

Medida de torsión en seguidores solares con sensores de fibra óptica

Torsion Measurements on Solar Trackers Using Fiber Optic Sensors

Daniel LEANDRO⁽¹⁾, Mikel BRAVO⁽¹⁾, Manuel LOPEZ-AMO⁽¹⁾, Alayn LOAYSSA⁽¹⁾, Aitor JUDEZ⁽¹⁾, Jon MARIÑELARENA⁽¹⁾, Francisco FALCONE⁽¹⁾, Sergio JIMENEZ⁽²⁾, Iñaki MORIANA⁽²⁾

1. Instituto de Smart Cities y Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, España
2. STI Norland S.L., Avd. Sancho el Fuerte, 26. Oficinas 1, 31008, Pamplona, España.

Persona de contacto: Daniel Leandro (daniel.leandro@unavarra.es).

RESUMEN:

En este trabajo se ha monitorizado la torsión sufrida por una estructura de seguidores solares empleando sensores de fibra óptica. Estas medidas de campo se han obtenido con una red de sensores formada por 45 redes de difracción de Bragg en una huerta solar activa. Estos resultados, correlados con la velocidad y dirección del viento permitirían aumentar la eficiencia de los seguidores y ayudar a entender y prevenir efectos negativos relacionados con inestabilidades aeroelásticas.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, redes de difracción de Bragg, energía solar, seguidores solares, red de sensores, medida de torsión.

ABSTRACT:

In this work, the torsion experienced by set of solar trackers is monitored using fiber optic sensors. The in-field measurements were obtained using a sensor network comprising 45 fiber Bragg gratings in an active solar plant. These results, correlated with wind speed and direction could increase efficiency and lead to understand and prevent harmful effects related to aeroelastic instability events.

Key words: Fiber optics sensors; fiber Bragg gratings, solar energy, solar trackers, sensor network, torsion measurements.

1.- Introducción

Hoy en día existe una preocupación creciente a nivel global respecto al cambio climático y sus efectos colaterales. En este contexto, hay un consenso generalizado en que las energías renovables deben seguir desarrollándose para reducir el consumo de combustibles fósiles; lo que reduciría consecuentemente la contaminación y, por tanto, el calentamiento global asociado. Es aquí donde la energía solar, en particular la fotovoltaica, es una de las alternativas más interesantes. Esto queda de manifiesto con el 100% de aumento en la capacidad

instalada de 2019 respecto a 2018 en la UE. Es más, en 2019 hubo más capacidad fotovoltaica instalada que de cualquier otra tecnología [1].

La generación fotovoltaica, aunque puede realizarse de múltiples maneras, se realiza en su mayoría con paneles fotovoltaicos desplegados en seguidores solares. Estos seguidores están diseñados para seguir la trayectoria del sol, manteniendo el panel operando en una posición óptima. Hay diferentes tipos de seguidores y configuraciones desplegadas en las

huertas solares, pero un problema común a todas ellas es la maximización tanto de la eficiencia como del tiempo de operación. De esta manera, ha habido un gran esfuerzo en los últimos años para mejorar tanto la eficiencia como la fiabilidad y vida útil de los seguidores [2].

Los fallos en los seguidores provocados por el clima, en particular por el viento, fueron la causa más común de reclamaciones a aseguradoras en plantas fotovoltaicas entre 2011 y 2015 [3]. Normalmente, en el diseño de seguidores solares, los efectos del viento se consideran únicamente en cuanto a cargas estáticas, dejando de lado efectos de amplificación dinámica. Sin embargo, las cargas sufridas durante estas inestabilidades aero-elásticas pueden ser hasta cinco veces mayores que las provocadas por cargas estáticas [4]. Por tanto, es de crucial importancia la obtención de información del estado de los seguidores en función de la velocidad y dirección del viento para evitar daños en las instalaciones. Es más, es tal el riesgo de fallos por el viento en los seguidores, que los protocolos de seguridad normalmente sobre-reaccionan preventivamente. Esto tiene como consecuencia una reducción de los tiempos de producción y, por tanto, de la generación. En definitiva, la monitorización directa del estado de los seguidores permitiría seleccionar con mayor precisión las situaciones en las que los seguidores deben colocarse en posición de defensa, o simplemente reajustar su posición para reducir las cargas sufridas. Como consecuencia, aumentaría el tiempo de producción al reducir posiciones de defensa innecesarias, y evitaría daños al detectar cargas potencialmente peligrosas fuera de los parámetros de seguridad convencionales.

