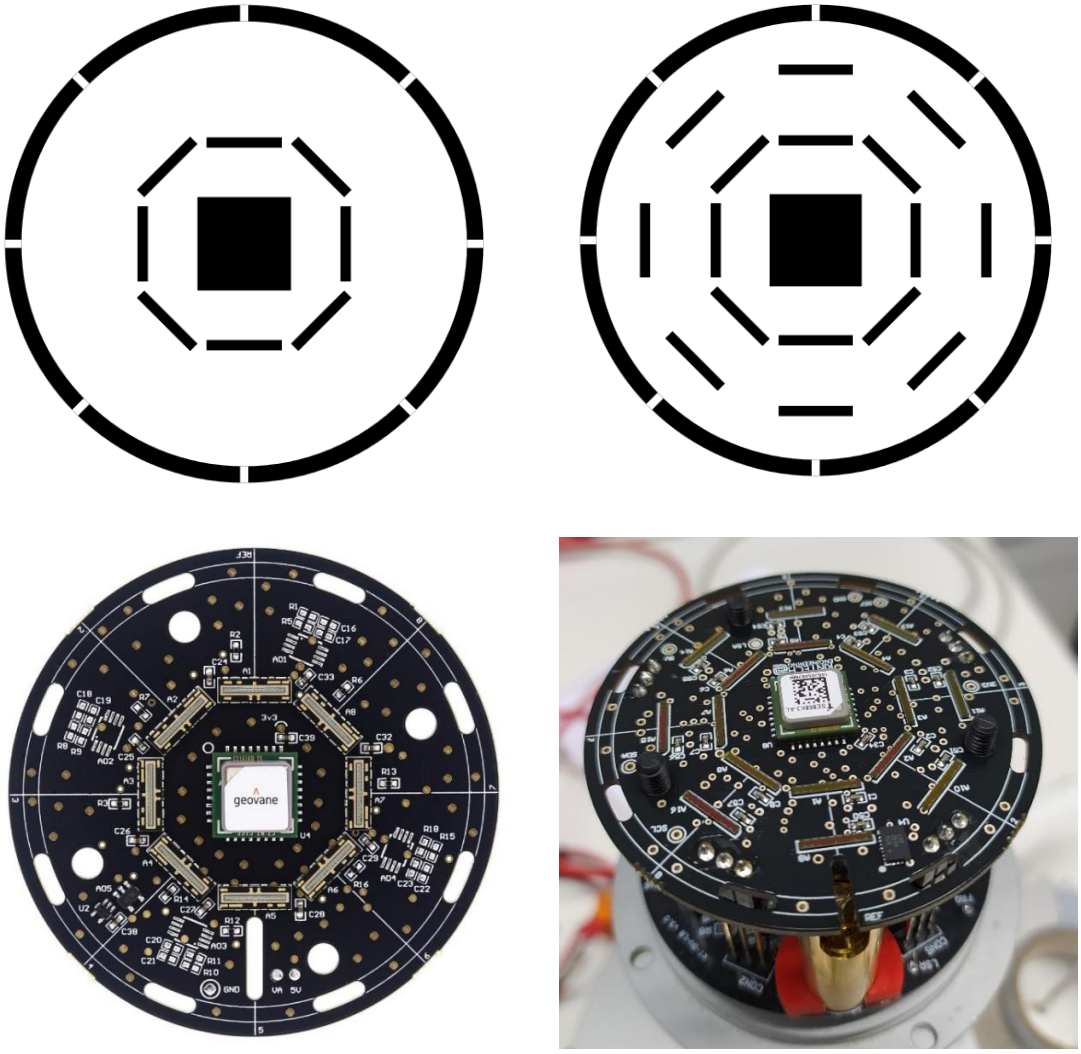


Fig. 34. Vista interna Geovane: 1024 píxeles (2018) vs 2048 píxeles (2020)

En 2020 se lleva también a cabo una evolución de la mecánica que facilita su alineado con aerogeneradores, mediante una pieza extra auxiliar sobre la que la Geovane encaja en posición única, tal y como aparece en la fotografía izquierda de la Fig. 35.

El procedimiento ese sencillo y se puede ver en este vídeo.

Primeramente, se alinea con un puntero láser un casquillo sobre el que se colocará la Geovane. Una vez alineado dicho casquillo, se fija con los tornillos para evitar su giro. Finalmente, se coloca encima la Geovane, la cual encaja en una posición única.

