

## SISTEMA DE REFERENCIA PARA LA MEDICIÓN DE PAR TORSIONAL DE BAJO ALCANCE (0,1 Nm A 10 Nm).

Ramírez Ahedo D., \*Peschel D., Subias Juárez J. F., Torres Guzmán J. C.

Centro Nacional de Metrología, CENAM

km 4,5 carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, México

Teléfono (52) 442 211 0572, fax (52) 442 211 0578

Dirección de correo electrónico: [dramirez@cenam.mx](mailto:dramirez@cenam.mx)

\*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Alemania

Teléfono (49) 531 592 1130, fax (49) 531 592 69 1130

**Resumen:** El trabajo que se describe en el presente documento, es parte de las actividades encomendadas al Centro Nacional de Metrología (CENAM) apoyando al sector industrial mediante el desarrollo y el establecimiento de un patrón de par torsional en alcances de medición menores a los existentes, con el fin de diseminar su exactitud. Aquí se presenta una descripción del sistema de referencia de par torsional de bajo alcance diseñado, construido y puesto en operación en el CENAM en el alcance de 0,1 N·m a 10 N·m mediante el uso de transductores patrón calibrados y, que en conjunto con los métodos de calibración adecuados permitan una diseminación correcta de la magnitud.

### 1. INTRODUCCIÓN

La medición de potencia en motores eléctricos de bajos alcances, las pruebas en ensambles en piezas automotrices para valores de torsión muy “pequeña”, el apriete de las tapas en los frascos de tabletas medicinales, el par de torsión en la salida de un eje conectado a rotores en máquinas son algunos ejemplos de aplicación en los cuales el par torsional es usado para la realización de pruebas, experimentación e investigación.

De esta forma a través del tiempo, la medición de esta magnitud ha ampliado la demanda en los servicios de calibración en alcances bajos que van desde 0,1 N·m a 10 N·m.

Para estas necesidades de medición, el CENAM consideró conveniente desarrollar un sistema de referencia que facilitara la trazabilidad a instrumentos patrón para medición de par torsional de bajo alcance con incertidumbres relativas mejores o iguales a  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ .

Así pues, el objetivo del proyecto fue desarrollar e implementar un sistema de transferencia de par torsional de bajo alcance de medición en el intervalo de 0,1 N·m a 10 N·m, con la más alta exactitud en el ámbito nacional para la diseminación de esta magnitud.

### 2. DESARROLLO

Debido a la demanda de servicios de medición, calibración o pruebas que fueron registrados en el

CENAM, se consideró conveniente el desarrollo de un patrón de par torsional con alcances de medición diferentes a los que se tenía anteriormente con el sistema de transferencia de par torsional de 1 N·m a 2 kN·m (PNTPT-2kN·m) [1]. Para alcances menores a 1 N·m, el CENAM realizaba servicios de medición sub utilizando un transductor patrón de 10 N·m caracterizado, con la inconveniencia de que su incertidumbre aumentaba en valores menores al 10% del alcance de medición del transductor. Empero, la necesidad fue aún más evidente, ya que al utilizar el sistema de transferencia (PNTPT-2kN·m) y debido a que las dimensiones físicas de los transductores de bajo alcance eran mucho menores y presentan menor rigidez a deformación, hacían más sensible la medición y más grandes los errores generados por componentes parásitas siempre presentes en cualquier medición. Tales componentes pueden influir de manera significativa en la calibración de un instrumento de medición de par torsional [2].

Lo anterior sirvió de base para buscar alternativas con el fin de propagar de forma adecuada la exactitud de la magnitud a instrumentos de medición de par torsional como “torquímetros”, transductores, herramientas de torsión, patrones de medición, etcétera.

Para el desarrollo del presente proyecto se estableció en primer término los alcances del patrón, los cuales se resumen en la tabla 1 que a continuación se presentan.

Alcance de medición:	de 0,1 N·m a 10 N·m
Equipos a calibrar:	Transductores patrón y "torquímetros".
Modo de aplicación del Par de Torsión:	Par torsional en sentido horario, contra horario y alternativo.
Forma de aplicación del Par de Torsión:	Ascendente y descendente.
Incertidumbre relativa ( $k=2$ )	$5 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 1.** Requerimientos para el sistema de referencia de par torsional.

## 2.1 Instrumento Bajo Calibración

Se dice que una barra (elemento cilíndrico elástico) es sometido a torsión (figura 1) cuando en cada uno de sus extremos es aplicado un par torsional, el cual es equilibrado por su resistencia interna [3].

