

Ordinary least squares method: A strategy to reduce the mass measurement uncertainty

Mínimos cuadrados ordinarios: una estrategia para disminuir la incertidumbre de medición de masa

J.D. Hernández-Vásquez  ; C.A. Pedraza-Yepes  ; L.E. Malkún-Tobón  ; C.G. Rapalino-Gutiérrez 
; J.L. Tapias-Martínez 

Abstract—This research was motivated by technical-economic challenges imposed by mass metrology, in particular on issues concerning calibration methods of non-automatic weighing instruments (i.e.: scales). In the contemporary world it is vital to ensure the reliability of measurement results in a test, testing and research laboratory. These results must be reproduced by institutions —National and International— considering the uncertainties associated with the process. Two of the factors that strongly affect the metrological reliability of the mass measurement processes are: (i) non-frequency of calibration of scales; (ii) analytical methods for the treatment of experimental data obtained in the calibration. In this context, and maintaining the principles for the calibration of a measuring instrument in which it must be performed under the same operating conditions of the instrument, metrology laboratories are in need of knowing metrological reliability (i.e.: errors and uncertainties) for each calibration scenario. In this order of ideas, this study sought to evaluate the incident factors in the measurement of mass and calibration of non-automatic weighing instruments. The applied methodology (ordinary least squares method) allowed estimating the metrological reliability of a Digital Scale (Max. Cap.: 30 kg; Res.: 0.001 kg) at 0.012% ($k = 2$). The results confirmed that the applied method allowed to reduce the adjustment uncertainty up to 92.0% from the use of a fourth degree polynomial when compared to a model widely used by conventional metrology laboratories, i.e.: first degree polynomial to from a simple linear regression.

Index Terms— buoyancy factor, gravity acceleration ratio, mass and balance, measurement uncertainty, metrology.

Resumen— Esta investigación fue motivada por desafíos técnico-económicos impuestos por la metrología de masa, en particular, en temas concernientes a métodos de calibración de los instrumentos no automáticos de pesaje (i.e.: balanzas). En el mundo contemporáneo resulta un factor vital garantizar la confiabilidad de los resultados de medición en un laboratorio de prueba, ensayos

e investigación. Estos resultados deben ser reproducidos por instituciones —nacionales e internacionales— considerando las incertidumbres asociadas al proceso. Dos de los factores que afectan fuertemente la confiabilidad metrológica de los procesos de medición de masa son: (i) no frecuencia de calibración de balanzas; (ii) métodos analíticos para el tratamiento de datos experimentales obtenidos en la calibración. En este contexto y, manteniendo los principios para la calibración de un instrumento de medición en el cual ésta debe ser realizada en las mismas condiciones de operación de instrumento, los laboratorios de metrología están en la necesidad de conocer la confiabilidad metrológica (i.e.: errores e incertidumbres) para cada escenario de calibración. En este orden de ideas, Este estudio buscó evaluar los factores incidentes en la medición de masa y calibración de los instrumentos no automáticos de pesaje. La metodología aplicada (método de los mínimos cuadrados ordinarios) permitió estimar la confiabilidad metrológica de una Balanza Digital (Cap. Máx.: 30 kg; Res.: 0,001 kg) en 0,012% ($k=2$). Los resultados confirmaron que el método aplicado permitió disminuir la incertidumbre de ajuste hasta en 92,0% a partir de la utilización de un polinomio de cuarto grado cuando comparado con un modelo ampliamente utilizado por laboratorios de metrología convencionales, i.e.: polinomio de primer grado a partir de una regresión lineal simple.

Palabras claves— factor de empuje, incertidumbre de medición, masa y balanza, metrología, relación de aceleración de gravedad.

