

RONNA

DICIEMBRE
2024

Metrología fundamental y aplicada

Volumen 2 | Ejemplar 2 | Segundo semestre 2024



LABORATORIO
COSTARRICENSE
DE METROLOGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

Revista Ronna

Volumen 2. Ejemplar 2. Segundo semestre de 2024.

Índice de contenidos

Cuarta Edición de la Revista Ronna.....	2
Reconocimientos internacionales recientes obtenidos por los sistemas de gestión de calidad del Lacomat y sus Laboratorios Designados.....	3
¿Es una calibración una evaluación de la conformidad?	9
Diseño de un sistema semiautomatizado para la lectura del menisco en pruebas de calibración de contenedores volumétricos.....	15

Cuarta Edición de la Revista Ronna

El 2024 ha sido un buen año para el desarrollo del Laboratorio Costarricense de Metrología. En el marco del desarrollo de un proyecto de cooperación internacional con Corea del Sur, a través de la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA), el laboratorio ha logrado fortalecer su competencia técnica, mejorar sus capacidades de medida y plantearse metas a corto, mediano y largo plazo para la mejora de la estructura de metrología legal del país. Aunado a esto, los logros del proyecto han sido un impulsor para el reconocimiento de nuestras capacidades de medición y calibración (CMCs) a nivel internacional. Durante los últimos 2 años, se han realizado 7 revisiones por pares y se han defendido y aprobado los Sistemas de Gestión de Calidad de 9 magnitudes físicas y químicas ante el Comité Técnico de Sistemas de Calidad (QSTF) del Sistema Interamericano de Metrología (SIM). Esta aprobación es un requisito establecido en el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM-MRA) y es esencial para el reconocimiento de las CMCs a nivel internacional y su eventual publicación en la base de datos (KCDB) del Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). Junto al Lacomet, nuestros Laboratorios Designados han renovado, ampliado y obtenido el reconocimiento de sus CMCs en el mismo periodo.

Por otro lado, el 2024 también ha sido un año de cambios sustanciales. En mayo del 2024 se aprobó la nueva ley que define el Sistema Nacional para la Calidad (Ley 10473) y con esto, se redefinen las funciones del Lacomet,

fortaleciendo su rol como Instituto Nacional de Metrología. Adicionalmente, dicha ley establece cambios en el Consejo Nacional para la Calidad (CONAC), el Ente Costarricense de Acreditación (ECA), crea el Consejo Nacional de Reglamentación Técnica (Conart) y ratifica la designación del Ente Nacional de Normalización (ENN) en el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). La nueva ley establece también nuevos requisitos para las instituciones públicas y proveedores de servicios de evaluación de la conformidad.

Finalmente, en el 2024 hemos continuado desarrollando proyectos de automatización y digitalización de los servicios de metrología con el objetivo de reducir la intervención humana, minimizar errores, reducir tiempos y mejorar la precisión. En esta edición de la Revista Ronna nos complace presentar 3 artículos relativos a estos temas que han definido el 2024. Esperamos que sea de su agrado.



Fernando J. Andrés Monge / Director General Lacomet

Reconocimientos internacionales recientes obtenidos por los sistemas de gestión de calidad del Lacomet y sus Laboratorios Designados

Gabriel Molina-Castro, Responsable de Calidad, Lacomet, Costa Rica. Email: gmolina@lcm.go.cr. Código ORCID: 0000-0002-4051-7229

Resumen: Este artículo presenta las generalidades y los principales resultados obtenidos tras el más reciente proceso de declaración y renovación de los reconocimientos internacionales, emitidos por el QSTF del SIM, a los sistemas de gestión de calidad implementados y mantenidos por el Lacomet y sus Laboratorios Designados, que sustentan las CMCs declaradas por el país ante el BIPM.

Palabras clave: Calidad, CIPM-MRA, metrología, sistemas de gestión, reconocimiento.

