

MONITORIZACIÓN DEL MOVIMIENTO HORIZONTAL DE LA CÚSPIDE DE UNA AGUJA DE LA CATEDRAL DE BURGOS MEDIANTE UN SISTEMA LÁSER COMBINADO CON VISIÓN ARTIFICIAL

MONITORING THE HORIZONTAL MOVEMENT OF THE TIP OF A SPIRE OF BURGOS CATHEDRAL USING A LASER-BASED SYSTEM COMBINED WITH COMPUTER VISION

Álvaro Mena Alonso⁽¹⁾, Jesús Mínguez Algarra⁽²⁾, Dorys C. González Cabrera⁽³⁾, Miguel A. Vicente Cabrera⁽⁴⁾

¹ Universidad de Burgos, Burgos, España, amena@ubu.es

² Universidad de Burgos, Burgos, España, jminguez@ubu.es

³ Universidad de Burgos, Burgos, España, dgonzalez@ubu.es

⁴ Universidad de Burgos, Burgos, España, mvicente@ubu.es

RESUMEN

La monitorización de estructuras esbeltas singulares puede simplificarse si se controla un parámetro global: el desplazamiento horizontal de la cúspide. Este trabajo presenta y valida un sensor de visión artificial, llamado transductor de desplazamiento mediante láser y vídeo (LVBDT), que combina un emisor láser fijo con una cámara y un panel translúcido en el punto móvil, permitiendo una adquisición continua, robusta y de bajo coste. El sistema se instaló en la aguja sur de la Catedral de Santa María de Burgos para registrar, durante aproximadamente un año, los movimientos horizontales de su cúspide y contrastarlos con sensores convencionales.

La configuración consiste en un láser en la base de la aguja y, en la coronación, una cámara orientada a un panel con dos LED de referencia separados una cierta distancia. El procesamiento incluye la binarización de las imágenes, la localización centroides y la aplicación de un factor de escala. La campaña incluyó medidas intermitentes en 2020–2021 y dos episodios meteorológicos representativos.

Los resultados muestran que la aguja experimenta oscilaciones diarias predominantemente noroeste–sureste inducidas por temperatura, con amplitudes horizontales de hasta 4 mm. El LVBDT registró con alta sensibilidad los movimientos lentos de baja frecuencia y variaciones nocturnas que el inclinómetro apenas detectó. En cambio, las vibraciones de alta frecuencia y pequeña amplitud asociadas al viento no quedaron representadas en los desplazamientos medidos. Estos resultados confirman el potencial del LVBDT como alternativa eficaz y económica para la monitorización estructural en edificios históricos, especialmente en construcciones donde el acceso, la instalación de equipos pesados o el impacto visual deben minimizarse. Se concluye que el LVBDT es especialmente adecuado para el seguimiento continuo, remoto y preciso de movimientos horizontales cuasiestáticos en torres de valor patrimonial y otras estructuras esbeltas.

Palabras clave: sensor de desplazamiento, visión artificial, monitorización de la salud estructural, patrimonio histórico.

ABSTRACT

Monitoring slender, singular structures can be simplified by tracking a single global parameter: the horizontal displacement of the tip. This paper presents and validates a computer vision sensor, the laser-and-video displacement transducer (LVBDT), which combines a fixed laser emitter with a camera and a translucent panel at the moving point, enabling continuous, robust, and low-cost data acquisition. The system was

installed on the south spire of the Cathedral of Santa María de Burgos to record, over approximately one year, the horizontal movements of its tip and compare them with conventional sensors.

The setup consists of a laser at the base of the spire and, at the top, a camera aimed at a panel with two reference LEDs separated by a known distance. Processing includes image binarization, centroid localization, and application of a scale factor. The campaign comprised intermittent measurements in 2020–2021 and two representative weather episodes.

Results show that the spire undergoes daily oscillations predominantly along a northwest–southeast direction induced by temperature, with horizontal amplitudes up to 4 mm. The LVBDT captured low-frequency, slow movements with high sensitivity and nighttime variations that the inclinometer barely detected. In contrast, high-frequency, small-amplitude vibrations associated with wind were not reflected in the measured displacements. These results confirm the potential of the LVBDT as an effective and cost-efficient alternative for structural monitoring in historic buildings, particularly in structures where access, the installation of heavy equipment, or visual impact must be minimized. We conclude that the LVBDT is particularly well-suited for continuous, remote, and precise monitoring of quasi-static horizontal movements in heritage towers and other slender structures.

Keywords: displacement sensor, computer vision, structural health monitoring, cultural heritage.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos en construcciones singulares, como presas, puentes o edificios históricos, es la implementación de un mantenimiento adecuado. Ello permite conservar la funcionalidad de las estructuras en condiciones seguras para los usuarios. Además, se realizan las labores de conservación en el momento óptimo, evitando daños estructurales más severos, que en estos casos suelen conllevar costes de reparación muy elevados.