Resumo—Esta pesquisa foi motivada por desafios técnico-econômicos impostos pela metrologia de massa, em particular questões relacionadas aos métodos de calibração de instrumentos de pesagem não automáticos (ou seja: balanças). No mundo contemporâneo, é vital garantir a confiabilidade dos resultados da medição em um laboratório de testes, testes e pesquisa. Esses resultados devem ser reproduzidos por instituições —nacionais e internacionais— considerando as incertezas associadas ao processo. Dois dos fatores que afetam fortemente a confiabilidade metrológica dos processos de medição de massa são: (i) não

Este manuscrito fue enviado el 17 de octubre del 2019 y fue aceptado el 26 de septiembre del 2020.

José Daniel Hernández-Vásquez es profesor Tiempo Completo de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia. Pertenece al grupo de investigación. Puerto Colombia (e-mail: johernandez79@uan.edu.co).

Cristian Pedraza-Yepes es Profesor de planta de la Universidad del Atlántico. Pertenece al grupo de investigación CONFORMAT. Puerto Colombia, Colombia (e-mail: cristianpedraza@mail.uniatlantico.edu.co).

Luis Enrique Malkún Tobón es Ingeniero Mecánica egresado de la Universidad del Atlántico. Puerto Colombia, Colombia (e-mail: lemalkun@mail.uniatlantico.edu.co).

Carlos Guillermo Rapalino Gutiérrez es Ingeniero Mecánica egresado de la Universidad del Atlántico. Puerto Colombia, Colombia (e-mail: cgrapalino@mail.uniatlantico.edu.co).

Jorge Luis Tapias Martínez es Ingeniero Mecánica egresado de la Universidad del Atlántico. Puerto Colombia, Colombia. Puerto Colombia, Colombia (e-mail: jltmartinez@mail.uniatlantico.edu.co).



frequência de calibração de balanças; (ii) métodos analíticos para o tratamento de dados experimentais obtidos na calibração. Nesse contexto, e mantendo os princípios para a calibração de um instrumento de medição no qual ele deve ser realizado sob as mesmas condições de operação do instrumento, os laboratórios de metrologia precisam conhecer a confiabilidade metrológica (ou seja, erros e incertezas) para cada cenário de calibração. Nesta ordem de ideias, este estudo procurou avaliar os fatores incidentes na medição de massa e calibração de instrumentos de pesagem não automáticos. A metodologia aplicada (método dos mínimos quadrados ordinários) permitiu estimar a confiabilidade metrológica de uma Balança Digital (Max. Cap.: 30 kg; Res.: 0,001 kg) a 0,012% ($k = 2$). Os resultados confirmaram que o método aplicado permitiu reduzir a incerteza de ajuste em até 92,0% do uso de um polinômio de quarto grau quando comparado a um modelo amplamente utilizado pelos laboratórios de metrologia convencionais, ou seja: polinômio de primeiro grau a de uma regressão linear simples.

Palavras-chave - fator de empuxo, incerteza de medição, massa e equilíbrio, metrologia, razão de aceleração da gravidade.

I. INTRODUCCIÓN

La Organización Internacional de Metrología Legal, en su recomendación R-76-1 [1, 2], define los instrumentos no automáticos de pesaje (balanzas) como aquellos que requieren la intervención de un operador durante el proceso de pesaje, por ejemplo, para colocar o retirar de un reservorio una determinada masa de líquido permitiendo obtener el resultado de la medición.

Considerando la relevancia de las balanzas para todos los procesos de laboratorio e industriales, este trabajo busca aplicar el método de los mínimos cuadrados ordinarios en pro de determinar un polinomio de ajuste que permita estimar la confiabilidad metrológica de una balanza digital utilizada en el laboratorio de investigaciones químicas de la Universidad del Atlántico.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Relación de aceleración de la gravedad (R_g)

Los instrumentos no automáticos de pesajes están fuertemente influenciado por la relación de la aceleración de la gravedad. Así, el cálculo de la relación de aceleración de gravedad (R_g), i.e.: local de uso (g) y de fabricación de la balanza (g_{ref}), puede ser calculada por (1):

$$R_g = \left(\frac{g}{g_{ref}} \right) \quad (1)$$

B. Factor de Empuje (E)

Considerando que la masa de un objeto es determinada por un sistema localizado en un campo gravitacional dentro de una atmósfera envolvente, el resultado de la indicación de la masa es influenciado por el efecto de empuje del aire con relación a ese objeto [3]. La fuerza aplicada en la celda de carga (F_b) es dada por:

$$F_b = m_o \cdot g \cdot E \quad (2)$$

De esa forma, el factor de empuje (E) puede ser calculado a

partir de la relación de densidad del aire (ρ_{ar}) y del objeto (ρ_o):

$$E = \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_o} \right) \quad (3)$$

