

1. Introducción

Cada día, nuevos desarrollos y tecnologías en distintos sectores de la industria, como el aeronáutico, naval o el de producción de energía eólica, permiten ampliar los límites de sus rangos de trabajo actuales. Estos avances requieren de mediciones precisas en distintos ámbitos, como la fuerza y el par ejercidos en máquinas, construcciones, cargas estructurales, etc. Dichas mediciones ayudan a controlar y mejorar el desempeño de los equipos, lo que llevará a una mayor eficiencia en el funcionamiento de los mismos.

Uno de los campos de mayor desarrollo en los últimos años es el de la producción de energía eólica y su desarrollo se prevé aún mayor en los próximos años. De acuerdo al informe de 2011 de la “*European Wind Energy Association*” (EWEA), la producción de energía eólica se incrementará dramáticamente, gracias al impulso por parte de los gobiernos de muchos países, interesados en favorecer el desarrollo de las energías renovables. En consecuencia, nuevos avances y desarrollos surgirán, los cuales permitirán ampliar los rangos de trabajo actuales de las turbinas eólicas, las cuales operarán en el rango de los MN•m.

A pesar de los avances técnicos de las distintas industrias, en la actualidad no existen métodos de medición del par de torsión trazables a los patrones nacionales e internacionales que puedan asegurar la calidad de las mediciones en los nuevos rangos de trabajo, de valor más elevado. Ante la demanda de mediciones precisas, es necesario que se aumenten las capacidades de medición en estos nuevos rangos de trabajo, lo que supone un desafío a la hora de asegurar la trazabilidad de las medidas.

El objeto del presente trabajo es analizar las metodologías existentes para la medición de la fuerza y el par de torsión que aseguren la trazabilidad de las medidas. Para ello, se expondrá la estructura metrológica mundial, como se establece la trazabilidad y cuál es el estado de la técnica actual en el ámbito de la fuerza y el par.

Además, se describirá el nuevo proyecto EMPIR 14IND14 “*Torque in the MN•m*”, el cual tiene como objetivo ampliar las capacidades de medición del par de manera trazable y directa, especialmente en la producción de energía eólica. Concretamente, se detallará la solución propuesta por el CEM, quien a través de su participación en este proyecto ha desarrollado un nuevo patrón de transferencia para la medición del par de torsión en el rango de los MN•m basado en la medida de la fuerza.

2. Medición de la fuerza y el par de torsión en la actualidad

Los nuevos avances industriales requieren de mediciones en mayores rangos de medición. Por ejemplo, como se ha comentado, los pares de torsión generados en las turbinas eólicas en la actualidad operan en el rango de los MN•m. Otro ejemplo, en el ámbito de la medición de fuerza, sería el caso del sector de construcción y obras públicas, donde se efectúan medidas en el rango de los MN, necesarias en la construcción de puentes para la determinación de la carga que soportan sus pilares y uniones.

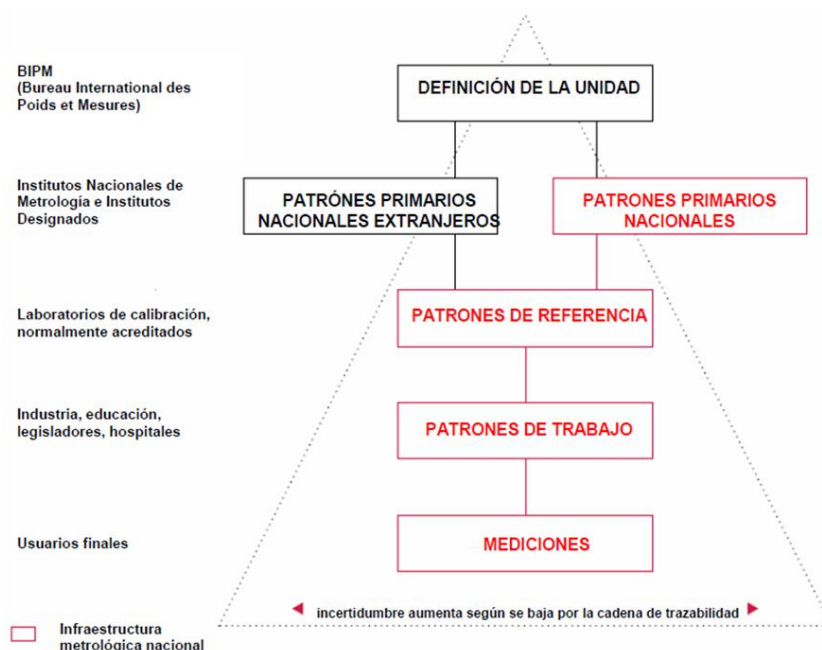
Sin embargo, los patrones primarios existentes en la actualidad en los Institutos Nacionales de Metrología no pueden ofrecer trazabilidad en estos nuevos rangos de trabajo. A continuación se describe la trazabilidad en la medida de la fuerza y el par de torsión, así como las distintas metodologías empleadas por los patrones primarios para la realización de ambas magnitudes.

