

Confiabilidad metrológica del proceso de transferencia de calor por convección libre y forzada

Metrological reliability of the heat transfer process by free and forced convection

**Fernando Pastor Forero¹, Leonardo Pérez Manotas¹, Cristian Pedraza Yepes¹,
José Daniel Hernández-Vásquez²**

¹Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad del Atlántico; ²Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação. PósMQI/PUC-Rio.

E-mail: jdhernandez@aluno.puc-rio.br

Resumen: Se evaluó la confiabilidad metrológica de un banco de prueba para analizar el proceso de transferencia de calor por convección libre y forzada, conformado por un termómetro bimetálico (50 a 300°F) y un manómetro Bourdon (0 a 60 PSI). El método de los Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) permitió determinar: valores ajustados, errores e incertidumbre asociada a la medición. La confiabilidad metrológica del sistema se estimó en: 1,12% (termómetro); 4,02% (manómetro). Así, se atendió la tolerancia máxima establecida para el proceso de 5,0%. Finalmente, fue confirmada la viabilidad y aplicabilidad del método OLS para evaluar metrológicamente sistemas y procesos de medición.

Palabras claves: metrología, polinomio de ajuste, mínimos cuadrados ordinarios, confiabilidad metrológica.

Abstract: The metrological reliability of a test bench was evaluated for the analysis of the free and forced convection heat transfer process, consisting of a bimetallic thermometer (50 to 300 °F) and a Bourdon manometer (0 to 60 PSI). The Ordinary Least Squares (OLS) allowed us to determine: adjusted values, errors and uncertainty associated with the measurement. The metrological reliability of the system was estimated: 1.12% (thermometer) and 4.02% (manometer). Thus, the maximum tolerance established for the process (5.0%) was obtained. Finally, the feasibility and applicability of the OLS for the metrological evaluation of measurement systems and processes was confirmed.

Keywords: Metrology, adjustment polynomial, ordinary least squares, metrological reliability.

1. INTRODUCCIÓN

A la ciencia de las mediciones le competen métodos estadísticos y, son exactamente esos métodos estadísticos, lo que permite el análisis cuantitativo de sistemas e instrumentos de medición en sus más diversas áreas. La confiabilidad metrológica de los instrumentos de medición en el desarrollo del proceso pedagógico del estudiante de ingeniería mecánica es fundamental para garantizar el desarrollo de la enseñanza y aprendizaje de conceptos y procedimientos científicos de manera clara y confiable, con este fin, se plantea un modelo estadístico basado en los mínimos cuadrados ordinarios como una estrategia para evaluar la confiabilidad metrológica de los bancos de pruebas del CELTI (Centro de Laboratorio y Talleres de Ingeniería de la Universidad del Atlántico) y presentar un polinomio de ajuste para las mediciones a realizar en cada instrumento evaluado.

2. APLICACIÓN DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS ORDINARIOS

La confiabilidad metrológica en cualquier sistema de medición es indispensable, es por esto que se es necesario realizar calibraciones periódicas y estandarizadas de los instrumentos. A fin de caracterizar metrológicamente cada uno de los instrumentos, fue utilizado el método estadístico de los mínimos cuadrados ordinarios (*Ordinary Least Squares*, OLS). Además, con la aplicación de este método, se logró identificar la linealidad de las curvas de calibración.

En 2008, Yurievich & Petrovich [1] realizaron una investigación metrológica para la industria aeronáutica. Los autores propusieron un método para evaluar la confiabilidad metrológica de los sistemas de medición de frecuencia radiales en aeronaves comerciales. Según Yurievich & Petrovich [1], los resultados confirmaron que el

método propuesto es efectivo al nivel de confianza de 99% para sistemas de baja, media y alta frecuencia.

Teniendo en cuenta que el número de datos experimentales en la calibración, se encuentran en torno de 10 puntos, es fundamental realizar interpolaciones para valores no experimentales (i.e.: puntos no medidos). Las curvas son ajustadas por el método de los mínimos cuadrados ordinarios, de esta forma, se logra representar el desempeño medio del sistema de medición en una determinada fase de operación [2]. El método debe abarcar un adecuado diseño experimental, la estimación de los parámetros y el tratamiento de valores atípicos [3].