C. Masa aparente

La masa aparente es definida como el valor que indicaría la balanza considerando los factores debidos a la aceleración de la gravedad y del factor de empuje. Despreciando la diferencia de temperatura entre el objeto y el aire atmosférico, los efectos debido a la transferencia de calor por convección no fueron considerados. De esa forma, el valor de la masa aparente puede ser calculado por un modelo simplificado en comparación de aquellos propuestos por [4]. Este valor es calculado dividiendo la fuerza (F , cuya masa del objeto es representada por m_o) medida por la celda de carga, por el valor de la aceleración de la gravedad en el local de fabricación (g_{ref}).

$$m_{ap} = \frac{F}{g_{ref}} = m_o \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_o} \right) \cdot \left(\frac{g}{g_{ref}} \right) \quad (4)$$

III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La balanza objeto de estudio (Fig. 1) fue evaluada experimentalmente según los lineamientos establecidos en [4].



Fig. 1. Balanza objeto de estudio (Fabricante: Bernal; Cap.: 30 kg; Res: 0,001 kg) [5]

Adicionalmente, fue calculada la desviación media cuadrática (u_s ; incertidumbre de ajuste), aplicando (5), para establecer el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales:

$$u_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{ap} - m_a)^2}{N - n - 1} \quad (5)$$

La expresión anterior lleva en consideración la masa aparente (m_{ap}); la masa ajustada por el polinomio de ajuste (m_a); el número de puntos experimentales (N) y el grado del polinomio de ajuste (n). Una vez calculada u_s fue posible especificar el polinomio que mejor modela los datos experimentales para un nivel confianza de 95,0%.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I, la columna que indica Patrón muestra la masa nominal colocada en la plataforma de la balanza, junto con la incertidumbre de medición asociada a las masas patrón. La columna que indica Balanza muestra: (i) la masa indicada, que corresponde a la lectura de la balanza según la masa patrón colocada en la plataforma; (ii) la masa aparente, que fue calculada aplicándose (4); (iii) la incertidumbre de la masa aparente, que fue calculada a partir de (6):

$$\left(\frac{u_{map}}{m_{ap}}\right)^2 = \left(\frac{u_{mo}}{m_o}\right)^2 + \left(\frac{u_{ar}}{\rho_{ar} - \rho_o}\right)^2 \tag{6}$$

La expresión anterior fue obtenida a partir de: (i) aplicando el concepto de expansión en serie de Taylor definidos por la GUM [7] en (4) y manipulando los resultados de forma algebraica y (ii) considerando en el modelo físico, la aceleración de la gravedad constante durante el desarrollo de los experimentos.

Las columnas relacionadas con la Temperatura ambiente y la Presión atmosférica denotan el valor medido con el termómetro. La incertidumbre asociada a la medición de la temperatura ambiente es de 0,25 °C. La incertidumbre asociada a la medición de la presión atmosférica es de 0,058 mbar/abs. Finalmente, con los valores medidos de temperatura ambiente y presión atmosférica en cada punto experimental obtenido, se puede estimar la densidad del aire (masa específica) que envuelve la masa patrón para cada uno de los puntos evaluados. Para tal propósito se aplica la ecuación de estado para gases ideales [8]. A seguir se desglosa el desarrollo de la ecuación de los gases ideales dada por (7), con el propósito de obtener la masa de específica del aire:

$$P_{atm} \cdot \vartheta_{ar} = R_{ar} \cdot T_{amb} \tag{7}$$

$$\vartheta_{ar} = \frac{R_{ar} \cdot T_{amb}}{P_{atm}} \quad \therefore \quad \vartheta_{ar} = \frac{1}{\rho_{ar}} \tag{8}$$