Una de las estrategias más habituales para planificar el mantenimiento de estructuras es la monitorización. Mediante una red de sensores de todo tipo (galgas extensométricas, células de carga, acelerómetros, inclinómetros, etc.) es posible conocer la salud estructural de un edificio en un instante dado. De este modo, pueden detectarse zonas de debilidad en las que sea necesario acometer trabajos de mantenimiento preventivo.

No obstante, la monitorización de estructuras entraña serias dificultades. En primer lugar, cuanto más compleja es la construcción, más extensa será la red de sensores. En estructuras singulares, el número de puntos de control puede ser muy elevado, lo que dificulta en gran medida el análisis e interpretación de los datos. En ocasiones, ello conduce a descartar la idea de monitorizar la estructura (Acikgoz et al., 2017; Blanco et al., 2018; Ferraioli et al., 2020; Gentile et al., 2015). En segundo lugar, resulta muy interesante que los sensores sean permanentes, de modo que recojan datos de forma continua y no solo en momentos puntuales. Esto facilita la detección de procesos de degradación estructural, como asientos diferenciales, etc. Además, también es muy útil disponer de los datos en un ordenador con acceso remoto en línea, evitando desplazamientos. Sin embargo, en la mayoría de los casos la configuración de los sensores no permite esta posibilidad y se recurre a mediciones in situ ocasionales, lo que se traduce en una monitorización más imprecisa y sesgada. Por último, la red de sensores debe ser capaz de resistir inclemencias meteorológicas o actos vandálicos, entre otros.

En el caso de estructuras con elementos verticales altos y esbeltos, como pilas de viaducto, chimeneas o campanarios de iglesias, la monitorización puede simplificarse notablemente. Ello se debe a que, por lo general, un porcentaje elevado de patologías estructurales que pueden comprometer la estabilidad global del edificio se manifiesta en movimientos horizontales en la coronación de dichos elementos verticales. Por ejemplo, un asiento diferencial en la cimentación o un deslizamiento del terreno provoca la rotación de las pilas o torres y, por tanto, un desplazamiento horizontal de su coronación (Ferrante et al., 2019; Gilchrist, 2001; Kouris et al., 2021; Micelli et al., 2020; Preciado et al., 2015). En consecuencia, la salud estructural de este tipo de construcciones, al menos a nivel global, puede monitorizarse mediante un único parámetro.

Existen numerosos sensores en el mercado capaces de medir movimientos, tales como distanciómetros láser, transductores de desplazamiento, estaciones totales, sensores basados en GPS, etc. Sin embargo, apenas ninguno satisface todos los requisitos necesarios para monitorizar estructuras singulares. Algunos de estos requisitos ya se han mencionado, como la robustez, la capacidad de adquisición continua de datos o el

acceso remoto a la información. Otros son la precisión, la fiabilidad, el bajo coste y el bajo impacto. Este último resulta especialmente importante en el caso de edificios de patrimonio cultural.

Además de los sensores citados, cabe destacar los basados en visión artificial. Esta tecnología ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años, impulsado por el rápido incremento de la resolución de las cámaras digitales, así como de la velocidad de procesamiento de los ordenadores. En la actualidad, existen soluciones capaces de medir y analizar imágenes de forma continua y en tiempo real (Brownjohn et al., 2017; Feng & Feng, 2016; Schumacher & Shariati, 2013; Spencer et al., 2019; Ye et al., 2016). Esto las hace muy competitivas frente a las soluciones tradicionales. De hecho, en el ámbito de la monitorización estructural, pueden cumplir todos o casi todos los requisitos antes mencionados.

Dentro de este tipo de sensores, cabe señalar el sistema desarrollado por Vicente y colaboradores (Brown et al., 2021; Vicente et al., 2018), denominado transductor de desplazamiento basado en láser y vídeo (LVBDT, por sus siglas en inglés). Tal y como se muestra en la Figura 1, se trata de un sensor compuesto por una parte fija (un emisor láser) y una parte móvil (una cámara de vídeo y un panel de medida). Esta última se ubica en el punto cuyo movimiento se desea medir, mientras que la primera se sitúa en una posición permanente e independiente de la estructura. Hasta la fecha, el sistema se ha ensayado con éxito en varios puentes y en un edificio. No obstante, su eficacia no se ha evaluado nunca en un entorno real durante largos periodos de monitorización.

Este artículo describe un ensayo de medida del sensor LVBDT, consistente en la monitorización de la aguja sur de la Catedral de Santa María de Burgos (España). La elección de esta localización obedece a la idoneidad de la estructura, caracterizada por dos agujas altas y esbeltas, y al creciente interés por la conservación del patrimonio. Las pruebas se han llevado a cabo de forma intermitente durante aproximadamente un año.

