




Control Methods for Weighing Instruments Based on Electromagnetic Force Compensation: A State-of-the-Art Review

Mauricio Serna Gómez , Hernán Paz Penagos , and Jorge Andrés Puerto Acosta 

Abstract—This study presents a systematic review of the control methods applied to electromagnetic force compensation load cells (EMFC), a technology widely used in high-accuracy weighing instruments in various industrial, scientific and biomedical sectors. The research was conducted using a structured methodology applied to five recognised scientific databases — Scopus, Web of Science, Dimensions AI, Lens and OpenAlex—, covering publications from 2012 to 2024. The analysis identifies recurring trends and approaches in control design aimed at ensuring stability, accuracy, and high dynamic performance. The results indicate that achieving higher levels of accuracy requires more robust control methods, in which the performance of the electronic subsystem, consisting of the optical sensor, data acquisition system and digital controller, has a decisive impact compared to mechanical improvements. It is concluded that, in the simulated and experimental evaluations reported in the literature, no study was found to have performed a complete calibration of the EMFC weighing instrument or validated it in real environments, in accordance with the international recommendations of the International Organization of Legal Metrology (OIML) and the guidelines of the Inter-American Metrology System (SIM) or European Association of National Metrology Institutes (EURAMET). This gap highlights the need for future research to include validations under real operating conditions that enable the performance, accuracy and response speed of EMFC systems to be evaluated in the environments for which they are used.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/10104>

Index Terms—EMFC weighing systems, EMFC control weighing cell systems, EMFC weighing load cell, EMFC load cell, EMFC dynamic weighing systems.

I. INTRODUCCIÓN

LOS instrumentos de pesaje son ampliamente utilizados para determinar la magnitud de una carga en términos de su masa. Según su modo de funcionamiento, estos instrumentos se clasifican en automáticos o no automáticos, dependiendo de si requieren o no la intervención

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Javier Moreno-Valenzuela (*Corresponding author: Mauricio Serna Gómez*).

This work was supported by the Master's Program in Electronic Engineering at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Mauricio Serna Gómez, and H. P. Penagos are with the Master's Program in Electronic Engineering, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia (e-mails: mauricio.sernag@mail.escuelaing.edu.co, and herman.paz@escuelaing.edu.co).

J. A. P. Acosta is with Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia (e-mail: japuertoa@udistrital.edu.co).

de un operador [1, 2], uno de los dispositivos principales en estos instrumentos es la celda de carga, la cual es un transductor de medición que genera una señal de salida en respuesta a la carga aplicada [3]. Se han desarrollado diversas tecnologías para la construcción de celdas de carga, incluyendo las basadas en galgas extensométricas (strain gauges) [4, 5, 6], hilo vibrante (vibrating wire) [7], diapason (tuning fork) [8] y compensación de fuerza electromagnética (EMFC), siendo esta última el enfoque principal del presente artículo, cuya descripción técnica se encuentra en la Sección II. Además, la literatura reporta otras tecnologías aplicadas en el diseño de celdas de carga, como sensores inductivos de desplazamiento [9], sensores capacitivos [10, 11], celdas de carga piezoeléctricas [12, 13], entre otras tecnologías descritas en [14].

Al comparar el principio de pesaje por compensación de fuerza electromagnética (EMFC) con otras alternativas de pesaje, como las utilizadas con galgas extensométricas, estas últimas se reconocen como la tecnología clásica por su madurez, robustez mecánica y facilidad de integración. Sin embargo, presentan limitaciones en linealidad, histéresis y estabilidad que restringen su exactitud. En contraste, los sistemas EMFC ofrecen mayor sensibilidad y resolución, adecuándose a aplicaciones metrológicas de alta exactitud, aunque requieren mayor complejidad constructiva y condiciones ambientales más estrictas. Además, debido a su capacidad para mantener la estabilidad a largo plazo en condiciones controladas, los sistemas EMFC son preferidos en aplicaciones que exigen mediciones repetibles y con alta confiabilidad. Por otro lado, las galgas extensométricas siguen siendo una opción viable en entornos donde la simplicidad y el costo son factores prioritarios, aunque su desempeño en cuanto a exactitud de la medición está limitado [15].

Los instrumentos de pesaje se encuentran en todo tipo de industrias como la farmacéutica [16], en el transporte de carga, principalmente con la medición del peso de vehículos mientras están en movimiento (weigh in motion - WIM), [17, 18], en la metrología científica [19], en la calibración gravimétrica por pesaje [20, 21, 22], en la industria química [23], en las transacciones comerciales, producción, agricultura y atención sanitaria [24], por lo cual la medición de masa es de gran importancia para una gran cantidad de sectores.

Existe una normatividad bien establecida para la calibración de estos instrumentos [25, 26]. Para clasificar la exactitud de los instrumentos de pesaje sujetos a control legal, se emplean el intervalo de verificación y el número de intervalos de verificación, siendo este último el cociente entre la capacidad máxima del instrumento y el intervalo de verificación, ambos conceptos se encuentran definidos en la OIML R76-1:2006

[27], y su relación, tomada de la misma fuente, se presenta a continuación (Tabla I).

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PESAJE

Clase de exactitud	Intervalo de verificación, e	Número de intervalos de verificación, n = Máx/e		Capacidad mínima, Min (Límite inferior)
		(mínimo)	(máximo)	
Especial (I)	$0.001 \text{ g} \leq e^*$	50 000**	–	100 e
Alta (II)	$0.001 \text{ g} \leq e \leq 0.05 \text{ g}$	100	100 000	20 e
	$0.1 \text{ g} \leq e$	5 000	100 000	50 e
Media (III)	$0.1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$	100	10 000	20 e
	$5 \text{ g} \leq e$	500	10 000	20 e
Ordinaria (III)	$5 \text{ g} \leq e$	100	1 000	10 e

Con el fin de facilitar la interpretación de la Tabla 1, es importante precisar que la recomendación internacional OIML R76-1:2006 establece únicamente cuatro clases de exactitud para los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático sujetos a control metrológico legal: Especial (I), Alta (II), Media (III) y Ordinaria (IV). No obstante, la tabla presenta más de un renglón para algunas de estas clases, dado que esta recomendación internacional define sub-rangos permitidos para el intervalo de verificación (e) y para el número de intervalos de verificación ($n = \text{Máx}/e$) dentro de una misma clase.

Por consiguiente, los renglones adicionales no representan nuevas clases, sino sub-rangos normativos que pertenecen a la misma clasificación. Esta estructura en la tabla refleja las variaciones permitidas en los parámetros metrológicos sin generar nuevas clases ni subdivisiones conceptuales, garantizando así la coherencia del sistema de clasificación para los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático. A continuación, se presenta la clase de exactitud de una celda de carga en función del número máximo de sus intervalos de verificación, según la OIML R60-1:2021 [3] (Tabla II).

TABLA II
NÚMERO MÁXIMO DE INTERVALOS DE VERIFICACIÓN EN CELDAS DE CARGA CONFORME A LA CLASE DE EXACTITUD

	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Límite inferior	50 000	5 000	500	100
Límite superior	Sin límite	100 000	10 000	1 000

La Tabla II muestra que cada clase de exactitud establece un rango diferente para el número máximo de intervalos de verificación. La clase A admite la mayor cantidad de intervalos —sin límite superior—, seguida por la clase B, mientras que las clases C y D presentan rangos más restringidos. Estas diferencias reflejan que un mayor número de intervalos de verificación implica mayores exigencias metrológicas para la celda de carga.

A partir de la información presentada en las Tablas I y II, se evidencia una relación directa entre la clase de exactitud de un instrumento de pesaje y la clase de exactitud de su celda de carga, determinada por el número de intervalos de verificación. Esta relación impone requisitos cada vez más exigentes sobre los métodos de control implementados. A partir de un análisis exhaustivo de la literatura científica, realizado según la

metodología sistemática descrita en la Sección III, se identificaron doce documentos que abordan diversos métodos de control, los cuales se presentan en la Sección IV.

En la Sección V, los resultados del análisis evidencian que el 52.78 % de los artículos corresponden a la implementación del control PID digital, lo que refleja una marcada preferencia por este método de control. La descripción de este tipo de controlador se encuentra en [28]. Además, el 33.33 % de los documentos incluye controladores PID-T1, cuya descripción se presenta en [29]. Los controladores adaptativos con referencia al modelo (MRAC, por sus siglas en inglés Model Reference Adaptive Control) aparece en el 8.33 % de los artículos; este tipo de controlador se describe en [30]. También se identificó el uso del control robusto H-infinito en un 2.78 % de los artículos, descrito en [31], así como el control de modelo interno (IMC, por sus siglas en inglés Internal Model Control), también con un 2.78 %, descrito en [32].

Para el análisis porcentual, se consideró que un documento abordaba con igual profundidad tres métodos de control: PID digital, control robusto H-infinito e IMC. Por ello, se asignó a cada método una ponderación fraccionada de una tercera parte, garantizando una representación justa de la literatura y una suma exacta del 100 % en el análisis cuantitativo.

También es importante aclarar que los métodos de control mencionados anteriormente no representan la totalidad de enfoques existentes en el campo del control. Existen otros métodos ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como el control predictivo basado en modelos (MPC) [33], el control óptimo [34], el control adaptativo [35], el control LQG/LTR [36, 37], el control neuronal tipo PID (PIDN) [38], así como el control FIS (Fuzzy Inference System) y ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [39], entre otros. Finalmente, en la Sección VI se presenta la conclusión derivada de esta revisión.

II. MARCO DE REFERENCIA

Las celdas de pesaje en balanzas de precisión suelen ser mecanismos monolíticos, fabricados mediante técnicas de mecanizado sofisticadas, como el corte por hilo mediante descarga eléctrica (EDM) o el fresado. La estructura se fabrica a partir de un bloque de aluminio para simplificar el ensamblaje y reducir las fuentes de error. Estos mecanismos son prácticamente libres de mantenimiento y gracias a su comportamiento altamente repetible, permiten alcanzar desviaciones estándar muy bajas en la medición de masa [40]. En la Fig. 1 se presenta la configuración esquemática del sistema EMFC y la lista (1-8) identifica sus componentes principales, los cuales se describen a continuación.

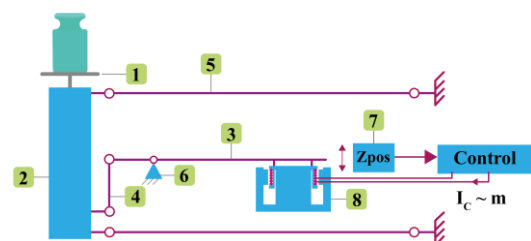


Fig. 1. Configuración esquemática de una balanza EMFC, con sus componentes principales. Adaptado de [41].

- 1 – Platillo de pesaje
- 2 – Suspensión de carga
- 3 – Palanca de transmisión
- 4 – Elemento de acoplamiento con bisagras flexibles
- 5 – Sistema de palancas paralelas con bisagras flexibles
- 6 – Soporte de la palanca de transmisión (fulcro)
- 7 – Detector de posición
- 8 – Actuador electrodinámico

Cuando se aplica una carga sobre el platillo de pesaje (1), este desciende, guiado por el sistema de palancas paralelas (5). El movimiento es entonces transmitido por la palanca de transmisión (3) con una relación específica. Un sensor de posición (7) detecta el desplazamiento de la palanca de transmisión. La señal de posición resultante se utiliza como entrada para un controlador, el cual genera una corriente hacia la bobina (8) [41].

El sensor de posición está compuesto por una ranura en la palanca de transmisión, un LED infrarrojo y un fotodiodo diferencial [42]. Al desplazarse la palanca, la ranura cambia de posición, generando el sombreado de los haces de luz de acuerdo con su ubicación [43]. La luz del LED atraviesa la ranura y produce una fotocorriente en cada una de las mitades del fotodiodo diferencial. Estas fotocorrientes se utilizan para generar una señal de voltaje, la cual es igual a cero cuando ambas mitades reciben la misma cantidad de luz [44].