2.1 Cadenas de trazabilidad

Una de las misiones de la metrología consiste en **establecer cadenas de trazabilidad** (Figura 1), creando la capacidad de determinar y documentar el valor y la exactitud de las mediciones y de diseminar dicho conocimiento (European Association of National Metrology Institutes [EURAMET], 2008).

Las cadenas de trazabilidad permiten asegurar que las medidas efectuadas con un determinado instrumento pueden relacionarse con instrumentos de un nivel metrológico superior, siendo posible recorrer la cadena hasta el patrón primario de la magnitud medida (Joint Committee for Guides in Metrology [JCGM], 2012).

Figura 1: Cadena de trazabilidad



En el caso de la fuerza y el par de torsión, los patrones primarios son máquinas, llamadas máquinas patrón de fuerza/par, capaces de generar fuerzas/pares de un valor conocido con un cierto nivel de incertidumbre. Mediante estas máquinas es posible generar calibraciones en ambas magnitudes.

2.2 Técnicas para la realización de la magnitud fuerza

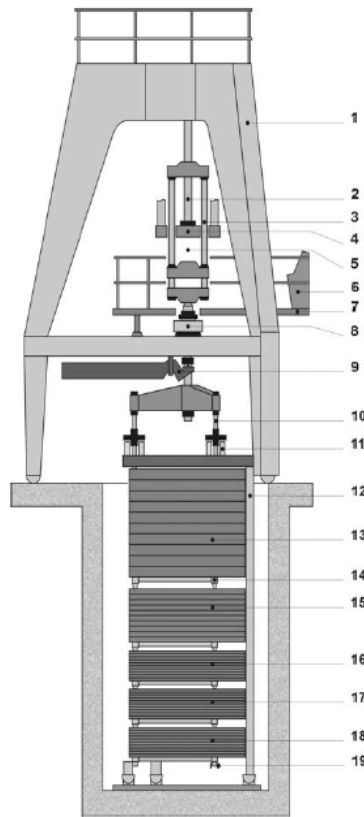
Existen varios tipos de máquinas patrón, con cuatro principios de funcionamiento distintos según establece la guía EURAMET cg 04 (2010).

1. Máquinas patrón de carga directa

Su principio de funcionamiento en la acción directa de un campo gravitatorio local conocido sobre masas patrón de valor e incertidumbre así mismo conocidas

La fuerza que se genera durante el ensayo se transmite al elemento de medición (el transductor o célula de carga) mediante un bastidor de carga, al cual están unidos todos los elementos de carga considerados (Figura 2).

Figura 2: Ejemplo de máquina patrón de fuerza de carga directa de 2 MN en el PTB (Peters et al., 2006)



2. Máquinas patrón de amplificación hidráulica

En este tipo de máquinas, se emplean sistemas hidráulicos con conjuntos pistón-cilindro cuyas áreas efectivas son distintas. El factor de amplificación se corresponde, aproximadamente, a la razón entre las dos áreas (Figura 3).

