

COMPARATIVO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA PESAR DE ALTO ALCANCE

¹Eduardo González E, ¹Luis O. Becerra S, ¹Félix Pezet S, ²José Revuelta M, ²José Revuelta R

¹Centro Nacional de Metrología, ²Básculas Revuelta Maza, S.A. de C.V.

¹Tel. (01 442) 2 11 05 00; ¹Fax. (01 442) 2 11 05 68; ²Tel (01 87) 17 47 47 47 ²Fax (01 87) 17 75 70

egonzale@cenam.mx; lbecerra@cenam.mx; fpezet@cenam.mx; jrm@revuelta.com.mx; jrevuelta@revuelta.com.mx

Resumen: Los resultados presentados en este documento se derivan del ejercicio realizado con diferentes técnicas de calibración sobre un instrumento para pesar de alto alcance, y tiene la finalidad de comparar los diferentes métodos que pueden ser utilizados para la calibración de este tipo de instrumentos dependiendo de los recursos que se tengan al momento del ejercicio y la incertidumbre que se requiera.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que se presentan comúnmente en la calibración de instrumentos para pesar de alto alcance es la cantidad de patrones necesarios para realizar la calibración con incertidumbres bajas, la situación se dificulta debido a la aplicación del reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de auto-transporte expedida por la SCT [1] para controlar el peso bruto vehicular máximo autorizado por tipo de vehículo y camino.

El peso bruto vehicular varía según la Dirección General de Auto-transporte Federal de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte entre 14 000 kg a 72 500 kg, dependiendo de la configuración del vehículo y la carretera por donde transite.

Por ello los métodos alternativos para poder realizar calibraciones con una cantidad mínima de pesas patrón se hacen presentes en diferentes foros de metrología, tratando siempre de ofrecer una alternativa que pueda reducir el riesgo en el traslado de pesas patrón por las carreteras.

De acuerdo con el método utilizado las incertidumbres aumentan o disminuyen dependiendo de las necesidades del usuario las cuales pueden ser justificadas por el uso que se destine el instrumento en calibración.

Las diferentes pruebas y ensayos que se presentan en este trabajo se realizaron en cooperación con la empresa Básculas Revuelta Maza S. A. de C. V., ubicada en Torreón Coahuila, lugar donde se facilitaron todos los medios para que esta práctica tuviera los mejores resultados.

El instrumento bajo prueba fue una báscula Marca Revuelta con un alcance máximo de medición de 80 000 kg con una división mínima de 10 kg, donde

$d = e$ (e , división de verificación), para esta práctica el instrumento solo se calibró hasta 60 000 kg. Los patrones de masa utilizados son de valor nominal de 1 000 kg, con trazabilidad al patrón nacional, adicionalmente se utilizó material de sustitución para la demostración de las diferentes técnicas, compuesto por camiones, montacargas, y otros equipos usados como carga para este fin. Los valores nominales del material de sustitución fueron obtenidos en lectura directa con el instrumento calibrado.

Antes de iniciar las pruebas, el instrumento fue sometido a mantenimiento preventivo y ajuste.

2. PRUEBAS

2.1. Prueba de carga excéntrica

Por facilidad de maniobra se usó la unidad móvil de calibración junto con los patrones de masa que en conjunto suman 25 140 kg, valor representativo para esta prueba.

Para este ensayo se tomaron dos puntos de apoyo llamados secciones, donde en cada una las secciones se colocó la parte trasera de la unidad o la parte ligera dependiendo de la disposición, sin seguir un orden estricto de lo expuesto en la R76 [4]

Con la finalidad de analizar si el instrumento indica resultados diferentes dependiendo del sitio y el sentido en que se coloque la carga sobre el receptor

Donde: la colocación de los ejes de la unidad móvil sigue el esquema siguiente:

- ⊙ Eje sencillo, parte más ligera de la unidad
- ⊙⊙ Eje doble, parte más pesada de la unidad
- Sentido del movimiento del camión
- ←

2.1.1. Inicialmente la carga entra en sentido de izquierda a derecha y posteriormente de derecha a izquierda, cuidando que el eje de la unidad móvil de cuerdo con la fig. 1 se encuentre apoyado sobre la sección. Los resultados se encuentran en la tabla 1.