1. Introducción

El reconocimiento de un sistema de gestión de calidad en un Instituto Nacional de Metrología (INM) es esencial para establecer la confianza en las mediciones que sustentan sectores clave en un país, desde la salud y la energía hasta el comercio internacional. Este reconocimiento, enmarcado en el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM-MRA, por sus siglas en inglés), asegura que los resultados de los INM alrededor del orbe sean comparables globalmente, trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) y aceptados en todos los países firmantes de dicho acuerdo internacional [1].

Para su correcta implementación, el CIPM-MRA establece directrices y guías claras para garantizar la confiabilidad y comparabilidad de las capacidades de medición de sus participantes, incluidas aquellas relacionadas con la gestión de calidad. Específicamente, el documento CIPM MRA-G-12 [2] enfatiza la importancia de que los INM implementen un sistema de gestión de calidad (SGC) basado en normas como ISO/IEC 17025 [3] o ISO 17034 [4], garantizando que las capacidades de medición y calibración (CMCs) publicadas en la base de datos KCDB del Buró Internacional

de Pesas y Medidas (BIPM) [5] cumplan con estándares internacionales y la correspondiente trazabilidad metrológica sea diseminada de forma coherente, imparcial y constante.

La responsabilidad de asegurar que los SGC de los INM cumplan con las expectativas del CIPM-MRA recae sobre los respectivos Organizaciones Regionales de Metrología (RMO, por sus siglas en inglés) [2], como el Sistema Interamericano de Metrología (SIM). Para ello, se han establecido procesos de revisión que incluyen evaluaciones por pares y aprobación por parte de comités técnicos que cuenten con la representación de los miembros del RMO, como es el caso del Quality Systems Task Force (QSTF) para el SIM [6].

Siendo Costa Rica un país firmante del CIPM-MRA, el Laboratorio Costarricense de Metrología (Lacomet) y sus laboratorios designados (LD) implementan y mantienen SGC que soportan las CMCs declaradas por Costa Rica ante el BIPM, y que deben ser revisados y avalados periódicamente por el SIM. El presente artículo tiene como objetivo exponer los principales resultados obtenidos en este proceso entre los años 2022 y 2024, período en el cual el Lacomet y todos sus LD

debieron renovar todos y buscar nuevos reconocimientos del QSTF del SIM, que evidencian la capacidad de sus SGC para dar soporte a las CMCs declaradas por el país dentro de la KCDB.

2.Aspectos metodológicos

De manera general, y cumpliendo con las disposiciones del CIPM-MRA [1, 7] y los procedimientos propios del QSTF [8, 9], para lograr y mantener el reconocimiento de sus SGC, el Lacomet y sus LD deben cumplir con el proceso mostrado en la Figura 1 y descrito en este apartado.

Implementación de un SGC: Se debe implementar, mantener y mejorar un SGC que cumpla con los requisitos incluidos en las normas de referencia. Dicha implementación debe incluir la ejecución periódica de auditorías internas por personal con competencia técnica, de revisiones por parte de la alta dirección, gestión y mantenimiento de recursos y equipamiento, gestión de trabajos no conformes, acciones correctivas, quejas, mejoras, riesgos y oportunidades, así como velar por la adecuada gestión de toda la información documentada requerida (políticas, manuales, procedimientos, registros y otros) y por el seguimiento para garantizar la integridad del SGC [3, 4].

