

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PATRÓN PRIMARIO NACIONAL DE PAR TORSIONAL EN MÉXICO

Ramírez Ahedo D. A., Torres Guzmán J. C.
 Centro Nacional de Metrología

km 4,5 carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, México
 Tel. (52) 4 211 0500, fax (52) 4 211 0578, e-mail dramirez @cenam.mx

Resumen: La medición de Par Torsional en México tiene un uso generalizado, especialmente en la industria automotriz. En años recientes, con el establecimiento del sistema de referencia nacional para medición de Par Torsional, se ha incrementado el número de laboratorios secundarios que dan apoyo en esta magnitud. La exigencia de los laboratorios ha impulsado el diseño y construcción de un patrón nacional primario que permita niveles de incertidumbre más bajos.

Como resultado de un proyecto interno del Centro Nacional de Metrología (CENAM, México) se ha implantado el patrón primario nacional de Par Torsional con un alcance de hasta 2 kN.m y con incertidumbre relativa expandida menor a $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ de la lectura (con $k=2$). En este artículo se presentan los detalles del patrón y las variables de influencia en el diseño.

INTRODUCCION

Un Par Torsional es usado para el apriete de los tornillos de rines en llantas de automóviles o para abrir una tapa rosca de un refresco; también se utiliza con la exactitud requerida para el apriete de las punterías en un motor. Durante los últimos años, la medición de la magnitud de Par Torsional se ha generalizado en la industria nacional, en tal forma que ha permitido el aumento de laboratorios acreditados con intervalos de medición que especifican cada vez una mejor clase de exactitud.

El Par Torsional – una fuerza aplicada en forma perpendicular a una distancia dada de un eje central conocido – es un parámetro mecánico importante. Aunque el Par Torsional difiere en la forma de aplicación de una fuerza axial (tensión o compresión), con el Par Torsional es posible generar fuerzas de tensión o compresión como en el caso del “apriete” de un ensamble con un tornillo. La cantidad de Par Torsional para generar “apriete” es crítico en la pieza ensamblada. Cuando la pieza es apretada con una tensión adecuada su trabajo es óptimo y el ensamble resistirá la fuerza deseada. Menos tensión (menos Par Torsional) y en un ambiente de vibración se puede causar el aflojamiento del ensamble; por el contrario más tensión (más Par Torsional) produce sobre “apriete” en la rosca, lo que puede dar lugar a deformación de la misma y en su caso una posible fractura del perno o del ensamble. [1].

El desarrollo de un patrón de medición de alta exactitud se hizo necesario para garantizar la trazabilidad adecuada de los patrones de referencia. En este documento se describen los principales parámetros en la medición de Par Torsional y su incertidumbre, así como algunos criterios adoptados en el diseño del patrón primario nacional.

NECESIDADES DE MEDICIÓN DE PAR TORSIONAL EN MÉXICO

Desde el establecimiento del patrón nacional de referencia de Par Torsional en CENAM en 1996 [2], la demanda y expectativas de calibración de Par Torsional se han incrementado en un número significativo. Los intervalos de medición se han mantenido, sin embargo la necesidad de mejores clases de exactitud para los laboratorios secundarios y la industria, han generado nuevas expectativas que ponen en relieve el diseño de un patrón primario para la realización de esta magnitud.

Por esto, se desarrolló un proyecto cuyo objetivo fue crear un sistema de calibración de la más alta exactitud en el ámbito nacional, el cual sería utilizado para la calibración de patrones de transferencia para diseminar la exactitud de la magnitud de Par Torsional a la industria nacional a través de la red de laboratorios acreditados.

La siguiente tabla presenta algunas especificaciones del sistema de Par Torsional, las cuales son el resultado de combinar las necesidades y experiencia recibidas de solicitudes de calibración, reuniones en el Sistema Nacional de Calibraciones (SNC), especificaciones de fabricantes y características de los patrones primarios de otros países.

Alcance de medición	De 1 N.m a 2 kN.m
Sistema de carga	Brazo de palanca
Incertidumbre expandida	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$ relativa
Sentido de aplicación del par	Horario y antihorario
Forma de aplicación del par	Ascenso y descenso

Tabla 1. Especificaciones del sistema.

La especificación de incertidumbre relativa expandida menor o igual a $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ de la lectura, es para asegurar la calibración de transductores de alta exactitud, que cuentan con incertidumbres relativas expandidas de alrededor de $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ de la lectura [3].

