

Caracterización del Sistema Híbrido de Par Torsional de 1 kN·m Fabricado en CENAM para Volkswagen de México, S. A. de C. V.

D. Ramírez-Ahedo,^a J. C. Torres-Guzmán^a
M. Hernández-Rivas,^b A. Castillo-Medina,^b G. Gamboa-Hernández^b

^a Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
dramirez@cenam.mx

^b Volkswagen de México, S. A. de C. V.
km 116 Autopista México-Puebla, San Lorenzo Almecatla, 72700, Puebla, México.

RESUMEN

La caracterización de sistemas de medición para diseminar una magnitud con los niveles adecuados de exactitud e incertidumbre, es una actividad metrológica necesaria para la confiabilidad en las mediciones de los laboratorios de metrología. La construcción de un patrón de medición de par torsional para la empresa Volkswagen de México S. A. de C. V. realizada por personal de CENAM [1], tiene su origen en la detección de una necesidad crítica observada en esta empresa automotriz, la cual se llevó a cabo mediante varias etapas de asesoría realizadas por personal de la División de Metrología de Fuerza y Presión del CENAM. En este documento se presenta la caracterización del "Sistema Híbrido de Medición de Par Torsional SHPT-VW- 1 kN·m" y la declaración de su capacidad de medición. Se incluye, la parte práctica de evaluación de las fuentes de incertidumbre y su contribución en la generación (método primario) o diseminación (método de transferencia) del par torsional.

1. INTRODUCCIÓN

El par torsional es utilizado en muchos procesos industriales, por ejemplo en la industria automotriz para asegurar las tuercas en rines de automóviles o bien en el ajuste de las "cabezas" de un motor. Aunque el par torsional difiere en la forma de generar una fuerza axial (tracción o compresión), la cantidad de par torsional es crítico en la pieza ensamblada. Por ejemplo para cualquier aplicación, menor tracción (menor par torsional) en un ambiente de vibración puede causar el aflojamiento del ensamble; por el contrario más tracción (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, también bajo condiciones de vibración.

Consiente de la mejora continua y el aseguramiento de la calidad de las mediciones en sus procesos, la empresa automotriz Volkswagen de México, S. A. de C. V. a través del área PPA (Parte Producción Automóvil) contrató con el CENAM desde el 2002 a través del programa Medición una serie de consultorías encaminadas a ese objetivo.

Para el gran número de mediciones que se realizan en pruebas a un automóvil, es de vital importancia contar con los recursos técnicos adecuados para la

evaluación de su correcto funcionamiento, bajo las condiciones más cercanas al uso propuesto.

En el caso particular del área PPA, el par torsional de apriete en ensamble de componentes del automóvil, debe ser aplicado bajo especificaciones internas y verificado en varias etapas posteriores (por ejemplo, etapa de relajamiento a corto plazo, etapa de relajamiento a largo plazo, pruebas de cargas externas, pruebas de fuerzas de sujeción, etcétera en componentes del automóvil).

Como resultado de la consultoría realizada al área PPA y debido a que el par torsional es una magnitud crítica, algunas oportunidades para mejorar la calidad de los resultados fueron observadas, entre otras, aquella acerca de la trazabilidad del resultado de sus mediciones en sus pruebas, verificaciones y calibraciones. Por lo anterior, la empresa Volkswagen de México S. A. de C. V., tomó la decisión de sustituir un patrón de medición de brazo de palanca y masas suspendidas que ellos tenían para calibraciones internas.

Este nuevo patrón de masas suspendidas y brazo de palanca fue adquirido en un proyecto con el CENAM. Algunos de los motivos de la sustitución fueron: i) la definición de la magnitud en el sistema anterior de masas suspendidas y brazo de palanca

incluía efectos de fuerzas transversales (no se tenía un apoyo en el sistema de masas y brazo para evitar momentos de flexión sobre el transductor); ii) el tiempo de duración de la calibración era bastante tardado debido a la instalación manual de masas; iii) la aplicación de masas generaba “golpeteo” en el momento de depositar cada masa.