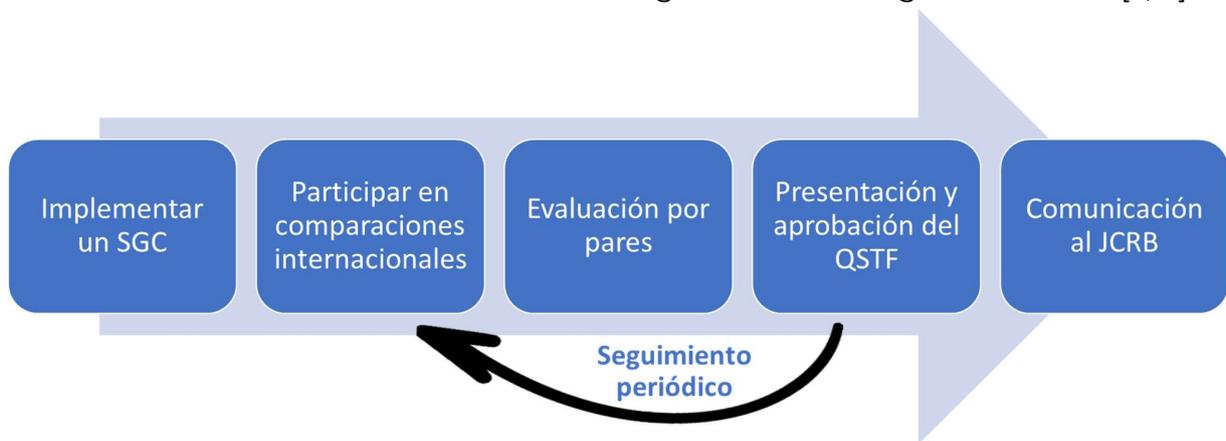


Figura 1. Proceso requerido para lograr y mantener el reconocimiento del SGC por parte del QSTF para soportar las CMCs declaradas por un INM o LD en la KCDB del BIPM.

Participación en comparaciones interlaboratoriales internacionales (claves o suplementarias): Siendo que las bases del CIPM-MRA incluyen la determinación de grados de equivalencia entre patrones nacionales y el reconocimiento de la validez de CMCs incluidas en la KCDB del BIPM, la participación satisfactoria en comparaciones interlaboratoriales organizadas por los comités del CIPM, BIPM o los RMO representa un requisito fundamental para brindar sustento técnico y confianza a la declaración de CMCs. Los detalles sobre los tipos de

comparaciones, sus requisitos y su organización se describen en [10]. La participación en comparaciones interlaboratoriales es un aspecto medular del proceso y su ausencia podría imposibilitar la aprobación del SGC por parte del SIM.

Evaluación por pares: Como parte inicial del proceso de revisión por parte del SIM, cada INM y LD debe someterse a una evaluación integral de su SGC y de sus capacidades técnicas de medición por parte de uno o más evaluadores pares competentes, según los requisitos establecidos en [2]. Estos procesos

incluyen la revisión del cumplimiento de requisitos según las normas y otros documentos aplicables, la testificación de los procesos de medición o calibración, revisión técnica de la participación en comparaciones interlaboratoriales y su validez y consistencia con las CMCs declaradas, la garantía de trazabilidad metrológica al SI y demás aspectos que los evaluadores pares consideren pertinente. Este proceso puede ser realizado conjuntamente con las evaluaciones periódicas de acreditación, siempre que se cumplan con los requerimientos establecidos en las guías del CIPM-MRA [1, 7, 10] y procedimientos del QSTF [8, 9]. Los principales resultados de estas evaluaciones por pares son consignados en informes, posteriormente revisados y considerados por grupos de trabajo regionales (QSTF para el SGC) para generar conclusiones sobre la adecuación y validez del SGC y las CMCs declaradas por los INM o LD.

Presentación y aprobación del QSTF: Como parte final del proceso de evaluación, un representante del INM o LD debe realizar una presentación ante el QSTF sobre las generalidades del SGC, sus estadísticas más relevantes y la forma en que se cumple con los requisitos normativos aplicables, así como los planes de acción tomados ante los resultados de la(s) evaluación(es) por pares y otros procesos de revisión (como auditorías internas) y la lista de CMCs a ser declaradas.

En esta presentación, se busca la aprobación del SGC por parte de los miembros del QSTF, los cuales pueden realizar consultas para evacuar cualquier duda sobre la adecuación del SGC presentado. Una vez lograda la aprobación, el instituto deberá renovar el reconocimiento luego de un plazo máximo de 5 años, en el cual se deberá demostrar el correcto mantenimiento del SGC y la vitalidad de sus CMCs declaradas, pasando nuevamente por todas las etapas.

Comunicación al JCRB: El último paso del proceso corresponde al envío de una comunicación oficial por parte del QSTF al Comité Conjunto de los RMOs y el BIPM (JCRB, por sus siglas en inglés), el cual valida formalmente el reconocimiento del SGC para habilitar la declaración y publicación de las CMCs dentro de la KCDB.