Fig. 1.- En las secciones I y IV se cargan una parte ligera y una parte pesada de la unidad.

I sección	II sección	III sección	IV sección
→	→	→	→
⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙	⊙
⊙	⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙
←	←	←	←

Tabla 1.- Resultados prueba de excentricidad

Sección	Lectura (kg) L1	Lectura (kg) L2	Diferencia (kg) L1-L2
Sentido	→	←	
I	25 150	25 130	20
II	25 140	25 130	10
III	25 140	25 130	10
IV	25 140	25 130	10
	Dmx		10

2.1.2. En esta otra disposición ó forma se trabaja sobre los extremos del instrumento, quedando siempre el eje doble sobre las diferentes secciones. Los resultados se encuentran en la tabla 2.

Fig. 2.- Posición del eje de la unidad móvil sobre la plataforma de pesaje

I sección	II sección	III sección	IV sección
→	→	→	←
⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙
⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙	⊙⊙
→	←	←	←

Tabla 2.- Resultados prueba de excentricidad

Sección	Lectura (kg) L1	Lectura (kg) L2	Diferencia (kg) L1-L2
	→	←	
I	25 140	25 130	10
II	25 130	25 130	0
III	25 140	25 130	10
IV	25 130	25 130	0
	Dmx		10

2.1.3. En este nuevo caso se combina la forma de recibir la carga para cada sección. Los resultados se encuentran en la tabla 3.

Fig. 3.- Para cada sección y en ambos sentidos se recibe el eje doble y el eje sencillo.

I sección	II sección	III sección	IV sección
→	→	→	→
⊙⊙	⊙⊙	⊙	⊙
⊙	⊙	⊙⊙	⊙⊙
←	←	←	←

Tabla 3.- Resultados prueba de excentricidad

Sección	Lectura (kg) L1	Lectura (kg) L2	Diferencia (kg) L1-L2
Sentido	→	←	
I	25 140	25 130	10
II	25 130	25 130	0
III	25 130	25 130	0
IV	25 130	25 130	0
	Dmx		10

2.2. Repetibilidad del instrumento

En esta prueba se utilizan dos diferentes cargas para poder determinar la repetibilidad del instrumento. Como resultado se obtienen dos valores de desviación estándar de las lecturas (s_L) y dos valores de desviación estándar del instrumento (S), por cada carga utilizada, este ultimo se presenta como un intervalo de dispersión que incluye una componente de incertidumbre debida a la resolución del instrumento fórmulas 2 y 3.

Este valor es utilizado para la evaluación de la incertidumbre de las correcciones encontradas por los diferentes métodos en la prueba linealidad.

Tabla 4.- Resultados de la prueba de repetibilidad

Número de repetición	Carga 1 (kg)	Carga 2 (kg)
1	38620	55680
2	38610	55680
3	38610	55680
4	38610	55670
5	38610	55670
Promedio:	38612	55676
Desviación estándar de las lecturas (s_L)	4	5
Desv. est. del inst. (S)	5	6

2.3. Prueba de Linealidad

Para los diferentes métodos se emplearon pesas calibradas y para la estimación de los valores de corrección, por simplicidad de cálculos, no se consideró la corrección debida al empuje del aire, pero esta corrección a la indicación puede ser considerada en función del valor de la densidad del aire o de la densidad de los patrones y carga complementaria utilizados.

2.3.1 Método utilizando solo patrones

Sin duda alguna la mejor forma de caracterizar un instrumento es utilizar patrones de masa (P), de esta manera se obtienen los valores de corrección con un valor de incertidumbre más pequeño, estos valores serán la referencia con respecto a los demás ejercicios.

Para este ensayo solo se calibro el instrumento hasta 60 000 t donde se utilizaron 60 pesas con valor nominal de 1 000 kg.