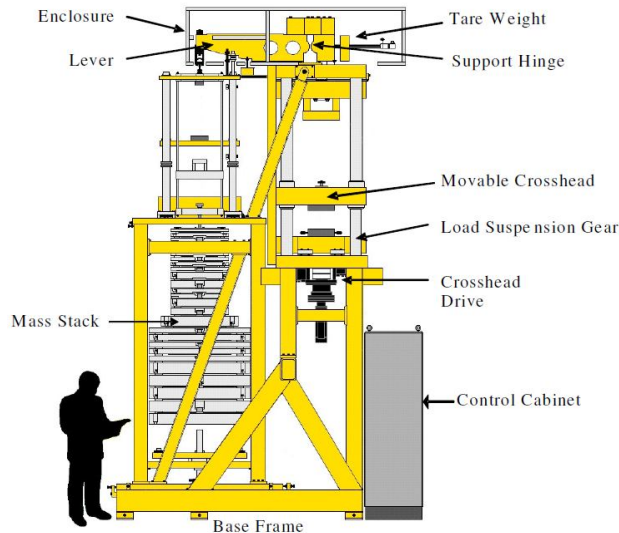
Figura 3: Ejemplo del sistema de hidráulico en la base de una máquina patrón de amplificación hidráulica en el BEV (Buchner et al., 2012)



3. Máquinas patrón de amplificación por palanca

En las máquinas patrones de fuerza de amplificación por palanca, una fuerza producida por carga directa se amplifica utilizando uno o más sistemas mecánicos de palancas, consiguiendo dicha amplificación de manera proporcional a relación entre las longitudes de las palancas (Figura 4).

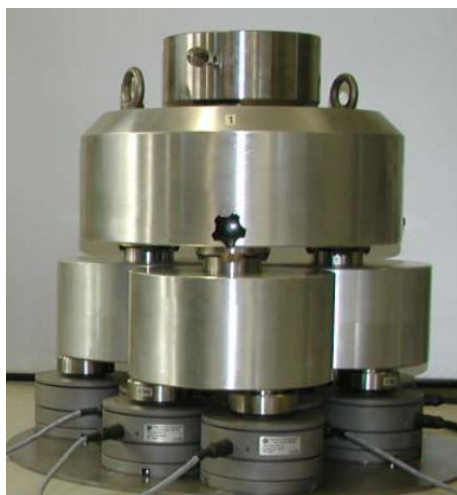
Figura 4: Ejemplo de máquina patrón de amplificación por palanca en el NPL (Jain et al., 2012)



4. Máquinas patrón con sistemas de múltiples transductores

Estas máquinas, conocidas comúnmente por el término inglés “Sistemas Build-Up”, están basadas en el empleo de conjuntos de transductores de fuerza, previamente calibrados de manera individual en máquinas patrón de fuerza, lo cuáles se montan en paralelo (Figura 5). La fuerza que la máquina genera se puede medir como la suma de las fuerzas individuales medidas por cada uno de los transductores del conjunto.

Figura 5: Ejemplo de un sistema de múltiples transductores (9) (Kolwinski & Schwind, 2014)



2.3 Técnicas para la realización de la magnitud par de torsión

En el caso del par de torsión existen tres tipos de máquinas patrón, algunos de los cuales guardan gran similitud con las empleadas en la unidad fuerza; esto se debe a que la unidad

de par está relacionada con la unidad de fuerza. La unidad del par de torsión es el “newton metro”, unidad correspondiente al momento generado por una fuerza de 1N en el extremo de un cuerpo longitudinal de longitud 1m.

1. Máquinas de carga directa

Su principio de funcionamiento es similar al de las máquinas patrón de fuerza de carga directa. Salvo que dicha fuerza no se aplica de manera directamente axial sobre un transductor de fuerza, sino al final del extremo de un brazo. En el centro de dicho brazo, se acopla un eje al cual se acopla a su vez el transductor de par. El par de torsión se obtiene del producto de la longitud del brazo por el valor de la fuerza aplicada (Figura 6).