Si a esta barra o elemento sometida a torsión, se le mide su deformación (manteniéndola dentro de sus límites elásticos) por cualquier método, ya sea óptico, mecánico o eléctrico, y asignamos una correspondencia de la deformación observada con el par torsional aplicado, entonces el sistema completo es un instrumento de medición de par torsional e incluye:

- i) El elemento elástico;
- ii) El sistema de medición de la deformación (instrumento analógico o digital);
- iii) El dispositivo indicador.



**Figura 1.** Ejemplo de un instrumento de medición de par torsional e indicador digital.

Entre los instrumentos de medición comunes se encuentran los transductores de par torsional y las herramientas de medición de par torsional comúnmente conocidos como "torquímetros" [3].

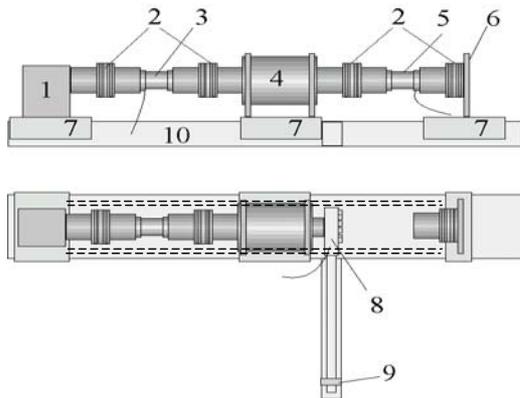
## 2.2 El Sistema de Medición

Así pues, la forma de generar el par torsional, con el objetivo de aplicarlo y medir en un instrumento su respuesta para establecer una relación con los valores del par torsional aplicado, puede ser efectuado por dos métodos que a continuación se comentan: a) métodos primarios [4] y b) método de comparación directa con un sistema de transferencia y transductor. En el caso b) la calibración de instrumentos por el método de comparación directa nos genera algunas bondades, las cuales surgieron de las necesidades se listan a continuación:

1. Costos del sistema de calibración;
2. Sistema automático o semi automático que reduce el tiempo de una calibración;
3. Posibilidad de calibración para diferentes instrumentos de medición;
4. Uso comercial de elementos que reduce el costo de trabajo requerido para la fabricación y construcción del sistema.

El sistema de referencia para la medición del par torsional incluye los siguientes sistemas que pueden observarse en esquema de la figura 2:

- a) Un sistema para generar el par torsional (un motor y un reductor de velocidad);
- b) Un conjunto de acoplamiento hidráulico y flexible para minimizar los efectos de componentes parásitas;
- c) Un par de transductores patrón (utilizados uno a la vez) en el alcance de medición de 2 N·m y de 10 N·m;
- d) Un cojinete neumático utilizado como sistema de absorción de un momento de flexión para calibración de herramientas de medición de par torsional o "torquímetros";
- e) Una estructura soporte de alineación con un sistema de guías y carros móviles;
- f) Un sistema de contra reacción para transductores o para "torquímetros".



**Figura 2.** Principio del sistema de medición de par torsional para calibración de transductores y herramientas de medición de par torsional: a) una vista frontal con un transductor para su calibración; b) una vista superior de un "torquímetro" bajo prueba.

**Descripción:** 1. motor y reductor de velocidad, 2. coples flexibles, 3. transductor de referencia, 4. cojinete neumático, 5. transductor bajo prueba, 6.- contra reacción, 7. sistema de alineación con guías y carros móviles, 8. herramienta de medición de par torsional, 9. soporte de herramienta, 10. estructura soporte.