En este contexto, los sensores de fibra óptica son unos candidatos excelentes para obtener una medida directa del estado de los seguidores. Esto se debe a sus propiedades únicas respecto a otras tecnologías, como ser pasivos electromagnéticamente, su pequeño tamaño, ligereza, capacidad de ser embebido, o de crear grandes redes de sensores [5]. Además, debido a que son elementos pasivos, los sensores de fibra óptica pueden interrogarse mediante la propia fibra óptica a distancias de centenares de kilómetros [6].

Teniendo todo esto en cuenta, este estudio se enmarca en un proyecto destinado a analizar los efectos del viento en seguidores solares mediante la instalación de sensores de fibra óptica que monitoricen la torsión sufrida por la estructura. Estos sensores se han instalado en puntos críticos de la estructura lo cual, tras un análisis adecuado permite obtener el estado de toda la estructura. En concreto, en este trabajo se presentan los resultados iniciales de las medidas de torsión empleando redes de difracción de Bragg fabricadas en fibra óptica (FBG). También se describe la configuración de red usada e instalación de los sensores. Estos resultados preliminares permiten validar la propuesta y continuar con el análisis de los efectos del viento en la estructura.

2.- Principio de operación

Como ya se ha comentado, en este trabajo se emplean sensores de fibra óptica para monitorizar el comportamiento mecánico de puntos clave de la estructura de seguidores. Esta estructura está formada por un conjunto de vigas transversales que forman semifilas, soportan los paneles y rotan para realizar el seguimiento en un eje. Estas semifilas de seguidores están conectadas entre sí por un conjunto brazo-biela encargado de transmitir la rotación simultáneamente a las diferentes filas.

Para la medida de la torsión puede aplicarse la teoría clásica de Euler-Bernoulli y Saint Venant, y aplicarse directamente a sensores FBG colocados en un ángulo de $\pm 45^\circ$ [7]. De esta manera, asumiendo dos sensores puntuales de deformación colocados en un ángulo de $\pm 45^\circ$ con respecto al eje longitudinal de la viga, el momento de torsión M_T puede calcularse como

$$M_T = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) W_T G, \quad (1)$$

donde ε_1 y ε_2 son las deformaciones obtenidas de los sensores 1 y 2 respectivamente, W_T es el momento resistente torsional y G es el módulo de elasticidad transversal o módulo de cizalla de la viga. En este estudio, los valores empleados son $G = 85.000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ y $W_T = 56.442 \text{ o } 73.700 \text{ mm}^3$ en función del espesor de la pared de la viga donde se encuentran los sensores. Hay que tener en cuenta que las posibles fluctuaciones de temperatura de los sensores se compensan por el propio método de

cálculo de la torsión. Pese a todo, la red instalada incluye sensores convencionales FBG para la compensación de temperatura en las medidas de deformación simple o de flexión.

2.- Esquema experimental

En la figura 1 se puede ver una imagen de la instalación fotovoltaica del estudio, localizada en las Bardenas Reales (Navarra, España). Los seguidores estudiados incluyen las tres primeras filas, de una longitud aproximada de 60 metros. La red de sensores incluye por su parte un interrogador de sensores de fibra óptica comercial Micronoptics SM130 de cuatro canales y un conmutador óptico de cuatro canales; todo ello instalado en un cuarto de control localizado a 1.5 kilómetros. De esta manera, se han instalado 7 grupos de sensores (3 canales del interrogador y 4 canales del conmutador) de unos 6-7 sensores cada grupo.

En total, la red consiste en 45 sensores FBG de los cuales se obtienen 19 puntos de medida de torsión (2 FBG cada punto), 2 de flexión y 5 de temperatura. La figura 2 muestra la localización de los sensores en las diferentes posiciones de la estructura.