Desarrollo

Se colocaron cargas a intervalos de 10 000 kg hasta sumar 60 000 kg se tomó la lectura por cada carga, para este ejercicio, se considerando la zona de trabajo del instrumento y los puntos de la escala donde el error máximo tolerado cambia, también se considero la pesada mínima que para este caso es de 200 kg.

Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 5, los valores de corrección y sus incertidumbres asociadas se estiman utilizando las fórmulas 4 y 5

Tabla 5.- Resultados, Método solo patrones

Valor de la carga (kg)	Corrección C (kg)	Incertidumbre U, k=2 (±kg)
0	0	12
200	-10	12
10 000	-10	12
20 000	-20	12
30 000	-20	12
40 000	-19	12
50 000	-19	12
60 000	-19	12

2.3.2. Método de enlaces sucesivos

Para este método se recomienda usar como mínimo patrones (P) con valor de masa equivalente al 20 % del alcance máximo del instrumento y cargas de sustitución (M), que deben ser aproximadas a las lecturas del instrumento por cada enlace con un

máximo de cuatro enlaces, tomando como enlace a la colocación de las cargas (M+P).

Para este ensayo se utilizaron 12 000 kg en pesas patrón y cuatro diferentes cargas: 12 990 kg (M1), 25 880 kg (M2), 36070 kg (M3) y 40 140 kg (M4)

Desarrollo

Se colocaron los patrones P en el receptor de carga, posteriormente se retiraron P y se colocó la carga M tratando siempre de aproximar al instrumento a la misma indicación que se obtuvo con P, cuando esto no fue posible debido a que M no lo permitía se usaron cargas pequeñas ó pesas fraccionarias.

Sin retirar M se colocó nuevamente P y se obtuvo el 40 % del alcance del instrumento.

Se repitió esta misma secuencia hasta llegar al 100 % del alcance del instrumento.

Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 6, así como la secuencia del ensayo, los valores de corrección y sus incertidumbres asociadas se estiman utilizando las fórmulas 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Tabla 6.- Resultados, enlaces sucesivos

Secuencia	Valor de la carga (kg)	Corrección C (kg)	Incertidumbre U, k=2 (±kg)
Min	0	0	12
P	12 000	0	12
M1	12 990	0	12
M1+P	24 990	0	17
M2	25 880	-9	17
M2+P	37 880	10	17
M3	36 070	-9	21
M3+P	48 070	9	24
M4	40 410	9	24
M4+P	52 410	8	29

2.3.3. Método cargas complementarias

Para este método se recomienda utilizar como mínimo 5 000 kg (P) y se debe tener dos cargas (M1) y (M2) bajo reserva de que M1 sea superior a P y M2 superior a M1+P, para este caso los valores de las cargas fueron de 30 130 kg (M1) y 50 840 kg (M2)

Desarrollo

Se colocó P sobre el receptor de carga, a continuación se retiró P y se colocó la carga M1, enseguida, se agregó P la carga M1, después se retiró M1+P y se colocó la carga M2 a continuación y se añadió P a la carga M2, la secuencia esta mejor representada en la tabla 7, donde se presentan los resultados de este ensayo junto con

los valores de corrección y sus incertidumbres asociadas estos se estimaron utilizando las fórmulas 4, 5, 6, 7, 8 y 9

Tabla 7.- Resultados, cargas complementarias

Carga	Valor de carga (kg)	Corrección C (kg)	Incertidumbre U, k=2 (±kg)
Min	0	0	12
P	5 000	-10	12
M1	30 130	-16	155
M1+P	35 130	16	155
M2	50 840	-33	211
M2+P	55 840	33	211

2.3.4. Técnica combinatoria

El trabajo presentado por Clarkson et al. [2] presenta un método de estimar los errores de indicación de un instrumento para pesar de alto alcance y una estimación de incertidumbre de este error. Con la finalidad de comparar los resultados de esta prueba contra los resultados del método de patrones al 100%, se desarrolló el modelo matemático de la corrección considerando el procedimiento descrito y se estimó la incertidumbre de esta corrección. Los resultados obtenidos por este modelo coinciden con los que resultan empleando las fórmulas propuestas en [2] pero el valor de incertidumbre fue obtenido mediante el método de la GUM [3] partiendo del modelo de medición para su estimación a diferencia del presentado en [2] el cual menciona que es una derivación numérica de manera empírica.