El documento se estructura como sigue. La Sección 2 describe el sensor LVBDT. La Sección 3 presenta la campaña experimental, incluyendo la descripción del edificio y de los sensores adicionales. La Sección 4 muestra y discute los resultados obtenidos durante dos episodios meteorológicos. Finalmente, la Sección 5 recoge las conclusiones.

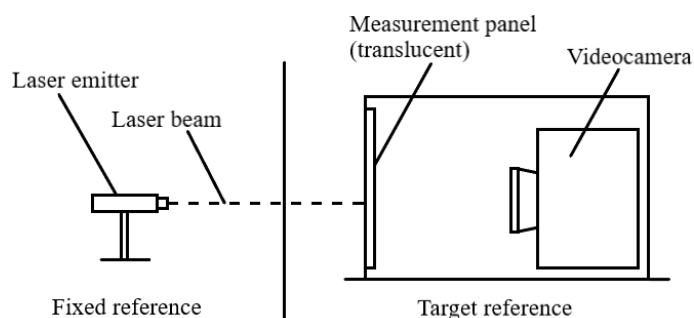


Figura 1. Transductor de desplazamiento basado en láser y vídeo (LVBDT) (Vicente et al., 2018): parte fija (izquierda) y parte móvil (derecha).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la capacidad del transductor de desplazamiento mediante láser y vídeo (LVBDT) para monitorizar de forma precisa y continua los movimientos horizontales en estructuras esbeltas de valor patrimonial. Concretamente, se pretende analizar su comportamiento en un entorno real sometido a variaciones térmicas y de viento, comparando sus resultados con los obtenidos mediante sensores convencionales.

De manera específica, se persiguen los siguientes objetivos parciales:

1. Describir la configuración y el principio de funcionamiento del sensor LVBDT, adaptado para la monitorización a largo plazo.
2. Instalar y poner en servicio el sistema en la aguja sur de la Catedral de Santa María de Burgos, seleccionada como caso de estudio representativo por su geometría, esbeltez y relevancia patrimonial.

3. Registrar y analizar los desplazamientos horizontales en la cúspide durante distintos episodios meteorológicos, identificando las causas dominantes de movimiento.
4. Comparar los registros del LVBDT con los obtenidos mediante un inclinómetro y otros sensores convencionales, evaluando su precisión, robustez y sensibilidad.

Con ello, se busca validar el LVBDT como una alternativa fiable, económica y de bajo impacto para la monitorización estructural en construcciones históricas y otras estructuras singulares.

3. DESCRIPCIÓN DEL SENSOR

El sensor utilizado es una adaptación del descrito en Brown et al., 2021 y Vicente et al., 2018. Su parte fija consta de un único láser, modelo FP-LR-250-25-C-F fabricado por Laser Components GmbH (Olching, Alemania) (Figura 2.a). Se trata de un emisor láser verde con una longitud de onda de 520 nm y una potencia de salida de 25 mW. El láser se fija a la base de la aguja mediante un soporte de precisión.

Por otro lado, la parte móvil dispone de dos componentes principales. En primer lugar, una cámara de vídeo Logitech Brio 4K (Lausana, Suiza) capaz de alcanzar resolución 4K y una velocidad de captura de 30 fps. En segundo lugar, un panel translúcido de 85×85 mm sobre el que incide la luz del láser y que es registrado permanentemente por la cámara. En la cara interior del panel se disponen dos LED rojos separados 100 mm, que se emplean para definir una dirección de referencia y un factor de escala en la medida de desplazamientos.

La cámara de vídeo y el panel se protegen en el interior de una caja de plástico, fabricada mediante impresión 3D y específicamente diseñada para este fin. Como puede apreciarse en la Figura 2.b, el conjunto se ubica en la parte superior de la aguja de la catedral.

La cámara se conecta a un ordenador que analiza las imágenes en tiempo real. Para ello, se ha implementado una rutina utilizando MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, EE. UU.).



Figura 2. Sistema LVBDT: (a) Emisor láser, (b) caja que contiene la cámara y el panel traslúcido.

La Figura 3 muestra el procedimiento seguido por el algoritmo. En primer lugar, las imágenes se corrigen con los parámetros de calibración de la cámara, previamente obtenidos siguiendo un proceso similar al descrito en Brown et al., 2021. En segundo lugar, las imágenes RGB se transforman a escala de grises y se realiza un proceso de binarización; esto es, los píxeles cuyo valor de gris está por debajo de un umbral se consideran “fondo” (negro) y aquellos con un valor de gris superior se consideran “fuentes de luz” (blanco). De este modo, se discretizan el láser verde y los dos LED de referencia. En este caso, considerando que se trabaja con imágenes de 16 bits (rango de grises 0–65535), el valor umbral se ha fijado en 190. En tercer lugar, se calculan las coordenadas (medidas en píxeles) de los centroides de las tres fuentes de luz, estableciendo uno de los LED como origen de coordenadas y tomando como eje X la recta que une ambos LED. Finalmente, se aplica el factor de escala para obtener las coordenadas del punto láser en mm. Este proceso se repite para cada fotograma a una velocidad de 5 Hz.