La señal de posición resultante se utiliza como entrada para un controlador, el cual genera la corriente adecuada que alimenta la bobina. La fuerza electromagnética inducida contrarresta la fuerza ejercida por la carga [45]. Mediante el control de la corriente que circula por la bobina, el sistema retorna a su posición de equilibrio [46]. Finalmente, la corriente que circula por la bobina (I_c) se digitaliza como magnitud primaria de medición y mediante una calibración previa, se convierte en un valor de masa (m) [47].

También se debe asegurar un cierto desplazamiento Δy para garantizar la exactitud en la medición de masa; sin embargo, un desplazamiento excesivo puede afectar negativamente la velocidad de medición [48]. Con el objetivo de optimizar tanto la velocidad como la exactitud en las mediciones, se han implementado diversos esquemas de control en mecanismos de compensación de fuerza electromagnética (EMFC) [49].

El principio de compensación de fuerza electromagnética (EMFC) no solo se aplica en el pesaje estático, como en comparadores de masa [50, 51, 52], sino también en el pesaje dinámico [53, 54, 55], en inclinómetros EMFC con rango de medición extendido [56], en la medición de fuerza de alta exactitud [57, 58] y en la medición de flujo mediante velocimetría por fuerza de Lorentz (LFV) [59, 60]. También ha sido utilizado en la calibración de pesas de clase de exactitud OIML E1 y E2, de acuerdo con la redefinición del kilogramo [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67], en la calibración de potencia láser, mediante la medición del momento de los fotones [68], y como método para evaluar el factor de fuerza en balanzas de Kibble oscilantes, con aplicación a las balanzas de Planck [69].

Su aplicación se ha extendido a la viabilidad práctica de emplear fuerzas de Lorentz como alternativa a las pesas físicas [70], al concepto y diseño de balanzas de compensación de fuerza microfabricadas [71, 72, 73] y a la implementación de

técnicas de control de vibraciones, como el rechazo de onda reflejada, en celdas de pesaje basadas en EMFC [74]. También se han desarrollado prototipos planos de estas celdas de pesaje [75] y se ha empleado este principio en la determinación de constantes de resorte de microcantilevers utilizados en microscopía de fuerza atómica (AFM) [76].

A. Análisis de los Fundamentos Físicos de las Celdas de Pesaje por EMFC

Las celdas de pesaje por EMFC operan en el denominado modo de fuerza o modo de pesaje [47]. En este modo, el peso mg de una masa m , donde g representa la aceleración local de la gravedad, es contrarrestado por la fuerza electromagnética vertical Bli , generada por una corriente eléctrica I que circula a través de una bobina de longitud l en una densidad de flujo magnético B , lo que se expresa mediante la siguiente ecuación [77]:

$$mg = Bli \quad (1)$$

Por tanto, la fuerza electromagnética vertical compensa el peso aplicado, estableciendo la condición de equilibrio en el sistema de medición. En este estado, la fuerza electromagnética generada es igual y opuesta al peso de la masa. Al despejar la corriente eléctrica I de la ecuación (1), se obtiene la expresión que relaciona la corriente requerida con el peso aplicado, como se muestra en la ecuación (2):

$$I = \frac{mg}{Bl} \quad (2)$$

Dado que B , L y g son constantes durante la medición, se establece que la corriente eléctrica requerida para mantener el sistema en equilibrio es directamente proporcional a la masa aplicada. En consecuencia, la corriente de compensación constituye un estimador lineal de la masa, lo que fundamenta el principio operativo de la compensación de fuerza electromagnética en celdas de carga de alta exactitud, como se expresa en la ecuación (3):

$$I \propto m \quad (3)$$

B. Modelo Físico del Sistema por EMFC

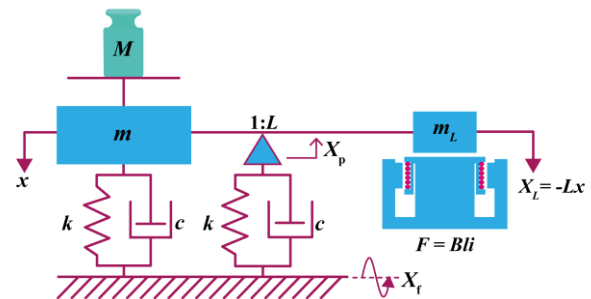


Fig. 2. Modelo físico del sistema de medición de masa basado en compensación de fuerza electromagnética, representado mediante un sistema masa-resorte-amortiguador y la interacción con el actuador electrodinámico. Adaptado de [78].

De acuerdo con lo propuesto en [78], La Fig. 2 muestra un modelo físico de un sistema de compensación de fuerza electromagnética (EMFC), en el cual se han incorporado los efectos de la vibración del suelo, denotada como x_f , el desplazamiento del punto de apoyo (fulcro) representado por x_p y el fulcro, previamente identificado en la Fig. 1 con el número 6. Este componente actúa como soporte mecánico de la palanca de transmisión y su movimiento inducido por vibraciones afecta directamente la exactitud en la medición de masa. En la Fig. 2, el fulcro se representa mediante un triángulo isósceles, asociado a la relación de transmisión $1:L$ del sistema de palancas y el desplazamiento vertical de la palanca se denota por x_L y se mide respecto a su posición de equilibrio. Esta representación permite evaluar con mayor exactitud los efectos dinámicos sobre el sistema de medición.

A partir del modelo físico representado en la Fig. 2, se establece la ecuación de movimiento que describe el comportamiento dinámico del sistema de medición de masa ante vibraciones del suelo. Esta ecuación incorpora la masa equivalente del sistema, los efectos de rigidez y amortiguamiento presentes en la estructura mecánica, así como la influencia del desplazamiento del punto de apoyo (fulcro) inducido por dichas vibraciones. De este modo, se representa de manera integral la respuesta dinámica del mecanismo de compensación, permitiendo analizar su estabilidad y sensibilidad ante variaciones inducidas por la vibración del suelo, tal como se expresa en la ecuación (4):

$$(M + m + m_L L^2)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c(\dot{x}_f - \dot{x}_p) + k(x_f - x_p) + Mg + FL \quad (4)$$

donde M es la masa del objeto a medir, m_L es la masa de la palanca, L es la relación de transmisión de la palanca, definida como $L = m/m_L$, c es el coeficiente de amortiguamiento, k es la constante de resorte, FL es la fuerza electromagnética que actúa como señal de control para regular la posición de la palanca, definida como $FL = BI$, x representa el desplazamiento vertical de la masa m . Al asumir $M = 0$ y $FL = 0$, se obtiene la ecuación de movimiento (5) a partir de la ecuación (4):

$$(m + m_L L^2)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c(\dot{x}_f - \dot{x}_p) + k(x_f - x_p) \quad (5)$$

Este modelo describe el comportamiento dinámico del sistema de medición de masa frente a la vibración del suelo, permitiendo analizar cómo las perturbaciones externas influyen en la respuesta del mecanismo. Con el fin de incorporar el efecto del desplazamiento del punto de apoyo, se introduce la hipótesis $x_p = Xx_f$, que supone que el movimiento del fulcro sigue proporcionalmente la vibración del suelo. Al aplicar esta relación, la ecuación (5) puede reescribirse dando lugar a la ecuación (6):

$$(m + m_L L^2)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{x}_f(1 - X) + kx_f(1 - X), \quad (6)$$

donde X es un parámetro asociado al desplazamiento del punto de apoyo (fulcro), el cual determina qué proporción de la vibración del suelo se transmite al sistema. En el caso $X = 0$,

el punto de apoyo permanece inmóvil ($x_p = 0$) y no replica la vibración del suelo. Por otro lado, si se asume que $x_p = x_f$, es decir, $X = 1$, el desplazamiento del punto de apoyo sigue exactamente la vibración del suelo, por lo que se obtiene la ecuación (7):

$$(m + m_L L^2)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

La ecuación (7), al cancelarse el efecto de la vibración del suelo (cuando $x_p = x_f$), no representa adecuadamente el comportamiento real del sistema, ya que no permite obtener el desplazamiento del mecanismo. Por tanto, la ecuación (5) puede considerarse válida para reproducir el comportamiento dinámico del sistema de medición de masa bajo condiciones reales de vibración.

Una vez establecido el modelo dinámico del sistema, es posible determinar la frecuencia natural correspondiente. De acuerdo con la ecuación (4), la frecuencia natural f del sistema de medición de masa se puede expresar como se muestra en (8):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M + m + m_L L^2}} \quad (8)$$

C. Tipos de Celdas de Pesaje por EMFC

Para complementar la comprensión teórica y el modelo matemático presentado, se ilustra en la Fig. 3 algunos tipos de celdas de pesaje con el principio de compensación de fuerza electromagnética (EMFC). Estas imágenes destacan la diversidad de enfoques utilizados en su diseño, lo que permite observar las adaptaciones que estos sistemas pueden tener en diferentes contextos. También se observa que estos sistemas son complejos en su diseño, mecanizado y construcción, en comparación con otras tecnologías de pesaje como las celdas de carga por galgas extensométricas.

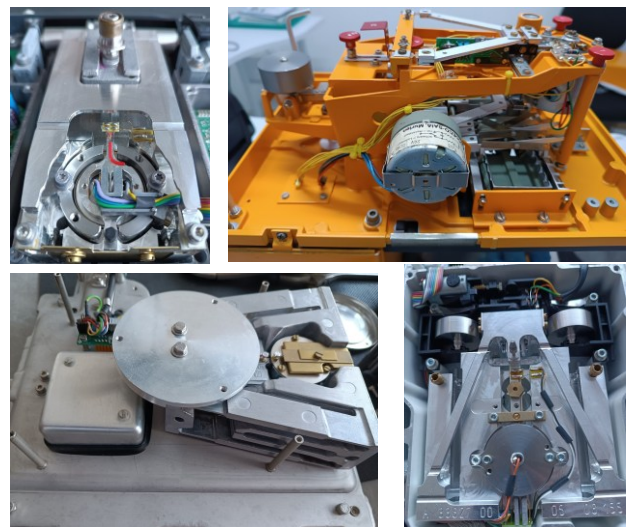


Fig. 3. Tipos de celdas de pesaje por compensación de fuerza electromagnética en balanzas de la empresa Sartorius AG. Fuente: Grupo Milligram S.A.S., fotos tomadas con autorización. Elaboración propia.

D. Diagramas de Bloques Representativos en EMFC

El diagrama de bloques de la Fig. 4 presenta un sistema en el que la señal de referencia U_{setpt} se compara con la salida real U_{pos} , proveniente de un detector de posición, la diferencia entre ambas señales genera una señal de error que es procesada por un controlador para ajustar la corriente de la bobina I_c , en el actuador electromagnético. Este actuador aplica una fuerza magnética F_{magn} , que actúa sobre el sistema mecánico, provocando un desplazamiento cuya posición y_{pos} es detectada y retroalimentada al controlador. Este ciclo de retroalimentación permite la regulación exacta de la posición.

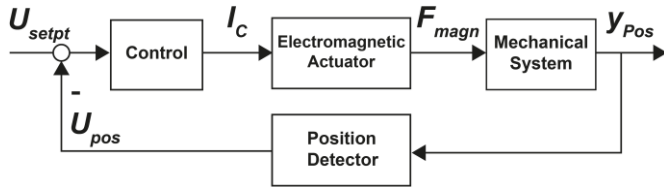


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema de la balanza de compensación de fuerza electromagnética. Adaptado y Modificado de [79].

Para identificar las funciones de transferencia del sistema de la balanza de compensación de fuerza electromagnética en condiciones de lazo cerrado, se utiliza la representación de retroalimentación, donde se modulan señales de perturbación sobre la corriente de la bobina I_m y la señal de voltaje de posición U_{pos} . Este enfoque permite analizar cómo la señal de error, que es la diferencia entre la señal de salida U_{pos} y la referencia U_{setpt} influye en el sistema. El diagrama de bloques mostrado en la Fig. 5 ilustra este proceso, donde la función de transferencia de la planta $G_s(s)$ y la del controlador $G_c(s)$ se determinan a partir de estas señales moduladas. Este procedimiento permite identificar, de manera precisa, los parámetros de transferencia de la planta y del controlador, garantizando un análisis detallado del comportamiento dinámico del sistema [47].