Para este ensayo se utilizaron 8 000 kg en pesas patrón y cuatro diferentes cargas: 4 270 kg (M1), 10 220 kg (M2), 13 470 kg (M3) y 17 150 kg (M4)

Desarrollo

La técnica combinatoria consiste en poner cargas distintas en todas las combinaciones posibles sobre la báscula. Solamente una de estas cargas es una carga patrón (P), y las cargas M restantes se componen del material de sustitución disponible en sitio, este procedimiento da un total de 2^m donde m es el número de cargas usadas, cinco diferentes cargas son generalmente suficientes.

Una vez seleccionadas las cargas se realizaron todas las combinaciones posibles.

Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 8, así como la secuencia del ensayo, los valores de corrección y sus incertidumbres

asociadas se estiman utilizando las fórmulas 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Tabla 8.- Resultados, técnica combinatoria

N°	Combinación	Carga (kg)	Corrección C (kg)	Incert. U, k=2 (±kg)
1	0	0	0	13
2	M1	4269	-11	20
3	P	8000	-10	13
4	M2	10221	-9	19
5	M1+P	12269	-11	20
6	M3	13472	-8	21
7	M1+M2	14490	-10	32
8	M4	17153	-7	24
9	M1+M3	17741	1	34
10	P+M2	18221	-9	19
11	M1+M4	21422	-8	38
12	P+M3	21472	2	21
13	M1+P+M2	22490	-10	32
14	M2+M3	23693	-7	33
15	P+M4	25153	-7	25
16	M1+P+M3	25741	1	34
17	M2+M4	27374	-6	37
18	M1+M2+M3	27962	2	47
19	M1+P+M4	29422	2	38
20	M3+M4	30625	5	39
21	M1+M2+M4	31643	-7	51
22	P+M2+M3	31693	3	33
23	M1+M3+M4	34894	4	53
24	P+M2+M4	35374	-6	37
25	M1+P+M2+M3	35962	2	47
26	P+M3+M4	38625	15	39
27	M1+P+M2+M4	39643	-7	51
28	M2+M3+M4	40846	6	52
29	M1+P+M3+M4	42894	14	53
30	M1+M2+M3+M4	45115	5	67
31	P+M2+M3+M4	48846	6	52
32	M1+P+M2+M3+M4	53115	5	67

3. CÁLCULOS

3.1. Excentricidad

Para encontrar la diferencia máxima en la prueba de excentricidad se aplica la siguiente fórmula,

$$D_{mx} = D_m - D_n \tag{1}$$

donde:

D_{mx} =Diferencia máxima

D_m =Diferencia mayor

D_n =Diferencia menor

3.2. Repetibilidad

En la prueba de repetibilidad, la desviación estándar de las lecturas se obtiene mediante la fórmula 2,

$$s_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \tag{2}$$

La desviación estándar del instrumento se obtiene de la siguiente fórmula,

$$S = \sqrt{s_L^2 + \left(\frac{d}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (3)$$

3.3. Linealidad

En la prueba de linealidad el objetivo es estimar la corrección a aplicar a las indicaciones del instrumento para pesar para corregir un error sistemático y la incertidumbre asociada a esta corrección.

$$C_i = P - L_i \quad (4)$$

Donde:

- C_i Corrección de las indicaciones i
- P Masa del patrón (certificada)
- L_i Indicación del instrumento i

la incertidumbre de la corrección se estima con la siguiente fórmula. Para todos los casos se empleo un factor de cobertura $k=2$.

$$U = 2 \cdot \sqrt{\left(\sum u_{pi}\right)^2 + S^2} \quad (5)$$

Donde:

- U Incertidumbre combinada
- u_{pi} Incertidumbre de la masa patrón i
- S es la desviación estándar del instrumento (fórmula 3)

En los métodos por enlaces, cargas complementarias y técnica combinatoria se utilizan cargas de sustitución o cargas complementarias en las cuales para poder obtener la corrección es necesario estimar su valor de masa y su incertidumbre (fórmulas 6 y 7).

