

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EUROPEO PARA LA MEDICIÓN DINÁMICA DE MAGNITUDES MECÁNICAS

Michael Kobusch¹, Claire Bartoli², M. Florian Beug¹, Thomas Bruns¹, Sascha Eichstädt¹, Trevor Esward³,
Leonard Klaus¹, Andy Knott³, Nieves Medina Martín⁴, Christian Schlegel¹

¹PTB (Alemania), ²LNE (Francia), ³NPL (Reino Unido), ⁴CEM (España)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Alemania,
Teléfono: +49-531-5921107, Correo electrónico: michael.kobusch@ptb.de

Resumen: Este artículo presenta los resultados de un proyecto de investigación, en el que un total de nueve Institutos Nacionales de Metrología participaron para dar trazabilidad a la medición dinámica de tres magnitudes mecánicas, la fuerza, la presión y el par torsional. El trabajo se ha enfocado en el desarrollo de métodos trazables de calibración en dinámico, de modelos matemáticos, y de la evaluación de la incertidumbre de medida, considerando tanto los sensores mecánicos como los amplificadores eléctricos. Este proyecto comenzó en septiembre del 2011, duró tres años, y fue apoyado por el programa EMRP de la Unión Europea.

1. INTRODUCCIÓN

En muchos sectores de la industria, tales como el automovilístico, aeroespacial, instalaciones eólicas, fabricación, medicina, automatización y control industrial, las mediciones dinámicas de magnitudes mecánicas son tareas que hoy en día se aplican constantemente. Además, junto con el aumento de las aplicaciones de la medición dinámica, la calidad de las medidas es un aspecto muy importante.

A pesar de que muchas mediciones de las tres magnitudes fuerza, presión y par torsional se realizan en condiciones dinámicas, actualmente los transductores y los amplificadores se calibran estáticamente. Todavía no existen normas ni directrices específicas para la medición dinámica de dichas magnitudes.

Es bien conocido que los diversos transductores mecánicos presentan un comportamiento dinámico que muestra que la sensibilidad desvía de su valor estático con la variación de la frecuencia. También los distintos componentes eléctricos de la cadena de medición poseen una respuesta en frecuencia que se tiene que tomar en cuenta para obtener medidas precisas y confiables.

Para avanzar en la metrología dinámica, nueve Institutos Nacionales de Metrología europeos participaron en un proyecto de investigación dedicado a la medición dinámica. Este proyecto con código EMRP IND09 se titula "Medición dinámica trazable de magnitudes mecánicas" y fue financiado por el *European Metrology Research Programme*

(EMRP) de la Unión Europea con un 46 % de un volumen total de casi 3,6 millones de euros. El proyecto comenzó en septiembre del 2011 y duró tres años.

El proyecto tiene el objetivo de desarrollar y proveer las futuras bases de la trazabilidad para mediciones dinámicas. Para lograr esa meta, se requiere investigar las diversas instalaciones de calibración dinámica, sus componentes mecánicos y eléctricos, elaborar el correspondiente modelo matemático y estimar su incertidumbre asociada.

Las investigaciones conducidas se han enfocado a la trazabilidad de las respuestas dinámicas de los diferentes transductores, al igual que de las correspondientes instrumentaciones eléctricas para el acondicionamiento, la amplificación y el almacenamiento de datos. Con respecto a la calibración dinámica, excitaciones con señales sinusoidales y choques han sido investigadas para poder estudiar rangos amplios de amplitud y frecuencia.

2. PAQUETES DE TRABAJO

El proyecto fue dividido en siete paquetes de trabajo (*work package* en inglés, WP), de los cuales cuatro son técnicos, uno interdisciplinario y dos administrativos:

WP 1: Fuerza dinámica
WP 2: Presión dinámica
WP 3: Par torsional dinámico

WP 4: Amplificadores

WP 5: Matemática y estadística

WP 6: Impacto

WP 7: Coordinación principal

La coordinación y la interacción entre los varios paquetes de trabajo están ilustrados en la figura 1.

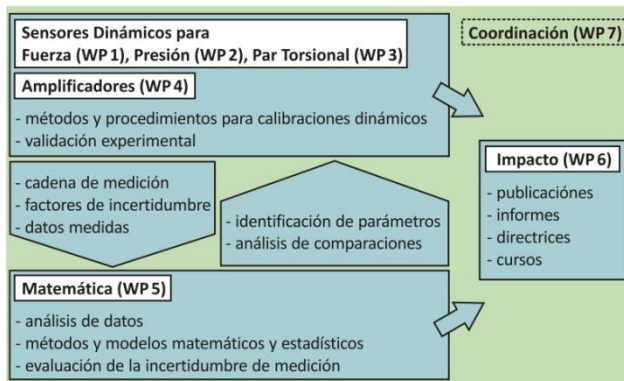


Fig. 1. Interacción entre los paquetes de trabajo [1].