OPCIONES PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para la selección del mejor sistema de medición primario de Par Torsional se estudiaron varias opciones para asegurar que el diseño final fuera acorde a las necesidades de medición en México [4]. Algunos de los métodos estudiados son:

1. Método directo sin apoyo. Consiste en el uso de un brazo de palanca y masas aplicados directamente sobre el transductor a ser calibrado. Este diseño elimina la fricción que se presenta en el punto de apoyo. Tales sistemas son muy utilizados en laboratorios secundarios así como por fabricantes y empresas. La principal desventaja es que la aplicación del Par Torsional va acompañada de fuerzas transversales y momentos flexionantes ocasionados por el peso del sistema de calibración, lo que introduce un error en la indicación del equipo bajo calibración.
2. Método directo usando un transductor de fuerza, en el extremo del brazo de palanca, y un apoyo. El método está limitado por la incertidumbre del transductor de fuerza (normalmente entre $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ y $\pm 1 \cdot 10^{-4}$, relativa a la lectura) y la suma de las incertidumbres de las variables de influencia.
3. Método directo con brazo de palanca y masas, utilizando un apoyo. Este método se presenta en la figura 1 y su modelo matemático en la expresión 1. La principal restricción es la utilización del elemento de apoyo (cojinete), el cual puede incluir en la medición de Par Torsional una incertidumbre relativa desde $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ de la lectura (rodamiento de bolas) hasta un mínimo de $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ de la lectura (rodamiento de aire). Este es el mejor modelo de los tres.

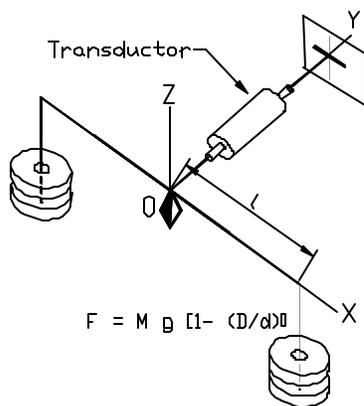


Figura 1. Definición de la magnitud de Par Torsional. Método primario.

MODELO MATEMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DEL PAR TORSIONAL APLICADO

El método 3 fue el seleccionado, este sistema de medición de Par Torsional esta formado por un brazo de palanca, masas y un apoyo. Un esquema del sistema de medición se muestra en la figura 1. La siguiente expresión matemática define el Par Torsional, fuerza resultante generada por la masa m (de densidad r_m) y la aceleración local de la gravedad (g_l),

$$T = \left\{ m \cdot g_l \left[1 - \frac{r_a}{r_m} \right] \cdot l \right\} - T_f \tag{1}$$

esta expresión incluye las correcciones a la fuerza aplicada por el empuje de las masas en el fluido (aire de densidad r_{aire}) y a la fricción T_f debida al elemento de apoyo O . Donde:

- T Par Torsional en Nm = kg m²/s²
- m masas aplicadas en kg
- g_l atracción gravitacional local en m/s²
- r_a densidad del aire en kg/m³
- r_m densidad de las masas en kg/m³
- l longitud del brazo de palanca utilizado en m
- T_f Par Torsional ocasionado por la fricción del elemento de apoyo en Nm.

La expresión puede reescribirse como:

$$T = F \cdot l - T_f \tag{2}$$

donde F es la fuerza efectiva, expresada como:

$$F = m \cdot g_l \cdot \left(1 - \frac{r_m}{r_a} \right) \tag{3}$$

MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Aplicando a la expresión 2 las reglas de la GUM [5] y realizando algunas simplificaciones, se obtiene la siguiente expresión para la incertidumbre en la realización de la magnitud:

$$\left[\frac{u(T)}{T} \right] \approx \left[\frac{u(F)}{F} \right] + \left[\frac{u(l)}{l} \right] + T^{-2} u^2(T_f) \tag{4}$$

La contribución de incertidumbre debida a la fuerza efectiva en la expresión 4, se obtiene al aplicar la expresión 3, sustituyendo la fuerza generada por las masas en la ley de propagación de incertidumbres:

$$\left(\frac{u(F)}{F}\right)^2 = \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{r_a}{r_m - r_a}\right)^2 \cdot \left\{ \left(\frac{u(r_a)}{r_a}\right)^2 + \left(\frac{u(r_m)}{r_m}\right)^2 \right\} \quad (5)$$

Se ha determinado que la incertidumbre relativa de la fuerza, de acuerdo a la última expresión, esta dentro del orden de 10^{-6} de la lectura. Las contribuciones de cada variable de influencia y la incertidumbre relativa de cada una de ellas se presentan a continuación.