### 2.3 El Principio de Medición

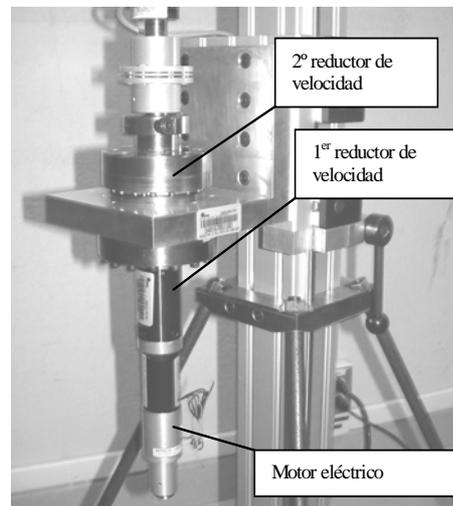
De acuerdo con lo observado en la figura 2, se aprecian dos guías lineales en paralelo sobre una estructura soporte. Los componentes del sistema están montados en carros deslizables sobre las guías lineales por medio de placas de adaptación. Un sistema de conducción eléctrica (motor eléctrico) conectado con una unidad de engranaje permite un amplio intervalo de control de la velocidad angular requerida (la deformación del transductor bajo prueba puede ser mayor de 0,1° a 360° en el alcance nominal). El transductor de referencia es conectado en su eje de salida a un sistema de acoplamientos elástico y rígido. Debido al uso de acoplamientos hidráulicos, es posible el cambio de cualquier transductor o instrumento bajo calibración de forma casi inmediata. Los acoplamientos reducen la presencia de componentes parásitas como fuerzas laterales y momentos flexionantes permisibles en los instrumentos bajo calibración así como para los transductores de referencia. En el caso de herramientas de medición de par torsional, estas, son cargadas por fuerzas que actúan en el extremo de un brazo de palanca y, un elemento adicional, un cojinete neumático de fricción despreciable, que es usado para absorber todas las

fuerzas laterales y momentos flexionantes (parte 9 en la figura 2).

De acuerdo a lo anterior, en el sistema de referencia para la calibración de instrumentos de medición de par torsional es conveniente realizar la siguiente distinción en el campo de uso de esos instrumentos.

Caso 1: Calibración de transductores de par torsional bajo la aplicación de un par de torsión puro, sin fuerzas transversales.

Caso 2: Calibración de herramientas de medición de par torsional o "torquímetros" en el cual la magnitud es generada y transmitida a la herramienta de torsión a través de un momento de flexión sobre el brazo de palanca de la herramienta.



**Figura 3.** Subsistema para generación del par torsional.

### 2.4 Subsistema de Generación para el Par Torsional

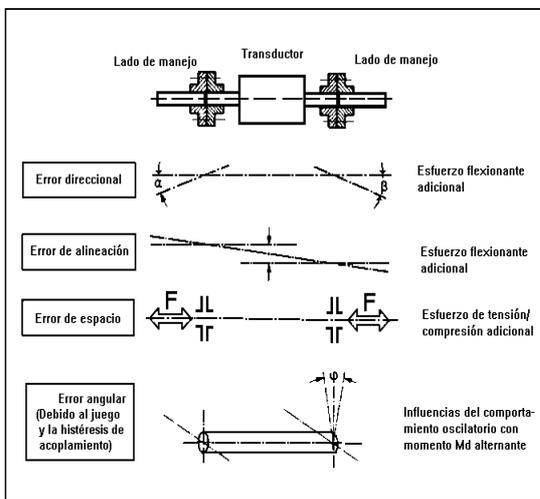
Este subsistema, como ya fue comentado anteriormente consiste de la combinación de un motor eléctrico y un reductor de velocidad. Como la calibración de un instrumento de medición de par torsional se realiza en modo estático por equilibrio entre la lectura observada en el patrón y la lectura del instrumento bajo calibración, se determinó por conveniencia y estabilidad que la velocidad máxima del sistema fuera menor o igual a 0,5 rpm (revoluciones por minuto).

Los factores demandados por las necesidades de calibración hicieron necesario el uso de un motor

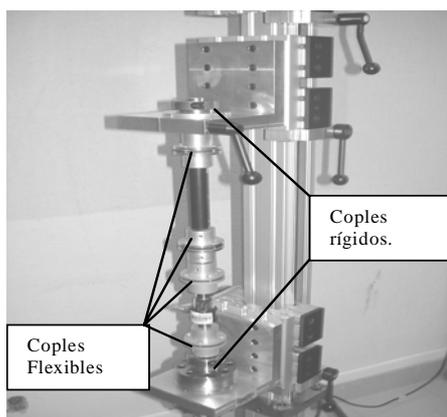
eléctrico de bajo momento inercial para generar un par de torsión de 0,1 N·m (par torsional nominal del motor eléctrico de 0,082 N·m) y de un reductor de velocidad (o caja de engranes) que amplifica la fuerza de torsión.

**2.5 Sistema de acoplamiento.**

Los instrumentos de medición de alta exactitud de par torsional pueden ser instalados en cualquier posición. En la práctica, las magnitudes de fuerza y par torsional tienen siempre tres componentes con tres grados de libertad cada una (figura 3), las cuales están presentes en cualquier calibración.