Una vez que se han obtenido los valores de masa e incertidumbre de éstas cargas se aplican las fórmulas 4 y 5 para obtener los valores de la corrección e incertidumbre para cada punto de la escala bajo prueba tomando ahora las cargas como valores de masa con su incertidumbre asociada correspondiente.

$$M_x = P + (L_x - L_p) \cdot \bar{s}_b \quad (6)$$

$$u^2(M_x) = u^2(P) + [(L_x - L_p) \cdot u(\bar{s}_b)]^2 + (S \cdot \bar{s}_b)^2 \quad (7)$$

$$\bar{s}_b = \frac{\sum_{n=1}^n \frac{P}{L_{q+P} - L_q}}{n} \quad (8)$$

$$u^2(\bar{s}_b) = \left[\frac{u(P)}{L_{q+P} - L_q}\right]^2 + \left(\frac{P \cdot S}{(L_{q+P} - L_q)^2}\right)^2 + \left(\frac{S_{sb}}{\sqrt{n}}\right)^2 \quad (9)$$

Donde :

- M_x Es la masa de la carga x
- L_p es la indicación del instrumento con la masa patrón sobre el receptor de carga
- L_x es la indicación del instrumento con la carga x sobre el receptor de carga
- L_{q+P} es la indicación del instrumento con la carga q mas la masa patrón P sobre el receptor de carga
- L_q es la indicación del instrumento con la carga q sobre el receptor de carga
- \bar{s}_b es la sensibilidad promedio del instrumento (obtenida tantas veces como veces se haya colocado la masa patrón en el instrumento)
- n es el número de veces que se determinó la sensibilidad del instrumento
- $u(M_x)$ es la incertidumbre estándar de la carga x
- $u(P)$ es la incertidumbre estándar de la masa patrón
- $u(\bar{s}_b)$ es la incertidumbre estándar de la sensibilidad del instrumento

4. CONCLUSIONES

4.1. Excentricidad de carga

De las diferentes disposiciones para determinar el error de excentricidad, no se encontró ninguna diferencia entre los resultados, probablemente debido a que el instrumento no presentó ningún indicio de mal funcionamiento.

4.2. Repetibilidad de carga

Como resultado de esta prueba se obtuvo el valor de dispersión entre las lecturas del instrumento para dos cargas diferentes aprox. 50% y 100% de su alcance de medición, y que razonablemente pueden ser atribuidas como representativas del instrumento.

4.3. Linealidad

Con la finalidad de comparar los diferentes métodos, se calcularon las curvas representativas

de la linealidad del instrumento (correcciones) y su incertidumbre asociada a cada valor mediante curvas de 2^{do} orden adicionalmente a una curva de 3^{er} orden que también se obtuvo para la Técnica combinatoria ya que los autores así lo recomiendan. Posteriormente se calcularon las correcciones y la incertidumbre para diferentes valores del alcance del instrumento a intervalos equidistantes a cada 5 000 kg hasta el alcance máximo y su incertidumbre asociada a cada corrección. La incertidumbre asociada a la corrección incluyó una componente debida a la varianza del ajuste por mínimos cuadrados. La incertidumbre se presenta como una incertidumbre expandida con k=2.

Posteriormente se calculó el error normalizado e [5] con la siguiente fórmula, (considerando las dos evaluaciones de incertidumbre sin correlación)

$$e = \frac{|C_{p100\%} - C_i|}{\sqrt{(U(C_{p100\%}))^2 + (U(C_i))^2}} \quad (10)$$

donde el criterio es

$e \leq 1$ El valor de la corrección por el método i es consistente con el método de patrones al 100%

$e > 1$ El valor de la corrección por el método i no es consistente con el método de patrones al 100%

- $C_{p100\%}$ corrección obtenida por el método solo patrones
- C_i corrección obtenida por el método i
- $U(C_{p100\%})$ incertidumbre expandida obtenida por el método solo patrones
- $U(C_i)$ incertidumbre expandida obtenida por el método i

La tabla 9 presenta los resultados obtenidos por las curvas de ajuste para los diferentes métodos y el error normalizado resultante. Se puede observar que todos los métodos arrojan resultados consistentes con el método solo patrones, pero la diferencia se presenta en los resultados de incertidumbre ya que, mientras mayor cantidad de masa patrón se utilicen es posible obtener valores de incertidumbre menores.