Si $r_a = 1 \text{ kg m}^{-3}$ y $r_m \approx 800 \text{ kg m}^{-3}$

entonces $r_a/(r_a - r_m) \approx 1 \cdot 10^{-4}$

por lo que las contribuciones a la incertidumbre de r_a y r_m se mantienen dentro del orden de $1 \cdot 10^{-8}$, relativas a la lectura.

La contribución a la incertidumbre relativa debida a la gravedad local es de aproximadamente $1 \cdot 10^{-6}$ de la lectura, ya que esta magnitud es medida directamente en el lugar.

La incertidumbre en el valor de las masas utilizadas puede ser evaluada en el CENAM con incertidumbres relativas menores a $4 \cdot 10^{-6}$ de la lectura, dentro de los valores de las masas necesarias, aproximadamente $5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ en 50 kg.

Contribución de la Longitud

La siguiente expresión define la longitud del brazo de palanca incluyendo las posibles desviaciones para la aplicación real, como se muestra en la figura 2.

$$l = l_0 \cos \alpha \cos j \cdot (1 + b_T q) f(F) \quad (6)$$

l_0 es la longitud original del brazo de palanca medido (sin fuerza aplicada), α y j son los ángulos que se muestran en la figura 2, b_T es el coeficiente de expansión térmica del acero inoxidable, q es la diferencia de la temperatura de trabajo t y la temperatura de referencia t_0 y $f(F)$ es un coeficiente de deformación que depende de la fuerza aplicada y de la forma del brazo de palanca seleccionado (puede ser determinado experimentalmente o por cálculo).

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la expresión anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{u(l)}{l}\right)^2 = \left(\frac{u(l_0)}{l_0}\right)^2 + \left(\frac{u(f(F))}{f(F)}\right)^2 + u^2(\mathbf{a}) + u^2(\mathbf{j}) + \left(\frac{b_T q}{1 + b_T q}\right)^2 \cdot \left\{ \left(\frac{u(b_T)}{b_T}\right)^2 + \left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 \right\} \quad (7)$$

La exactitud de la medición de l_0 depende del patrón de medición (en el caso de medición con máquina de coordenadas, tiene una incertidumbre relativa expandida menor a $1 \cdot 10^{-6}$ de la lectura) y de la localización de la línea de acción de la fuerza en el brazo de palanca. En el diseño se utilizaron bandas metálicas con un espesor de 0,025 mm (instaladas con placas de fijación, ver figura 3), lo cual asegura incertidumbres relativas del orden de $u(l_0)/l_0 \sim 3 \cdot 10^{-6}$ de la lectura. Las demás variables, al aplicar sus correcciones y mantener un adecuado control, tienen un efecto despreciable en la medición y en la incertidumbre.

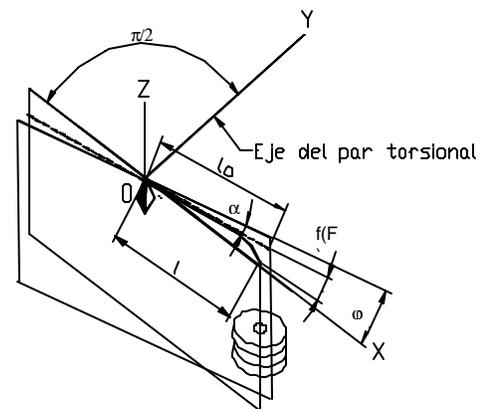


Figura 2. Definición geométrica de la longitud del brazo de palanca.

Contribución de la Fricción

De acuerdo al tipo de apoyo seleccionado, la fricción puede contribuir de manera significativa en la exactitud de la realización de la magnitud, así como en la incertidumbre de la medición. Los rodamientos comunes generan fricciones del orden de 0,1 Nm en pares aplicados de hasta 1 kN.m. En los baleros de aire, como el usado en CENAM, la fricción generada es del orden de 20 $\mu\text{N.m}$ de acuerdo con especificaciones de fabricantes (Kügler GmbH), así como a estudios realizados en algunos institutos de metrología [6] y confirmados experimentalmente en CENAM con procedimientos internos.