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \cdot T_{amb}} \tag{9}$$

en las expresiones arriba: P_{atm} , denota la presión atmosférica medida; ϑ_{ar} , el volumen específico del aire; R_{ar} , la constante específica del aire; T_{amb} , temperatura ambiente medida; ρ_{ar} , masa específica del aire estimada. A seguir, se resumen los resultados obtenidos:

TABLA I
CALIBRACIÓN BALANZA BERNALO

Patrón		Balanza		
Masa nominal (kg)	Incertidumbre (u) (kg)	Masa indicada (kg)	Masa aparente (kg)	Incertidumbre masa aparente (kg)
0	0,00000	0,000	0,000	0,000000
1	0,0000085	0,998	1,005	0,0000009
2	0,0000017	1,997	2,010	0,0000017
3	0,0000019	2,995	3,016	0,0000019

4	0,0000023	3,994	4,021	0,0000024
5	0,0000042	4,993	5,026	0,0000042
6	0,0000042	5,993	6,031	0,0000043
7	0,0000045	6,990	7,037	0,0000046
8	0,0000045	7,988	8,042	0,0000047
9	0,0000048	8,987	9,047	0,0000049
10	0,0000048	9,985	10,052	0,0000050
20	0,000017	19,965	20,104	0,000017
22	0,000017	21,965	22,115	0,000017
25	0,000017	24,961	25,130	0,000017
30	0,000017	29,947	30,156	0,000018

En la Tabla I puede ser observado que la incertidumbre de la masa aparente está en el mismo orden de grandeza que la incertidumbre de la masa patrón. Esto confirma que la contribución de la incertidumbre del aire atmosférico es menor cuando comparada con la contribución de la masa nominal. Por otro lado, también puede ser observado, que el valor de la masa aparente es un poco mayor al valor nominal de la masa patrón. Este resultado era esperado una vez que, a pesar que el factor de empuje es menor que la unidad ($E = 0,999852411$), la relación de aceleración gravedad es mayor que uno ($R_g = 1,005364076$), es decir, aceleración de la gravedad del local de calibración, $g = 9,8286204 \text{ m/s}^2$; aceleración de la gravedad del local de fabricación, $g_{ref} = 9,7761802 \text{ m/s}^2$ [5]. Esto confirma la influencia de la aceleración de la gravedad en la calibración de balanzas, conforme mostrado en la literatura especializada [4-6].

Siguiendo con el análisis estadístico, una vez aplicado el método de los mínimos cuadrados ordinarios se constató que el mejor ajuste es dado por una ecuación de cuarto grado. La Fig. 2 muestra la curva de ajuste polinomial de cuarto grado entre la masa indicada por el instrumento (“x”) y la masa aparente (“y”).

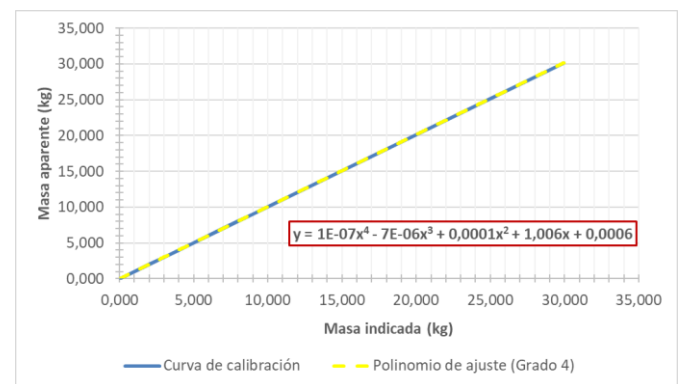


Fig. 2. Curva de ajuste polinomial de Cuarto Grado

Este análisis fue realizado comparando diversos polinomios desde un ajuste lineal (polinomio de primer grado) hasta un ajuste de cuarto grado. Considerando que es inviable, en la práctica, obtener un número infinito de puntos experimentales, siempre existirán valores intermediarios que no podrán ser calibrados. De esta forma, el uso de una ecuación matemática capaz de representar el fenómeno físico estudiado, es particularmente útil en busca de dos objetivos: (i) conocer el