De manera sencilla, puede entenderse esta estructura como una serie de vigas (que soportan los paneles) conectadas por varias juntas de abrazadera que forman semifilas. Dos semifilas se conectan entre sí mediante una biela, formando una fila completa. Por último, estas filas se conectan entre sí a través del conjunto biela-brazo encargado de rotar los paneles. De esta manera, se ha considerado que los puntos más críticos de la estructura incluyen las seis juntas entre vigas de la primera fila (T1-T6), y las cuatro juntas más cercanas de la segunda y tercera fila (T7-T14). Además, se ha medido la torsión y flexión en la junta de la biela con

la primera fila (T19 y S1) y en las secciones centrales de algunas vigas (T15-T18). Por último, además de la temperatura en diferentes puntos, también se ha medido la flexión en el brazo (S2, figuras 4 y 5). La Tabla 1 muestra un resumen de los sensores instalados según su codificación, posición, parámetro medido y valor W_T (si procede). Nótese que cada punto de medida de torsión consiste en dos sensores FBG instalados a $\pm 45^\circ$ en el eje longitudinal de la estructura, como puede verse en la Figura 3



Fig. 1. Imagen de la estación fotovoltaica del estudio. En el recuadro negro: seguidores estudiados. Línea roja: ruta de la fibra óptica de comunicación. Obtenido de Google – Gobierno de Navarra y el Inst. Geográfico Nacional.

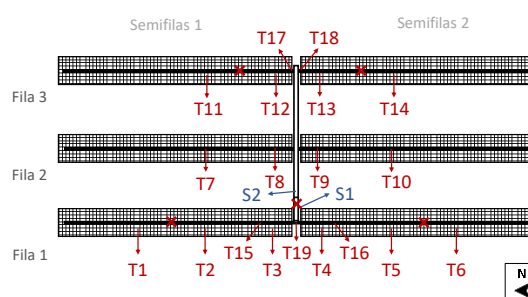


Fig. 2. Esquema de la red de sensores. Tn en rojo: sensores de torsión; Sn en azul: sensores de flexión; cruz roja: sensores de temperatura.

Código	Posición	Parámetro	W_T
T1 to T14	Junta entre vigas de soporte	Torsión	56442 mm ³
T15 T16	Vigas de soporte	Torsión	56442 mm ³
T17 T18	Vigas de soporte	Torsión	73700 mm ³
T19	Abrazadera de biela	Torsión	73700 mm ³
S1	Biela	Flexión	-
S2	Brazo	Flexión	-
Temp 1 to 5	Con S1-S2 y en vigas	Temperatura	-

Tabla 1. Resumen de los sensores instalados y parámetro W_T correspondiente.



Fig. 3. Punto de medida de torsión T1.



Fig. 4. Sensores S1 y S2.

3.- Resultados

En primer lugar, se realizaron una serie de experimentos para validar el comportamiento del sistema y evaluar la torsión, flexión y temperatura de la estructura. Tras la instalación, se verificó la detección de todos los sensores FBG empleados. Después, se inició la monitorización de las longitudes de onda características de cada sensor, para evaluar su desplazamiento espectral (directamente proporcional a la temperatura y deformación del sensor en concreto). Por último, estos desplazamientos en longitud de onda se convierten a torsión empleando la ecuación 1 o a flexión (tras la compensación de temperatura correspondiente).

Para comprobar que la medida de los sensores era correcta, se aplicó torsión en diferentes partes de la estructura, de manera gradual, mediante la colocación de peso. La figura 5 muestra las medidas de torsión capturada a 100 Hz de los sensores T4-T6 durante la aplicación de peso en el extremo de la semifila 1.2 y en la viga entre T5 y T6. En el primer caso, puede observarse cómo la torsión inducida en el extremo de la estructura se transmite por ésta hasta la junta con la biela. Esto se debe a

que la junta con el brazo está actuando como un punto fijo, mientras que el otro extremo de la estructura está libre. Este efecto se evidencia a partir del segundo 30, cuando la torsión se aplica en la siguiente viga, entre T6 y T5. Ahí puede verse cómo T6, al tener un extremo libre, no sufre torsión (simplemente rota). Sin embargo, tanto T5 como T4 presentan torsión, al tener ambos extremos fijos o semifijos.