En las siguientes secciones se describe un breve resumen de los temas y actividades en los paquetes de trabajo, poniendo especial énfasis en la fuerza dinámica como ejemplo.

2.1. Fuerza dinámica (WP 1)

Este paquete de trabajo se enfocó en la medición de la fuerza dinámica usando dos tipos de excitación, la excitación sinusoidal con ensayos realizados en los institutos PTB (Alemania), LNE (Francia) y CEM (España), y también con choques (PTB). El WP 1 fue dirigido por el instituto alemán.

Varios transductores de diferentes diseños y principios físicos fueron seleccionados para los ensayos: sensores resistivos (basados en galgas extensiométricas) y sensores piezoeléctricos, rangos de medición de 1 kN hasta 30 kN, utilizables para fuerzas de tracción y compresión.

Para la calibración con **fuerzas sinusoidales** [2, 3], cada uno de los participantes ha usado su propio dispositivo que utiliza un excitador electrodinámico y una masa de carga montada encima del transductor bajo calibración. Por ejemplo, el correspondiente dispositivo del CEM está presentado en la figura 2.

Cuando se hace vibrar este sistema mecánico, la masa de carga genera una fuerza dinámica según la segunda ley de Newton: fuerza es masa por

aceleración. La medición de esa fuerza inercial, que actúa sobre la parte superior del transductor, proporciona la referencia para la calibración dinámica. Esta medición se basa en la determinación de la masa y la medida de la aceleración por medio de acelerómetros o vibrómetros láser. De esta forma se obtiene trazabilidad mediante un método primario [4].

El resultado de la calibración sinusoidal es la respuesta en frecuencia de la sensibilidad (amplitud y fase) definida como la relación entre las señales de la salida del transductor bajo calibración y la fuerza de referencia.

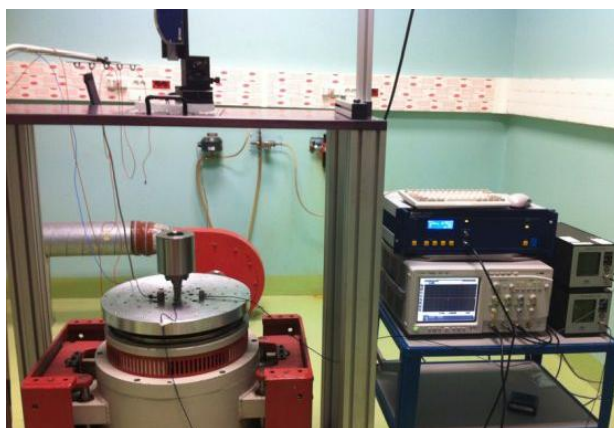


Fig. 2. Dispositivo para la calibración con fuerzas sinusoidales en el CEM.

Este sistema mecánico, en el que se introduce la excitación sinusoidal a la base del transductor de fuerza, presenta una resonancia característica a causa de la masa de carga y su conexión elástica. La elasticidad se puede considerar como una propiedad inherente del transductor de fuerza, si se supone que los dos acoplamientos a ambos lados del transductor, es decir, para la masa de carga y para la plataforma del vibrador, son rígidos. Esto es razonable dado que los componentes de los acoplamientos están sólidamente atornillados.

Como ejemplo, la figura 3 muestra la medición de la resonancia de un transductor HBM U9B / 1 kN al que se ha aplicado una masa de carga de 1 kg. Se observa que el cociente de las aceleraciones de la masa de carga y de la plataforma del vibrador puede superar el valor de 400, lo que demuestra que el amortiguamiento es considerablemente débil.

Este comportamiento dinámico se puede describir mediante un sistema de masa-resorte-amortiguador de un grado de libertad (desplazamiento lineal x). La

figura 4 ilustra el modelo básico de un transductor de fuerza rígidamente montado y al que se ha aplicado una masa de carga m . El transductor está compuesto por dos masas puntuales (m_a , m_b) unidas por un resorte (rigidez k) y un amortiguador viscoso (constante b). Las masas designan la parte superior e inferior del transductor de fuerza, o sea, su cabeza y su base. La señal de salida del transductor se considera proporcional a la elongación del resorte de medición. Con respecto al dispositivo para calibraciones sinusoidales, la base del transductor está fijada a la plataforma del excitador que se hace vibrar.

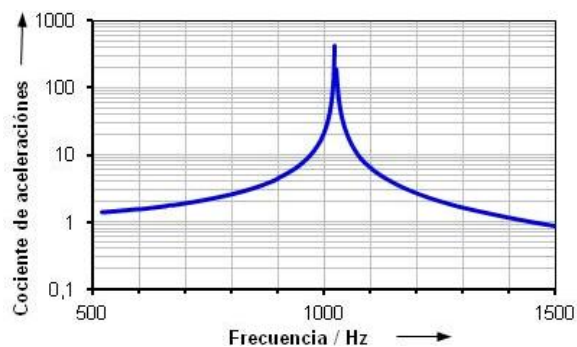


Fig. 3. Resonancia mecánica de un transductor HBM U9B / 1 kN cargado con 1 kg.