2. ACTIVIDADES DESARROLLADAS Y RESULTADOS

Como fue descrito en [1], el patrón diseñado para la empresa Volkswagen de México, S. A. de C. V., es un sistema híbrido (SHPT-VW-1kN·m), y su principio depende del modo de la operación de sus 2 sistemas integrados: i) método primario (a diferencia de un patrón primario) y ii) método de transferencia.

El modo de operación con el método primario consiste básicamente de un conjunto de masas – que se usan de forma independiente – para generar una Fuerza que es aplicada en el extremo de un brazo de palanca por medio de bandas metálica para obtener el valor de par torsional que se aplicará al equipo bajo calibración (normalmente un transductor de par torsional) como se observa en la Fig. 1.

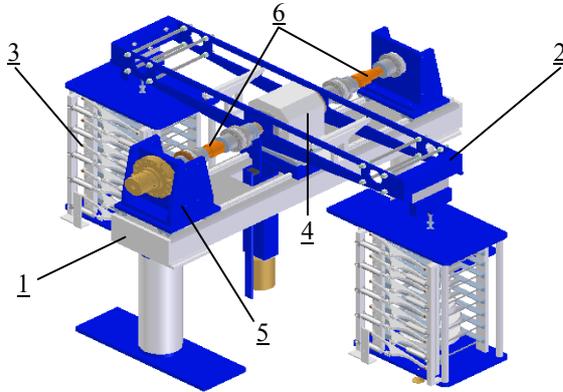


Fig. 1. Figura esquemática del sistema híbrido de par torsional SHPT-VW-1kNm. 1) Estructura principal; 2) Brazo de palanca; 3) Sistema de masas; 4) Cojinete de aire; 5) Contra reacción; 6) Transductores bajo calibración.

La máquina en el modo de transferencia incluye 3 transductores con intervalos de 10 N·m, 100 N·m and 1 kN·m calibrados en el método primario, un motor para generar el par torsional, un cojinete de aire para evitar las componentes parasíticas y una placa de contra reacción. Con este modo es posible realizar calibración por comparación directa de transductores, herramientas de par, “torquímetros” etcétera.

La caracterización del sistema de par torsional consistió en 3 partes:

1. Parte inicial: Definición teórica para la realización de la magnitud;
2. Parte intermedia: incluye la caracterización y validación del sistema de medición;
3. Parte Final: Calibración de transductores de par torsional con el SHPT-VW-1kN·m por personal de Volkswagen de México, S. A. de C. V.

2.1. Parte Inicial: Definición Teórica para la Realización de la Magnitud

El Par Torsional puede entonces representarse por la siguiente expresión matemática 1) que se define mediante la fuerza resultante (generada por una masa m de densidad ρ_m y la aceleración local de la gravedad g_l) aplicados a una distancia d :

$$T = F \cdot d - T_f. \quad (1)$$

La Ec. (1) incluye una corrección por la fricción T_f de un fulcro de apoyo (cojinete de aire) para evitar momentos de flexión (su valor fue estimado mediante la prueba de péndulo con un valor relativo de $T_f = 5 \cdot 10^{-5}$ del par aplicado). La expresión de la incertidumbre asociada a la expresión anterior puede obtenerse de la ley de propagación de incertidumbres como fue referida en [2].

La magnitud Fuerza está basada en la expresión que define a la magnitud de acuerdo a la segunda ley de Newton como:

$$F = mg_l \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right), \quad (2)$$

donde m es la masa aplicada, en kg y el valor de cada masa fue obtenido con trazabilidad al patrón nacional de masa prototipo número 21 mantenido por el laboratorio de masas del CENAM, g_l es la acción de la aceleración de la gravedad local de 9,779 155 m/s^2 y fue calculado para la ciudad de Puebla con una incertidumbre estándar de $\pm 1 \cdot 10^{-4} m/s^2$, ρ_a , es la densidad del aire, en kg/m^3 y su valor se evalúa mediante la Ec (3), y ρ_m , densidad de la masa, en kg/m^3 , con un valor aproximado de 7 920 kg/m^3 .