Fig. 35. **Geovane WT (Wind Turbine) y sistema de alineamiento (2020)**

4.5 Ferias y conferencias (2017-2020)

Al tratarse de una tecnología totalmente novedosa, ha sido necesaria una intensiva labor comercial y de divulgación por parte de Kintech Engineering.

La Geovane ha sido presentada en las siguientes ferias y eventos:

- Brazil Wind Power 2017 (Río de Janeiro).
- China Wind Power 2017 (Pekín).
- WindEurope Conference & Exhibition 2017 (Ámsterdam).
    - Póster: "Novel Approach to Wind Direction Measurements"
- Windergy India 2017 (Nueva Delhi).
- Brazil Wind Power 2018 (Río de Janeiro).
- Workshop Kintech 2018 en India (Nueva Delhi).
- China Wind Power 2018 (Pekín).
- Mexico Wind Power 2018 (Ciudad de México).
- Brazil Wind Power 2019 (São Paulo).
- China Wind Power 2019 (Pekín).
- Wind Energy Hamburg 2018 (Hamburgo).

- WindEurope Resource Assessment 2019 (Bruselas).
- WindEurope Conference & Exhibition 2019 (Bilbao, stand AEE).
- China Wind Power 2020 (Pekín).
- Webinar Eólico AEE: "Geovane: tecnología solar aplicada a la reducción de incertidumbre en la orientación de veletas, aerogeneradores y RSD" (2020).

Fig. 36. **Presentación de la Geovane en la China Wind Power 2017 (Pekín).**

4.6 Patente Europea (2019)

La tecnología Geovane ha sido **protegida mediante patente**. Una patente es un contrato Estado - inventor por el cual el Estado otorga el monopolio de una invención al titular de la patente, a condición de que ésta se divulgue. La patente constituye un derecho a impedir a terceros, por hasta 20 años, la explotación de la invención protegida. Esto significa que únicamente el titular de la patente, en este caso Kintech Engineering, o terceros autorizados por Kintech, pueden fabricar o vender la tecnología Geovane.

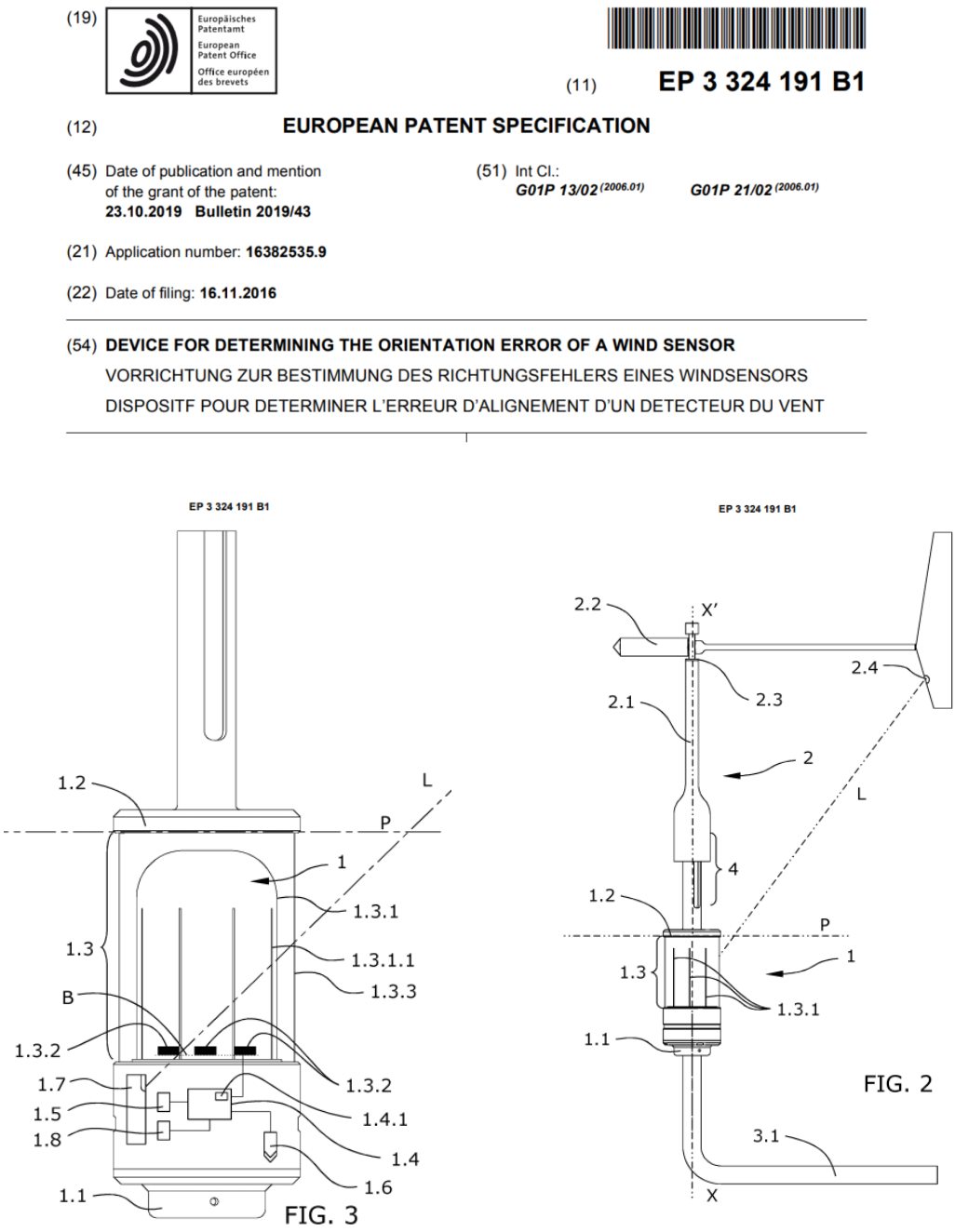
La vía por la que se ha decidido patentar es la de "**Patente Europea**". El sistema de Patente Europea permite obtener protección mediante una única solicitud de patente y un único examen. Una vez concedida la patente europea, todos los estados que forman parte del Convenio Europeo de Patentes aceptan el resultado del examen como propio. Así, se puede obtener protección en hasta 38 países del ámbito europeo sin tener que pasar los exámenes individuales de las oficinas de cada país.