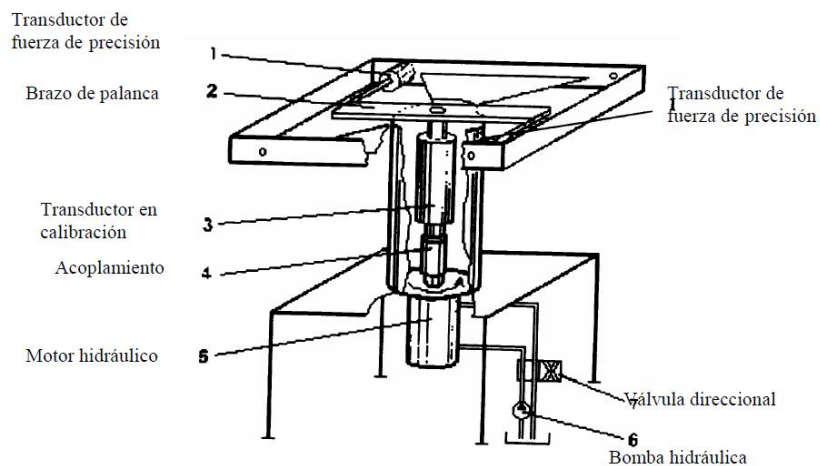
Figura 6: Máquina patrón de par de carga directa en el CEM (J. A. Robles, J. L. Robles & Lobo, 2006)



2. Máquinas de par hidráulicas

El par de torsión se genera por medio de sistemas hidráulicos. En ocasiones, se trata de un método por comparación, dado que puede emplear transductores adicionales para evaluar la presión del fluido y así controlarlo (Figura 7). Resulta, por lo tanto, un método de mayor incertidumbre que la medida mediante máquinas de carga directa.

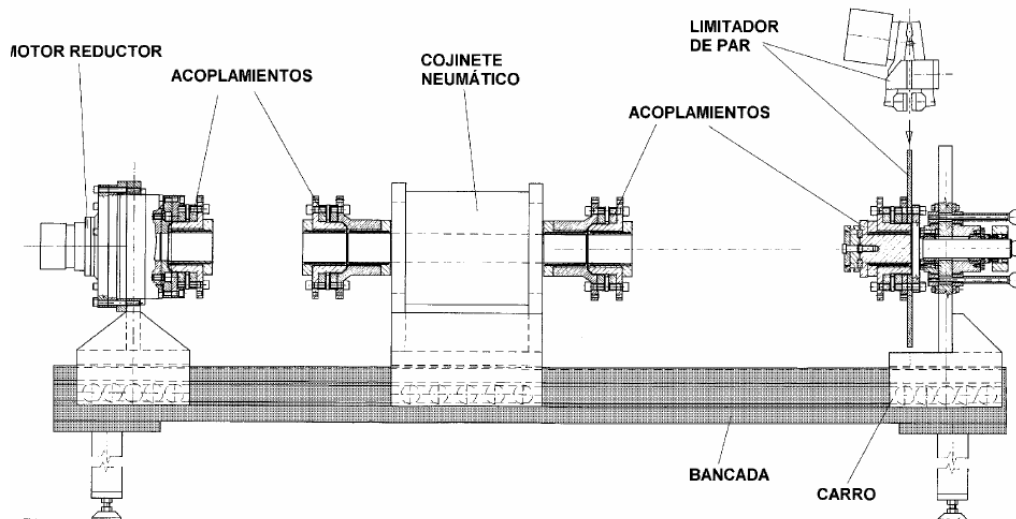
Figura 7: Diagrama de una máquina de par hidráulica



3. Máquina de par electromecánica

Este tipo de máquina se compone de una cadena de transmisión, con un motor eléctrico al inicio que genera el par de torsión y un freno al final. En medio el transductor o llave de para a ensayar. En el caso de tratarse de una máquina por comparación (caso más habitual) habrá dos transductores instalados: uno de referencia, previamente calibrado en otra máquina patrón, y el transductor o llave de par a ensayar (Figura 8).

Figura 8: Diagrama de una máquina de electromagnética



3. Nuevos rangos de medición: El par de torsión en el rango de los MN•m

Tal y como se ha expuesto en la introducción, los nuevos avances y técnicas en diferentes sectores industriales requieren mediciones de par de torsión precisas y trazables en rango de trabajo superiores a los alcanzados actualmente por las máquinas patrón.

El nuevo proyecto EMPIR 14IND14 “*Torque in the MN•m*” (EURAMET, 2015) tiene como objetivo asegurar la trazabilidad en el rango de los MN•m, concretamente para su aplicación en bancos de ensayo de nacelle, en los cuales se ensayan las turbinas eólicas para analizar su comportamiento.