3. Principales resultados

En el período comprendido entre el 2022 y el 2024, el Lacommet y la mayor parte de sus LD realizaron un total de 16 presentaciones ante el QSTF del SIM, correspondientes a 12 procesos de renovación y 4 procesos nuevos, logrando un 100 % de aprobaciones por parte de dicho grupo de trabajo. El detalle de las áreas metrológicas cubiertas y la distribución de estas presentaciones en el tiempo se muestran en la Figura 2, así como en el sitio web del Lacommet [12].

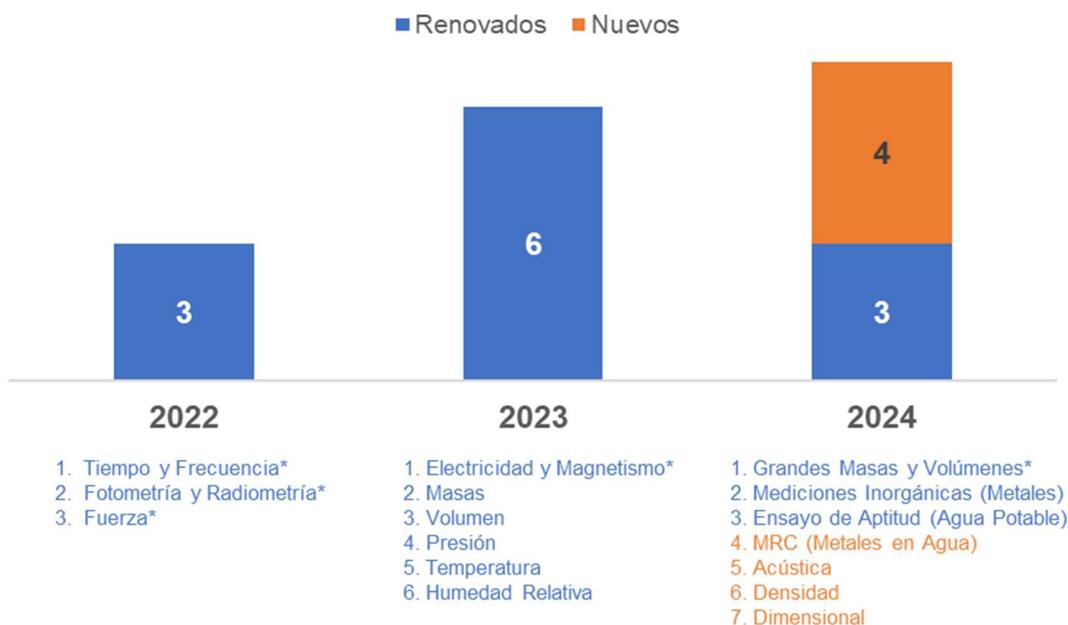


Figura 2. Cantidad y distribución de los SGC presentados y aprobados por parte del QSTF del SIM para el Lacomet y sus LD entre los años 2022 y 2024. Las áreas metrológicas marcadas con un asterisco (*) corresponden a aquellas mantenidas por los LD.

Considerando que tanto el Lacomet como la mayor parte de sus LD (LanammeUCR, ICE-LMVE, ICE-LAMETRO y LNM-RECOPE) ya contaban con CMCs en calibración declaradas en la KCDB antes del 2022, la etapa de implementación de un SGC basado en la norma ISO/IEC 17025 ya se encontraba debidamente cubierta. Sin embargo, para el caso del Lacomet, en concordancia con sus objetivos estratégicos y con los compromisos adquiridos en proyectos de cooperación internacional, el SGC fue ampliado y depurado para abarcar calibraciones y otras mediciones realizadas por los laboratorios de Acústica, Densidad y Dimensional del Departamento de Metrología Física (DMF), así como la producción de materiales de referencia realizada por el Departamento de Metrología Química (DMQ), específicamente en el área de Mediciones Inorgánicas (elementos mayoritarios - metales en agua), considerando los requisitos de la norma ISO 17034 para éste último alcance. Cabe señalar que, aunque no se encuentra cubierto en el

marco del CIPM-MRA, el SGC del Lacomet considera además el cumplimiento de los requisitos estipulados en la norma ISO/IEC 17043 [11], aplicable para proveedores de ensayos de aptitud. Dicho alcance, para el área de mediciones fisicoquímicos en agua potable realizadas por el DMQ, cuenta también con un reconocimiento por parte del QSTF.