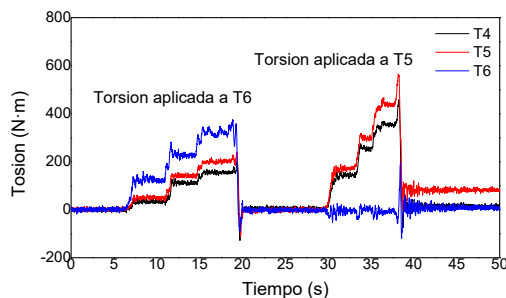


Fig 5. Medidas en T4-T6 cuando se aplica torsión en T6 y T5 respectivamente.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el resto de los casos. Por ejemplo, en otra tanda de medidas se comprobó la ausencia de transmisión entre semifilas a través del brazo central y la biela, como era de esperar. La figura 6 muestra los resultados de la fila 3, cuando se aplica torsión en T11 y T13 respectivamente. En el primer caso, tanto T11 como T12 sufren torsión mientras que ésta no es transmitida a T13 a través de la estructura. De la misma manera, cuando la carga se aplica en la semifila 3.2, T13 presenta torsión mientras que T11 y T12 sólo detectan los impactos y vibraciones debidos a la carga y descarga, pero sin torsión significativa.

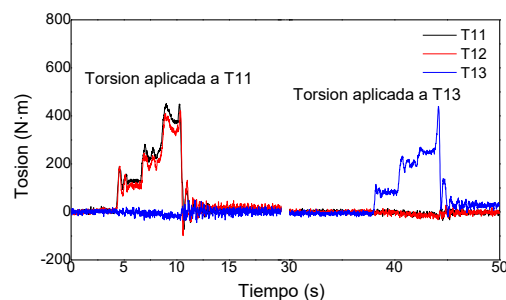


Fig 6. Medidas en T11-T13 cuando se aplica torsión en T11 y T13 respectivamente.

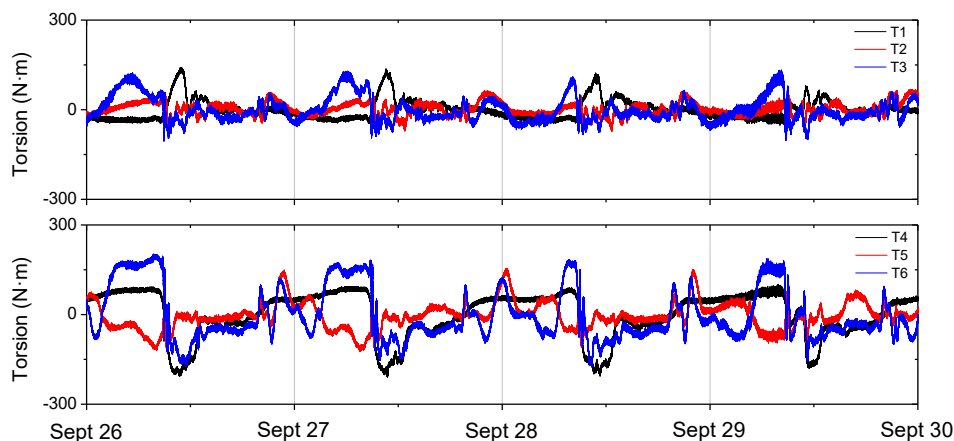


Fig 7. Torsión medida entre el 26 y el 30 de septiembre en los sensores T1-T6.

Cabe mencionar que existe cierto comportamiento inelástico en la estructura ya que, en ocasiones, la torsión medida no recupera los valores iniciales anteriores a la carga. Este efecto es evidente en la figura 5, tras la segunda excitación. Esto se debe probablemente a la fricción estática inducida por las juntas de rotación colocadas entre los postes y las vigas. Sin embargo, se ha observado que esta torsión remanente puede liberarse tras la aplicación de nuevas torsiones o excitaciones.

Tras validar la red de sensores y su comportamiento, se inició una campaña de medidas en condiciones de operación real. Por ejemplo, la figura 7 muestra las medidas obtenidas en la fila 1 entre el 26 y el 30 de septiembre 2019. Las condiciones meteorológicas durante este periodo fueron relativamente estables, con vientos menores de 4 m/s, temperaturas en el rango de 15-30 °C y sin lluvia. Para mejorar la visibilidad de la medida, se ha aplicado un filtro de media móvil de 10 segundos, quedando evidenciada la presencia de patrones diarios en la estructura. Estos patrones son independientes de la sensibilidad cruzada de la temperatura en los sensores y probablemente se deban a efectos como la presencia/ausencia de viento constante o de la rotación de los seguidores durante el día.