En dichos ensayos, el par de torsión es una de los parámetros a evaluar más importantes, pues está directamente relacionado con la potencia, y en consecuencia, es clave a la hora de determinar la eficiencia de las turbinas eólicas. Es por lo tanto necesario encontrar un sistema de medición que asegure la trazabilidad de las medidas de par de torsión en bancos de ensayos de nacelle.

Aunque en la actualidad existen propuestas comerciales de transductores de par de torsión, los patrones primarios no operan en el rango de trabajo de los mismos, por lo que no es posible asegurar su trazabilidad y se hace necesario recurrir a métodos de extrapolación, comparación con medidas eléctricas, modelos matemáticos, etc.

Sin embargo, sí que existen algunas máquinas patrón de fuerza, capaces de asegurar la trazabilidad en el rango de los MN•m (Kumme and Koehler, 2014). El CEM, gracias a su colaboración en el proyecto, ha desarrollado un patrón de transferencia para la medición del par de torsión (Lorente et al., 2017). Este nuevo sistema se basa en el principio de funcionamiento de los sistemas de fuerza-palanca, en los que se obtiene una medida

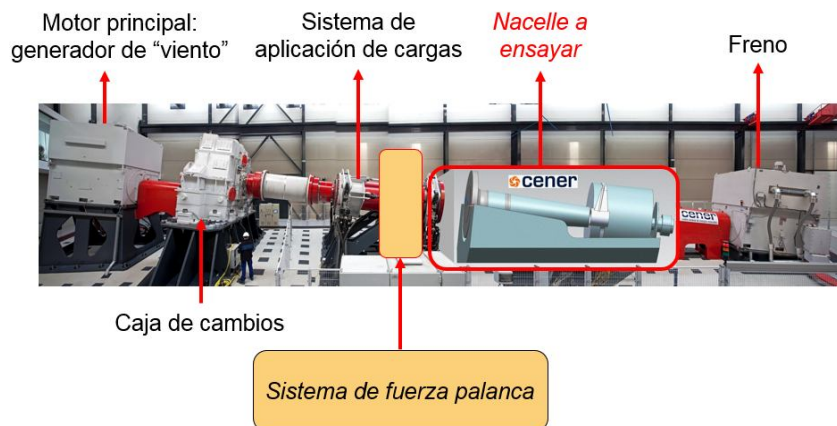
trazable del par de torsión a través de la medida de la fuerza ejercida en el extremo de una palanca o brazo.

Al descomponer el par de torsión generado en varias fuerzas tangenciales, aplicadas en distintos puntos del perímetro del sistema, se obtienen valores de fuerza más bajos. Dichos valores de fuerza se encuentran dentro de un rango en el que sí es posible asegurar la trazabilidad a través de máquinas patrón de medida de la fuerza (entre 2 MN y 3 MN). Por lo tanto, al emplear la medida combinada de la fuerza, trazada a los patrones primarios, y la longitud de un brazo calibrado, es posible asegurar la trazabilidad de la medida de par de torsión.

3.1 Características de los bancos de ensayos de nacelles

En los bancos de ensayo de nacelle se emplean para asegurar el correcto funcionamiento de las turbinas eólicas a través de distintos análisis. Para ello recrean las condiciones de funcionamiento en campo, mediante un motor principal que hace las veces de fuerza eólica, el cual transmite la energía mecánica a la nacelle a ensayar mediante una cadena de transmisión como la mostrada en la figura 9. Además de este motor principal, la mayoría de bancos de ensayo incluyen también un Sistema de Aplicación de Cargas (LAS por sus siglas en inglés), el cual genera esfuerzos laterales y momentos flectores como, como los que pueda llegar a soportar la nacelle cuando durante la operación aparecen vientos laterales.