**Figura 3.** Errores en la instalación de instrumentos de medición de par torsional.



**Figura 4.** Sistema de acoplamiento en el patrón de referencia de par torsional.

El uso de las conexiones flexibles sirve principalmente para compensar desalineamientos, y

en consecuencia proteger los instrumentos de medición de par torsional contra fuerzas o cargas no deseadas. En situaciones reales de instalación, desalineamientos del eje (mayores a ±1 mm), espaciamientos y errores angulares son a menudo inevitables. Tales errores se manifiestan causando momentos flexionantes en los instrumentos de medición de par, y bajo condiciones de altas velocidades de rotación pueden causar daño en el mismo.

**2.6 Transductores de Par Torsional.**

Para la disseminación de la magnitud, CENAM cuenta con 2 transductores de par torsional en los alcances e incertidumbres que se indican en la tabla 2. La respuesta de los transductores es por medio de láminas eléctricas medidores de la deformación o "strain gauges" [3], por su notación comúnmente utilizada en Inglés y es obtenida en un indicador digital con resolución de  $2 \cdot 10^{-6}$  dígitos. La figura 1 muestra un transductor con su indicador digital.

Designación	Alcance de Medición		Incertidumbre de medición ( $k = 2$ )
	Min	Max	
Transductor de 2 N·m	0,1 N·m	2 N·m	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$
Transductor de 10 N·m	1 N·m	10 N·m	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 2.** Transductores de referencia para la medición de par torsional.

**2.7 Cojinete Neumático.**

Como se comentó previamente, el cojinete neumático es utilizado principalmente para absorber las fuerzas radiales que se generen en la calibración de una herramienta de medición de par torsional. El principio de funcionamiento del cojinete neumático consiste en un estator y un rotor. El sistema opera con suministro de aire a presión (entre 4 y 6 bar). Tan pronto como se ha suministrado aire, y el peso o carga adherida al cojinete permanece dentro de límites aceptables, no habrá contacto mecánico entre el rotor y el estator.

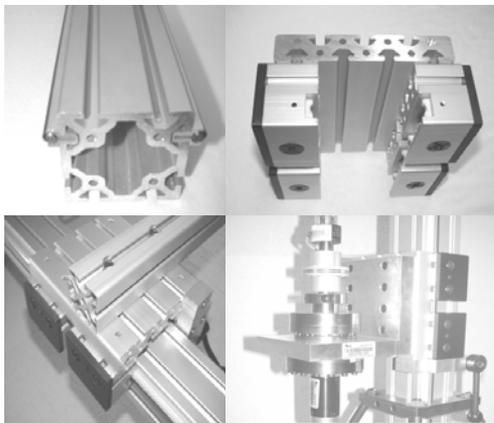
La fricción puede entonces mantenerse dentro de valores cercanos a  $20 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ , si el suministro de aire se mantiene libre de polvo (menor a  $0,1 \mu\text{m}$ ), aceites y humedad relativamente baja. Para tal efecto en CENAM se instaló un purificador de aire, un secador y un filtro. Ver en figura 4 fotografía del cojinete.



**Figura 4.** Cojinete neumático.

**2.8. Estructura Soporte**

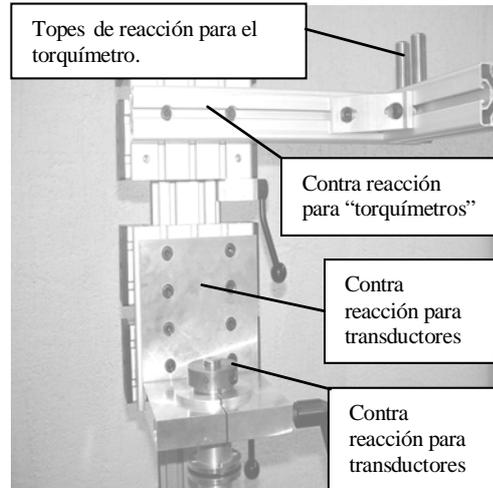
La estructura soporte o subsistema de alineación esta formado básicamente por un perfil de sección transversal angular, un perfil de sección transversal cuadrada, un juego de guías lineales y un juego de carros de desplazamiento lineal con bloqueo donde son ensamblados el cojinete neumático, el sistema de contra reacción y el sistema soporte del motor reductor. Este subsistema de alineación ayuda a mantener el eje de giro del par generado en todo lo largo del eje axial durante la trayectoria de la transmisión del par.