En el campo de las comparaciones interlaboratoriales, en los últimos años recientes el Lacomet y sus LD están participando o han participado y recibido reportes de resultados en más de 25 comparaciones claves y suplementarias, dentro de las que destacan: SIM.EM-S15 (electricidad), SIM.QM-S10 (mediciones inorgánicas), SIM.M.M-K4.1 (masas), SIM.M.P-S10 (presión), CCT-K9.3 (temperatura), SIM.AUV.A-S2 (acústica), SIM.L-S2.2.n01 (dimensional), CCTF-K001.UTC (tiempo y frecuencia), entre muchas otras [5].

Para cumplir con los requisitos del proceso, el Lacomet y sus respectivos LD coordinaron

con profesionales de otros INM para la ejecución de sus evaluaciones por pares, tanto de carácter técnico como de gestión. Este proceso significó la visita y evaluación por parte de más de 10 expertos internacionales provenientes del CENAM (México), NIST (EEUU), INTI (Argentina), LATU (Uruguay), INM (Colombia), KRISS (Corea del Sur), IBMETRO (Brasil), CENAMEP-AIP (Panamá), entre otros, para revisar los procesos y capacidades metrológicas de mayor jerarquía desarrollados en el país y la adecuación de los SGC que los sustentan. La visita de estos expertos no solo permitió confirmar la validez de las CMCs ya publicadas en la KCDB, sino también optar por la ampliación de las capacidades en áreas como fotometría, radiometría, electricidad, temperatura, humedad relativa, mediciones inorgánicas; mejorar la exactitud de las CMCs en electricidad y masas; y la futura declaración de nuevos alcances en las áreas de materiales inorgánicos, acústica, densidad y dimensional.

Finalmente, los miembros designados por parte del Lacomet y sus LD realizaron exitosamente las debidas presentaciones en las reuniones semestrales organizadas por el QSTF entre los años de 2022 y 2024 (6 reuniones en total), con aprobaciones prácticamente unánimes en todos los casos. De esta forma, al finalizar este período, la cantidad de SGC reconocidos por el QSTF fue ampliada de 12 a 16, incluyendo la incorporación de tres alcances nuevos en calibraciones en las áreas de Acústica, Densidad y Dimensional basados en los requisitos de la norma ISO/IEC 17025, así como un alcance completamente nuevo y único en el país, correspondiente a la producción de materiales de referencia certificados en el área de la metrología

química, basado en los requisitos de la norma ISO 17034.

4. Conclusiones y proyecciones

Gracias a este exitoso proceso, los reconocimientos a los SGC mantenidos por el Lacomet y sus LD fueron obtenidos y renovados para un nuevo período de 5 años, garantizando la calidad de la infraestructura que sustenta las 81 líneas de CMCs actualmente publicadas por Costa Rica ante la KCDB y las más de 20 líneas adicionales que se encuentran actualmente en proceso de revisión internacional y que se espera sean publicadas en los próximos meses.

Adicionalmente, se proyecta incorporar al más reciente LD (CicanumUCR) dentro del proceso de evaluación y reconocimiento por parte del QSTF, así como ampliar y robustecer aún más el SGC para optar por nuevos reconocimientos en áreas como electroquímica, metrología de gases y flujo, así como en nuevos alcances de ensayos de aptitud en el área de calibraciones físicas.