El valor de la densidad del aire se obtiene de la Ec. (3) siguiente:

$$\rho_a = \frac{a \cdot P_{atm} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r}{c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})}, \quad (3)$$

donde P_{atm} es la presión atmosférica promedio en la ciudad de Puebla, P_{vs} es la presión del vapor saturado, y su valor puede ser obtenido de la expresión 4), en P_a , con una incertidumbre estándar aproximada de $\pm 0,3 Pa$, h_r , es la humedad relativa promedio en planta de Volkswagen de México, en % de h_r y tiene un valor de 30 %, T_{amb} es la temperatura ambiente promedio en la empresa Volkswagen de México, S. A. de C. V., y es de 20°C; a , b , c y d son constantes y sus valores respectivos son $a = 1,293 \cdot 04 \cdot 10^{-3}$; $b = 4,885 \cdot 10^{-6}$; $c = 101,325$; $d = 3,67 \cdot 10^{-3}$.

La presión del vapor saturado se obtiene de la siguiente expresión:

$$P_{vs} = 1Pa \cdot e^{[A \cdot T^2_{amb} + B \cdot T_{amb} + C + D / (T_{amb} + 273,15)]}, \quad (4)$$

donde $e = 2,718 \ 281 \ 83\dots$ es la base de los logaritmos naturales, $A = 1,237 \ 884 \ 7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $B = -0,012 \ 358 \ 751 \ 883 \ 9 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $C = 29,637 \ 720 \ 198 \ 76$ y $D = -6 \ 343,164 \ 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Tabla 1. Par torsional generado en sentido horario utilizando la expresión 1.

Sentido horario				
<i>Id. de la masa</i>	<i>Masa kg</i>	<i>F_{real-aplicada} N</i>	<i>Distancia m</i>	<i>Par Torsional Nm</i>
M-10 N·m	1,022 820	10,001	0,999 792	10,000
M1-20 N·m	2,045 510	20,001	0,999 792	20,000
M2-20 N·m	2,045 530	20,001	0,999 792	20,000
M-50 N·m	5,113 750	50,002	0,999 792	49,999
M1-100 N·m	10,227 390	100,003	0,999 792	99,996
M2 - 100 N·m	10,227 260	100,002	0,999 792	99,995
M- 200 N·m	20,455 160	200,010	0,999 792	199,996
M1- 250 N·m	25,568 830	250,011	0,999 792	249,993
M2- 250 N·m	25,569 230	250,015	0,999 792	249,997

Las Tablas 1 y 2 muestran los cálculos realizados para el valor de fuerza corregida por los valores mostrados en las Ecs. (3) y (4), así como el par torsional (incluye corrección por efecto de la fricción del cojinete de aire) para el método primario en sentido horario y contra horario. La distancia d fue medida para el sentido horario y contra horario con un Láser Tracker Modelo I, marca FARO y el resultado de la medición trazable al patrón nacional

de longitud mantenido en la División de Metrología Dimensional del CENAM.

Tabla 2. Par torsional generado en sentido contra horario utilizando la expresión 1.