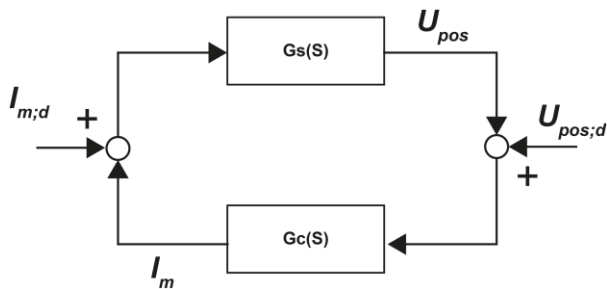


Fig. 5. Diagrama de bloques del proceso de identificación de la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de una balanza con compensación de fuerza electromagnética [47].

Las funciones de transferencia de la planta y el controlador se determinan utilizando las siguientes relaciones, las cuales se derivan a partir de la modulación de las señales de perturbación aplicadas tanto a la corriente de la bobina I_m como a la señal de voltaje de posición U_{pos} . Estas relaciones permiten analizar el

comportamiento dinámico del sistema y cómo las variaciones en las señales de entrada afectan la salida del sistema en el lazo cerrado, como se muestra en las ecuaciones (9) y (10):

$$G_s(s) = \frac{U_{pos}(s)}{I_m(s) + I_{m,d}(s)} \quad (9)$$

$$G_c(s) = \frac{I_m(s)}{U_{pos}(s) + U_{pos;d}(s)} \quad (10)$$

Donde:

$G_s(s)$ representa la función de transferencia de la planta, que describe cómo la corriente de la bobina I_m y las perturbaciones $I_{m,d}$ influyen en la señal de voltaje de posición U_{pos} .

$G_c(s)$ representa la función de transferencia del controlador, que muestra cómo el controlador ajusta la corriente I_m en respuesta a la diferencia entre la señal de salida U_{pos} y la referencia U_{setpt} , modulado por las señales de perturbación $U_{pos;d}$.

Este proceso de identificación de funciones de transferencia es fundamental para caracterizar el comportamiento dinámico del sistema en condiciones de lazo cerrado. Permite no solo obtener los parámetros de transferencia precisos de la planta y el controlador, sino también garantizar que el sistema responda adecuadamente a las perturbaciones externas, manteniendo la estabilidad y el rendimiento óptimo del sistema de control.

III. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del marco de referencia se fundamentó en una revisión sistemática de la literatura [80], complementada con un análisis bibliométrico mediante VOSviewer, con datos recolectados en abril y mayo de 2025. Se emplearon herramientas de inteligencia artificial para la identificación de palabras clave y formular una ecuación de búsqueda en Scopus AI [81, 82]. Como se muestra en la Fig. 6.

Start exploring

Fig. 6. Enunciado del problema de investigación utilizado en la consulta realizada mediante Scopus AI.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar la consulta en Scopus AI, los cuales corresponden al planteamiento de búsqueda y muestran las primeras referencias identificadas pertinentes al tema de investigación. La plataforma, desarrollada por Elsevier, generó automáticamente

una ecuación de búsqueda a partir del planteamiento ingresado, con el fin de ampliar la recuperación de información mediante sinónimos y términos equivalentes. La ecuación obtenida fue la siguiente:

("control" OR "regulation" OR "management" OR "governance") AND ("methods" OR "techniques" OR "approaches" OR "strategies") AND ("electromagnetic" OR "magnetic" OR "EM" OR "electro-magnetic") AND ("force" OR "power" OR "influence" OR "impact") AND ("compensation" OR "balancing" OR "adjustment" OR "offset") AND ("weighing" OR "measurement" OR "scales" OR "mass") AND ("instruments" OR "devices" OR "systems" OR "equipment").

Esta ecuación, generada por Scopus AI, permitió identificar publicaciones relevantes sobre los métodos de control empleados en los instrumentos de pesaje por compensación de fuerza electromagnética, garantizando precisión y exhaustividad en la estrategia de búsqueda.

Scopus AI interpreta la pregunta formulada en lenguaje natural, genera automáticamente una versión técnica en inglés y construye una ecuación de búsqueda basada en palabras clave y operadores booleanos. Con esta información, la plataforma identifica y presenta referencias relevantes extraídas de la base de datos. En la Tabla III se presenta la clasificación designada por Scopus AI como "método de control", la cual incluye tanto técnicas propiamente de control como aproximaciones complementarias derivadas de la búsqueda.

TABLA III
ESTRATEGIAS Y TÉCNICAS ASOCIADAS AL CONTROL
IDENTIFICADAS POR SCOPUS AI

Método de Control	Descripción	Beneficios
Control PID	Ajuste dinámico del sistema	Mejora del rendimiento y estabilidad del sistema
Filtros notch adaptativos	Supresión de vibraciones	Reducción de perturbaciones
Resortes magnéticos y cojinetes de aire	Mejorar la robustez y amortiguación	Aumento del ancho de banda y robustez
Sensores ópticos de posición	Medición exacta de la posición nula	Alta resolución y exactitud
Calibración no lineal	Métodos para tratar la calibración no lineal con sensores	Efectividad en calibración en tiempo real
Compensación de fuerza de Lorentz	Generación de fuerza conocida y reproducible durante la carga	Mejora de reproducibilidad y automatización

La Tabla III muestra que los métodos identificados abarcan diferentes enfoques, incluyendo técnicas de control clásicas, estrategias orientadas a la supresión de vibraciones, mejoras de la robustez mecánica y métodos orientados a incrementar la exactitud en la medición, lo que evidencia la diversidad de aproximaciones empleadas en los sistemas de pesaje basados en compensación de fuerza electromagnética (EMFC). Estos

métodos permiten la integración de dispositivos de alta tecnología, lo cual contribuye a la robustez y confiabilidad en aplicaciones donde la exactitud y la estabilidad son fundamentales, asegurando así un rendimiento óptimo en condiciones operativas exigentes como en las aplicaciones de pesaje dinámico.

Para el proceso de búsqueda bibliográfica se seleccionaron las siguientes palabras clave: EMFC system, Dynamic weighing systems, EMFC control system, EMFC weighing cell y non-automatic weighing. Estas palabras clave fueron definidas a partir de una lectura crítica y rigurosa de los artículos presentados por Scopus AI y posteriormente se emplearon en una búsqueda académica realizada en las bases de datos: OpenAlex, Lens, Scopus, Dimensions AI y Web of Science (WoS). Esta búsqueda incluyó estudios publicados a partir del año 2012 y constituyó la fuente principal de recuperación de información científica.

La selección de estas bases de datos se realizó considerando que Web of Science y Scopus son las dos principales bases de datos bibliográficas [83], se incluyó OpenAlex debido a su creciente relevancia como alternativa gratuita a los proveedores comerciales en los análisis bibliométricos [84]. También se incorporó la base de datos Dimensions AI por su compatibilidad con herramientas como Bibliometrix y VOSviewer [85]. Además, se seleccionó la base de datos Lens, la cual es una plataforma gratuita que permite el acceso tanto a literatura académica como a documentos de patentes [86]. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la búsqueda por palabras clave en las bases de datos previamente descritas (Tabla IV).

TABLA IV
RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA DE PALABRAS CLAVE EN LAS
BASES DE DATOS SELECCIONADAS

Base de datos	EMFC System	EMFC control System	EMFC Weighing Cell	Non-Automatic Weighing	Dynamic Weighing
Open Alex	39	15	8	429	5361
Lens	109	65	11	47678	49898
Scopus	52	19	12	48	2697
Dimensions AI	1190	822	118	340714	952076
WoS	28	6	8	6	1036

La Tabla IV muestra diferencias significativas en el número de registros recuperados entre las bases de datos, destacándose Dimensions AI y Lens por concentrar la mayor cantidad de documentos en la mayoría de las consultas, mientras que WoS presenta los valores más bajos para varios de los términos empleados.

Una vez consolidado el conjunto definitivo de documentos, se realizó un análisis de coocurrencia de las index keywords más relevantes para identificar clústeres temáticos y relaciones entre términos. En este análisis, los nodos representan las palabras clave y los clústeres agrupan temáticas afines. El mapa resultante se presenta en la Fig. 7.

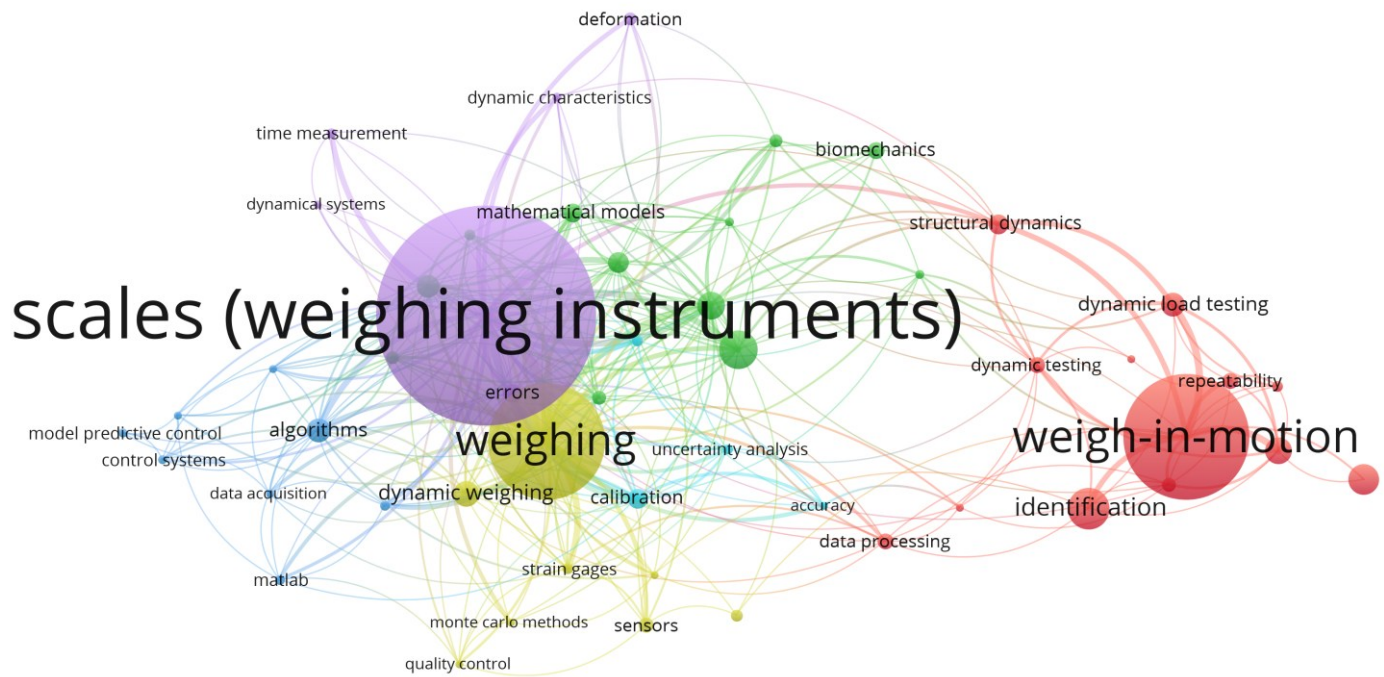


Fig. 7. Mapa de coocurrencia de las index keywords relevantes para la investigación, generado mediante VOSviewer a partir de los registros bibliográficos recuperados.