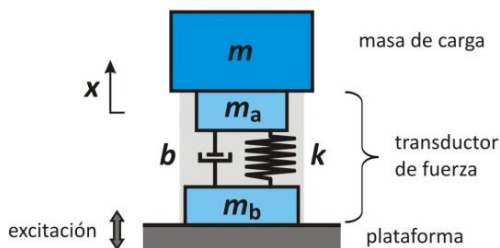


Fig. 4. Modelo de un transductor de fuerza aplicado en el dispositivo para la calibración sinusoidal.

Las **fuerzas de choque** han sido otro objetivo de las investigaciones teóricas y experimentales [5–8]. Este método ofrece las ventajas de generar más fácilmente fuerzas mayores y también contenidos espectrales en altas frecuencias. Lógicamente se controla que la fuerza ejercida nunca supere el rango del transductor bajo calibración. Dispositivos para la calibración con fuerzas de choque sólo existen en el PTB. En la figura 5 se presenta un dispositivo utilizando dos masas cúbicas de 10 kg para realizar impactos de choque. Su principio de funcionamiento está ilustrado en la figura 6.



Fig. 5. Dispositivo para la calibración con fuerzas de choque hasta 20 kN en el PTB.

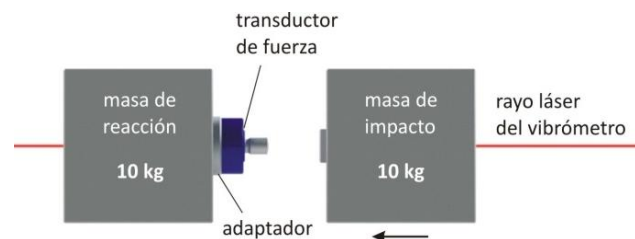


Fig. 6. Esquema de la calibración primaria con fuerzas de choque.

La masa al lado derecho se hace impactar con el transductor bajo calibración que está montado en la segunda masa. El dispositivo utiliza guías lineales de cojinetes de aire para minimizar la fricción. De nuevo, la trazabilidad de la fuerza dinámica se consigue por medio de vibrómetros láser que miden las aceleraciones de los dos cuerpos en el eje común de movimiento.

Como típicos ejemplos se muestran en la figura 7 dos señales de fuerza de choque medidas con transductores resistivos de diferente diseño.

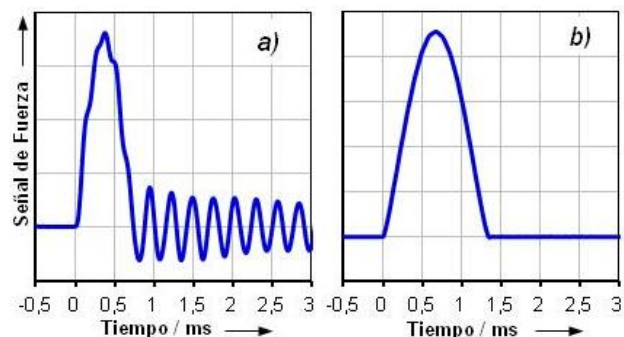


Fig. 7. Señales de fuerza de choque:
a) Interface 1610 / 2,2 kN, b) HBM U9B / 1 kN.

La señal izquierda se obtuvo con un transductor de una masa total (incluido el adaptador) de 1,5 kg. El impacto de la masa de 10 kg resultó en un pulso de una anchura de 0,7 ms seguido por una vibración fuerte. El pulso presenta deformaciones que indican vibraciones superpuestas durante el tiempo de contacto. Se realizó una identificación de los parámetros mediante un modelo expandido [6], que también toma en cuenta los posibles acoplamientos elásticos. Los resultados muestran que la vibración fuerte está causada por la masa interna m_a actuando con la rigidez k del resorte de medición.

A diferencia de esta respuesta, el segundo ejemplo (fig. 7b) obtenido con un transductor de sólo 63 g muestra un pulso de 1,3 ms de forma perfecta sin vibraciones notables. Es obvio que el choque obtenido con una masa de impacto de 10 kg no es capaz de excitar la resonancia de este transductor. Las investigaciones teóricas muestran que la identificación de parámetros necesita la excitación de las resonancias como información clave para determinar el comportamiento dinámico del sistema. Un método probado para aumentar los contenidos espectrales en altas frecuencias y para excitar la resonancia del transductor es el uso de una masa de impacto más liviana que genera pulsos más cortos. Varios ensayos experimentales demostraron que un pulso de 0,1 ms es suficientemente corto para excitar las resonancias de este pequeño transductor [7].