Figura 9: Banco de ensayos de nacelle de CENER



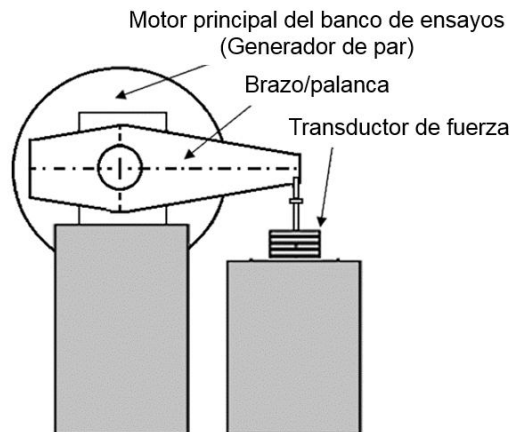
En la actualidad, dada la falta de mediciones directas de par de torsión mediante métodos trazables, los operadores de los bancos de ensayo emplean medidas eléctricas y modelos matemáticos para determinar el par de torsión y las pérdidas que tienen lugar en la cadena de transmisión.

El objetivo del proyecto es incluir un sistema de medición trazable en la cadena de transmisión, tal y como se muestra en la figura, que aporte medidas de par reales, mediante las cuales se puede determinar con mayor precisión la eficiencia de la nacelle a ensayar.

3.2 Descripción del sistema de fuerza palanca

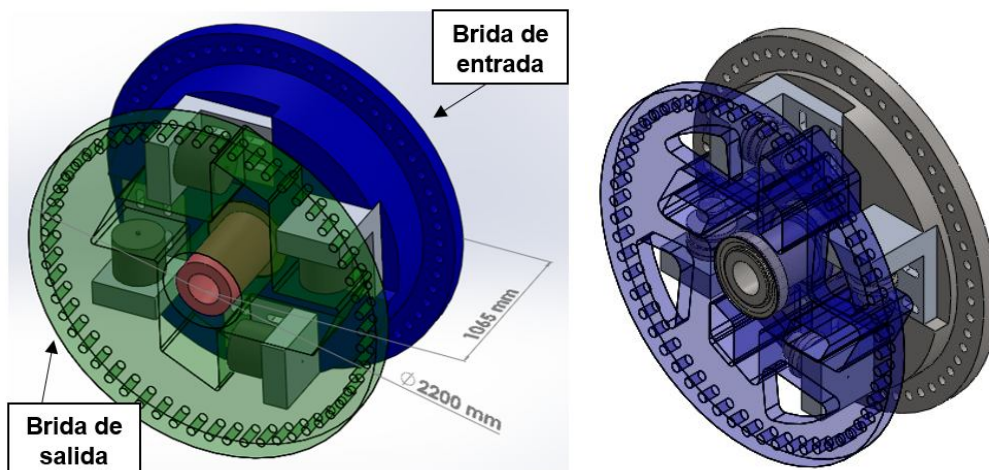
El patrón de transferencia desarrollado por el CEM se basa en el principio de funcionamiento de los sistemas de fuerza-palanca (Figura 10). En este tipo de sistemas, se acopla a un generador una palanca o brazo, al final de la cual se conecta una célula de carga o transductor de fuerza para medir el esfuerzo generado en dicha palanca. El producto de la longitud del brazo y la fuerza generada ofrece una medida precisa del par de torsión.

Figura 10: Principio de funcionamiento del sistema de fuerza-palanca



Sin embargo, estos sistemas trabajan habitualmente de manera estática. Por el contrario, el patrón a montar en el banco de ensayos estará sufriendo la rotación generada por el motor principal. Por ello, se ha dividido en dos partes con extremos bridados para su montaje en el banco de ensayos, asegurando de esta forma que gire de manera solidaria al resto de elementos de la cadena de transmisión (Figura 11).

Figura 11: Concepto y desarrollo del patrón de transferencia del CEM



En un extremo se encuentran acoplados los soportes para los cuatro transductores de fuerza empleados. En el otro extremo se han mecanizado los 4 brazos que harán contacto con los transductores, aseguran la transmisión del movimiento y la medición del par generado.

Adicionalmente, se ha incluido un eje central con rodamientos cilíndricos de rodillos para su montaje. El objetivo de estas componentes es asegurar la transmisión de las cargas laterales, generadas por el mencionado sistema de aplicación de cargas, minimizando al mismo tiempo su efecto sobre la medida del par torsor.

Actualmente, se están llevando a cabo distintos análisis y simulaciones por elementos finitos para determinar el desempeño del sistema en condiciones de operación. Mediante software FEM se estudian las fuerzas de reacción en los transductores, así como la deformación sufrida por el sistema (y especialmente, la variación de longitud del brazo) bajo los distintos esfuerzos y cargas que el banco de ensayos genera.