Para contextualizar la construcción del mapa presentado en la Fig. 7, a continuación se describe el proceso de integración, depuración y selección del conjunto documental. Las bases de datos descargadas fueron integradas y procesadas mediante la herramienta web *AteneaSires* (<https://ateneasires.com/>), que permitió la detección y eliminación de artículos duplicados. Posteriormente, los registros consolidados se analizaron con el software VOSviewer [87], con el fin de estructurar el conjunto de documentos seleccionados para el análisis de coocurrencia. Con el propósito de garantizar la pertinencia, coherencia y calidad, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- documentos recuperados en las bases de datos Scopus, Web of Science, Dimensions AI, Lens y OpenAlex;
- documentos publicados entre 2012 y 2024;
- estudios cuyo título, resumen o palabras clave evidenciaron relación directa con los sistemas de pesaje por compensación de fuerza electromagnética (EMFC), incluidos sus métodos de control y la dinámica del sistema;
- documentos disponibles en texto completo.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- registros duplicados detectados mediante *AteneaSires*;
- documentos que, tras la revisión del título y del resumen, no mostraron pertinencia temática con los sistemas EMFC, sus métodos de control o la dinámica de pesaje;
- literatura no académica (pósteres y resúmenes de conferencias sin texto completo disponible);
- documentos sin acceso a texto completo.

El mapa de coocurrencia mostró que las index keywords más relevantes fueron *weighing instruments*, *weigh-in-motion* y *weighing*, directamente relacionadas con el objeto de investigación. Con el propósito de optimizar el filtro de búsqueda, se definieron nuevas palabras clave: EMFC weighing systems, EMFC control weighing cell systems, EMFC weighing load cell, EMFC load cell y EMFC dynamic weighing systems. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla V.

TABLA V
NUEVA BÚSQUEDA POR PALABRAS CLAVE EN LAS BASES DE DATOS SELECCIONADAS

Base de datos	EMFC weighing systems	EMFC control weighing cell systems	EMFC weighing load cell	EMFC load cell	EMFC dynamic weighing systems
Open Alex	8	0	3	7	1
Lens	12	2	5	25	1
Scopus	12	2	4	11	5
Dimensions AI	136	90	103	333	98
WoS	8	0	5	9	2

La Tabla V evidencia diferencias marcadas en el número de registros recuperados entre las bases de datos para términos más específicos relacionados con sistemas EMFC. *Dimensions AI* concentra la mayor cantidad de documentos en todas las consultas, mientras que *OpenAlex* y *WoS* presentan los valores más bajos en la mayoría de los términos.

Los resultados de las búsquedas se integraron en la plataforma *AteneaSires* con el propósito de unificar y depurar la información proveniente de las bases de datos. Los registros

consolidados se analizaron posteriormente en VOSviewer. La Fig. 8 presenta el diagrama de bloques que ilustra el procedimiento metodológico.

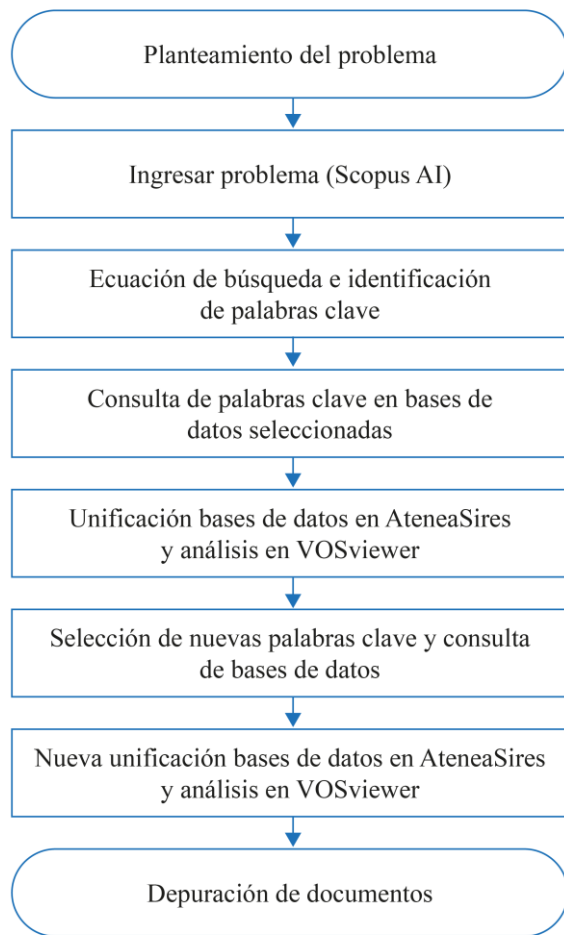


Fig. 8. Diagrama de bloques correspondiente a la metodología utilizada en la investigación.

IV. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En [88] se desarrolla un sistema de control automático para una celda de pesaje con compensación de fuerza electromagnética, empleando el módulo de pesaje WZA224-ND y un sistema dSPACE conectado a un PC. Las pruebas y visualización se realizaron con el software ControlDesk y Matlab. La metodología incluyó la descripción técnica del módulo de pesaje, el análisis de los fundamentos físicos de la compensación por fuerza electromagnética, el modelo matemático de los procesos mecánicos en la celda de carga, la identificación de parámetros y la simulación computacional. El control se implementó mediante un esquema PID sintonizado con Simulink Control Design, PID Tuner. La principal tarea que plantea la identificación es reproducir la resonancia que surge a 113,7 Hz. El efecto de esta resonancia es característico de un cambio brusco de carga. Como resultados, se destaca la relación lineal entre la masa medida y la corriente generada por la bobina, así como el desarrollo de un sistema de control de

corriente de la bobina que mantiene el equilibrio en la celda de carga.

En [89], se propone una celda de pesaje por compensación de fuerza electromagnética de alta exactitud que reemplaza el mecanismo de guía por flexión mediante resortes magnéticos en configuración Halbach y cojinetes de aire. El sistema, diseñado con tres resortes magnéticos dispuestos simétricamente para minimizar los movimientos parásitos, utiliza un controlador en tiempo real con convertidores analógico-digital y digital-analógico de 16 bits, un algoritmo de control PID y un filtro digital pasa-bajas de segundo orden con una frecuencia de corte de 100 Hz. El control fue desarrollado en MATLAB/Simulink y la visualización de datos se realizó con el software ControlDesk/dSPACE.

Las pruebas indicaron que, para un peso patrón clase E2 de 10 g y 100 g, la repetibilidad fue de 2,35 mg y 9,59 mg, respectivamente. En comparación con un sistema de resorte mecánico, que presentó una resonancia a 7 Hz típica de celdas EMFC convencionales, la configuración con resorte magnético no mostró resonancias en el intervalo de frecuencias hasta 100 Hz y alcanzó la estabilidad 89 ms más rápido bajo el criterio de $\pm 0,1\%$, además de duplicar la estabilidad de corriente, lo que permitió mejorar tanto la resolución como la repetibilidad del pesaje.

En [90] se desarrolló un concepto de ajuste para una celda de pesaje con compensación de fuerza electromagnética (EMFC), orientado a optimizar la rigidez y la sensibilidad a la inclinación de los mecanismos flexibles con el fin de mejorar la exactitud en la medición de masa. El sistema incorpora masas de ajuste y modificaciones geométricas para minimizar estos parámetros, evaluándose mediante un procedimiento automatizado en una plataforma de inclinación de alta exactitud y bajo condiciones de vacío. El control se implementó mediante un PID digital que regula la corriente de la bobina para mantener la posición de referencia. La electrónica del sistema incluyó una fuente de corriente constante, un amplificador de transimpedancia, un fotodiodo diferencial y un multímetro Agilent 3458A. Entre las principales fuentes de incertidumbre se identificaron desviaciones micrométricas en la fabricación de las bisagras flexibles y la sensibilidad a la inclinación. Como resultado, se obtuvo una celda de pesaje monolítica planar EMFC capaz de compensar de manera sofisticada la rigidez y la sensibilidad a la inclinación.

En [91] se presenta el diseño y ajuste de celdas de pesaje EMFC para un comparador de masa al vacío de 1 kg, optimizando la rigidez, la sensibilidad a la inclinación y la respuesta a cargas excéntricas. Se empleó modelado mecánico, desde formulaciones analíticas hasta elementos finitos, para desarrollar y evaluar dos prototipos llamados PROT-S y PROT-EA, controlados mediante un PID digital con frecuencia ≤ 20 Hz. La fotocorriente del sensor de posición se amplificó y convirtió a voltaje mediante un amplificador de transimpedancia, medido con un multímetro HP 3458A,

mientras que la corriente de la bobina móvil fue suministrada por una fuente HP 3245A. La incertidumbre, asociada a tolerancias mecánicas y parámetros geométricos, se evaluó para alcanzar una incertidumbre de 5 ng en cada pesaje. Los prototipos lograron una reducción significativa de la incertidumbre y una mayor exactitud en la medición de masas de referencia de 1 kg en condiciones de vacío.

En [92] se presenta el diseño y la validación de un sistema de control adaptativo robusto para una balanza con EMFC. El objetivo es mantener la posición de equilibrio del brazo de la balanza frente a variaciones en los parámetros del sistema y perturbaciones externas, garantizando estabilidad bajo condiciones de incertidumbre. La metodología inicia con el modelado matemático de la dinámica del sistema, seguido del diseño de un controlador adaptativo que integra un operador de proyección para acotar los parámetros estimados dentro de un rango seguro, incrementando la robustez ante perturbaciones no modeladas. La implementación se llevó a cabo en Matlab/Simulink sobre una plataforma dSPACE DS1104.

Entre las principales fuentes de incertidumbre se identifican tolerancias de fabricación, homogeneidad del material, ruido en la medición y perturbaciones no modeladas. Los resultados experimentales muestran que, aunque el control adaptativo mejora la estabilidad, no alcanza la exactitud deseada de $\pm 23,42$ nm, registrándose una desviación aproximada de $\pm 0,5$ μ m respecto a la posición de equilibrio. Se propone la incorporación de un sensor de mayor exactitud, como un interferómetro, lo que también permitiría reducir el tiempo de estabilización.

En [79] se presenta un modelo mecatrónico de una celda de pesaje con EMFC Sartorius OEM WZA224, desarrollado en ANSYS Mechanical APDL. El subsistema mecánico se modela mediante el método de elementos finitos (FEM), mientras que los componentes electrónicos y electromagnéticos incluidos el sensor de posición, controlador y actuador electromagnético se representan mediante ecuaciones diferenciales implementadas en ANSYS Parametric Design Language (APDL). Este enfoque integrado permite la optimización simultánea de elementos mecánicos, electromagnéticos y de control, así como la evaluación de la sensibilidad del sistema frente a variaciones en las condiciones de operación, como la rigidez del soporte. El sistema de control implementado corresponde a un PIDT1 discreto, diseñado para mantener la palanca en la posición cero con la mayor estabilidad posible, minimizando el ruido de medición y reduciendo el tiempo de estabilización.

La validación se realiza mediante la comparación de resultados obtenidos en simulaciones y mediciones experimentales, evidenciando una alta concordancia tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Los resultados confirman que este modelo permite realizar estudios de estabilidad y desempeño del control en fases tempranas de desarrollo, optimizando el diseño sin incurrir en la fabricación de prototipos costosos.

En [93] se presenta un proceso de diseño de controladores para balanzas con EMFC, priorizando la función de transferencia de perturbaciones del lazo de control como criterio central de optimización. El objetivo es mejorar la dinámica de medición y reducir el tiempo de respuesta en aplicaciones dinámicas frente a controladores PID convencionales. El estudio se desarrolló con una celda de pesaje Sartorius WZA224ND con capacidad de 200 g, acoplada a un sistema de procesamiento dSPACE DS1006, con módulos DS2102 (DAC) y DS2004 (ADC), ambos de 16 bits y ± 10 V. Se evaluaron dos estrategias: un controlador PIDT1 diseñado para compensar las dos frecuencias naturales más bajas de la planta y un controlador de quinto orden derivado del modelo de la planta, complementado con filtros notch (114 Hz) y de segundo orden (1 kHz) para atenuar resonancias y diafonía.