La figura 4 muestra las curvas de linealidad para los diferentes métodos, en el caso de la Técnica

combinatoria se gráfico una curva adicional de 3^{er} orden de acuerdo con el documento original.

En el caso de la técnica combinatoria se analizaron las ecuaciones presentadas en [2], y la opinión de los autores es que la incertidumbre esta subestimada, y la que se esta presentando en este trabajo puede ser considerada como una mejor estimación de la incertidumbre de la corrección.

Queda a criterio del usuario utilizar cualesquiera de los métodos presentados y establecer si es conveniente o no su uso considerando la incertidumbre que puede resultar de la aplicación de los métodos. Se debe señalar que los resultados obtenidos en estos ejercicios corresponden al instrumento específico bajo prueba y que tanto los valores de corrección como las incertidumbres asociadas corresponden a: los patrones de masa, la resolución, la repetibilidad, la sensibilidad, ajuste de la curva etc. propias de este instrumento por lo que si un instrumento presenta un valor mayor de repetibilidad, una mayor dispersión de la sensibilidad en diferentes alcances del instrumento, etc. se esperarí un incremento en la incertidumbre resultante.

Sin duda alguna se debe trabajar más en estos ensayos, ya que los resultados presentados en este documento son sólo de un evento.

REFERENCIAS

- [1] SCT Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal 1996
- [2] Mark T. Clarkson, Terry Collins and Barrie Morgan OIML bolletin volumen XLIII Number 2 April 2002
- [3] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML "Guide to the expression of Uncertainty on measurement" Reprinted on 1995.
- [4] OIML– Recommendation Internationale 76-1,2 – Instruments de pesage à fonctionnement non automatique. France, 1992
- [5] Wolfgang Wöger -Remarks on the En – Criterion Used in Measurement Comparison, PTB-Mitteilungen 109 1/99, Internationale Zusammenarbeit

Tabla 9 Comparativo de métodos

Carga	Patrones		Enlaces		En	Cargas Comp-		Tec. Comb 3 ^{er} Orden			Tec. Comb 2 ^o orden			
	Corrección	Inc.	Corrección	Inc.		Corrección	Inc.	En	Corrección	Inc.	En	Corrección	Inc.	En
0	-3	14	3	16	0.29	-3	59	0.02	-3	17	0.01	-8	61	0.08
5000	-6	14	-1	17	0.21	-5	65	0.01	-7	19	0.06	-8	62	0.04
10000	-8	14	-5	17	0.17	-8	80	0.01	-9	22	0.02	-7	63	0.01
15000	-10	14	-7	18	0.16	-9	99	0.01	-8	26	0.06	-6	65	0.06
20000	-12	14	-8	18	0.18	-10	119	0.02	-7	30	0.16	-5	67	0.10
25000	-13	14	-8	20	0.23	-9	138	0.03	-4	35	0.26	-3	69	0.15
30000	-15	14	-7	21	0.30	-8	155	0.04	0	40	0.33	-1	71	0.18
35000	-16	14	-5	23	0.39	-7	172	0.05	3	46	0.38	1	74	0.22
40000	-16	14	-3	25	0.49	-4	187	0.07	5	52	0.41	3	78	0.25
45000	-17	14	1	27	0.60	-1	200	0.08	7	57	0.40	6	82	0.27
50000	-17	14	6	29	0.71	3	212	0.10	6	62	0.37	9	86	0.30
55000	-17	14	12	32	0.82	8	222	0.11	4	68	0.30	12	91	0.31
60000	-17	14	18	35	0.93	14	231	0.13	-1	72	0.21	15	96	0.33

Figura 4 Comparación de las curvas de linealidad obtenidas mediante diferentes métodos