Sentido contra horario				
<i>Id. de la masa</i>	<i>Masa kg</i>	<i>F_{real-aplicada} N</i>	<i>Distancia m</i>	<i>Par Torsional Nm</i>
M-10 N·m	1,022 740	10,000	0,999 979	-10,001
M1-20 N·m	2,045 460	20,000	0,999 979	-20,002
M2-20 N·m	2,045 530	20,001	0,999 979	-20,002
M-50 N·m	5,113 590	50,001	0,999 979	-50,004
M1-100 N·m	10,227 350	100,003	0,999 979	-100,006
M2 - 100 N·m	10,227 560	100,005	0,999 979	-100,005
M- 200 N·m	20,455 120	200,010	0,999 979	-200,016
M1- 250 N·m	25,569 030	250,013	0,999 979	-250,018
M2- 250 N·m	25,569 240	250,015	0,999 979	-250,022

2.2. Parte Intermedia: Incluye la Caracterización y Validación del Sistema de Medición

Esta etapa consistió inicialmente en la caracterización del SHPT-VM-1kN·m una vez realizado el traslado de la máquina del CENAM a la empresa Volkswagen de México, S. A. de C. V. en agosto del 2007. Su correspondiente caracterización, es decir verificar el comportamiento homogéneo de la realización de la magnitud y aplicación de cargas en el SHPT-VM-1kN·m; fue realizado y verificado con 3 transductores de par torsional patrón propiedad del CENAM (alcances de medición de 50 N·m, 200 N·m y 2 kN·m) marca HBM, modelos TN/50 N·m, TN 200 N·m y TN/2 kN·m, series 1299P03, 831P13 y 831P09 respectivamente.

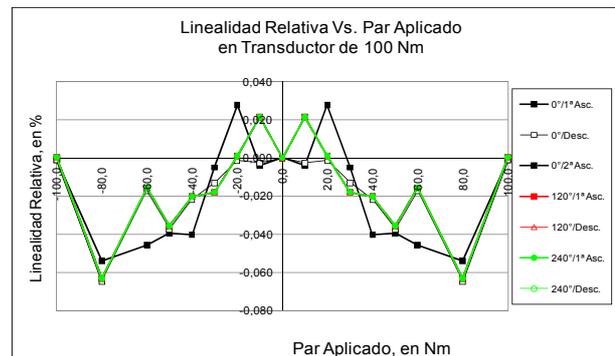


Fig. 2. Linealidad relativa del transductor marca HBM, modelo TB1A, alcance de medición 100 N·m propiedad de Volkswagen de México, S.A. de C.V. en el SHPT-VW-1kN·m antes de su caracterización.

Se observa la linealidad relativa de un transductor de 100 N·m propiedad de la empresa Volkswagen de México, S. A. de C. V. antes de la caracterización (Fig. 2) y después de la caracterización (Fig. 7), lo que muestra componentes parásitas (antes) en el SHPT-VW-1kN·m, debido a varios factores que fueron corregidos durante su operación a punto.

Las Figs. 3 y 4 muestran el sistema ya caracterizado. En las Figs. 2, 3, 4 y 7 se puede observar y comparar una gran diferencia en el comportamiento de las curvas de linealidad relativa así como el valor de la escala vertical antes y después de la caracterización.

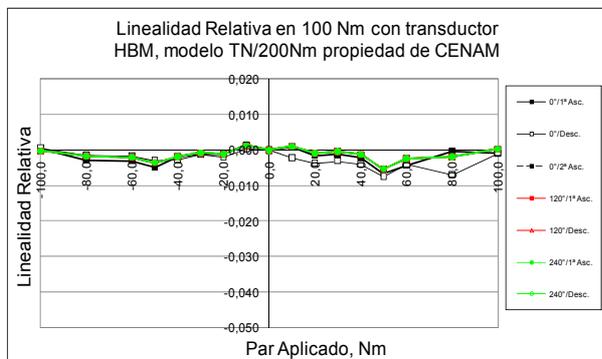


Fig. 3. Linealidad relativa del transductor marca HBM, modelo TN/200N·m, alcance de medición 100 N·m propiedad del CENAM una vez caracterizado el SHPT-VW-1kN·m.