2.1. OLS: Fundamentación teórica

El objetivo principal de este método es determinar la curva de ajuste de los datos experimentales con la menor desviación media cuadrática (s), este parámetro s generalmente se encuentra asociado a la desviación estándar de los datos medidos. Posterior a la adquisición de datos, se procede a la determinación de los valores atípicos (*outliers*) que pudiesen tener lugar en las mediciones, y los datos relevantes medidos por el patrón y el instrumento a calibrar fueron graficados para con base en dichos datos determinar los polinomios de ajuste, luego se usó la ecuación (1) para calcular la desviación media cuadrática (s) en función a cada polinomio de ajuste.

$$s^2 = \sum_{i=0}^n \frac{[y(x_i) - y_i]^2}{n - m - 1} \quad (1)$$

En esta ecuación $y(x)$ corresponde a la variable representando el valor verdadero en la calibración evaluada en x ; y_i representa el valor verdadero medido por el patrón durante la calibración; x_i el valor indicado por el instrumento durante la calibración; s , la desviación media cuadrática; m el grado del polinomio de ajuste y n el número de puntos medidos, luego se identificó el polinomio de ajuste que presentase la menor desviación

media cuadrática (s). Este valor de s es definido como la incertidumbre de ajuste.

Utilizando el polinomio de ajuste que genera la menor desviación media cuadrática puede ser obtenido un valor de la medición cercano al valor real.

3. APARATO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la calibración de los instrumentos de medición del banco de prueba de transferencia de calor por convección libre y forzada ubicado en el área de termociencias del CELTI, tomado como muestra para este artículo se aplicó el método estadístico anteriormente descrito. Como se puede apreciar en la Figura 1, los instrumentos de medición necesarios para controlar y medir los parámetros relevantes del experimento son: Termómetro Bimetálico (A) y Manómetro Bourdon (B). Mayores detalles pueden ser consultados en [4, 5].



Figura 1. Banco de convección libre y forzada

Durante el proceso de adquisición de los datos experimentales se tomaron 11 puntos con el fin de obtener una calibración adecuada y las variables necesarias para realizar el análisis de valores atípicos por medio del criterio Chauvenet. Los resultados confirmaron que los datos

experimentales no contienen valores atípicos. Incluyendo todos los valores medidos se procede a realizar la calibración del manómetro y el termómetro. En relación a la calibración se encontraron 4 polinomios de ajuste con el fin de determinar la mejor curva de calibración.

3. RESULTADOS

3.1 Polinomio de ajuste e Incertidumbre asociada a la medición

Utilizando la ecuación 1 es calculada la desviación mínima cuadrática para cada polinomio de ajuste tanto para las mediciones de presión, como para las de temperatura, los resultados de este cálculo mostraron que el polinomio de grado 2 (Figura 2) genera la menor desviación media cuadrática de las mediciones de presión (Tabla 1) y el polinomio de grado 1 (Figura 1) provee la menor desviación media cuadrática de las mediciones de temperatura (Tabla 2).

Tabla 1. Desviación media cuadrática, manómetro.

Desviación media cuadrática (PSI)			
Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
0,0136	0,0122	0,1890	0,0917

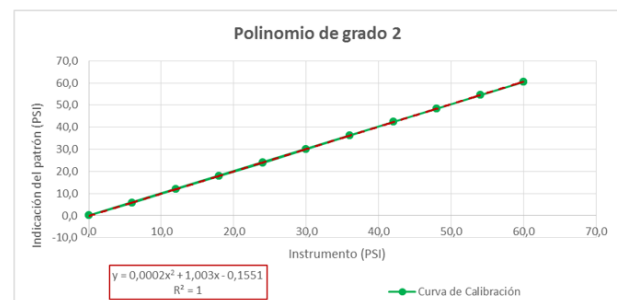


Figura 2. Manómetro: Polinomio de ajuste

Tabla 2. Desviación media cuadrática, termómetro.