valor real de medición para aquellos puntos que no fueron calibrados; (ii) conocer el error y la incertidumbre asociada a la medición de esos puntos. En términos específicos, un ajuste polinomial permite encontrar el valor real de medición para cualquier valor indicado por el instrumento, así como los errores y las incertidumbres para tales puntos. A pesar de esta, incuestionable ventaja técnica, es necesario especificar cuál de los polinomios analizados correspondería al mejor ajuste del fenómeno físico. Para resolver este interrogante, es importante resaltar que el uso de un polinomio de ajuste implica introducir una fuente de incertidumbre adicional al sistema de medición. Esta fuente corresponde, exactamente, a la incertidumbre del ajuste. Para cada polinomio es necesario determinar la incertidumbre del ajuste y aquel polinomio que ofrezca que el menor valor de incertidumbre es considerado como la ecuación matemática que mejor representa la naturaleza física del problema. En este sentido, aplicando (5) fue calculada la incertidumbre de ajuste para cada grado del polinomio. La Tabla II presenta los resultados consolidados:

TABLA II
CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE AJUSTE

Incertidumbre de ajuste (u_s)			
Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
0,0983	0,0989	0,1472	0,0079

En la Tabla II se observa que la incertidumbre de ajuste es considerablemente mayor cuando comparada con la incertidumbre de la masa aparente. A pesar de este hecho ocurrir, esta incertidumbre debe ser considerada como una fuente adicional. En contrapartida, se tiene, el beneficio que es posible estimar la masa ajustada, el error y la incertidumbre para cualquier indicación del instrumento. Adicionalmente, como se observó en la Fig. 2, el polinomio que mejor modela los datos experimentales para la balanza Bernalo, corresponde a un polinomio de grado 4, pues este ofrece la menor desviación media cuadrática (Tabla II). De ese modo, la ecuación de ajuste está dada por (10):

$$y = (1 \times 10^{-7})x^4 - (7 \times 10^{-6})x^3 + 0,0001x^2 + 1,006x + 0,0006 \quad (10)$$

Donde:

y : denota el valor de la masa ajustada (kg);

x : denota el valor de masa indicada por la balanza (kg).

Finalmente, se determinó el valor de masa ajustado para cada punto experimental obtenido junto con la incertidumbre expandida (U) asociada a la medición de masa. Este valor de incertidumbre fue estimado para un factor de cobertura $k=2$, ésta fue calculada a partir (11):

$$u^2 = u_s^2 + u_p^2 + u_{inst}^2 \quad (11)$$

La Tabla III presenta los resultados finales de la calibración correspondiente a la balanza Bernalo objeto de estudio en el presente trabajo.