PATRÓN PRIMARIO NACIONAL

El patrón primario de Par Torsional está actualmente en la etapa de acondicionamiento y mejora. Tiene un alcance de medición de 1N.m a 2 kN.m, utilizando masas de 0,5 kg, 1kg, 2 de 2 kg, 5 kg, 10 kg, 2 de 20 kg y 3 de 50 kg; y una longitud del brazo de palanca de 1 m.

Los cálculos de la evaluación de la incertidumbre relativa expandida del patrón presentan valores menores a $2 \cdot 10^{-5}$ de la lectura, sin embargo la incertidumbre relativa expandida declarada del patrón es de $5 \cdot 10^{-5}$ de la lectura. Se prevé el establecimiento de mejores valores de incertidumbre después de desarrollar proyectos de caracterización y realizar comparaciones internacionales.

En la figura 3 se presenta un esquema del patrón primario nacional y algunos de los componentes del sistema de calibración.

Como puede observarse en la figura, las placas de carga pueden ser desplazadas horizontalmente para ajustar la longitud a un metro del eje central del balero de aire. El espesor de la banda metálica es de 0,025 mm (lámina de acero de alta resistencia, AISI 301-7CrNi). La evaluación de la deflexión del brazo de palanca en el alcance máximo de medición es de 0,25 mm/1 000 m. Como contra reacción al Par Torsional aplicado por el sistema brazo - masas, se usa un motor reductor electromecánico que permite mantener nivelado el brazo de palanca.

El sistema de guiado permite una exactitud de 40µm/m, sin embargo se incluye el uso de acoplamientos flexibles para corregir los posibles desalineamientos ocasionados en el sistema por el montaje. Estos sistemas de acoplamiento han sido estudiados [7] y se prefiere un sistema de acoplamiento con el siguiente orden: Brazo de palanca para aplicar el Par Torsional, acoplamiento rígido al brazo, acoplamiento flexible rígido al transductor bajo calibración y acoplamiento rígido flexible al motor reductor electromecánico.