Los resultados indicaron que, aunque el controlador basado en modelo presentó una respuesta más lenta en el control de posición, logró una estimación de masa más rápida y precisa ante perturbaciones, evidenciando que un diseño orientado a la función de transferencia de perturbaciones puede superar a enfoques clásicos en aplicaciones dinámicas. Además, se determinó que la reproducibilidad de las mediciones está condicionada por las capacidades del hardware de conversión de señales, lo que plantea oportunidades de mejora en la instrumentación.

En [94] analizaron la sustitución del control analógico tradicional, basado en estructuras PID o PIDT1, por un control digital con el objetivo de optimizar el rendimiento dinámico de balanzas por EMFC. Este cambio busca responder a los requerimientos de aplicaciones como sistemas de pesaje dinámico y dosificación rápida, donde la rapidez y estabilidad de la medición son determinantes. El estudio comparó dos configuraciones de hardware en tiempo real: un sistema con controlador PXI (NI PXIe-8102 RT) y módulo A/D-D/A (NI PXI-6289) y un sistema con FPGA (NI PXI-7854R con Virtex-5-LX110) que integra convertidores y permite conexión directa con los sensores, reduciendo latencias y aumentando la frecuencia de muestreo.

Para ambos casos se implementó un controlador digital PIDT1 con compensación polinómica de resonancias, aplicado a una celda OEM de 220 g, lo que permitió ampliar el ancho de banda de lazo cerrado de aproximadamente 90 Hz a 370 Hz, multiplicando por cuatro la capacidad de respuesta. Los resultados experimentales mostraron que la arquitectura con FPGA alcanzó frecuencias de control de hasta 280 kHz y superó las limitaciones observadas en el sistema PXI, confirmando su potencial para optimizar aplicaciones de pesaje dinámico de alta exactitud.

En [95] se presenta y valida un método para el diseño de controladores en celdas de pesaje por EMFC, fundamentado en la identificación de parámetros dinámicos a partir de la respuesta en frecuencia de la impedancia. El enfoque permite obtener un conjunto reducido de parámetros que describen las

propiedades dinámicas principales de la celda, optimizando su rendimiento en términos de exactitud y velocidad, posibilitando tanto la caracterización de celdas existentes como la determinación directa de parámetros de control. Inspirado en el método empleado en acústica para caracterizar altavoces electrodinámicos mediante parámetros Thiele-Small (TSP), el trabajo demuestra que una celda EMFC puede representarse por un modelo masa-resorte-amortiguador acoplado a un circuito RL y que, mediante analogía electromecánica, este se transforma en un circuito equivalente RLC.

Con la diferencia entre la posición de referencia y la posición real como señal de error, se plantea la implementación de un controlador PID, cuyos parámetros se derivan directamente de los TSP identificados. Los resultados evidencian que este procedimiento permite obtener tanto las características mecánicas como eléctricas de la celda, así como configurar de forma sistemática el controlador, contribuyendo a mejorar el desempeño dinámico del sistema de pesaje.

En [96] se presentan dos enfoques de modelado para optimizar balanzas por EMFC en aplicaciones de pesaje dinámico: un modelo de cuerpo rígido para describir el comportamiento mecánico y un modelo de elementos finitos (FEM). Ambos modelos permiten reducir la fabricación de prototipos físicos y facilitar la identificación de parámetros mediante un enfoque de caja negra, considerando la balanza como un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI). A partir de simulaciones y mediciones experimentales, se desarrolla un controlador digital PIDT1 discretizado, evaluado tanto en simulación como en pruebas experimentales. La representación de la balanza como sistema MISO mejora la compensación de perturbaciones y resonancias. Los resultados evidencian que la optimización mediante controladores incrementa el rendimiento dinámico sin requerir modificaciones mecánicas significativas.

En [97] abordan el modelado y control de sistemas de pesaje dinámico (checkweighers) operando bajo el principio de EMFC, con especial atención a los efectos de vibración del suelo. El objetivo principal es desarrollar y validar un modelo físico-matemático que represente el comportamiento dinámico del sistema, evaluando su respuesta al escalón tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. La metodología empleada comprende la estimación de parámetros del modelo a partir de datos experimentales y el análisis de la influencia de vibraciones externas; los resultados experimentales indican que la frecuencia natural del sistema es de aproximadamente 5 Hz.

El método de control implementado corresponde a un control PID realizado en un FPGA, optimizado para cumplir con restricciones de tiempo de muestreo de 0,1 ms. El modelo dinámico se aproxima mediante un sistema masa-resorte-amortiguador, cuyos parámetros se estimaron a partir de datos experimentales. La validez del modelo se verifica comparando las respuestas experimentales y simuladas para configuraciones en lazo abierto y cerrado, evidenciando una alta concordancia.

Además, se analiza el impacto de las vibraciones del suelo sobre la exactitud de la medición de masa y se demuestra que el modelo propuesto reproduce de forma fiable dichos efectos, proporcionando una base sólida para el diseño de estrategias de compensación en entornos con perturbaciones mecánicas.

En [98] se presenta ZEFIRA como un marco metodológico para el desarrollo de sistemas embebidos aplicados a la metrología, con énfasis en el pesaje dinámico mediante compensación de fuerza electromagnética (EMFC). Este proceso integra el desarrollo de hardware y software, optimizado para entornos con requisitos estrictos de exactitud, trazabilidad metrológica y robustez frente a perturbaciones. Como caso de aplicación, se implementa un sistema de control en FPGA para una balanza EMFC de alta exactitud, utilizando una arquitectura polinómica discreta de décimo orden que permite parametrizar diversas estrategias de control, incluyendo PID digital, controlador robusto (H-infinito) y control por modelo interno (IMC). La parametrización de los controladores se realizó mediante MATLAB/Simulink, considerando restricciones de tiempo de respuesta y estabilidad frente a perturbaciones.

Para la validación experimental, se implementan versiones reducidas de controladores polinómicos de punto fijo y doble precisión en la FPGA, alcanzando frecuencias de muestreo de hasta 500 kHz y reduciendo significativamente la latencia respecto al sistema predecesor. Los resultados evidencian mejoras en resolución, estabilidad y rendimiento dinámico, confirmando la utilidad y aplicabilidad del marco ZEFIRA para el diseño de sistemas embebidos de alta exactitud en metrología.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan las Tablas VI(a) y VI(b), en las cuales se resume de manera comparativa el conjunto de aportes identificados en la revisión del estado del arte, con el propósito de organizar sistemáticamente la evidencia y facilitar el contraste entre enfoques de control e implementaciones en sistemas de pesaje por compensación de fuerza electromagnética (EMFC). Esta síntesis permite visualizar tendencias metodológicas, niveles de madurez tecnológica y criterios de evaluación reportados en la literatura, así como identificar convergencias y diferencias entre propuestas. En particular, la Tabla VI(a) consolida los elementos descriptivos y de implementación de cada estudio, incluyendo los objetivos, el método de control empleado y las herramientas de software y hardware utilizadas, lo que posibilita comparar arquitecturas, estrategias de diseño y condiciones experimentales. De manera complementaria, la Tabla VI(b) integra los aspectos asociados a las fuentes de incertidumbre consideradas, los resultados obtenidos y las limitaciones reportadas, aportando una visión crítica sobre el alcance de los hallazgos y los vacíos de investigación.

TABLA VI (a)

RESUMEN REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: OBJETIVO, CONTROLADOR E IMPLEMENTACIÓN (SOFTWARE Y HARDWARE)

Artículo	Objetivo	Controlador	Software empleado	Hardware
[88]	Desarrollar y simular un sistema de control automático para una celda de carga por EMFC	PID digital	Matlab / Simulink, Control Desk	Módulo de pesaje WZA224-ND, sistema dSpace, PC
[89]	Desarrollar una celda EMFC con resortes magnéticos y cojinetes de aire	PID digital	Matlab / Simulink, Control Desk	Tres resortes magnéticos, dSpace, DSA 35670A
[90]	Desarrollar un concepto de ajuste para la rigidez y la sensibilidad a la inclinación en una celda EMFC	PID digital	No especificado	Sensor óptico diferencial, bobina móvil, multímetro de alta exactitud
[91]	Diseñar, ajustar y validar una celda de pesaje EMFC para comparadores de masa al vacío de 1 kg	PID digital	Matlab, ANSYS APDL	Multímetro HP 3458A, fuente HP3245A, bobina móvil, cámara de vacío
[92]	Desarrollar un control para una balanza EMFC manteniendo la posición de equilibrio	MRAC (Control Adaptativo con Referencia al modelo)	Matlab / Simulink	dSpace DS1104
[79]	Desarrollar un modelo mecatrónico para una celda de pesaje con EMFC	PID-T1 digital	ANSYS APDL	Celda Sartorius OEM WZA224
[93]	Optimizar la dinámica de medición en balanzas EMFC ante perturbaciones	PID-T1 digital	Matlab / Simulink, Control Desk	Celda Sartorius WZA224, dSpace DS1006, DS2102, DS2004
[94]	Optimizar el desempeño dinámico de balanzas por EMFC sustituyendo el control analógico	PID-T1 digital	LabVIEW	NI PXIe-8102 RT, NI PXI 6289, NI PXI-7854R
[95]	Parametrizar balanzas EMFC usando respuesta en frecuencia	PID digital	No especificado	Celda EMFC
[96]	Optimizar el diseño de balanzas por EMFC para pesaje dinámico mediante modelos de cuerpo rígido y FEM	PID-T1 digital	ANSYS APDL, Matlab	Celda de pesaje por EMFC
[97]	Proponer un modelo dinámico y una estrategia de control para una balanza EMFC ante vibraciones	PID digital	No especificado	Celda EMFC, FPGA
[98]	Analizar y optimizar la dinámica de celdas EMFC mediante técnicas de modelado y control embebido	PID digital, controlador robusto (H-infinito), IMC (control por modelo interno)	Matlab / Simulink, LabVIEW	Celda EMFC, FPGA

TABLA VI (b)
RESUMEN REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: FUENTES DE INCERTIDUMBRE, RESULTADOS Y LIMITACIONES

Artículo	Fuente de Incertidumbre	Resultados	Limitaciones
[88]	Resonancia a 113,7 Hz por cambios bruscos de carga	Relación lineal masa-corriente en la bobina, modelo que reproduce la resonancia	Complejidad del modelo, alcance centrado en simulación, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[89]	Tolerancias de fabricación, ensamble de imanes, ruido eléctrico	Alta respuesta dinámica, mayor estabilidad de corriente	Alcance centrado en condiciones de laboratorio, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[90]	Rigidez del sistema, sensibilidad a la inclinación, tolerancias mecánicas	Sensibilidad lineal, repetibilidad aceptable y respuesta estable en pruebas reales y simuladas	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[91]	Tolerancias mecánicas, sensibilidad a cargas excéntricas	Reducción significativa de la incertidumbre y mayor exactitud	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[92]	Tolerancias, ruido y perturbaciones no modeladas	Error de $\pm 0,5 \mu\text{m}$, el objetivo era de $\pm 23,42 \text{ nm}$	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[79]	Variaciones en la rigidez del soporte	Alta concordancia entre simulaciones y pruebas reales	Alcance centrado en modelado y simulación, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[93]	Ruido ADC/DAC, diafonía, resonancias mecánicas, limitación de resolución	El controlador basado en modelo, mejoró la rapidez y exactitud en la medición de la masa	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[94]	Resonancias mecánicas ($\sim 475 \text{ Hz}$), retardo de muestreo entre canales (en PXI)	Ampliación del ancho de banda de 90 Hz a 370 Hz; control con FPGA hasta 280 kHz	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[95]	Medición de impedancia y variaciones mecánicas y eléctricas	Mejora en exactitud y velocidad, validación experimental	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[96]	Rigidez del soporte, resonancias, acoplamiento mecánico-eléctrico	Mejora del rendimiento dinámico sin modificar la estructura mecánica	Modelado numérico y pruebas experimentales en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[97]	Vibraciones del suelo (frecuencia y amplitud), parámetros estimados del modelo dinámico	Alta concordancia entre simulación y pruebas reales en lazo abierto y cerrado	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación
[98]	Resonancias y errores de modelado, tiempo de muestreo	Menor latencia, mejor resolución y estabilidad	Pruebas en condiciones controladas, no se menciona explícitamente la calibración ni la validación en condiciones reales de operación

Las Tablas VI(a) y VI(b) ofrecen una visión general de los estudios revisados y sirven de base para el análisis comparativo de la literatura, el cual permitió identificar patrones comunes y diferencias clave en los enfoques de control empleados en los sistemas de pesaje por compensación de fuerza electromagnética (EMFC). La mayoría de los estudios coinciden en el uso predominante de controladores PID digitales y sus variantes, como el PID-T1, los cuales ofrecen un desempeño estable en el lazo de control y una exactitud adecuada, lo que ha favorecido su aplicación tanto en pesaje estático como dinámico. A continuación, en la Tabla VII se presentan las estrategias de control identificadas en el estado del arte, junto con sus ventajas, limitaciones y ámbitos de aplicación.