Desviación media cuadrática (°F)			
Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
0,4343	0,4878	1,7984	0,8506

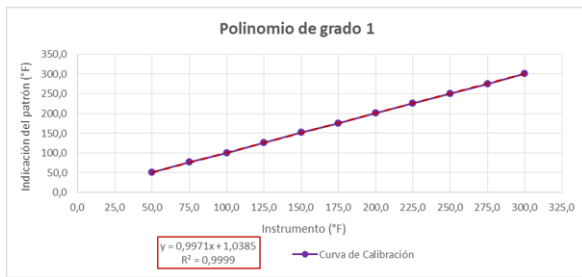


Figura 3. Termómetro: Polinomio de ajuste

A continuación, se presentan los polinomios que con base en los cálculos se seleccionaron por presentar la menor desviación media cuadrática, la ecuación (2) muestra el polinomio de grado 2 obtenido para el manómetro y la ecuación (3) para el termómetro.

$$y = 0,0002x^2 + 1,003x - 0,1551 \quad (2)$$

$$y = 0,9971x + 1,0385 \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, y : denota el valor ajustado; x : denota el valor indicado por el instrumentos. Por otro lado, el valor correspondiente a la incertidumbre de ajuste (u_s) ligada al manómetro y al termómetro respectivamente es:

$$u_s (\text{manómetro}) = 0,0122 \text{ PSI}$$

$$u_s (\text{termómetro}) = 0,4343 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Las tablas 3 y 4 resumen el cálculo de la incertidumbre expandida (U) asociada al manómetro y el termómetro.

Tabla 3. Manómetro: Cálculo de incertidumbre

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE (PSI)						
Patrón	Instrumento	Desv. Med. Cuadrática	Combinada	Parametro t-student	Expandida	Grado de confiabilidad
u_p	u_{ms}	u_s	u	t	U	%
0,050	1,155	0,0059	1,16	2,09	2,41	95,0

Tabla 4. Termómetro: Cálculo de incertidumbre

FUENTES DE INCERTIDUMBRE (°F)						
Patrón	Instrumento	Ajuste	Combinada	t-student	Expandida	Confiabilidad
u_p	u_{ms}	u_{ajuste}	u	t	U	%
0,00090	1,155	0,4343	1,23	2,26	2,79	95,0

4. CONCLUSIONES

Este trabajo estimó la confiabilidad metrológica de un banco de prueba para el análisis del proceso de transferencia de calor por convección libre y forzada. La metodología aplicada, basada en el método de los Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), permitió encontrar un polinomio de ajuste cuya importancia se basa en: (i) estimar valores ajustados para cada indicación del instrumento; (ii) calcular errores sistemáticos en todo el rango de medición del instrumento; (iii) estimar la incertidumbre asociada a la medición. Adicionalmente, la metodología OLS fue útil en la estimación de la confiabilidad metrológica de los instrumentos en conexión al banco de prueba, *i.e.*: termómetro bimetalico (1,12%), manómetro Bourdon (4,02%). Finalmente, confirmase que el método OLS resulta en una estrategia metrológica para evaluar la confiabilidad de sistemas y procesos de medición.

5. REFERENCIAS

- [1] Yurievich, Y. M., & Petrovich, V. A. (2006, February). Evaluation of the Metrological Reliability of the Means of Measuring Techniques of the Aircraft Radio Systems. In *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, 2006. TCSET 2006. International Conference* (pp. 591-592). IEEE.
- [2] De Faro Orlando, A. Departamento De Engenharia Mecânica Programa De Pós-Graduação Em Metrologia, Qualidade E Inovação. 2009.
- [3] Mesures, B. I. D. P. E.; Internationale, C. É.; Normalisation, O. I. D. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, 1995. ISBN 9267101889.
- [4] Pérez, L.; Pastor, F. Caracterización metrológica de los bancos de pruebas en el CELTI de la Universidad del Atlántico. Trabajo de Grado en fase de conclusión. Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería - Programa de Ingeniería Mecánica. 2016.
- [5] Pérez, L.; Pastor, F.; Pedraza C.; Hernandez J.; Ibañez I. Confiabilidad metrológica de un manómetro tipo bourdon para aplicaciones en procesos de transferencia de calor. Simposio CENAM. 2016.