TABLA III
CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE AJUSTE

	Masa Indicada	Masa ajustada	Incert. de ajuste	Incert.del patrón	Incert. del instrumento	Incert. ajustada (u)	Incert. Expandida (U)
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
CARGA ASCENDENTE	0,000	0,001	0,0015	0,00000	0,0011	0,0018	0,0037
	0,999	1,000	0,0015	0,0000085	0,0011	0,0018	0,0037
	1,998	2,000	0,0015	0,0000017	0,0011	0,0018	0,0037
	2,996	2,999	0,0015	0,0000019	0,0011	0,0018	0,0037
	3,994	3,998	0,0015	0,0000023	0,0011	0,0018	0,0037
	4,993	4,998	0,0015	0,0000042	0,0011	0,0018	0,0037
	5,992	5,998	0,0015	0,0000042	0,0011	0,0018	0,0037
	6,990	6,998	0,0015	0,0000045	0,0011	0,0018	0,0037
	7,989	7,998	0,0015	0,0000045	0,0011	0,0018	0,0037
	8,988	8,998	0,0015	0,0000048	0,0011	0,0018	0,0037
	9,986	9,997	0,0015	0,0000048	0,0011	0,0018	0,0037
	19,970	19,983	0,0015	0,000017	0,0011	0,0018	0,0037
	21,967	21,978	0,0015	0,000017	0,0011	0,0018	0,0037
24,962	24,970	0,0015	0,000017	0,0011	0,0018	0,0037	
29,947	29,948	0,0015	0,000017	0,0011	0,0018	0,0037	
CARGA DESCENDENTE	0,000	0,001	0,0015	0,0000000	0,0011	0,002	0,0037
	0,998	0,999	0,0015	0,0000009	0,0011	0,002	0,0037
	1,997	1,999	0,0015	0,0000017	0,0011	0,002	0,0037
	2,995	2,998	0,0015	0,0000019	0,0011	0,002	0,0037
	3,994	3,998	0,0015	0,0000023	0,0011	0,002	0,0037
	4,993	4,998	0,0015	0,0000042	0,0011	0,002	0,0037
	5,993	5,999	0,0015	0,0000042	0,0011	0,002	0,0037
	6,990	6,998	0,0015	0,0000045	0,0011	0,002	0,0037
	7,988	7,997	0,0015	0,0000045	0,0011	0,002	0,0037
	8,987	8,997	0,0015	0,0000048	0,0011	0,002	0,0037
	9,985	9,996	0,0015	0,0000048	0,0011	0,002	0,0037
	19,965	19,978	0,0015	0,000017	0,0011	0,002	0,0037
	21,965	21,976	0,0015	0,000017	0,0011	0,002	0,0037
24,961	24,969	0,0015	0,000017	0,0011	0,002	0,0037	
29,947	29,948	0,0015	0,000017	0,0011	0,002	0,0037	

La Tabla III muestra que la incertidumbre asociada a la medición de masa cuando es utilizada la balanza digital, es 0,0037 kg en todo el rango de medición del instrumento. En términos relativos, la incertidumbre corresponde a 0,012% para un nivel de confianza de 95,0%

V. CONCLUSIONES

Los resultados consolidados en este trabajo investigativo confirmaron que el método de los mínimos cuadrados ordinarios se constituye en una fuerte herramienta para la evaluación metrológica de instrumentos no automáticos de pesaje de tipo digital. Para el caso particular de esta investigación fue constatada una disminución de 92,0% en la incertidumbre de ajuste al utilizar un polinomio de cuarto grado, en detrimento de un polinomio de primer grado, lo cual es muy recurrente en un laboratorio de metrología convencional. Adicionalmente, los resultados mostrados en la Tabla III permiten afirmar que la incertidumbre asociada a la medición de masa es de 0,0037 kg lo que equivale a 0,012% de la capacidad máxima de la balanza. Por fin, este resultado confirma que la balanza evaluada atiende los requisitos establecidos para los procesos de medición de masa del Laboratorio de Nutrición y Dietética de la Universidad del Atlántico, una vez que el error máximo tolerado para las investigaciones no debe superar el 0,02%. De esta forma, los resultados de este trabajo investigativo constituyen una real contribución a la metrología de masa y balanza, esperándose que pueda ser reproducido por diversas instituciones en pro de

umentar la confiabilidad metrológica de procesos y sistemas de medición.