La solicitud de Patente Europea tiene lugar el 16 de noviembre de 2016, concediéndose, tras la superación del examen, el **23 de octubre de 2019**.

El examinador evalúa si la solicitud de patente cumple con tres requisitos:

1) Es **novedoso mundialmente**: la tecnología no está comprendida en el estado de la técnica anterior a la fecha de presentación.
2) Ha requerido **actividad inventiva**: no resulta obvia de combinar distintas invenciones del estado de la técnica por parte un experto en la materia.
3) Posee **aplicación industrial**.

La superación del examen de patente reconoce que el proyecto Geovane es novedoso a nivel mundial, presenta actividad inventiva y posee aplicación industrial.



(19) Europäisches Patentamt / European Patent Office / Office européen des brevets

(11) **EP 3 324 191 B1**

(12) **EUROPEAN PATENT SPECIFICATION**

(45) Date of publication and mention of the grant of the patent: **23.10.2019 Bulletin 2019/43**

(51) Int Cl.: *G01P 13/02* (2006.01) *G01P 21/02* (2006.01)

(21) Application number: **16382535.9**

(22) Date of filing: **16.11.2016**

(54) **DEVICE FOR DETERMINING THE ORIENTATION ERROR OF A WIND SENSOR**
VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DES RICHTUNGSFEHLERS EINES WINDSENSORS
DISPOSITF POUR DETERMINER L'ERREUR D'ALIGNEMENT D'UN DETECTEUR DU VENT

Fig. 37. Fragmentos de la patente Europea de la Geovane (2019)

4.7 Homologación para su uso en turbinas (2021)

La Geovane se ideó para dar solución a los errores de orientación de las veletas, pero existe otra aplicación en el ámbito eólico en la que se necesita conocer la orientación: orientación de turbinas de parques eólicos en operación.

El problema surge cuando los "ceros" de los codificadores rotatorios (*encoders*) que informan de la orientación de las góndolas de los aerogeneradores no comparten la misma orientación entre sí, algo muy común. Cuando esto ocurre, los datos de orientación de los aerogeneradores en el SCADA carecen de significado real y no pueden utilizarse como input en los algoritmos de optimización de la producción del tipo "*wind sector management*".