TABLA VII
ESTRATEGIAS DE CONTROL IDENTIFICADAS EN EL ESTADO
DEL ARTE

Estrategia de Control	Ventajas	Limitaciones	Ámbitos de Aplicación
Control PID digital	Implementación sencilla en sistemas lineales	Inadecuado para sistemas no lineales	Adecuado para sistemas estáticos o con comportamientos predecibles
Control PID-T1 digital	Ofrece mayor exactitud y estabilidad en comparación con el PID digital	Requiere mayor potencia computacional	Sistemas que requieren alta exactitud
Control adaptativo con referencia al modelo (MRAC)	Se adapta a variaciones del sistema, mejorando la respuesta dinámica	Requiere un modelo preciso, complejidad computacional	Sistemas con comportamiento variable y dinámicos complejos
Control por modelo interno (IMC)	Alta robustez frente a perturbaciones y errores de modelado	Requiere un modelo preciso del sistema	Sistemas con incertidumbre significativa y que no son completamente conocidos
Control (H-infinito)	Minimiza la sensibilidad a perturbaciones y errores de modelado	Requiere modelado preciso y complejidad computacional	Sistemas con incertidumbre y perturbaciones significativas

Las estrategias presentadas en la Tabla VII corresponden a los métodos de control identificados en la literatura analizada. No obstante, otros trabajos en sistemas electromagnéticos describen enfoques adicionales que complementan estos resultados. Por ejemplo, se han desarrollado modelos dinámicos detallados y esquemas de control adaptativo y robusto para actuadores electromagnéticos sujetos a perturbaciones y no linealidades [99]. A su vez, revisiones recientes sobre rodamientos magnéticos activos reportan técnicas avanzadas como control predictivo basado en modelos (MPC), modos deslizantes (SMC), control robusto, control difuso y control

inteligente, utilizados en sistemas electromecánicos que operan en entornos donde se requiere alta exactitud [100]. De igual manera, en balanzas tipo Kibble se emplean lazos de control PID para regular la corriente y la fuerza durante los modos de pesaje y velocidad, lo que confirma la vigencia de estos esquemas en instrumentos basados en principios electromagnéticos [101].

Una vez contextualizadas estas aproximaciones adicionales de control, es pertinente considerar los modelos dinámicos que fundamentan su diseño y ajuste. La literatura presenta diversas metodologías de modelado que complementan el análisis dinámico de los sistemas EMFC. En este contexto, el esquema masa-resorte-amortiguador constituye la aproximación más utilizada, ya que representa adecuadamente la dinámica mecánica del sistema y permite el diseño de controladores mediante métodos clásicos y simulación.

La literatura también identifica otros esquemas de modelado aplicables a sistemas EMFC, entre ellos los modelos de impedancia, que representan el acoplamiento entre los subsistemas eléctricos y mecánicos en el dominio de la frecuencia; los modelos de parámetros distribuidos, que emplean análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA) para describir deformaciones y propagación de esfuerzos a lo largo de la estructura y los modelos híbridos electromecánicos, que integran la dinámica eléctrica del actuador y del sensor con la respuesta mecánica mediante ecuaciones de estado o funciones de transferencia acopladas. Estas aproximaciones amplían la comprensión del comportamiento dinámico y complementan la aplicabilidad del modelo masa-resorte-amortiguador en el análisis y diseño de estrategias de control para instrumentos de pesaje de alta exactitud.

Las principales fuentes de incertidumbre detectadas incluyen la sensibilidad a la inclinación, tolerancias de fabricación de mecanismos flexibles, vibraciones ambientales y excentricidad de la carga, factores que afectan la estabilidad y exactitud de la medición y exigen estrategias de control robustas.

En cuanto a las plataformas de desarrollo, predominan sistemas como dSPACE, FPGA y PXI, integrados con entornos MATLAB/Simulink y ControlDesk, lo que posibilita control digital de alta resolución y ejecución en tiempo real, mejorando la latencia, adaptabilidad y estabilidad del sistema, especialmente en aplicaciones dinámicas.

Los sistemas de control digital para EMFC integran un ADC, una unidad de procesamiento (microcontrolador, DSP o FPGA) y un DAC, empleándose también PCs o plataformas PC-in-the-loop como PXI [102, 103].

Además de los errores intrínsecos, factores ambientales como temperatura, humedad, presión del aire, campos eléctricos/magnéticos, inclinación y vibraciones del suelo generan incertidumbres que afectan la exactitud [104]. Estos factores influyen directamente en la estabilidad mecánica y electromagnética del sistema, introduciendo perturbaciones en la señal del sensor y en la capacidad del controlador para mantener el equilibrio de fuerza. Por ello, la implementación de sistemas de compensación térmica, aislamiento de vibraciones

y blindaje electromagnético resulta fundamental para garantizar el desempeño metrológico en aplicaciones de alta exactitud.

Por último, el análisis de coocurrencia, el estudio bibliográfico permitió identificar tendencias relevantes en la producción científica del conjunto de documentos analizado. La productividad mostró un incremento progresivo a partir de 2015, especialmente acentuado en los años más recientes, en concordancia con el aumento global de investigaciones relacionadas con sistemas de pesaje y tecnologías de medición de alta exactitud. En cuanto a visibilidad científica, los autores con mayor número de citas corresponden a contribuciones sobre medición, modelado, sensórica, análisis de cargas dinámicas e instrumentos de pesaje, lo que pone de manifiesto el carácter interdisciplinario del conjunto analizado.

VI. CONCLUSIÓN

La revisión del estado del arte evidencia la ausencia de estudios que aborden la calibración y las pruebas de los instrumentos de pesaje basados en compensación de fuerza electromagnética (EMFC), tanto de funcionamiento automático como no automático, conforme a los lineamientos establecidos por las guías del Sistema Interamericano de Metrología (SIM), EURAMET o las recomendaciones de la OIML, bajo condiciones reales de operación. Esta carencia constituye una brecha crítica, dado que las investigaciones revisadas se centran en el modelado numérico, la simulación y las pruebas experimentales desarrolladas en entornos controlados de laboratorio, sin incluir resultados de la calibración ni validación en contextos de uso real.

La falta de estudios orientados al entorno real limita la posibilidad de evaluar de manera integral la exactitud, estabilidad, repetibilidad y robustez de estos sistemas frente a perturbaciones de origen mecánico, térmico, electromagnético o ambiental, así como ante las condiciones de instalación y operación presentes en condiciones reales de funcionamiento. En este contexto, la propuesta desarrollada en este trabajo representa un avance significativo orientado a reducir dicha brecha, al establecer fundamentos técnicos y metodológicos que sustentan la transición desde los estudios teóricos y experimentales de laboratorio hacia la validación en entornos operativos reales. De esta manera, se sientan las bases para futuras investigaciones y desarrollos encaminados a alcanzar la exactitud de la medición requerida, así como el desempeño de los instrumentos de pesaje por EMFC en los entornos para los cuales son empleados.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Dra. Valeriya Cherkasova, al Dr. Norbert Rogge, a la MSc. Luz Adriana Serna Gómez, al Dr. José Fernando Jiménez Gordillo y al Ing. Fredy Prieto del Grupo Milligram S.A.S., por su valiosa orientación y apoyo en el desarrollo de este artículo. Extiendo también mi reconocimiento al equipo de trabajo de la Biblioteca Jorge Álvarez Lleras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por su colaboración en la obtención de la documentación necesaria para su realización.

REFERENCES

- [1] SIM, Guidelines on the Calibration of non-automatic weighing instruments with resolution less than 0.010 mg, SIM MWG7/cg-04/v.00, 2025. [Online]. Available: https://sim-metrologia.org/wp-content/uploads/2025/03/GUIA-MICROBALANZAS-2025-03-11_Ingles.pdf
- [2] OIML, R50-1 Edition 2014 (E), Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers) – Part 1: Metrological and technical requirements, reconfirmed in 2024. International Organization of Legal Metrology (OIML), 2014, [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/publication_view?p_type=1&p_status=1
- [3] OIML, R60-1 Edition 2021 (E), Metrological regulation for load cells. Part 1: Metrological and technical requirements, International Organization of Legal Metrology (OIML), 2021. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/publication_view?p_type=1&p_status=1
- [4] P. Tutak, "Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects," *JACSM*, vol. 6, no. 2, pp. 135–145, 2014, doi: 10.1515/jacsm-2015-0004.
- [5] A. Qandil and A. I. O. Zaid, "Considerations in the design and manufacturing of a load cell for measuring dynamic compressive loads," in *Proc. 2nd Int. Conf. Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, Islamabad, Pakistan, Jun. 10–11, 2015, doi: 10.1109/PGSRET.2015.7312209.
- [6] M. H. M. Diah, M. H. F. S. Hazimin, N. A. S. Noramli, and H. A. Rahim, "Strain gauge sensors in industrial instrumentation: A review for human technology integration," *Journal of Human Centered Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 50–55, 2025, doi: 10.11113/humentech.v4n1.97.
- [7] V. A. Kamble, V. D. Shinde, and J. K. Kittur, "Overview of load cells," *Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 22–29, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/355370308_Overview_of_Load_Cells
- [8] N. Shinozaki, K. Okamoto, M. Ikeshima, K. Terunuma, and K. Naito, "Performance of 'tuning fork' load cells," *OIML Bulletin*, vol. 56, no. 1, pp. 20–27, 2015. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/publications/bulletin/pdf/oiml_bulletin_jan_2015.pdf
- [9] J. Lewandowski, "Inductive sensor for weighing of mass," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 323–334, 2011, doi: 10.2478/v10178-011-0014-9.
- [10] A. Abu Al Aish and M. Rehman, "Development of a capacitive mass measuring system," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 151, pp. 113–117, 2009, doi: 10.1016/j.sna.2009.02.023.
- [11] L. Cheng, H. Zhang, and Q. Li, "Design of a capacitive flexible weighing sensor for vehicle WIM system," *Sensors*, vol. 7, pp. 1530–1544, 2007, doi: 10.3390/s7081530.
- [12] M. A. Mangi, H. Elahi, A. Ali, H. Jabbar, A. B. Aqeel, A. Farrukh, et al., "Applications of piezoelectric-based sensors, actuators, and energy harvesters," *Sensors and Actuators Reports*, vol. 9, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sn.2025.100302>.
- [13] M. Khalili, G. Vishwakarma, S. Ahmed, and A. T. Papagiannakis, "Development of a low-power weigh-in-motion system using cylindrical piezoelectric elements," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 11, pp. 496–508, 2022, doi: 10.1016/j.ijst.2021.06.004.
- [14] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*, 3rd ed. London, U.K.: Academic Press, 2021, ch. 18, "Mass, force, and torque measurement." [Online]. Available:

- <https://mrce.in/ebooks/Measurement%20&%20Instrumentation%20Theory%20&%20Application%203rd%20Ed.pdf>
- [15] D. M. Ștefănescu, *Handbook of Force Transducers: Characteristics and Applications*. Cham, Switzerland: Springer, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-35322-3.
- [16] K. Fritsch, "Metrology of weighing in the pharmaceutical industry," *Measurement: Sensors*, vol. 18, 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100262.
- [17] J. Konijnenburg, L. Minnich, K. A. Lippa, T. Pandya, and J. Willis, "Certification approaches for weigh-in-motion systems in law enforcement applications," NIST Special Publication 2200-05, National Institute of Standards and Technology, 2024, doi: 10.6028/NIST.SP.2200-05.
- [18] OIML, R 134-1 Edition 2006 (E), *Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests*, International Organization of Legal Metrology (OIML), 2006. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r134-1-e06.pdf
- [19] S. V. Gupta, *Mass metrology: The newly defined kilogram*, 2nd ed., vol. 155, Springer Series in Materials Science, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-12465-6.
- [20] EURAMET, *Calibration Guide No. 19, Guidelines on the determination of uncertainty in gravimetric volume calibration, version 3.0*, Sept. 2018. [Online]. Available: <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>
- [21] ISO 8655-6:2022, *Piston-operated volumetric apparatus - Part 6: Gravimetric reference measurement procedure for the determination of volume*, 2nd ed., International Organization for Standardization, 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/52/75211.html?browse=tc>
- [22] C. Kroner, H. Warnecke, O. Büker, K. Stolt, P. Wennergren, G. Hagemann, et al., "Metrology for reliable fuel consumption measurements in the maritime sector," *Measurement*, vol. 226, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114161
- [23] E. Bulska, *Metrology in chemistry, Lecture Notes in Chemistry*, vol. 101, Springer, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-99206-8.
- [24] A. A. Eltawil, A. S. Desoky, and S. A. Gelany, "Performance evaluation of weighing instruments: A comparative study of different calibration sequences," *Journal of Measurement Science and Applications, JMSA*, vol. 4, 2024, doi: 10.21608/JMSA.2024.360341.
- [25] EURAMET, *Calibration Guide No. 18, Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments, version 4.0*, Nov. 2015. [Online]. Available: <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>
- [26] OIML, R 51-1 Edition 2006 (E), *Automatic catchweighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests*, International Organization of Legal Metrology (OIML), 2006. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/en/files/pdf_r/r051-p-e06.pdf
- [27] OIML, R 76-1 Edition 2006 (E), *Non-automatic weighing instruments, Part 1: Metrological and technical requirements – Tests*, 2006. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/publication_view?p_type=1&p_status=1
- [28] P. Bhandari and P. Z. Csurscia, "Digital implementation of the PID controller," *Software Impacts*, vol. 13, Art. no. 100306, 2022, doi: 10.1016/j.simpa.2022.100306.
- [29] S. Zacher, *Closed Loop Control and Management: Introduction to Feedback Control Theory with Data Stream Managers*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-13483-8.
- [30] A. Shekhar and A. Sharma, "Review of model reference adaptive control," in *Proc. 2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, Pune, India, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICICET.2018.8533713.
- [31] I. R. Petersen and R. Tempo, "Robust control of uncertain systems: Classical results and recent developments," *Automatica*, vol. 50, pp. 1315–1335, 2014, doi: 10.1016/j.automatica.2014.02.042.
- [32] N. Touati and I. Saidi, "Internal model control for underactuated systems based on novel virtual inputs method," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 97, no. 9, pp. 95–99, Sep. 2021, doi: 10.15199/48.2021.09.20.
- [33] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on model predictive control: an engineering perspective," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, pp. 1327–1349, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- [34] M. G. Younis, "Optimal control of dynamical systems using calculus of variations," *Babylonian Journal of Mathematics*, vol. 2023, pp. 1–6, 2023, doi: 10.58496/BJM/2023/001.
- [35] R. Qi, G. Tao, and B. Jiang, "Adaptive control: A tutorial introduction," in *Fuzzy System Identification and Adaptive Control, Communications and Control Engineering*, Springer, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-19882-4_3.
- [36] F. Shabaninia and K. Jafari, "Using LQG/LTR optimal control method to improve stability and performance of industrial gas turbine system," *ISRN Electronics*, vol. 2012, Article ID 134580, 8 pages, 2012, doi: 10.5402/2012/134580.
- [37] D. Masti, M. Zanon, and A. Bemporad, "Tuning LQR controllers: A sensitivity-based approach," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6, pp. 932–937, 2022, doi: 10.1109/LCSYS.2021.3087556.
- [38] K. Puentes, L. Morales, D. F. Pozo-Espin, and V. Moya, "Enhancing control systems with neural network-based intelligent controllers," *Emerging Science Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1243–1261, 2024, doi: 10.28991/ESJ-2024-08-04-01.
- [39] R. Saatchi, "Fuzzy logic concepts, developments and implementation," *Information*, vol. 15, no. 10, 2024, doi: 10.3390/info15100656.
- [40] R. R. Marangoni, I. Rahneberg, F. Hilbrunner, R. Theska, and T. Fröhlich, "Analysis of weighing cells based on the principle of electromagnetic force compensation," *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 7, p. 075101, 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa6bcd.
- [41] H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, and G. Jäger, "Parametric mechatronic model of a load cell with electromagnetic force compensation," in *IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences on Metrology in Modern Context*, Pattaya, Chonburi, Thailand, Nov. 2010, pp. 29–32. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267690745>
- [42] A. Amthor, I. Kaiser, N. Rogge, and H. Weiß, "Analysis, physically motivated modeling and system identification of electromagnetic force compensated balances (EMFC)," in *58th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany*, Sept. 2014. URN: nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-124:2. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/271827557>
- [43] C. Diethold, T. Fröhlich, F. Hilbrunner, and G. Jäger, "High precision optical position sensor for electromagnetic force compensated balances," in *IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences - Metrology in Modern Context*, Pattaya, Thailand, Nov. 22–25, 2010, pp. 91–94. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259575035>
- [44] N. Rogge, J. Schleichert, and C. Rothleitner, "Investigations on motion deviations of an EMFC balance," in *59th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau*, Sept.

- 11–15, 2017. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-068:4>
- [45] H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, and G. Jäger, “System simulation for electromagnetic force compensated load-cells with Matlab/Simulink and ANSYS,” in ANSYS Conference and 31th CAD/FEM Users’ Meeting, Technische Universität Ilmenau, 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280632417_System_simulation_for_electromagnetic_force_compensated_load-cells_with_Matlab_Simulink_and_ANSYS
- [46] V. Cherkasova and T. Fröhlich, “Implementation options of control systems for a cantilever calibration device,” in Proc. IV International Conference on Control in Technical Systems, 2021, doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562880.
- [47] N. Rogge, “Statische und dynamische Charakterisierung einer Planck Waage,” Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 2022, doi: 10.22032/dbt.55687. [Online]. Available: <urn:nbn:de:gbv:ilm1-2022000559>.
- [48] J. Y. An, J. S. Choi, G. S. Lee, J. H. Ahn, and H. Y. Kim, “Influence of spring constant and electromagnetic damping coefficient on measurement performance in a checkweigher with force balance system using Voice Coil Actuator,” in Proc. IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE), Melbourne, VIC, Australia, Dec. 9–11, 2019, doi: 10.1109/CSDE48274.2019.9162415.
- [49] Abdullah, J.-H. Ahn, and H.-Y. Kim, “Effect of electromagnetic damping on system performance of voice-coil actuator applied to balancing-type scale,” *Actuators*, vol. 9, no. 1, Art. 8, 2020, doi: 10.3390/act9010008.
- [50] M. Darnieder, R. Theska, T. Fröhlich, M. Pabst, R. Wenig, and F. Hilbrunner, “Design of high-precision weighing cells based on static analysis,” in 59th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, Sept. 11–15, 2017. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-067:6>
- [51] M. Darnieder, M. Wittke, M. Pabst, T. Fröhlich, and R. Theska, “Monolithic compliant mechanism for an EMFC mass comparator weighing cell,” in 60th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, Sept. 4–8, 2023, doi: 10.22032/dbt.58738.
- [52] F. Hilbrunner, M. Schreiber, T. Fröhlich, T. Fehling, F. Schwesinger, and G. Krapf, “New Sartorius mass comparator for highest accuracy including fully automatic vacuum transfer system,” *Measurement: Sensors*, vol. 38, Supplement, 2025, doi: 10.1016/j.measen.2024.101360.
- [53] H.-H. Lee, K.-T. Yoon, and Y.-M. Choi, “Checkweigher using an EMFC weighing cell with magnetic springs and air-bearings,” *Metrology and Measurement Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 465–478, 2021, doi: 10.24425/mms.2021.137135.
- [54] Y. Yamakawa and T. Yamazaki, “Simplified dynamic model for high-speed checkweigher,” *Measurement of Mass, Force and Torque (APMF 2013)*, International Journal of Modern Physics: Conference Series, vol. 24, 1360036 (8 pages), 2013, doi: 10.1142/S2010194513600367.
- [55] Y. Yamakawa, H. Tozuka, and T. Yamazaki, “Mathematical model in dynamic mass measurement with consideration of position variation of fulcrum point,” *Measurement: Sensors*, vol. 18, 100164, 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100164.
- [56] N. Rogge, O. Dannberg, M. Kühnel, and T. Fröhlich, “A novel EMFC tiltmeter with extended measurement range,” in IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 Int. Conf., Cavtat-Dubrovnik, Croatia, Oct. 11–13, 2022, pp. 1–6, doi: 10.21014/tc3-2022.123.
- [57] O. Dannberg, “Entwicklung eines prüfstandes zur rückführbaren kalibrierung von cantilevern,” Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2020, URN: <nbn:de:gbv:ilm1-2020000578>. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020000578>
- [58] Y. Wang, N. Rogge, S. Vasilyan, and T. Fröhlich, “Investigations on nonlinear deformation phenomena in a force calibration system,” *Acta IMEKO*, vol. 9, no. 5, pp. 150–155, Dec. 2020, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.958.
- [59] S. Vasilyan, “High precision force measurements in horizontal direction in combination with high dead loads: Non-contact flowmeter for low conducting electrolytes,” Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2016, URN: <nbn:de:gbv:ilm1-2016000136>. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000136>
- [60] N. Yan, “High resolution force measurement system for Lorentz force velocimetry,” Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2019, URN: <nbn:de:gbv:ilm1-2019000068>. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000068>
- [61] L. Keck, “Flexure-based mechanism for a Kibble balance,” Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2025, URN: <nbn:de:gbv:ilm1-2024000407>. doi: 10.22032/dbt.63554.
- [62] J. Konrad, C. Rothleitner, S. Vasilyan, N. Rogge, R. Behr, M. Götz, et al., “Small mass value realization equivalent to accuracy class E1 using the Planck-Balance at PTB,” *Metrologia*, vol. 62, no. 2, p. 025014, Apr. 2025, doi: 10.1088/1681-7575/adc581.
- [63] L. Günther, C. Rothleitner, J. Schleichert, N. Rogge, S. Vasilyan, F. Härtig, et al., “The Planck-Balance – primary mass metrology for industrial applications,” in XXII World Congr. Int. Meas. Confederation (IMEKO), *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1065, p. 042021, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1065/4/042021.
- [64] C. Rothleitner, N. Rogge, S. Lin, S. Vasilyan, D. Knopf, F. Härtig, et al., “Planck-Balance 1 (PB1) – a table-top Kibble balance for masses from 1 mg to 1 kg – current status,” *Acta IMEKO*, vol. 9, no. 5, pp. 47–52, Dec. 2020, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.937.
- [65] N. Rogge, C. Rothleitner, S. Lin, S. Vasilyan, T. Fröhlich, F. Härtig, et al., “Error sources in the force mode of the “PB2” Planck-Balance,” *Acta IMEKO*, vol. 9, no. 5, pp. 53–57, Dec. 2020, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.938.
- [66] S. Vasilyan, N. Rogge, C. Rothleitner, S. Lin, I. Poroskun, D. Knopf, et al., “The progress in development of the Planck-Balance 2 (PB2): A tabletop Kibble balance for the mass calibration of E2 class weights,” *tm – Technisches Messen*, vol. 88, no. 12, pp. 731–756, 2021, doi: 10.1515/teme-2021-0101.
- [67] C. Rothleitner, J. Schleichert, N. Rogge, L. Günther, S. Vasilyan, F. Hilbrunner, et al., “The Planck-Balance—using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights,” *Measurement Science and Technology*, vol. 29, no. 7, p. 074003, 2018, doi: 10.1088/1361-6501/aabc9e.
- [68] E. Manske, T. Fröhlich, and S. Vasilyan, “Photon momentum induced precision small forces: a static and dynamic check,” *Measurement Science and Technology*, vol. 30, no. 10, p. 105004, Aug. 2019, doi: 10.1088/1361-6501/ab257e.
- [69] C. Rothleitner, I. Poroskun, S. Svitlov, J. Kloß, and J. Konrad, “A method for evaluating the force factor in oscillating Kibble balances with application to the Planck-Balance,” *Metrologia*, vol. 60, no. 5, p. 055007, Sep. 2023, doi: 10.1088/1681-7575/acef23.
- [70] F. Hilbrunner, H. Weis, T. Fröhlich, and G. Jäger, “Comparison of different load changers for EMFC-balances,” in IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences Metrology in Modern Context, Pattaya, Chonburi, Thailand, pp. 65–68, Nov. 2010. [Online]. Available: <https://www.imeko.org/publications/tc3-2010/IMEKO-TC3-2010-016.pdf>