Para facilitar la transferencia de los distintos resultados de la calibración dinámica se propone el método de la **calibración dinámica basada en modelos**. La respuesta dinámica de un transductor bajo calibración se describe por un modelo, cuyos parámetros característicos se identifican utilizando los datos medidos. Con respecto al modelo mencionado, el transductor está caracterizado por los cuatro parámetros m_a , m_b , k , b . En los casos en que no se debe despreciar la elasticidad de los dos acoplamientos a la estructura alrededor, el modelo respectivo presentará parámetros adicionales.

Por lo general, los modelos de estructuras más complejas se pueden derivar del modelo básico para poder describir los diversos dispositivos y acoplamientos mecánicos. Para ello se aplican las propias condiciones secundarias tales como las excitaciones externas, p. ej. la vibración de la base del transductor para generar fuerzas sinusoidales, y se agregan otros componentes de masa-resorte-amortiguador para tener más grados de libertad cuando sea necesario.

Al finalizar, se comparan los resultados obtenidos con los distintos dispositivos y diferentes métodos de excitación [9]. El comportamiento dinámico de un transductor bajo calibración se habrá comprendido correctamente, cuando los respectivos modelos resulten en parámetros consistentes para distintas condiciones de medida (distintas masas de carga, aceleraciones y frecuencias, amplitudes y anchuras del pulso de choque, acoplamientos). Se requiere este conocimiento para evaluar la incertidumbre asociada a la medición dinámica. Los resultados preliminares muestran que se necesita profundizar en las investigaciones para comprender el comportamiento dinámico de los diversos diseños mecánicos de los transductores de fuerza.

2.2. Presión dinámica (WP 2)

Este paquete de trabajo, que fue dirigido por el NPL, se dedicó a la medición de presión dinámica investigando los dos siguientes métodos:

- A. Tubo de choque:
NPL (Reino Unido), SP (Suecia)
- B. Impacto por caída de peso:
PTB, MIKES (Finlandia), UME (Turquía)

El primer método utiliza un **tubo de choque** que genera choques cortos de presión en un volumen de gas de baja presión. El dispositivo está formado por un sistema cerrado de dos tubos que están conectados por una membrana delgada (figura 8). Para generar un choque, se aumenta la presión en la primera sección hasta que se rompe la membrana, lo que causa una onda de compresión que se propaga a lo largo de la segunda sección con velocidades hipersónicas. La alta velocidad tiene como resultado un rápido salto de la presión en menos de un microsegundo. Este salto constituye la señal de entrada para los sensores bajo calibración que están ubicados frente al segundo terminal del tubo.

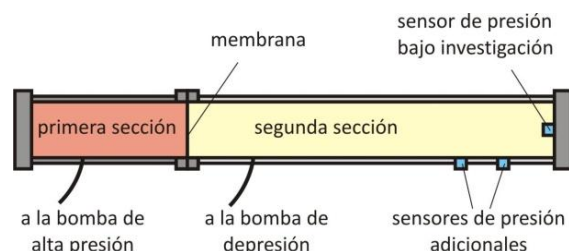


Fig. 8. Esquema de un tubo de choque.

La figura 9 muestra un tubo de choque hecho de plástico que se usa para los ensayos en el NPL. La primera sección mide 0,7 m de longitud y la segunda 2 m.

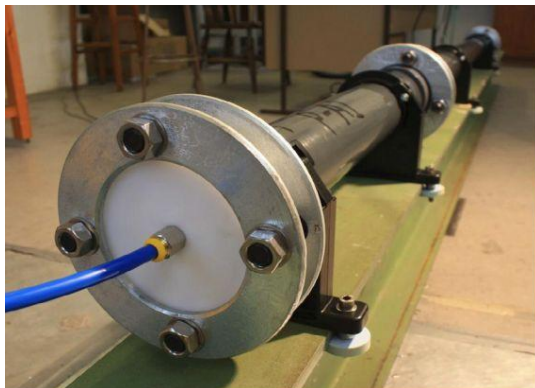


Fig. 9. Tubo de choque en el NPL.

Acerca de los tubos de choque se han investigado diferentes aspectos [10, 11], entre ellos la caracterización de los dispositivos, la influencia del material del soporte del sensor bajo calibración, la modelación del choque de gas y del sensor, la medición de la señal de referencia por medio de un vibrómetro láser.

El segundo método para la calibración dinámica de transductores de presión utiliza un **impacto por caída de peso** para generar choques de presión en los rangos de unos cien megapascles y pocos milisegundos de anchura. Una masa definida se hace caer desde una altura determinada para impactar con el pistón del recipiente de alta presión. La fuerza del impacto es transmitida a una pequeña cavidad interna de líquido hidráulico y ejerce un pulso de presión. Los sensores bajo calibración están conectados con esta cavidad mediante agujeros delgados.