Mediante estos análisis es posible determinar las distintas variaciones en las mediciones que experimenta el sistema, no solo ante los esfuerzos del banco de ensayos, sino también la influencia de otros factores como la temperatura o la fuerza centrífuga generada por la rotación del banco de ensayos. Los resultados obtenidos se emplearán para calcular una previsión de la incertidumbre asociada del patrón de transferencia.

4. Conclusiones

Los avances actuales en distintas industrias ayudan a incrementar sus rangos de trabajo. Estos nuevos rangos de trabajo crean nueva necesidad de mediciones para el correcto control de la calidad y el desempeño de distintas máquinas, construcciones y desarrollos.

En el ámbito de la fuerza y el par estas necesidades de medición se dan en los rangos de los MN y los MN•m respectivamente. Sin embargo, mediante las tecnologías y patrones actuales no es posible asegurar la trazabilidad en dichos rangos.

Una de las iniciativas para ampliar el rango de medición de par de torsión es el nuevo proyecto EMPIR 14IND14, en el cual el CEM, en su calidad de participante y en colaboración con otros Institutos Nacionales de Medida ha desarrollado un nuevo patrón de transferencia, llamado sistema de fuerza-palanca, para la medición del par a través de transductores de fuerza.

La posibilidad de emplear transductores de fuerza, trazados a los patrones primarios, supone la obtención de medidas de par precisas y trazables, lo que ayudará a mejorar los análisis de las nacelles y a la determinación de su eficiencia y mejorarla gracias a un mejor control de la misma.

Los resultados de las simulaciones FEM del sistema de fuerza-palanca han demostrado que el sistema no solo es capaz de soportar y transmitir satisfactoriamente los esfuerzos generados en los bancos de ensayo, sino que además han hecho posible evaluar las medidas obtenidas por los transductores de fuerza y la posible variación de la longitud del brazo ante distintos factores de influencia.

Mediante los resultados de las simulaciones será posible calcular una estimación de la incertidumbre asociada al patrón de transferencia del CEM aún antes de su fabricación.

Gracias al nuevo sistema desarrollado por el CEM será posible mejorar los ensayos de nacelles; con mejores mediciones de par de torsión, los cálculos de la potencia y la eficiencia de las turbinas eólicas serán más precisos y ayudarán a determinar las posibles causas de ineficiencias y minimizarlas.

4. Referencias

Buchner, C., Zelenka, Z., Mikats, T., & Bleicher, F. (2012). Determination of forces from 10 N up to 250 kN using two full automatical dead weight machines developed by the BEV. *IMEKO*.

European Association of National Metrology Institutes [EURAMET] (2008). Metrology in short. EURAMET (2010). Guía de calibración Euramet/cg-04/v.01: Incertidumbres en Mediciones de Fuerza.

European Wind Energy Association [EWEA] (2011). UpWind: Design limits and solutions for very large wind turbines: A 20 MW turbine is feasible.

Jain, S. K., Titus, S. S. K., Tegtmeier, F., Tetzlaff, N., & Schwind, D. (2012). Low uncertainty in force values achieved in a lever multiplication deadweight force standard machine of 1 MN. *IMEKO*.

Joint Committee for Guides in Metrology [JCGM] (2012). Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3a edición.

Kolwinski, U., & Schwind, D. (2014). Performance of force standard machines with compensation of lever arm distortion. *IMEKO*.

Kumme, R., & Koehler, F. (2014). PTB's 16.5 MN hydraulic amplification machine after modernization. *IMEKO*.

Lorente, R. M., Medina, M. N., Sáenz, M. A., & Sebastián, M. Á. (2017). Torque traceability for nacelle's test benches: a design proposal. *IMEKO*.

Peters, M., Peschel, D., Kumme, R., y Mauersberger, D. (2006). PTB's "new" 2 MN Deadweight Force Standard Machine», *IMEKO*.

Robles Carbonell, J. A., Robles Verdecia, J. L., & Lobo, A. (2006). Torque standard machines at CEM. *IMEKO*.