5. Agradecimientos

El autor extiende un agradecimiento a todo el personal involucrado en este proceso, incluyendo al personal del Lacomet y los LD, evaluadores pares, auditores internos, miembros del QSTF y demás colegas metrólogos del país y la región. Se extiende un agradecimiento adicional a la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA) por su apoyo financiero y logístico para lograr la ejecución de algunas evaluaciones por pares y la participación del personal del Lacomet en reuniones del QSTF.

6. Referencias

- [1] *Overview and implementation of the CIPM MRA*, CIPM MRA-P-11, 2023. [En línea]. Obtenido de <https://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents>
- [2] *Quality management systems in the CIPM MRA: Guidelines for monitoring and reporting*, CIPM MRA-G-12, 2021. [En línea]. Obtenido de <https://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents>
- [3] *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*, Norma INTE/ISO/IEC 17025, 2017.
- [4] *Requisitos generales para la competencia de los productores de materiales de referencia*, Norma INTE/ISO 17034, 2018.
- [5] BIPM. KCBD – Calibration and Measurement Capabilities (CMCs). <https://www.bipm.org/kcdb/>
- [6] SIM. Quality System Task Force (QSTF). <https://sim-metrologia.org/about-us/structure/quality-system-task-force-qstf/>
- [7] *CMCs in the context of the CIPM MRA: Guidelines for their review, acceptance and maintenance*, CIPM MRA-G-13, 2024. [En línea]. Obtenido de <https://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents>
- [8] *Procedure for Review and Approval Quality Management Systems*, QSTF-00, 2024. [En línea]. Obtenido de <https://sim-metrologia.org/about-us/structure/quality-system-task-force-qstf/>
- [9] *Procedure for Review of the Quality Management System of National Metrology Institutes and Designated Institutes*, SIM-09, 2017. [En línea]. Obtenido de <https://sim-metrologia.org/about-us/structure/quality-system-task-force-qstf/>
- [10] *Measurement comparisons in the CIPM MRA: Guidelines for organizing, participating and reporting*, CIPM MRA-G-11, 2021. [En línea]. Obtenido de <https://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents>
- [11] *Evaluación de la conformidad — Requisitos generales para la competencia de los proveedores de ensayos de aptitud*, Norma INTE/ISO/IEC 17043, 2024.
- [12] Laboratorio Costarricense de Metrología (Lacomet). Sistemas de Gestión. <https://lcm.go.cr/acerca-de/sistemas-de-gestion/>

¿Es una calibración una evaluación de la conformidad?

Fernando Andrés Monge; Director General del Lacomet; fandres@lcm.go.cr

Resumen: En este artículo se discute por qué una calibración no corresponde a una evaluación de la conformidad. Con el fin de ilustrar las diferencias entre una calibración y una verificación metrológica (evaluación de la conformidad), se desarrolla un ejemplo práctico para facilitar su comprensión. Adicionalmente, se comenta sobre la aplicación de declaraciones de conformidad en certificados de calibración, según la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017, y se aporta un segundo ejemplo para ilustrar este tema.

Palabras clave: evaluación de la conformidad, calibración, metrología legal

1. Introducción

El auge del desarrollo de las Infraestructuras de Calidad a nivel mundial, y la demanda por las actividades de evaluación de conformidad (demostración de que se cumplen los requisitos especificados) [1] para el reconocimiento de la calidad de un producto o servicio, ha propiciado el establecimiento de controles y evaluaciones de tercera parte que testifiquen que dichas actividades son llevadas a cabo de acuerdo con normas internacionales. En Costa Rica, en el 2024 se publicó la Ley 10473, Sistema Nacional para la Calidad, la cual, en sus artículos 41 y 42, hace referencia a la acreditación de organismos que desarrollen actividades de evaluación de la conformidad [2]. Algunas de las actividades de evaluación de la conformidad incluyen la acreditación, la certificación, la realización de ensayos, la verificación de reglamentos técnicos y la producción de materiales de referencia certificados, entre otros [3].

En el campo de la metrología legal, las actividades de evaluación de la conformidad como aprobación de tipo y/o verificaciones metrológicas son esenciales para garantizar el uso de instrumentos de medida aprobados [4]. Para esto, a nivel nacional, los países emiten reglamentos técnicos basados en normas y recomendaciones internacionales que deben establecer los requisitos para evaluar el desempeño de un instrumento y demostrar que es apto para su uso.