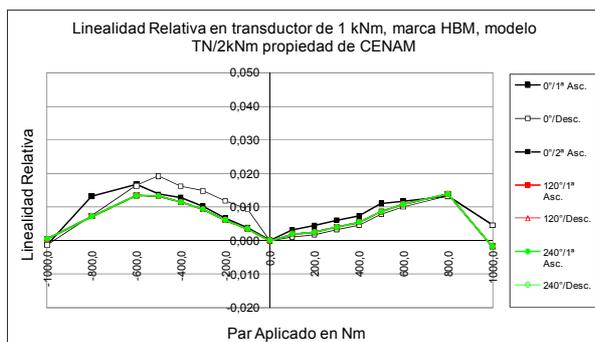


Fig. 4. Linealidad relativa del transductor marca HBM, modelo TN/2000 N·m, alcance de medición 1 kN·m propiedad del CENAM una vez caracterizado el SHPT-VW-1kN·m.

La validación consistió en una comparación del sistema de medición SHPT-VW-1kN·m por el método primario con los valores de referencia de par torsional medidos con 3 transductores patrón del CENAM. El protocolo de medición fue realizado por el CENAM y ejecutado por personal de Volkswagen

de México, S. A. de C. V. en las instalaciones de la misma empresa en marzo de este año 2008. Las lecturas de los transductores patrón pueden observarse en las Tablas 3 y 4 siguientes.

Tabla 3. Par torsional medido por los transductores de CENAM en el PHPT-VW-1kN·m en sentido horario.

Id. de las Masas utilizadas	Par Torsional medido en el Transductor patrón en N·m			Lectura Promedio	U_{Exp} k = 2
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	N·m	% Lect.
M-10 N·m	10,00	10,00	10,00	10,00	0,04
M1-20 N·m	20,00	20,00	20,00	20,00	0,04
M2-20 N·m	20,00	20,00	20,00	20,00	0,04
M-50 N·m	50,00	50,00	50,00	50,00	0,04
M1-100 N·m	100,01	100,01	100,01	100,01	0,04
M2 - 100 N·m	100,01	100,00	100,00	100,00	0,04
M- 200 N·m	200,00	200,00	200,01	200,00	0,04
M1- 250 N·m	250,00	250,01	250,01	250,01	0,04
M2- 250 N·m	250,02	250,01	250,02	250,02	0,04

Tabla 4. Par torsional medido por los transductores de CENAM en el PHPT-VW-1kN·m en sentido contra horario.

Id. de las Masas utilizadas	Par Torsional medido en el Transductor patrón en N·m			Lectura Promedio	U_{Exp} k = 2
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	N·m	% Lect.
M-10 N·m	-10,00	-10,00	-10,01	-10,01	0,05
M1-20 N·m	-20,01	-20,01	-20,01	-20,01	0,05
M2-20 N·m	-20,01	-20,01	-20,01	-20,01	0,05
M-50 N·m	-50,02	-50,03	-50,02	-50,02	0,04
M1-100 N·m	-100,05	-100,05	-100,05	-100,05	0,04
M2 - 100 N·m	-100,05	-100,05	-100,05	-100,05	0,05
M- 200 N·m	-200,11	-200,11	-200,11	-200,11	0,05
M1- 250 N·m	-250,13	-250,12	-250,12	-250,12	0,05
M2- 250 N·m	-250,12	-250,12	-250,11	-250,12	0,04

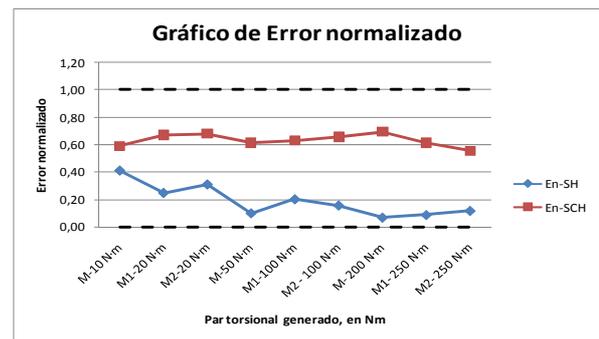


Fig. 5. Error normalizado para los valores generados por el SHPT-VW-1kN·m contra los medidos por comparación con los transductores patrón de CENAM.