En cuanto a la instalación de los sensores en campo, se realizó empleando resina epoxi en los sensores y sujetando los cables de comunicación a la estructura con soportes adhesivos y bridas. Esta instalación ha operado correctamente durante casi 2 años sin sufrir daños por las condiciones meteorológicas. Sin

embargo, sí que se produjeron daños menores en la caja de conexiones causados por roedores.

Cabe destacar que los parámetros de diseño de la red óptica instalada fueron muy conservadores en cuanto a la utilización del espectro. Se hubiera podido incluir un número muy superior de redes de Bragg en cada canal del interrogador, considerando que las variaciones por torsión son del orden de picómetros. Además, las excursiones de los sensores causadas por temperatura son solidarias entre los diferentes sensores. Por tanto, la zona de guarda de los sensores podría reducirse significativamente para incluir un número mucho mayor de sensores.

4.- Conclusión

En este trabajo, se han presentado y validado un esquema basado en sensores de fibra óptica para la medida de torsión y flexión en una estructura de seguidores fotovoltaicos. Para medir la torsión se han empleado redes de difracción de Bragg colocadas con un ángulo de $\pm 45^\circ$, lo que además permite obtener una medida independiente de la temperatura. Asimismo, se han incluido sensores adicionales para medir flexión y temperatura en puntos específicos. En total, se han empleado 45 FBG para implementar 19 sensores de torsión, 2 de flexión y 5 de temperatura. Estos sensores se han colocado en puntos estratégicos de la estructura, como las juntas entre vigas o la biela, pero también en algunos puntos secundarios que permitan verificar los resultados, como en las secciones centrales de algunas vigas.

Además, se han realizado experimentos para la validación del esquema. En estos ensayos, se aplicó torsión de manera gradual en diferentes puntos de la estructura, obteniéndose resultados acordes con lo esperado. Por último, se presenta una muestra de cuatro días de medidas obtenidas durante la operación normal de los seguidores. Estos resultados muestran el gran potencial de los sensores de fibra óptica para monitorizar estructuras fotovoltaicas en campo, dadas las capacidades para operar remotamente y la normalmente larga distancia hasta centro de control. La monitorización de la estructura en tiempo real puede ser de gran ayuda para optimizar el uso y la posición de los seguidores, mejorando tanto el tiempo de operación como la seguridad de la instalación. Además, un análisis adecuado de la estructura en función de las condiciones climatológicas, en particular velocidad y dirección del viento, pueden ayudar al desarrollo de modelos que ajusten los márgenes de seguridad y condiciones de operación.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto WINDSOLAR (0011-1365-2017-000122) del Gobierno de Navarra, los proyectos TEC2016-76021-C2 y PID2019-107270RB-C22, los fondos FEDER, la European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 838143 y las fundaciones "Caja Navarra" y "la Caixa" con el proyecto LCF/PR/PR13/51080004.

Referencias

- [1] [EU-28 annual solar PV installed capacity 2000-2019], Solar Power Europe, 2019.
- [2] W. NSENGIYUMVA, S. G. Chen, L. Hu, X. Chen, "Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 250-279, 2018.
- [3] K. PICKEREL, "How the solar industry is responding to the increasing intensity of natural disasters," *Solar Power World*, 2018.
- [4] C. ROHR, P. A. Bourke, D. Banks, "Torsional instability of single-axis solar tracking systems," *Proc. of the 14th International Conference on Wind Engineering*, 21-26 (2015).
- [5] J.M. LOPEZ-HIGUERA, *Handbook of Optical Fibre. Sensing Technology*; John Wiley&Sons." Inc.: Hoboken, NJ, USA , 2002.
- [6] V. DE MIGUEL, D. Leandro, M. Lopez-Amo, "Ultra-long (290 km) remote interrogation sensor network based on a random distributed feedback fiber laser," *Optics Express*, 26(21), 27189-27200, 2018.
- [6] Y. WANG, L. Liang, Y. Yuan, G.Xu, F. Liu, "A two fiber bragg gratings sensing system to monitor the torque of rotating shaft," *Sensors*, 16(1), 138, 2016.