REFERENCIAS

- [1] OIML R-76-1. "Non-automatic weighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements - Tests" International Organization. of Legal Metrology. International Recommendation. 2006.
- [2] OIML R-111-1. "Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirement" International Organization. of Legal Metrology. International Recommendation. 2004.
- [3] R. Engel and H. Baade, "Water density determination in high-accuracy flowmeter calibration - Measurement uncertainties and practical aspects" Flow Measurement and Instrumentation, vol. 25, pp. 40-53, June 1997. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.002
- [4] EURAMET cg-18. "Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments" European Association of National Metrology Institutes. International Guide. 2015.
- [5] C. Rapalino, J. Tapias, "Evaluación de la confiabilidad metrológica de los instrumentos no automáticos de pesaje en los laboratorios de la Universidad del Atlántico". Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería-Programa de Ingeniería Mecánica, Colombia. 2016.
- [6] C. Rapalino, J. Tapias, C. Pedraza C, J. Hernandez, I. Ibañez, "Factor de empuje y aceleración de gravedad: dos parámetros críticos en la calibración de balanzas" Simposio CENAM Metrología para el bienestar y la competitividad, septiembre 2016.
- [7] GUM. "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (1995), with Supplement 1, Evaluation of measurement data, JCGM 101:2008" International Standard Organization (ISO). 2008.
- [8] V. Wylan and R. Sonntag "Fundamentals of Classical Thermodynamics" (SI Version). Ed. John Wiley & Sons: Singapore, 3ra. edición, 1985.



José Daniel Hernández Vásquez. Doctor en Ingeniería Mecánica, formado por la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUC-Río, 2018). Máster en Metrología (PUC-Río, 2014). Ingeniero Mecánico (Universidad del Atlántico, 2011). Tiene experiencia

docente a nivel de pregrado y postgrado, ministrando disciplinas en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Programa de Posgrado en Metrología de la PUC-Río y la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Tiene experiencia como investigador y consultor de la industria brasileña, actuando en proyectos financiados por el Organismo Brasileño Regulador del Sistema Eléctrico (ANEEL) y la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP / PETROBRAS). Tiene experiencia en la gestión técnica y administrativa de los laboratorios de metrología. Es reconocido por la Red Colombiana de Metrología (RCM, Sub-Red: Academia, Industria), como experto en metrología para el mercado colombiano. Actualmente, actúa como profesor de tiempo completo con dedicación exclusiva en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB), Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Antonio Nariño.

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0028-2912>



Cristian Antonio Pedraza Yepes. Nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia en 1975. Recibió su título en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia en 2001. Se graduó como Master en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia en 2011

Actualmente trabaja como Profesor Asociado y miembro del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico, Colombia. Las áreas de interés de investigación incluyen diseño mecánico, procesos de fabricación, caracterización de materiales y generación de energía alternativa.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5951-7835>



Luis Enrique Malkún Tobón. Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad del Atlántico. Cuenta con experiencia en sistemas de aseguramiento metrológico a nivel de industrial. Proyectos de ingeniería mecánica, sistemas de refrigeración, análisis de incertidumbre y

calibración de instrumentos de medición.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2647-5373>



Carlos Guillermo Rapalino Gutiérrez. Profesional en Ingeniería Mecánica con amplia experiencia en el área de Control de Calidad de Producto, inspección y verificación de producto metalmeccánico terminado y en proceso; experiencia en lectura e interpretación de planos de

fabricación y ensamble; conocimiento en inspección visual de soldadura y procedimiento de Ensayos No Destructivos; experiencia en manejo de instrumentos de medición y con capacidad en labores de realización y presentación de informes gerenciales; experiencia en el sector de protección catódica, inspección de líneas de oleoducto y gasoducto, manejo de equipo para inspección de línea; experiencia en planeación, manejo de personal y alistamiento de material para producción. Persona activa con gran facilidad para asimilar nuevos conocimientos y responsable en el cumplimiento de sus obligaciones, buenas relaciones interpersonales, de excelente presentación personal, buena disposición para la labor asignada, con alto grado de responsabilidad y fácil interpretación de las políticas organizacionales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6425-178X>



Jorge Luis Tapias Martínez. Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad del Atlántico. Ampla experiencia en gestión del mantenimiento preventivo y correctivo. Implementación de aseguramiento metrológico a nivel industrial. Específicamente en la calibración de balanzas, termómetros y sistemas de medición de presión en plantas

industriales. Durante su formación como Ingeniero Mecánico tuvo la oportunidad de realizar un estudio metrológico en las balanzas de la Universidad del Atlántico. Producto de esto ha desarrollado artículos tanto a nivel nacional como a nivel internacional.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2709-1822>