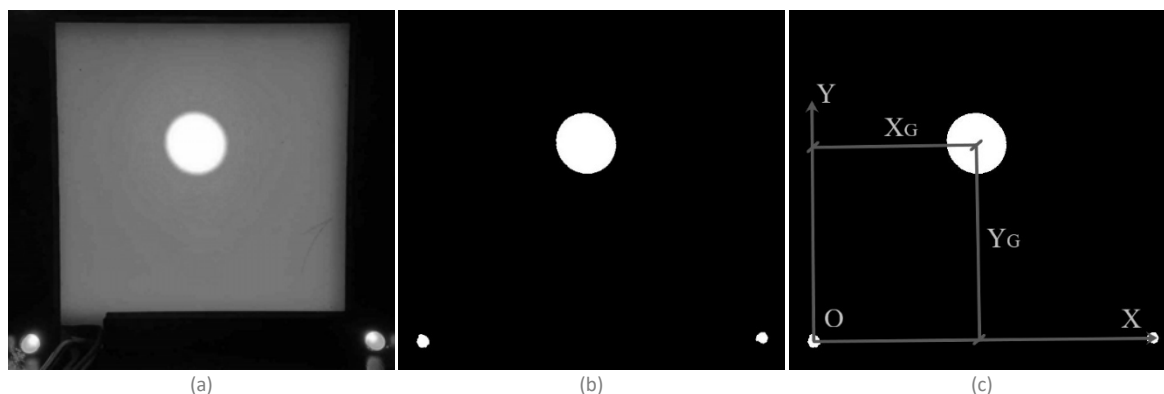


Figura 3. Procedimiento del algoritmo: (a) imagen en escala de grises, (b) binarización, (c) obtención de las coordenadas del punto láser.

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1 La Catedral de Burgos

La Catedral de Santa María de Burgos (Burgos, España) es un templo católico considerado uno de los mejores ejemplos de la arquitectura gótica en Europa. Su construcción comenzó en 1221 y se prolongó durante aproximadamente 500 años. En 1984 fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO y en 2021 se conmemoró el octavo centenario del inicio de su construcción.

Los elementos arquitectónicos más destacados de la catedral son su cimborrio (torre sobre el crucero) y la fachada de Santa María, dominada por dos torres de 84 metros de altura (Figura 4). Las torres están coronadas por agujas de 20 metros, datadas en el siglo XV y diseñadas por el arquitecto alemán Johannes von Köln (Colonia, Alemania, 1410 – Burgos, España, 1481).

Dado el excelente estado de conservación de la catedral en general y de las agujas en particular, se trata de un emplazamiento muy adecuado para evaluar el rendimiento del sensor LVBDT. Durante los años 2020 y 2021, el sensor midió de forma intermitente los desplazamientos horizontales de la aguja sur de la catedral.



Figura 4. Vista general de la Catedral de Burgos, con la torre sur a la izquierda.



Figura 5. Esquema general de los sensores y dispositivos instalados en la aguja.

4.2 Equipo de medida

El sensor LVBDT descrito anteriormente se instaló en el interior de la aguja sur para medir los desplazamientos horizontales de su coronación. El emisor láser se colocó en la base, mientras que la caja que alberga el panel y la cámara se situó en la parte superior. La distancia aproximada entre el láser y el panel es de 22,2 m.

Además, se instalaron sensores convencionales en la parte superior de la aguja. Con el fin de medir los parámetros meteorológicos más relevantes, se dispusieron un termopar PT100 y un anemómetro con veleta. También se instaló un inclinómetro biaxial modelo PST300 de Pewatron AG (Zúrich, Suiza), con un rango de medida de $\pm 5^\circ$ y una exactitud absoluta de $\pm 0,01^\circ$.

Los sensores convencionales se conectaron a un registrador de datos HBM MGC Plus (Darmstadt, Alemania) y a un ordenador. La cámara de vídeo del sensor LVBDT se conectó al mismo ordenador, de modo que los movimientos de la aguja también pudieron monitorizarse en tiempo real. En la Figura 5 se muestra un esquema con la ubicación del equipo de medida en la aguja sur.