Los resultados de error normalizado entre los valores generados por el SHPT-VW-1 kN·m y el valor de los transductores patrón de CENAM, se muestran en las Figs. 5 y 6 en los que se muestra la

compatibilidad de las mediciones en el sentido horario (SH) y sentido contra horario (SCH) al giro de las manecillas del reloj. La Fig. 5 muestra el error normalizado por masa individual, mientras que la Fig. 6, los valores para combinación de masas hasta el alcance máximo de medición de 1 kN·m.

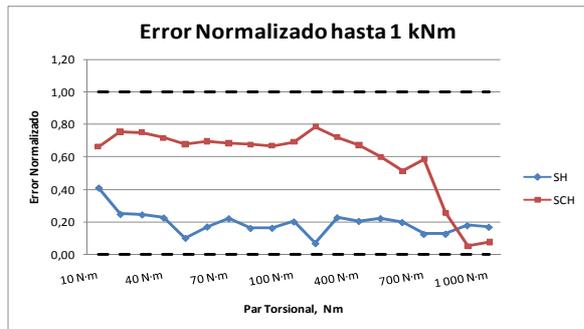


Fig. 6. Error normalizado para combinación de masas en el SHPT-VW-1kN·m contra los valores de Par Torsional medidos por con los transductores patrón de CENAM.

2.3. Parte Final: Calibración de Transductores de Par Torsional con el SHPT-VW-1kN·m por Personal de Volkswagen de México S. A. de C. V. Con los resultados obtenidos de las etapas anteriores, se inició la calibración de 2 transductores de par torsional mediante el método primario (alcances de medición de 100 N·m y de 1 kN·m) y de 1 transductor de par torsional por el método de transferencia (alcance de medición de 10 N·m).

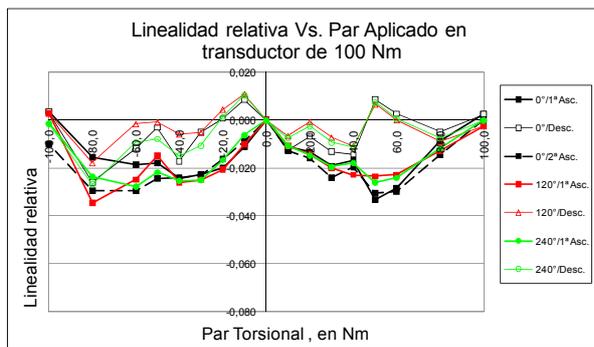


Fig. 7. Linealidad relativa en la calibración del transductor de 100 N·m, marca HBM, modelo TB1A, alcance de medición 100 N·m propiedad de Volkswagen de México, S. A. de C. V., en el SHPT-VW-1kN·m.

Las Figs. 7 y 8 muestran la linealidad relativa de los transductores propiedad de Volkswagen de México S. A. de C. V. bajo la calibración con el método primario, mientras que la Fig. 9 muestra la linealidad relativa de un transductor marca Lathi, alcance de

medición 10 N·m, por comparación por el método de transferencia.

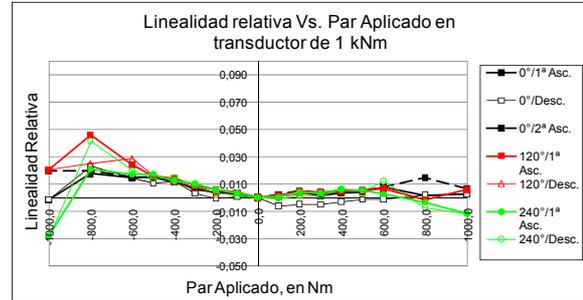


Fig. 8. Linealidad relativa en la calibración del transductor de 1 kN·m marca HBM, modelo TB1A, alcance de medición 1 kN·m propiedad de Volkswagen de México, S.A. de C.V., en el SHPT-VW-1kN·m.