- [71] K. Wedrich, M. Darnieder, E. Vierzigmann, A. Barth, R. Theska, and S. Strehle, "Conceptual design of a microscale balance based on force compensation," in *Microactuators, Microsensors and Micromechanisms*, MAMM 2020, Oct. 2020, doi: 10.1007/978-3-030-61652-6_9.
- [72] K. Wedrich, V. Cherkasova, V. Platl, T. Fröhlich, and S. Strehle, "Stiffness considerations for a MEMS-Based weighing cell," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3342, 2023, doi: 10.3390/s23063342.
- [73] V. Cherkasova, "Traceable force calibration of micro-electro-mechanical systems," Ph.D. dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2023, URN: nbn:de:gbv:ilm1-2023000459, doi: 10.22032/dbt.59791.
- [74] H. Kurumatani, Y. Inoue, S. Nishimura, M. Isaka, R. Shimane, T. Tanaka, et al., "Vibration suppression of electromagnetic-force-restoration weighing cell using wave control," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 8, no. 4, pp. 576–585, 2019, doi: 10.1541/ieejia.8.576.
- [75] M. Darnieder, M. Pabst, T. Fröhlich, L. Zentner, and R. Theska, "Mechanical properties of an adjustable weighing cell prototype," in *euspen's 19th International Conference and Exhibition*, Bilbao, ES, June 2019. [Online]. Available: <https://www.euspen.eu/resource/mechanical-properties-of-an-adjustable-weighing-cell-prototype/>
- [76] C. Diethold, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, and E. Manske, "Nanopositioning system with combined force measurement based on electromagnetic force compensated balances," in *XX IMEKO World Congress, Metrology for Green Growth*, Busan, Republic of Korea, Sept. 9–14, 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259575050>
- [77] I. A. Robinson and S. Schlamming, "The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass," *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74, 2016, doi: 10.1088/0026-1394/53/5/A46.
- [78] T. Yamazaki and Y. Yamakawa, "Mathematical model of mass measurement system with consideration of fulcrum point position shift and its evaluation," *Measurement: Sensors*, vol. 38, Art. no. 101363, 2025, doi: 10.1016/j.measen.2024.101363.
- [79] H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, and G. Jäger, "Mechatronic FEM model of an electromagnetic-force-compensated load cell," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 7, Art. no. 074018, Jun. 2012, doi: 10.1088/0957-0233/23/7/074018.
- [80] M. Phillips, J. B. Reed, D. Zwicky, A. S. Van Epps, A. G. Buhler, E. M. Rowley, et al., "Systematic reviews in the engineering literature: A scoping review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 62648–62663, Apr. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394755.
- [81] Á. J. Morales Robles, M. Ortiz Domínguez, E. Cardoso Legorreta, and A. Cruz Avilés, "Bibliometric analysis: Nitriding," *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 12, no. 23, Jan. 2025, doi: 10.29057/escs.v12i23.14102.
- [82] E. Aguilera-Cora, C. Lopezosa, J. Fernández-Cavia, and L. Codina, "Accelerating research processes with Scopus AI: A place branding case study," *Revista Panamericana de Comunicación*, vol. 6, no. 1, Apr. 2024, pp. 1–26, doi: 10.21555/rpc.v6i1.3088.
- [83] R. Prancutė, "Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world," *Publications*, vol. 9, no. 1, article 12, Mar. 2021, doi: 10.3390/publications9010012.
- [84] N. Haupka, J. H. Culbert, A. Schniedermann, N. Jahn, and P. Mayr, "Analysis of the publication and document types in OpenAlex, Web of Science, Scopus, Pubmed and Semantic Scholar," *arXiv*, arXiv:2406.15154, Jun. 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.15154.
- [85] S. Singh, A. Kaur, and Y. Gulzar, "The impact of augmented reality on education: a bibliometric exploration," *Frontiers in Education*, vol. 9, Art. no. 1458695, 2024, doi: 10.3389/educ.2024.1458695.
- [86] A. Tarazi, "Comparative analysis of the bibliographic data sources using PubMed, Scopus, Web of Science, and Lens," *High Yield Medical Reviews*, Published online June 1, 2024, doi: 10.59707/hymrUNHW4628.
- [87] E. Orduña-Malea and R. Costas, "Link-based approach to study scientific software usage: the case of VOSviewer," *Scientometrics*, vol. 126, pp. 8153–8186, 2021, doi: 10.1007/s11192-021-04082-y.
- [88] V. Cherkasova, "Modeling and development of a load cell control system with electromagnetic force compensation," in *2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, Oct. 2019, pp. 121–125, doi: 10.1109/CTS48763.2019.8973268.
- [89] K.-T. Yoon, S.-R. Park, and Y.-M. Choi, "Electromagnetic force compensation weighing cell with magnetic springs and air bearings," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 1, Art. no. 015905, 2021, doi: 10.1088/1361-6501/abae8e.
- [90] M. Pabst, M. Darnieder, R. Theska, and T. Fröhlich, "Adjustment concept for compensating for stiffness and tilt sensitivity of a novel monolithic electromagnetic force compensation (EMFC) weighing cell," *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 11, pp. 109–116, 2022, doi: 10.5194/jsss-11-109-2022.
- [91] M. Darnieder, Design and adjustment of weighing cells for vacuum mass comparators, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Universitätsverlag Ilmenau, 2024, doi: 10.22032/dbt.59666.
- [92] C. Schott, Adaptive regelung einer wägezelle, Bachelorarbeit, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, 2021. [Online]. Available: https://bibliographie.tu-ilmenau.de/servlets/DozBibEntryServlet?mode=show&id=ilm_mods_00007284
- [93] N. Rogge, H. Weiß, I. Kaiser, A. Amthor, F. Hilbrunner, and T. Fröhlich, "Design of digital controllers for electromagnetic force compensated balances focused on the disturbance transfer function," in *Proc. 2016 NCSLI Int. Workshop Symp.*, 2016, doi: 10.51843/wsproceedings.2016.24.
- [94] H. Weis, I. Gushchina, A. Amthor, F. Hilbrunner, C. Diethold, and T. Fröhlich, "Investigation on digital control concepts for dynamic applications of electromagnetic force compensated balances," in *Proc. NCSLI Int. Workshop Symp.*, 2013, doi: 10.51843/wsproceedings.2013.20.
- [95] F. Hilbrunner, H. Weis, and T. Fröhlich, "Parameterization and optimisation of EMC balances based on the frequency response of the impedance," *Measurement*, vol. 51, pp. 349–355, 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2014.01.032.
- [96] H. S. Baumgartl, Optimierung dynamischer Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation mittels numerischer Modelle zur Systemsimulation, Dr.-Ing. dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 2015. URN: nbn:de:gbv:ilm1-2015000362.
- [97] Y. Yamakawa and T. Yamazaki, "Modeling and control for checkweigher on floor vibration," in *Proc. XXI IMEKO World Congress: Measurement in Research and Industry*, Prague, Czech Republic, Aug. 30 – Sep. 4, 2015. [Online] Available: <https://www.imeko.info/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-093.pdf>
- [98] I. Kaiser, Zertifizierbarer Entwicklungsprozess für komplexe Informationsverarbeitungssysteme in der Wägetechnik, Dr.-Ing. dissertation, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau, 2015. URN: nbn:de:gbv:ilm1-2015000588.
- [99] S. Yuan, W. Yi, and G. Yang, "Adaptive robust control of electromagnetic actuators with friction nonlinearity and uncertainty compensation," *Mathematical Models in*

- Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 75–86, Jun. 2024, doi: 10.21595/mme.2024.23935.
- [100] K. P. Kamath, S. I. Bekinal, V. G. S., and M. Doddamani, “Review of control strategies for active magnetic bearings,” *Cogent Engineering*, vol. 12, no. 1, 2467145, 2025, doi: 10.1080/23311916.2025.2467145.
- [101] S. Li, Y. Ma, K. Ma, W. Liu, N. Li, X. Liu, *et al.*, “Updates on the Tsinghua tabletop Kibble balance,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, 1009909, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3566824.
- [102] F. Schwesinger, G. Krapf, and T. Fröhlich, “PC-based low latency controller for dynamic mechatronic systems,” in Proc. 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, Sep. 2014. URN: nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-091:8
- [103] G. Krapf, F. Schwesinger, and T. Fröhlich, “High-precision analog interfaces for low-latency PC-in-the-loop controller,” in Proc. 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, Sep. 2014. URN: nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-094:2
- [104] M. Darnieder, M. Pabst, R. Wenig, L. Zentner, R. Theska, and T. Fröhlich, “Static behavior of weighing cells,” *J. Sens. Syst.*, vol. 7, pp. 587–600, 2018, doi: 10.5194/jsss-7-587-2018.



Mauricio Serna Gómez received the B.Sc. degree in Electronic Engineering from Universidad ECCI, Colombia, and the specialization degree in Bioengineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. He is currently pursuing the M.Sc. degree in Electronic Engineering (Automation and Control) at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. Since 2012, he has served as Director of the Metrology Laboratory at AMEK Alianza Metrológica Colombiana S.A.S. Previously, he worked at Clínica Colsanitas S.A., supporting biomedical metrology laboratory activities. His research interests include electromagnetic force compensation systems, ISO/IEC 17025 laboratory accreditation, instrumentation, metrological calibration (temperature, mass, weighing instruments, pressure, relative humidity, and electrical quantities), and the application of artificial intelligence in measurement systems. (ORCID: 0009-0006-9559-2732).



Hernán Paz Penagos received the B.Sc. degree in Electronic Engineering and the M.Sc. degree from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, and the Ph.D. degree from Universidad Pedagógica Nacional, Colombia, in 2012. He is currently with Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. His research interests include digital communications, antennas, wireless and mobile communications, satellite and terrestrial telecommunications, and measurement, propagation, and radiation aspects of communication systems. He has led several research projects and has published more than thirty scientific papers and five research books on communication systems. He has also worked on teaching methods and pedagogical theory. (Scopus Author ID: 55344136500; Google Scholar:

<https://scholar.google.com/citations?user=8YmHJ6EAAAAJ&hl=en>; ORCID: 0000-0002-2692-1989).



Jorge Andrés Puerto Acosta received the B.Sc. degree in Electronic Control and Instrumentation Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, and the M.Sc. degree in Mechanical Engineering and the Ph.D. degree in Electrical Engineering from Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brazil. He is currently an Assistant Professor with Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, where he teaches Industrial Automation, Systems Control, Electric Power, and Signal Processing. His research interests include control theory, optimal control, and computational modeling of dynamic systems. He is a member of the ARMOS research group. (ORCID: 0000-0002-3029-5861).