4.3 Episodios meteorológicos medidos

Tanto el sensor LVBDT como los sensores convencionales realizaron mediciones de forma intermitente durante los años 2020 y 2021. Se llevaron a cabo campañas cortas, de varios días de duración, y campañas de larga duración, de varios meses. En este periodo se monitorizaron algunos episodios meteorológicos especialmente interesantes, entre ellos:

1. Episodio de variación térmica. Durante los días 29, 30 y 31 de marzo de 2021 se observaron oscilaciones térmicas significativas entre el día y la noche, alcanzando los 10 °C.
2. Temporal de viento. Los días 20 y 21 de noviembre de 2020 se registró un temporal con rachas cercanas a 60 km/h.

Todos los sensores instalados en el interior de la aguja registraron estos episodios. La frecuencia de adquisición de datos del sensor LVBDT fue de 5 Hz, mientras que la de los sensores convencionales fue de 20 Hz.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante los dos episodios meteorológicos. Además, se evalúa el rendimiento del sensor LVBDT considerando los datos procedentes de los sensores convencionales.

5.1 Episodio de variación térmica

Los días 29, 30 y 31 de marzo de 2021 se produjeron oscilaciones térmicas significativas. La Figura 6 muestra las mediciones de todos los sensores instalados en la aguja durante este periodo.

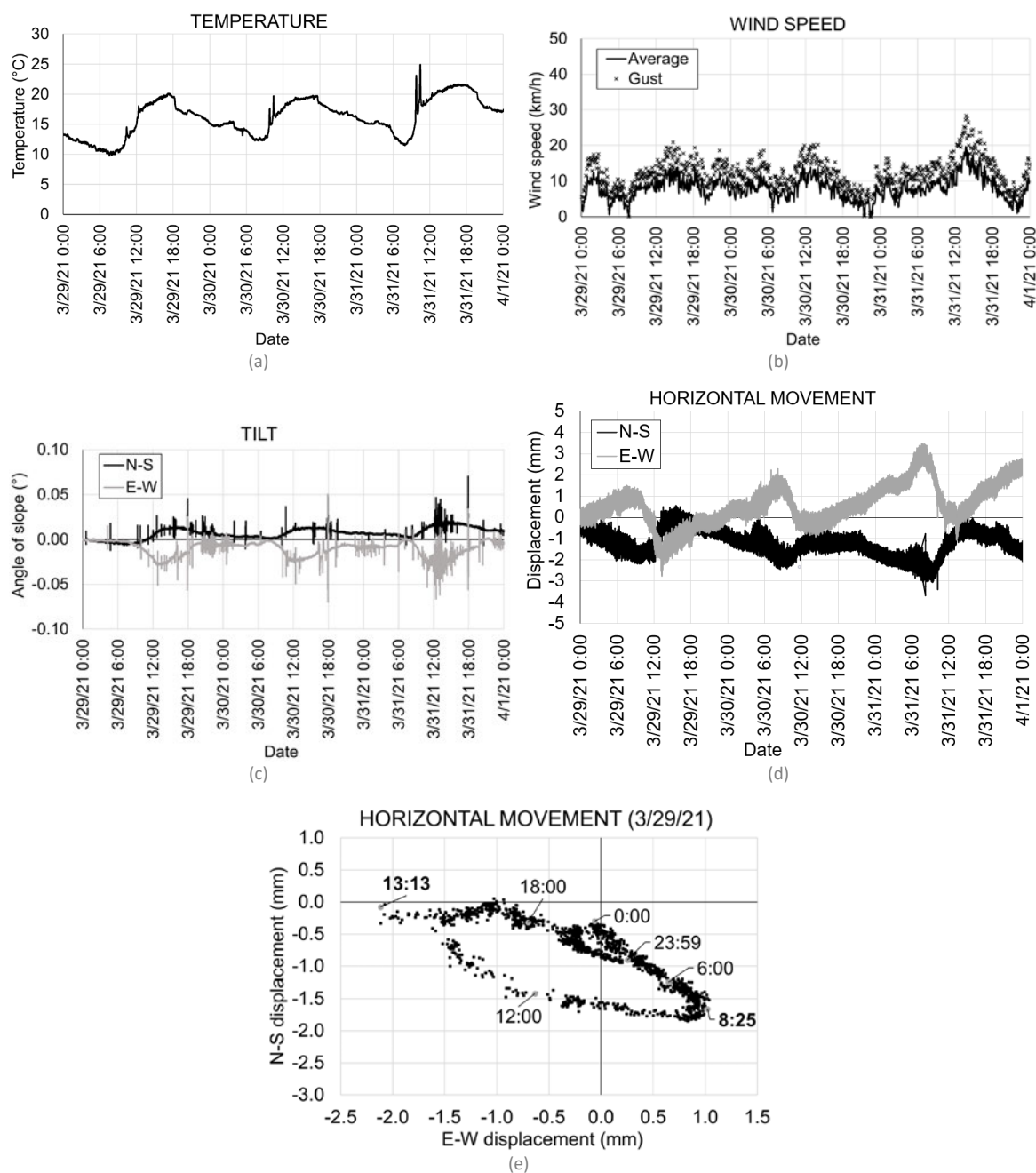


Figura 6. Registros medidos durante el episodio de variación térmica: (a) temperatura, (b) velocidad del viento, (c) inclinación, (d) desplazamiento horizontal y (e) desplazamiento horizontal según los ejes cardinales el 29 de marzo.