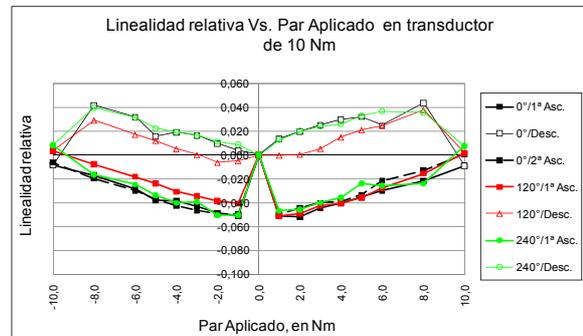


Fig. 9. Linealidad relativa en la calibración del transductor de 10 N·m marca Lathi, modelo TT1, alcance de medición 10 N·m propiedad de Volkswagen de México, S.A. de C.V., en el SHPT-VW-1kN·m por el método de transferencia.

Las Figs. 10 y 11 muestran la secuencia para la instalación y calibración de transductores en el SHPT-VW-1kN·m.



Fig. 10. Instalación de un transductor de par torsional para su calibración en el SHPT-VW-1kN·m.



Fig. 11. Sistema híbrido de par torsional de 1 kN·m (SHPT-VW-1kN·m).

3. DISCUSIÓN

El diseño, construcción y puesta en marcha del sistema híbrido de par torsional desarrollado en el y por el CENAM concluyó con la etapa de caracterización y declaración de su capacidad de medición. Los resultados de la caracterización arrojaron cifras que confirman que el sistema trabaja dentro del presupuesto de incertidumbre declarado de $5 \cdot 10^{-5}$ o mejor.

Las curvas de linealidad relativa de los transductores calibrados (Figs. 3 a 8) con el método primario, así como con el método de transferencia (Fig. 9) muestran de manera cualitativa la caracterización del sistema en comparación con la Fig. 2. Las curvas características, muestran un patrón de comportamiento del sistema de medición.

La entrega recepción del sistema fue realizado integrando un programa de capacitación, comparación y validación del SHPT-VM-1kN·m que habilita al personal responsable de operar el equipo en la empresa Volkswagen de México S. A. de C. V. para realizar mediciones y calibraciones confiables de forma eficiente, efectiva y adecuada de acuerdo con sus necesidades en concordancia con normas internacionales.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La caracterización del sistema híbrido de par torsional demostró que el sistema cumple con suficiencia las características y especificaciones necesarias y adecuadas en su operación bajo las condiciones de operación de la planta en Puebla.

La empresa Volkswagen de México, S. A. de C. V. cuenta con un patrón de referencia para la medición y calibración de par torsional, adecuado para ser origen de la trazabilidad de resultado de mediciones realizadas en su empresa.

Se prevé en un futuro inmediato, como parte del mantenimiento y aseguramiento de la calidad de las mediciones del SHPT-VW-1kN·m, la realización de ensayos de aptitud para verificar que la magnitud se mantiene constante en el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

La División de Metrología de Fuerza y Presión del CENAM agradece el empeño en el desarrollo de este proyecto a Fernando Martínez Juárez, a Calixto Morales Aguillon, a Jesús Galván Mancilla, a Rocío Jiménez Magaña, a Héctor Antonio Barrera Domínguez y a Elohim Banda Balderas por su colaboración y labor de equipo en el desarrollo del presente proyecto.

REFERENCIAS

- [1] D. Ramirez-Ahedo, J. C. Torres-Guzman, F. Martinez-Juarez, "Hybrid torque standard machine for 1 kN·m developed in CENAM". IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference 27th to 30th November, 2007. Mérida, México.
- [2] Ramirez-Ahedo D., Torres-Guzmán J., "Diseño y Construcción del Patrón Primario Nacional de Par Torsional en México". Simposio de Metrología 2001. Querétaro, México, Mayo 2001.