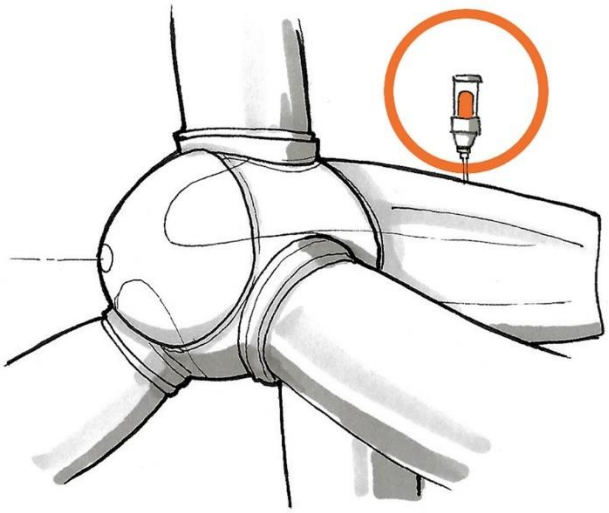


Fig. 38. Aplicación Geovane WT (orientación de aerogeneradores)

En estrecha colaboración con uno de los principales fabricantes de aerogeneradores, a lo largo de 2020 y 2021 se llevan a cabo las siguientes mejoras e implementaciones:

- Nueva trama NMEA con los datos de interés para el SCADA del parque (ORT).
- Compatibilidad con Modbus RTU, a través de la salida digital RS-485.
- Medida de vibración en 3 ejes: magnitud, en mg y amplitud del armónico principal, en Hz (Transformada Rápida de Fourier).
- Diseño del ajuste casquillo de alineamiento – Geovane – puntero láser.
- Mejora del procesamiento de análisis de la fotografía celeste.

A fecha de abril de 2021, la Geovane está siendo homologada por dos de los principales fabricantes de aerogeneradores y por un operador con proyectos por valor de 8.5 GW.

5 Aceptación en el mercado

La aceptación de la Geovane por parte del mercado ha sido **muy positiva** y el número de unidades vendidas ha ido progresivamente en aumento desde su lanzamiento. Independientemente de los buenos resultados, no cabe duda de que la Geovane sigue, a día de hoy, en lo que podría considerarse la primera etapa del ciclo de vida de un producto: la etapa de desarrollo de mercado.

Como ocurre con cualquier lanzamiento de una tecnología completamente novedosa, existen grandes inercias que hay que revertir por medio de una esmerada labor comercial y de divulgación. Al fin y al cabo, como en su día sucedió con multitud de productos (el teléfono móvil, por ejemplo), hasta ese momento se había vivido sin acceder a esa tecnología novedosa. Centenares de gigavatios se han instalado por todo el mundo, sin hacer uso de la tecnología Geovane en sus fases de evaluación de recurso.

La naturaleza novedosa de la tecnología Geovane ha requerido una estrategia de comercialización centrada en **clientes interesados por la novedad tecnológica**, en lugar de en clientes con un perfil tecnológico más rezagado y conservador, generalmente incómodos con las nuevas ideas.

5.1 Geovane MM para torres de medición eólica

El perfil del "*early adopter*" de la Geovane MM es el de un **gran promotor eólico, con proyectos repartidos por múltiples países** y con experiencia de primera mano sobre el impacto económico que tiene haber diseñado un parque con una rosa de vientos girada respecto de la real, por un problema de offsets en las mediciones.

Otra característica común a muchos de los early adopters de la Geovanes es que pretenden llevar a cabo la explotación del parque eólico que ellos mismos están desarrollando. Es decir, les interesa que el parque produzca el máximo durante toda su vida útil, sin sufrir *underperfomance* y sin sobrecostes de mantenimiento debido a fatigas imprevistas.

Algunos de los primeros clientes de Geovane, para torres de medición eólica, han sido: Mainstream Renewable Power, Iberdrola, CPFL, ENEL, Voltalia, ENGIE, RWE AG…

A día de hoy hay Geovanes MM instaladas en mástiles de medición de cinco continentes.

Los errores de orientación reportados por los clientes rondan, en promedio, los 15°. Esto significa que errores de 20 – 30 grados son mucho más comunes de lo que se piensa.

Fig. 39. **Instalación de Geovane MM en Suecia**

5.2 Geovane WT para orientación de aerogeneradores en operación

La Geovane WT se encuentra en proceso de homologación (ver apdo. 4.7). Se espera que a lo largo del 2021 se lleven a cabo las primeras ventas de carácter general para instalación en aerogeneradores de parques en producción.

6 Enlaces de interés

- Guía de usuario de la Geovane.
- Patente Europea Geovane.
- Novel Approach to Wind Direction Measurements (póster EWEA 2017).
- Sección Geovane MM web Kintech.
- Sección Geovane WT web Kintech.
- Landing page Geovane.
- M.O.E. test report (validación Geovane).
- Brochure comercial Geovane.
- Vídeo de alineamiento Geovane WT.
- Presentación del webinar Geovane (AEE, 2021)
- Vídeo del webinar Geovane (AEE, 2021).