La Figura 6.a muestra que la oscilación térmica diaria, definida como la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima a lo largo de un día, fue aproximadamente de 10 °C durante el periodo estudiado. Los días

30 y 31 de marzo se observaron picos de temperatura excepcionales en torno a las 10 AM. Estos se deben a la incidencia directa de la radiación solar sobre el termopar y, por tanto, constituyen valores atípicos que no se han considerado en el análisis de datos.

La Figura 6.b revela que el viento fue flojo durante los tres días, con una velocidad media siempre por debajo de 20 km/h y rachas máximas cercanas a 30 km/h. Por consiguiente, cabe esperar que el viento no tenga un impacto significativo en las mediciones del sensor LVBDT.

La Figura 6.c muestra las inclinaciones en la coronación de la aguja. Las mayores velocidades de giro se producen entre las 8 AM y las 12 PM, alcanzando valores máximos de $0,05^\circ$ hacia el oeste y $0,03^\circ$ hacia el norte. Por tanto, durante este intervalo la aguja se inclina hacia el noroeste. No obstante, a lo largo del resto del día esta tendencia se invierte y la aguja retorna a su posición inicial. Comparando las Figuras 6.c y 6.a, se concluye que las inclinaciones de la aguja tienen un claro origen térmico.

La Figura 6.d representa los desplazamientos horizontales en la coronación registrados por el sensor LVBDT. De nuevo se aprecia que las rotaciones de la aguja están influidas por las variaciones térmicas, pues la gráfica es casi homotética a la de la Figura 6.a. Los incrementos de desplazamiento más acusados se producen entre las 8 AM y las 12 PM, con valores máximos del orden de 4 mm hacia el oeste y unos 2 mm hacia el norte. En consecuencia, tal y como indican los datos del inclinómetro, durante ese periodo la aguja se inclina hacia el noroeste. Sin embargo, existe una diferencia muy significativa entre ambos sensores: mientras que el inclinómetro apenas detecta las rotaciones de la aguja durante la noche (de 9 PM a 6 AM), el LVBDT sí es capaz de hacerlo, lo que evidencia una elevada sensibilidad en dichas circunstancias.

Para una mejor comprensión de la rotación diaria de la coronación, la Figura 6.e representa este movimiento en función de los ejes cardinales durante el 29 de marzo. Los resultados confirman que la aguja se inclina predominantemente según una dirección noroeste-sureste. Además, la inclinación hacia el noroeste se produce durante el periodo de mayor radiación solar; en este caso, entre las 8:25 AM y las 1:13 PM. Durante esas horas se registra el mayor incremento de temperatura (Figura 6.a). Por el contrario, la inclinación hacia el sureste se recupera durante el resto del día, coincidiendo con el descenso térmico.

5.2 Temporal de viento

La tarde del 20 de noviembre de 2020 y durante el día siguiente tuvo lugar un temporal de viento. La Figura 7 presenta los registros de todos los sensores instalados en la aguja de la catedral.

La Figura 7.b muestra que las rachas más intensas se produjeron la tarde del 20 de noviembre de 2020. En concreto, la velocidad media de racha fue de alrededor de 50 km/h, alcanzando un valor máximo de 58,4 km/h a las 6:04 PM. La intensidad del viento disminuyó progresivamente durante la noche, y el 21 de noviembre fue menos ventoso. Por otro lado, las temperaturas se mantuvieron bastante constantes en ambos días, con una oscilación térmica diaria de solo $4,7^\circ\text{C}$ el 21 de noviembre (Figura 7.a). Esto permite estudiar el efecto de la acción del viento sobre los movimientos de la aguja, al ser predominante frente a las variaciones térmicas.

La Figura 7.c muestra las inclinaciones en la coronación. Se observa que las mayores oscilaciones coinciden con los periodos de mayor viento. Se trata de vibraciones de alta frecuencia, sin una orientación dominante y con una amplitud aproximada, en términos de inclinación, de $\pm 0,04^\circ$. Además, no se aprecia correlación entre la inclinación y la temperatura. Parece que las variaciones térmicas generan movimientos más lentos y continuos y, en este caso, la acción del viento enmascara ese fenómeno.