Cada uno de los institutos aplica un procedimiento diferente para la trazabilidad de la medición. Mientras que en el UME se usa el dispositivo sólo para las calibraciones secundarias, los institutos PTB y MIKES han realizado avances para establecer una trazabilidad con métodos primarios.

En el MIKES se ha investigado el dispositivo ilustrado en la figura 10, en el que la trazabilidad se obtiene por medio de la medición del movimiento dinámico del pistón usando un acelerómetro o un vibrómetro láser.

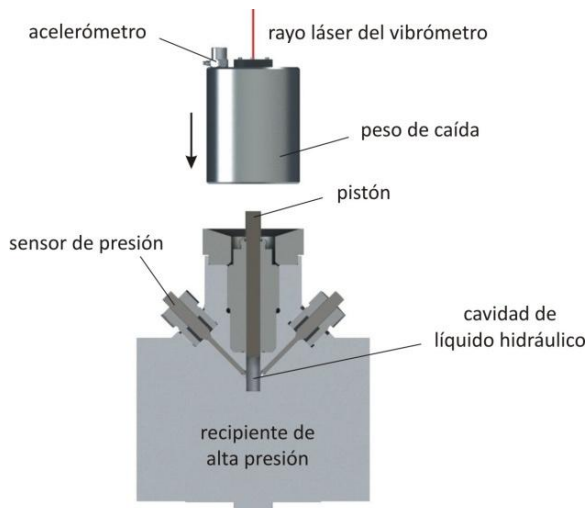


Fig. 10. Esquema de la calibración con presión dinámica en el MIKES.

El esquema en la figura 11 muestra el dispositivo que se ha desarrollado en el PTB [12]. El rayo de un vibrómetro láser pasa a través de la cavidad del líquido hidráulico y es retro-reflejado. La presión dinámica afecta instantáneamente la densidad del líquido resultando en un cambio del índice de refracción, lo que implica que el vibrómetro láser detecta una variación de desplazamiento. Por medio de una calibración estática para determinar la relación entre presión e índice de refracción, este procedimiento óptico ofrece un método primario para dar trazabilidad a la presión dinámica.

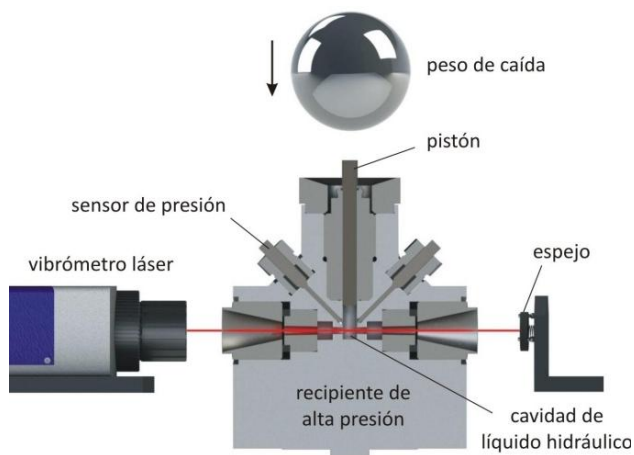


Fig. 11. Esquema de la calibración con presión dinámica en el PTB.

2.3. Par torsional dinámico (WP 3)

En el tercer paquete de trabajo participaron sólo el ČMI (República Checa) y el PTB. El instituto alemán tuvo la coordinación y elaboró la mayor parte de las actividades.

El trabajo se ha focalizado en la investigación de métodos y procedimientos para la calibración con par torsional sinusoidal. Por ello el PTB ha desarrollado un dispositivo con un excitador rotatorio para excitar vibraciones hasta 500 Hz y un rango máximo de 20 N·m (figura 12).

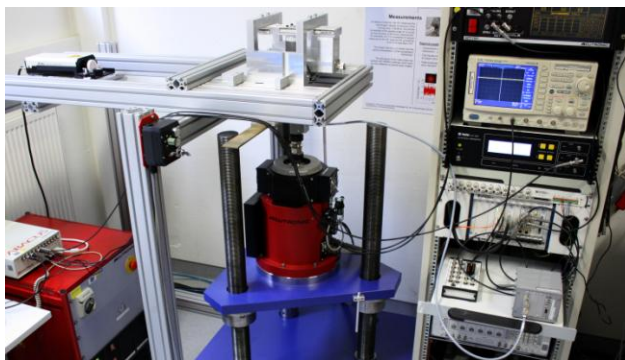


Fig. 12. Dispositivo para la calibración con par torsional dinámico en el PTB.