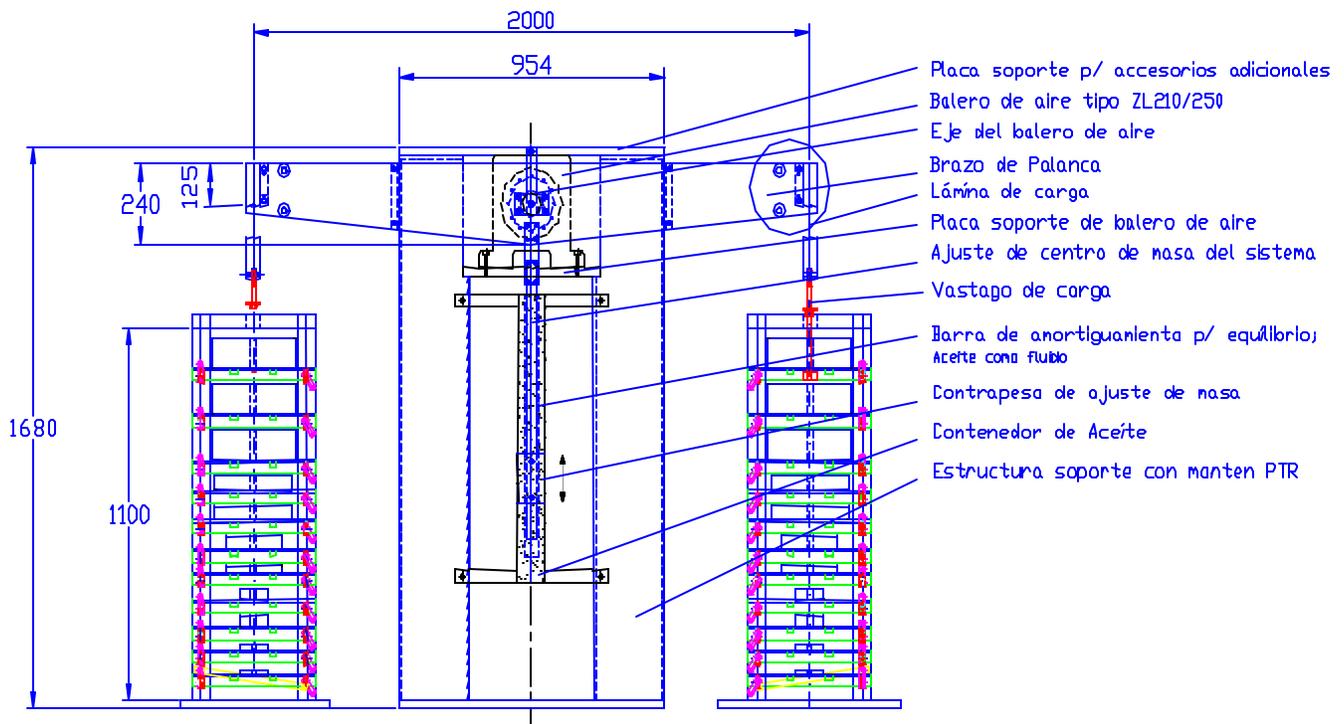


Figura 3. Esquema del patrón primario nacional.

CONCLUSIONES

Se ha establecido un patrón primario nacional de Par Torsional que permitirá autonomía en la trazabilidad de las mediciones en México. Actualmente se trabaja con estudios de caracterización y comparaciones internacionales de alto nivel, como parte del aseguramiento de la calidad de las mediciones realizadas para este patrón.

El presupuesto de incertidumbre del patrón (de acuerdo a la aplicación de la GUM) se obtiene con mejores niveles que la incertidumbre requerida en las especificaciones, tabla 1. Como se ha comentado, es necesario un estudio continuo e intenso del patrón (incluidas comparaciones internacionales) para asegurar los niveles bajos de incertidumbre obtenidos analíticamente; el patrón se utiliza actualmente declarando una incertidumbre mayor, como se observa en la tabla 2. La incertidumbre declarada para este patrón es igual a la incertidumbre requerida en las especificaciones.



Figura 4. Patrón primario nacional de Par Torsional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dan reconocimiento y agradecen de manera especial al Dr. Diedert Peschel, líder del grupo de Par Torsional en el Physikalish-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania, por su experta asesoría y continuo apoyo para el desarrollo de la magnitud en México.

REFERENCIAS

- [1] Ramírez Ahedo D., Torres Guzmán J. C., Galván Mancilla J., Metrología de Par Torsional, Publicación Técnica del CENAM CNM-MMF-PT-002. Diciembre de 1999.
- [2] Ramírez Ahedo D., Torres Guzmán J., Peschel D., Diseño y Construcción de un Sistema de Medición de Referencia de Par Torsional en CENAM (México). Memorias del congreso Metrología '96. La Habana, Cuba. Publicado en octubre de 1996.
- [3] Torres Guzmán J. C., Ramírez Ahedo D., Galván Mancilla J., Notas del Curso de Metrología de Par Torsional, CENAM. Septiembre de 2000.
- [4] Torres Guzmán J., Ramírez Ahedo D., Medición Primaria de Par Torsional. XIV Seminario Nacional de Metrología. Aguascalientes, Ags. Publicado en agosto de 1998.
- [5] "Guide to the expression of uncertainty in Measurement" Geneva, International Organization for Standardization, 1993.
- [6] Peschel D., Mauersberger D., "Determination of the friction of aerostatic radial bearings for the lever-mass system of torque standard machines" Proceedings of the 13th IMEKO World Congress, Torino (I). Septiembre 5-9, 1994.
- [7] Brüge A., Peschel D., Röske D., "The influence of misalignment on torque transducers", Physikalish-Technische Bundesanstalt, Germany.

Componente	Variable de influencia	Incertidumbre relativa
<i>Fuerza</i>	<i>Masa (m)</i>	4×10^{-06}
	<i>Gravedad local (g_l)</i>	1×10^{-06}
	<i>Flotación de las masas (1 - r_a/r_m)</i>	1×10^{-08}
<i>Longitud</i>	<i>Longitud original (l₀)</i>	3×10^{-06}
	<i>Demás contribuciones de la longitud</i>	<i>Despreciable</i>
<i>Par de fricción</i>	<i>Fricción (alcance máximo) (T_f)</i>	1×10^{-08}
<i>Par Torsional</i>	<i>Incertidumbre combinada expandida (k=2)</i>	10×10^{-06}
Par Torsional	Incertidumbre combinada expandida, declarada (k=2)	5×10^{-05}

Tabla 2. Contribuciones de cada variable de influencia a la incertidumbre en la realización de la magnitud de par torsional.

La figura 4 muestra el patrón primario nacional de par torsional como fue construido y en operación en el laboratorio de par torsional del CENAM.