

# Contribuciones de incertidumbre de interés en la magnitud de par de torsión de aplicación en el sector eólico

Raquel María Lorente Pedreille<sup>(1)</sup>, Miguel A. Sebastián<sup>(2)</sup>, María Ana Sáenz-Nuño<sup>(3)</sup>, María Nieves Medina Martín<sup>(4)</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, ICAI, Universidad Pontificia Comillas c/Alberto Aguilera, 25, 28015 Madrid, España  
<sup>2</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia, c/Juan del Rosal, 12, 28040 Madrid, España  
<sup>3</sup>Institute for Research in Technology (IIT), ICAI School of Engineering, Comillas Pontifical University, 28015 Madrid, España  
<sup>4</sup>Centro Español de Metrología, C. del Alfár, 2, 28760 Tres Cantos, Madrid, España  
<sup>1</sup>Teléfono: 915422800 Correo electrónico: rmlorente@comillas.edu



## RESUMEN

La investigación presentada persigue aumentar la eficiencia de la estimación del par en los bancos de ensayo de nacelles, los cuales operan en el rango de los MN-m. Dada la dificultad para ejecutar medidas directas y que aseguren la trazabilidad, los operadores de los bancos de ensayo de las nacelles de los aerogeneradores se ven obligados a recurrir a mediciones indirectas del par torsor, cuyas incertidumbres asociadas son muy elevadas, oscilando entre el 2 y el 5%. La presente investigación se desarrolló en la tesis doctoral [1], en la que se perseguía desarrollar medidas más fiables y trazables del par torsor durante el ensayo de nacelles y estudiar los efectos de las características cargas multicomponente que tienen lugar durante la operación de los aerogeneradores. En esta ponencia se presenta el modelo matemático de incertidumbres que se aplicaría al patrón propuesto para la medición del par torsor.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para hacer frente al desafío de la medición de par en el rango de los MN-m, desde la iniciativa EMPIR se puso en marcha el proyecto EMPIR14IND14 "Torque in the MN-m range". Dentro de este, una de las principales líneas de investigación fue el desarrollo de un patrón de transferencia para la medición de par en los bancos de ensayo de nacelle (Fig. 1).

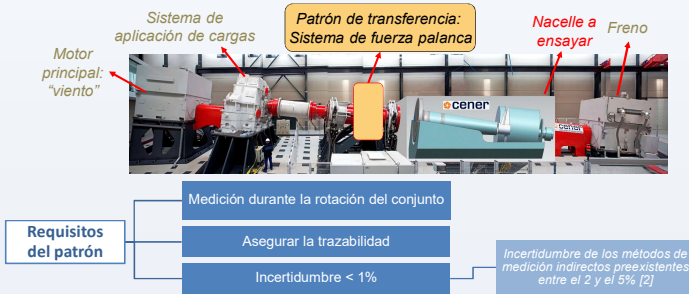


Figura 1: Banco de ensayos (CENER), localización del patrón y requisitos del patrón

Desde el Centro Español de Metrología se lanzó la propuesta de un patrón de transferencia basado en los sistemas de fuerza palanca: se realizan medidas de fuerza a una determinada distancia del eje de rotación, obteniendo la medida del par a partir de la medida de fuerza y longitud, siguiendo la definición de la magnitud par del SI (Fig. 2).

A lo largo de la tesis doctoral "Diseño y caracterización metrológica de un nuevo patrón de transferencia para la magnitud par de torsión en el rango de los MN-m" se elaboró el desarrollo completo y la optimización del sistema propuesto.

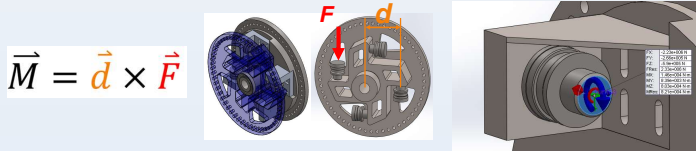


Figura 2: Patrón de transferencia basado en medidas de fuerza y longitud y muestra de las medidas obtenidas mediante FEM

## 2. DESARROLLO

Tras completar el diseño y optimización del sistema, se desarrolló un modelo para la estimación de la incertidumbre relativa asociada al patrón de transferencia [3].

Por ello, no era posible considerar las contribuciones clásicas recogidas en la norma UNE-EN ISO 376:2011 [4], ni la correlación entre distintas contribuciones. Se dividió el modelo en 3 etapas diferentes, para facilitar su comprensión y asegurar la correcta evaluación de los patrones de transferencia propuestos y su intercomparabilidad (Fig. 3 y 4)