Por último, la Figura 7.d presenta los desplazamientos horizontales en la coronación registrados por el LVBDT. Se aprecia que las oscilaciones son pequeñas y que no existe correlación entre ellas y la velocidad del viento. En cambio, sí aparece correlación entre los movimientos de la aguja y las variaciones térmicas. De hecho, el desplazamiento más significativo se produce entre las 8 AM y las 11 AM del 21 de noviembre, coincidiendo con un incremento de temperatura (Figura 7.a). Durante ese intervalo, la aguja se inclinó hacia el noroeste, tal como se observó en el episodio de variación térmica.

En consecuencia, se concluye que el sensor LVBDT es capaz de registrar con precisión movimientos de baja o muy baja frecuencia, como los de origen térmico, reológico o por degradación estructural. En cambio, no detecta movimientos de alta frecuencia y pequeña amplitud, como los debidos al viento.

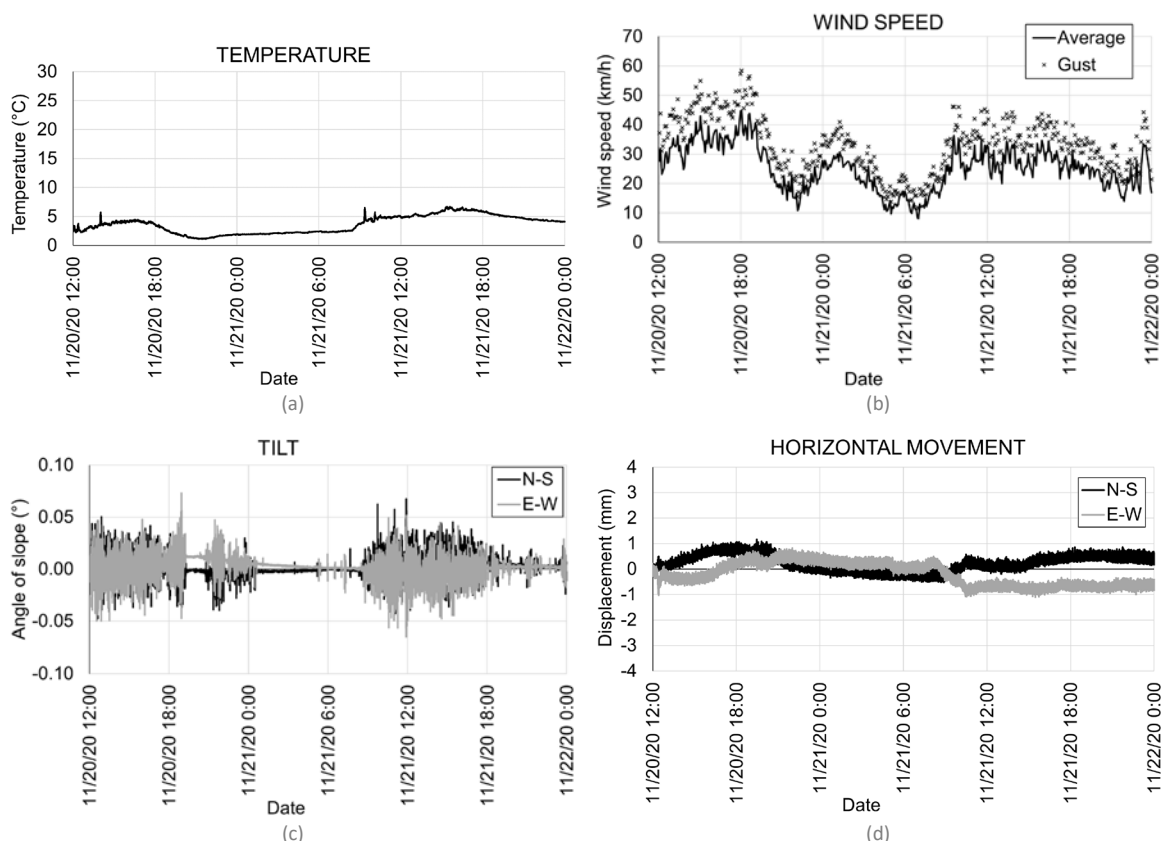


Figura 7. Registros medidos durante el episodio de viento: (a) temperatura, (b) velocidad del viento, (c) inclinación y (d) desplazamiento horizontal.

6. CONCLUSIONES

Los sensores basados en visión artificial han alcanzado en los últimos años un grado de desarrollo muy elevado y, en la actualidad, presentan una serie de características que los hace muy competitivos frente a los sensores tradicionales: robustez, posibilidad de adquisición de datos autónoma y remota, fiabilidad, precisión, bajo impacto y bajo coste.

Uno de los ámbitos en los que la instalación de estos dispositivos resulta especialmente interesante es la monitorización de estructuras singulares de gran esbeltez, como pilas de viaducto, chimeneas o torres de iglesias. En estas construcciones, los procesos globales de degradación estructural pueden controlarse mediante un único parámetro: el desplazamiento horizontal en la coronación.