Se realiza la trazabilidad dinámica con un método primario de la misma forma que se ha explicado anteriormente para la fuerza sinusoidal, aplicando la segunda ley de Newton para rotación, en la cual el torque se define como el producto del momento de inercia y la aceleración angular.

El transductor de par torsional bajo calibración está acoplado al excitador rotatorio (abajo) y al momento de inercia (arriba) por pinzas de tensión. Las aceleraciones angulares de ambos lados se miden por medio de un vibrómetro láser para rotación y mediante un sensor de aceleración angular incorporado en el excitador.

De forma similar a los procedimientos en fuerza dinámica, la modelación del dispositivo rotatorio y del transductor de par torsional está hecho por un correspondiente sistema de masa-resorte-amortiguador en forma rotatoria [13]. Para determinar los parámetros de los distintos componentes mecánicos que están incluidos en este modelo, se han desarrollado tres nuevos aparatos dedicados a la medición del momento de inercia, de la rigidez y la amortiguación rotatoria [14, 15].

2.4. Amplificadores (WP 4)

En este paquete de trabajo participaron los institutos PTB (coordinación) y NPL.

En general, es requerido conocer el comportamiento dinámico de los distintos componentes eléctricos de la cadena de medición. Suponiendo un rango mínimo de 10 kHz que se desea para la medición dinámica de las magnitudes mecánicas consideradas, las instrumentaciones típicas pueden presentar una respuesta en frecuencia que no se debe despreciar. Las actividades en este paquete se han concentrado en la caracterización dinámica de los siguientes componentes.

- A. Amplificadores de puente para los sensores resistivos (con galgas extensiométricas)
- B. Amplificadores de carga para los sensores piezoeléctricos.

Para la calibración dinámica de los amplificadores de puente, ambos institutos desarrollaron su propio patrón dinámico que es capaz de proporcionar una señal de referencia adecuada.

El principio de funcionamiento del patrón dinámico del PTB está ilustrado en el esquema simplificado de la figura 13. Al igual que un transductor con galgas extensiométricas, el instrumento proporciona una señal de salida ratiométrica V_p con respecto de la tensión de alimentación del puente V_a y es capaz de generar señales dinámicas arbitrarias desde cero a más de 10 kHz usando dos MDAC (convertidor digital-analógico multiplicador). Información más detallada sobre este patrón se encuentra en [16, 17].

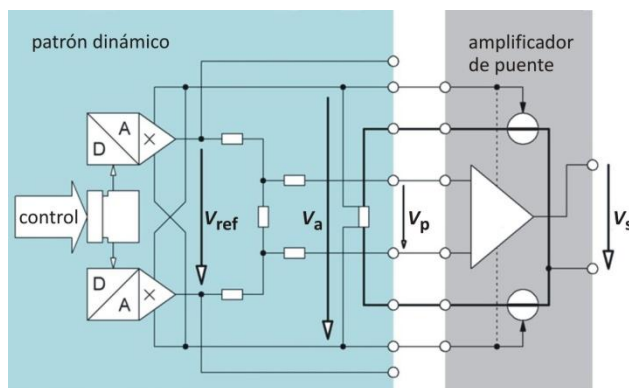


Fig. 13. Esquema del patrón dinámico del PTB para la calibración de amplificadores de puente.

El ejemplo de la figura 14 presenta el resultado de una calibración dinámica de un amplificador de puente (Dewetron Bridge B) mostrando su respuesta en frecuencia (amplitud y fase).

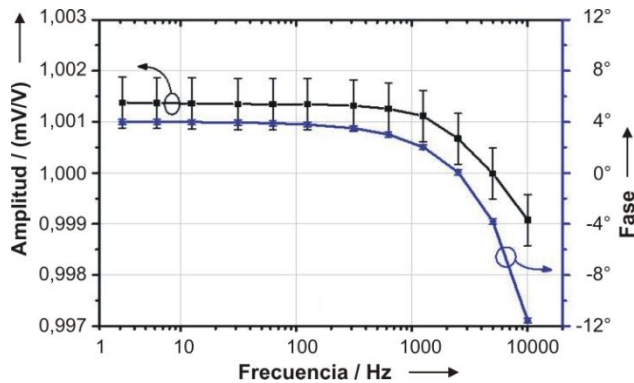


Fig. 14. Respuesta en frecuencia (amplitud y fase) de un amplificador de puente.

Investigaciones recientes acerca de la calibración de los amplificadores de carga han demostrado que errores significativos pueden ocurrir en altas frecuencias por causa de la diferencia de impedancias del sensor piezoeléctrico bajo calibración y del patrón de carga [18].

2.5. Matemática y estadística (WP 5)

Cuatro institutos nacionales participaron en este paquete de trabajo interdisciplinario: PTB, NPL, LNE y INRIM (Italia). El paquete fue dirigido por el PTB y el NPL, dependiendo de las tareas.