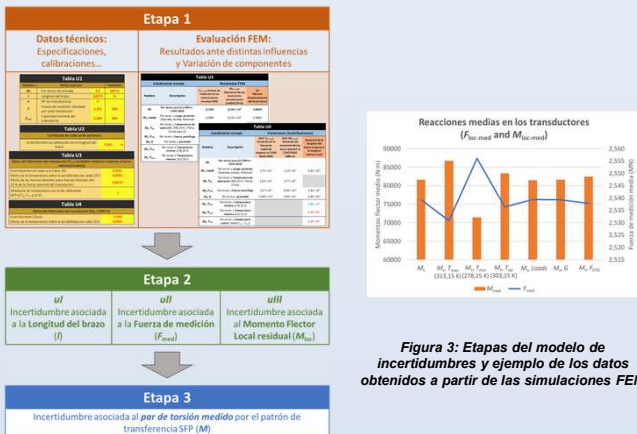


Figura 3: Etapas del modelo de incertidumbres y ejemplo de los datos obtenidos a partir de las simulaciones FEM

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la iniciativa EMPIR, al Centro Español de Metrología y a la escuela EIDUNED por hacer posible el desarrollo de la investigación y la tesis doctoral descritas en esta comunicación

- **Etapa 1:** Tablas de recogida de datos, tanto externos como resultados de las simulaciones FEM [5].
- **Etapa 2:** Incluye las tres componentes principales en el cálculo de la medida del par torsor (realizada en la etapa 3 final): Longitud del brazo ( $ul$ ), fuerza medida por los transductores ( $uF$ ) y momento flector local residual ( $uM_{loc}$ ). El valor de cada una de estas tres componentes se obtiene combinando las contribuciones correspondientes obtenidas en la etapa 1.
- **Etapa 3:** Los resultados de las tres componentes obtenidas en la etapa 2 se combinan para hallar el valor y la incertidumbre del par torsor medido.

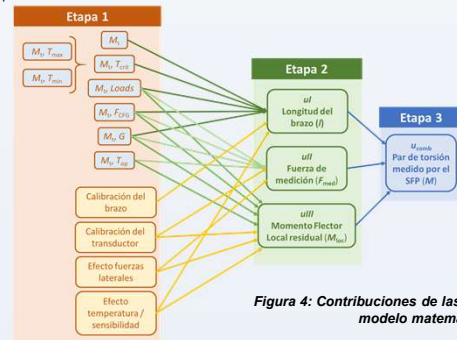


Figura 4: Contribuciones de las distintas etapas del modelo matemático

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados parciales mostraron que la calibración inicial y la temperatura crítica de operación eran las contribuciones más importantes sobre los elementos estudiados en la Etapa 2 (Fig. 5).



Figura 5: Resultados parciales (etapa 2) – efecto de las distintas influencias sobre cada componente del modelo

El resultado final fue una incertidumbre asociada relativa del par torsor del 0,15%, cumpliendo con creces el objetivo de diseño del proyecto.

Por otro lado, se aprecia que todas las componentes tienen un efecto similar, siendo ligeramente más elevado el peso de la contribución debida a la longitud del brazo (37,04%) (Fig. 6).



Figura 6: Efecto de las distintas componentes sobre el par torsor

## 4. CONCLUSIONES

El modelo de estimación propuesto ha permitido calcular la incertidumbre del patrón incluso antes de la fabricación del mismo. Si bien sería necesario revisar el modelo tras la construcción y ensayo del patrón para considerar nuevas incertidumbres, el empleo de los resultados FEM en combinación con los datos externos ha permitido predecir el comportamiento del patrón diseñado, suponiendo un ahorro en coste y tiempo.

El análisis por elementos finitos, demostró la idoneidad como patrón de transferencia para la medición de par en alto rango. La incertidumbre relativa del par asociada al patrón debía ser inferior al 1% para poder representar una alternativa a los métodos de medición actualmente empleados. El valor obtenido, con una incertidumbre relativa del par del 0,15%, cumple con creces el objetivo propuesto.

## 5. REFERENCIAS

[1] Lorente Pedreille, Raquel María. Tesis doctoral: Diseño y caracterización metrológica de un nuevo patrón de transferencia para la magnitud par de torsión en el rango de los MN-m . 2020. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Escuela Internacional de Doctorado. Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales2020.  
 [2] Beaho, G. (2015). Measurement and traceability of torque on large mechanical drives. Sensor+Test.  
 [3] Lorente-Pedreille, R. M., Sebastián, M. A., Sáenz-Nuño, M. A., & Medina-Martín, M. N. (2019). A Metrological Characterization Approximation for the New Torque Measurement System in Wind Turbines Test Benches. IEEE Access, vol. 7, pp. 73469-73479, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920261.  
 [4] UNE, Madrid. UNE-EN ISO 376:2011. Materiales metálicos. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial. (ISO 376:2011) (2011).  
 [5] R. M. Lorente-Pedreille, M. N. Medina-Martín, M. A. Sáenz-Nuño, M. A. Sebastián, M. A. Sáenz-Nuño, and M. A. Sebastián, "Study of influences in CEM's new transfer standard for torque measurements in the MN-m range," in IMEKO WORLD CONGRESS, 2018, vol. XXII, pp. 231–235.  
 Web del proyecto EMPIR 14IND14: <https://www.ptb.de/empir/ind14-home.html>