Este trabajo describe un ejemplo de aplicación de un transductor de desplazamiento basado en láser y vídeo (LVBDT). El objetivo es evaluar el comportamiento de este sensor en un entorno real durante un periodo de medida prolongado. En particular, el dispositivo se instaló en la aguja de la torre sur de la Catedral de Santa María de Burgos (Burgos, España) y registró los desplazamientos horizontales en la coronación durante aproximadamente un año, entre 2020 y 2021. Las mediciones se efectuaron de forma intermitente, recogiendo algunos episodios meteorológicos de interés.

Además del LVBDT, se instalaron sensores convencionales (un termopar, un anemómetro y un inclinómetro) para registrar los parámetros meteorológicos más relevantes y contrastar los resultados del transductor.

Los resultados revelan que la aguja experimenta oscilaciones diarias debidas a variaciones térmicas, con una dirección predominante noroeste-sureste y una amplitud en torno a 4 mm. Por otro lado, la acción del viento apenas genera desplazamientos horizontales en la aguja, sino vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud. Esto puede explicarse por la presencia de numerosas aberturas en la estructura que permiten la circulación del aire y reducen la presión del viento.

En cuanto a la respuesta del LVBDT, aunque no fue capaz de registrar las vibraciones inducidas por el viento, sí midió correctamente las oscilaciones térmicas, incluso con un grado de precisión superior al del inclinómetro. Por tanto, se concluye que se trata de un sensor con excelentes prestaciones para la monitorización de movimientos horizontales de baja frecuencia, al combinar buena precisión con alta robustez y bajo coste.

7. REFERENCIAS

- Acikgoz, S., Soga, K., & Woodhams, J. (2017). Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses. *Construction and Building Materials*, 150, 916–931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.075>
- Blanco, H., Boffill, Y., Lombillo, I., & Villegas, L. (2018). An integrated structural health monitoring system for determining local/global responses of historic masonry buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), e2196. <https://doi.org/10.1002/stc.2196>
- Brown, N., Schumacher, T., & Vicente, M. A. (2021). Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(2), 265–281. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00450-z>
- Brownjohn, J. M. W., Xu, Y., & Hester, D. (2017). Vision-Based Bridge Deformation Monitoring. *Frontiers in Built Environment*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00023>
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2016). Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(5), 876–890. <https://doi.org/10.1002/stc.1819>
- Ferraioli, M., Lavino, A., Abruzzese, D., & Avossa, A. M. (2020). Seismic Assessment, Repair and Strengthening of a Medieval Masonry Tower in Southern Italy. *International Journal of Civil Engineering*, 18(9), 967–994. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00515-6>
- Ferrante, A., Clementi, F., & Milani, G. (2019). Dynamic Behavior of an Inclined Existing Masonry Tower in Italy. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00033>
- Gentile, C., Guidobaldi, M., & Saisi, A. (2015). Structural health monitoring of a historic masonry tower. 2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings, 168–173. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2015.7175872>
- Gilchrist, R. (2001). Norwich Cathedral Tower and Spire: Recording and Analysis of a Cathedral's Longue Durée. *Archaeological Journal*, 158(1), 291–324. <https://doi.org/10.1080/00665983.2001.11079011>
- Kouris, E.-G., Kouris, L.-A. S., Konstantinidis, A. A., Karayannis, C. G., & Aifantis, E. C. (2021). Assessment and Fragility of Byzantine Unreinforced Masonry Towers. *Infrastructures*, 6(3), 40. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030040>
- Micelli, F., Cascardi, A., & Aiello, M. A. (2020). Seismic Capacity Estimation of a Masonry Bell-Tower with Verticality Imperfection Detected by a Drone-Assisted Survey. *Infrastructures*, 5(9), 72. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5090072>
- Preciado, A., Orduña, A., Bartoli, G., & Budelmann, H. (2015). Façade seismic failure simulation of an old Cathedral in Colima, Mexico by 3D Limit Analysis and nonlinear Finite Element Method. *Engineering Failure Analysis*, 49, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.12.003>
- Schumacher, T., & Shariati, A. (2013). Monitoring of Structures and Mechanical Systems Using Virtual Visual Sensors for Video Analysis: Fundamental Concept and Proof of Feasibility. *Sensors*, 13(12), 16551–16564. <https://doi.org/10.3390/s131216551>
- Spencer, B. F., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
- Vicente, M., Gonzalez, D., Minguez, J., & Schumacher, T. (2018). A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*, 18(4), 970. <https://doi.org/10.3390/s18040970>
- Ye, X. W., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications. *Journal of Sensors*, 2016, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/7103039>