Los trabajos anteriores [19–21] acerca de la calibración de acelerómetros ya prepararon el camino a seguir para el procedimiento propuesto de la calibración dinámica basada en modelos, que se quiere aplicar a las magnitudes mecánicas de este proyecto.

Los trabajos actuales han dado soporte a los cuatro paquetes técnicos WP 1–4 para analizar los datos, modelar los sistemas mecánicos, identificar los parámetros y determinar la incertidumbre de la medición dinámica. Varios estudios con el enfoque matemático han sido elaborados, por ejemplo [22–25], también tratando la descripción matemática, los procedimientos de identificación, los métodos de ajuste, el análisis estadístico, la filtración o la deconvolución de datos [26].

Las figuras 15 y 16 muestran dos ejemplos de la colaboración en el tema fuerzas de choque. En el contexto de la identificación de los parámetros del transductor de fuerza, el primer ejemplo compara la señal de fuerza medida con las respuestas calculadas usando tres modelos de diferentes grados de libertad. El segundo ejemplo visualiza un análisis espectral de las vibraciones excitadas mediante un choque para elaborar los modelos adecuados.

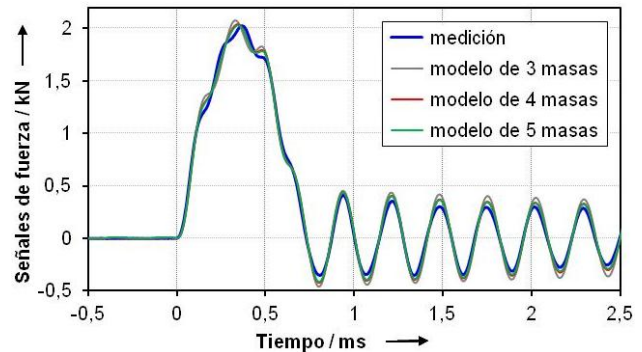


Fig. 15. Comparación de respuestas de choque.

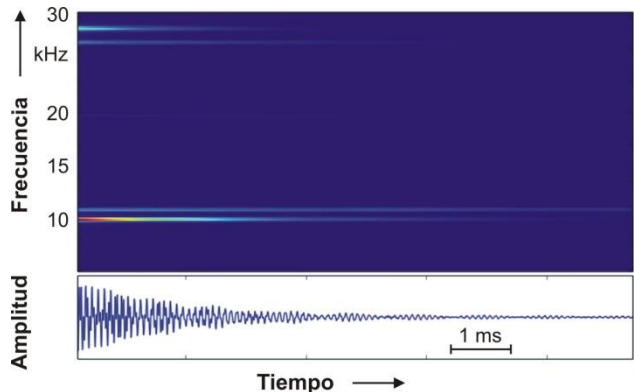


Fig. 16. Espectrograma de vibraciones excitadas.

2.6. Impacto (WP 6)

La disseminación de los resultados elaborados tiene mucha importancia para el EMRP, por ello se abrió un propio paquete de trabajo liderado por el LNE.

Los trabajos se han presentado en conferencias de metrología, en particular las de IMEKO y de *Workshop on Analysis of Dynamic Measurements*, revistas científicas, informes, capacitaciones y cursos. Además, la participación en comités y grupos de trabajo, por ejemplo [27, 28], ya ha aportado avances para elaborar futuras normas en la medición dinámica de las magnitudes mecánicas.

La página web del proyecto [29] y los repositorios web del EMRP y de las conferencias ofrecen un acceso libre y gratuito a la mayor parte de los trabajos.

3. CONCLUSIONES

Gracias al apoyo del programa EMRP de la Unión Europea, el proyecto de investigación presentado ha logrado grandes avances en la medición dinámica de las tres magnitudes fuerza, presión y par torsional.

Por primera vez en este campo de metrología, se han realizado trabajos conjuntos de investigación a nivel internacional sobre medición dinámica. Se han desarrollado nuevos dispositivos y procedimientos para la calibración dinámica con métodos primarios de trazabilidad en varios institutos nacionales, que son requisitos fundamentales para futuras calibraciones dinámicas. También se han realizado las primeras comparaciones en fuerza dinámica y presión dinámica. Para poder comprender el comportamiento dinámico se ha propuesto en este proyecto el método de la calibración dinámica basada en modelos.

Los trabajos han dado un gran impulso a la comunidad metroológica Europea para seguir en este camino comenzado, que al fin resultarán en normas y directrices específicas que difundan los procedimientos dinámicos a los usuarios industriales.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue apoyado por el programa EMRP de la Unión Europea. El EMRP está financiado por los países de EURAMET participantes en el EMRP conjuntamente con la UE.