**Figura 5.** Estructura soporte de alineación formado por guías lineales, carros lineales y placas de montaje.

**2.9 Sistema de Contra Reacción**

La contra reacción para los transductores bajo prueba es del tipo abrazadera, y la contra reacción para las herramientas de medición de par torsional ("torquímetro") es del tipo semi-ejes de tope.



**Figura 6.** Sistema de contra reacción.

En el primer tipo de contra reacción, el perfil soporte se encarga de ejercer el suficiente par de fricción (mediante un tornillo) a un buje ranurado, y este a su vez a otro buje (sin ranura) dentro del cual, se encuentra alojado un acoplamiento hidráulico (ETP-20) que es el que ejerce el último par de fricción sobre el eje del transductor bajo calibración.

En el segundo tipo la contra reacción se realiza directamente sobre el brazo de palanca del "torquímetro" mediante topes.

**3. RESULTADOS**

Como resultado del proyecto se tiene un patrón (desarrollado completamente en el CENAM) para diseminar la magnitud en los alcances de medición de 0,1 N·m a 10 N·m (figura 7). Se pueden realizar calibraciones en el alcance establecido a instrumentos de medición de par torsional tales como transductores y herramientas de medición de par torsional comúnmente llamadas "torquímetro" de conformidad con las normas que para calibración de par torsional se encuentran disponibles y que son más utilizadas a nivel internacional, p. e. ISO-6789:2003, EA-10/14:2000/07; DIN 51 309:1998-02.

**4. DISCUSIÓN**

La División de Fuerza y Presión ha tomado ya desde hace algún tiempo la decisión de desarrollar patrones de medición para generar y ampliar los conocimientos en este campo. No es suficiente el desarrollo de un patrón para argumentar valores absolutos en la diseminación de la magnitud y su incertidumbre.

La selección apropiada de un transductor de par torsional como patrón de referencia y un dispositivo indicador solamente es una referencia de la funcionalidad adecuada. Pruebas adicionales de comparación para verificar, por ejemplo, la estabilidad de largo plazo entre los diferentes transductores, cuyos valores puedan traslaparse y compararse son de gran importancia. Esas pruebas incluyen verificar:

- La caracterización del sistema en par torsional en sentido horario y contra horario;
- La reproducibilidad en las características del montaje del instrumento bajo calibración;
- La estabilidad de cero en el transductor patrón y;
- El conocimiento del valor de fluencia o "creep" en la respuesta del transductor patrón.



**Figura 7.** Sistema de referencia para medición de par torsional de bajo alcance (0,1 N·m a 10 N·m).

Estas pruebas además de realizarse como parte de la caracterización del sistema para determinar su mejor capacidad de medición, han sido registradas como parte de un programa de mantenimiento metrológico para el aseguramiento de la calidad de las mediciones dentro de procedimientos internos en el laboratorio de par torsional del CENAM.

## 5. CONCLUSIONES

Se desarrolló una nueva facilidad para la medición de par torsional en alcances de medición de 0,1 N·m a 10 N·m con incertidumbres relativas menores a  $5 \cdot 10^{-4}$  ( $k=2$ ). Esto subsana la creciente necesidad de medición de esta magnitud en los alcances bajos.

El sistema presentado ofrece la posibilidad de calibración de los diferentes instrumentos de medición de par torsional que actualmente existen en el mercado nacional debido a la versatilidad que este sistema de referencia ofrece (calibración de transductores y de herramientas de medición de par torsional) de acuerdo con la normatividad solicitada.

Este trabajo presenta el diseño conceptual de detalle y construcción del patrón; su aplicación y caracterización son necesarias y se realizarán en el futuro inmediato.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al laboratorio nacional de metrología de Alemania (Physikalische Technische Bundesanstalt) especialmente a los colegas del grupo de Par Torsional por el apoyo brindado para la realización del presente proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] *Ramírez Ahedo D., Torres Guzmán J. C., Peschel D.*, Diseño y Construcción de un Sistema de Medición de Par Torsional en CENAM (México). Memorias del Congreso Metrología '96. La Habana, Cuba. 1996.
- [2] *Peschel, D.*: Mechanical Parasitic Components and Their Influence on the Calibration of Torque Transducers. 13th International Conference on Force and Mass Measurement, Helsinki (Finland), 10.-14. May 1993; 1993.
- [3] *Notas del Curso "Metrología de Par Torsional"*, Centro Nacional de Metrología, 2004.
- [4] *Ramírez D., Torres J.*, Diseño y Construcción del Patrón Primario Nacional de Par Torsional en México. Simposio de Metrología CENAM. 2001.