REFERENCIAS

- [1] C. Bartoli et al., "Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: objectives and first results of this European project", *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, vol. 3, pág. 127–135, 2012.
- [2] C. Schlegel et al., "Traceable periodic force measurement", *Metrologia*, vol. 49, pág. 224–235, 2012.
- [3] N. Medina, J. L. Robles, J. de Vicente, "Realization of sinusoidal forces at CEM", en *Memorias de IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference*, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [4] Vocabulario internacional de metrología (VIM), 3ª edición en español, CEM, 2012.
- [5] M. Kobusch, L. Klaus, T. Bruns, "Model-based analysis of the dynamic behaviour of a 250 kN shock force calibration device", *XX IMEKO World Congress*, Busan, República de Corea, 2012.
- [6] M. Kobusch, "Influence of mounting torque on stiffness and damping parameters of the dynamic model of a 250 kN shock force calibration device", *7th Workshop on Analysis of Dyn. Meas.*, Paris, Francia, 2012.
- [7] M. Kobusch, S. Eichstädt, L. Klaus, T. Bruns, "Investigations for the model-based dynamic calibration of force transducer by using shock forces", *IMEKO TC3, TC5 and TC22 Int. Conf.*, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [8] M. Kobusch, S. Eichstädt, L. Klaus, T. Bruns, "Analysis of shock force measurements for the model-based dynamic calibration", *8th Workshop on Analysis of Dyn. Meas.*, Turin, Italia, 2014.
- [9] M. Kobusch, A. Link, A. Buss, T. Bruns, "Comparison of shock and sine force calibration methods", *IMEKO TC3, TC16 and TC22 Int. Conf.*, Mérida, México, 2007.
- [10] S. Downes, A. Knott, I. Robinson, "Determination of pressure transducer sensitivity to high frequency vibration", *IMEKO TC3, TC5 and TC22 Int. Conf.*, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [11] S. Downes, A. Knott, I. Robinson, "Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors", *Hopkinson Centenary Conference*, Sep. 2014, publicación prevista en *Philosophical Transactions A*.
- [12] T. Bruns, M. Kobusch, E. Franke, "Linking dynamic to static pressure by laser interferometry", *Metrologia*, vol. 50, pág. 580–585, 2013.
- [13] L. Klaus, B. Arendacká, M. Kobusch, T. Bruns, "Model parameter identification from measurement data for dynamic torque calibration", *IMEKO TC3, TC5 and TC22 Int. Conf.*, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [14] L. Klaus, T. Bruns, M. Kobusch, "Modelling of a dynamic torque calibration device and determination of model parameters", *ACTA IMEKO*, vol. 3 (2), pág. 14–18, 2014.

- [15] L. Klaus, M. Kobusch, "Experimental method for the non-contact measurement of rotational damping", IMEKO TC3, TC5 and TC22 Int. Conf., Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [16] M. F. Beug, H. Moser, G. Ramm, "Dynamic bridge standard for strain gauge bridge amplifier calibration", Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), pág. 568–569, 2012.
- [17] C. Bartoli et al., "Dynamic calibration of force, torque and pressure sensors", IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2014.
- [18] H. Volkers, T. Bruns, "The influence of source impedance on charge amplifiers", ACTA IMEKO, vol. 2 (2), pág. 56–60, 2013.
- [19] A. Link et al., "Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation", Meas. Sci. Technol., vol. 17, pág. 1888–1894, 2006.
- [20] A. Link et al., "Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation", Measurement, vol. 40, pág. 928–935, 2007.
- [21] C. Elster, A. Link, "Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system", Metrologia, vol. 45, pág. 464–473, 2008.
- [22] C. Matthews et al., "Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensors", Metrologia, vol. 51, pág. 326–338, 2014.
- [23] A. Malengo, F. Pennecchi, "A weighted total least-squares algorithm for any fitting model with correlated variables", Metrologia, vol. 50, pág. 654–662, 2013.
- [24] B. Arendacká et al., "Linear mixed models: GUM and beyond", Meas. Sci. Rev., vol. 14 (2), pág. 52–61, 2014.
- [25] S. Eichstädt, A. Link, P. Harris, C. Elster, "Efficient implementation of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation in dynamic measurements", Metrologia, vol. 49, pág. 401–410, 2012.
- [26] S. Eichstädt, C. Elster, T.J. Esward, J.P. Hessling, "Deconvolution filters for the analysis of dynamic measurement processes: a tutorial", Metrologia, vol. 47, pág. 522–533, 2010.
- [27] T. Eswards, "Current and future challenges in modelling and simulation of measuring systems", VDI/VDE-GMA FA 1.10 "Grundlagen der Messsysteme", Frankfurt, Alemania, 2012.
- [28] A. Schäfer, "Challenges in dynamic torque and force measurement with special regard to industrial demands"; BIPM Workshop on Challenges in Metrology for Dyn. Meas., 2012.
- [29] <http://projects.ptb.de/emrp/279.html>.