Suele ser común la referencia de que los instrumentos de medida reglamentados deben estar “debidamente calibrados”. Sin embargo, es importante considerar a la hora de emitir reglamentos técnicos que la calibración no incluye las reglas de decisión sobre los resultados de las pruebas que se realizan, siendo la calibración del instrumento un proceso donde se determina el error y la incertidumbre asociada, pero no garantiza la confianza en los resultados emitidos.

2. ¿Qué es una calibración?

La calibración permite diseminar la trazabilidad metrológica de un resultado de medida al Sistema Internacional de Unidades (SI). Esta trazabilidad se realiza a través de Institutos Nacionales de Metrología (INM) y/o laboratorios acreditados. Sin embargo, la calibración no se considera una evaluación de la conformidad en sí misma, de acuerdo con las resoluciones dictadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) [5] y las definiciones descritas en la norma ISO 17000:2020 [6]. Según el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), calibración se define como: “operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus

incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación” [7]. Una calibración, visto de forma sencilla, corresponde a un diagnóstico del instrumento bajo calibración (IBC), que permite determinar el sesgo de su indicación (error de medida) y su respectiva incertidumbre de medida, de modo que se pueda utilizar esta información para obtener un resultado de medida con el instrumento. Así, la calibración puede considerarse como un proceso abierto a interpretación de sus resultados, y no determina por sí sola si un instrumento es apto para su uso. Del análisis de los resultados de la calibración, el usuario puede: realizar un ajuste al instrumento, corregir sus mediciones, determinar la deriva instrumental, entre otros.

Cabe destacar que los resultados de una calibración pueden ser un insumo (evidencia) para que un Organismo Evaluador de la Conformidad (OEC) realice una evaluación de la conformidad sobre el instrumento y que, en las actividades de evaluación de la conformidad donde un OEC utilice instrumentos de medida, estos deben contar con trazabilidad metrológica al SI, es decir, deben estar calibrados [3].

3. Diferencia entre calibración y verificación metrológica

La diferencia entre ambas actividades se explicará mediante el análisis de los resultados de medida de dos esfigmomanómetros (instrumentos A y B), instrumentos que se utilizan para medir la presión arterial de manera no invasiva en un

paciente. Desde la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) se ha identificado a este tipo de instrumentos como instrumentos bajo control metrológico legal y, por lo tanto, ha emitido Recomendaciones con los requisitos metrológicos, técnicos y administrativos [8], [9] que permitan asegurar su buen funcionamiento. De forma instrumental, el esfigmomanómetro es un elemento para la medida de la presión y, por lo tanto, se podría calibrar el sensor e indicador como tal, siguiendo algún procedimiento desarrollado para tal fin. Para la aplicación de este ejemplo, se realizó la calibración de dos esfigmomanómetros contra un transductor de presión patrón.

Como se explicó en la sección anterior, la calibración determinó, de manera objetiva, el error de medida de ambos instrumentos y su incertidumbre de medida asociada, reportada como una incertidumbre expandida con $k = 2$; para un 95,45 % de probabilidad de cobertura. En este caso, los resultados ilustrados en la figura 1, se presentan dentro de cada certificado de calibración correspondiente, y es responsabilidad del usuario (profesional de la salud) determinar si el instrumento es apto para su uso. Esto requiere que el usuario tenga experiencia y criterio de cómo interpretar los resultados, y bajo qué condiciones es aplicable. Si se utilizaran ambos instrumentos para diagnosticar a un paciente cuya presión sistólica es de 100 mmHg, esta se leería como $(103,4 \pm 2,1)$ mmHg en el instrumento A y $(98,1 \pm 2,1)$ mmHg en el instrumento B. De esta forma, si la persona especialista no aplica las correcciones correspondientes a partir de los resultados de la calibración, la presión sistólica diagnosticada tendría una diferencia de $(5,3 \pm 3,0)$ mmHg entre instrumentos.

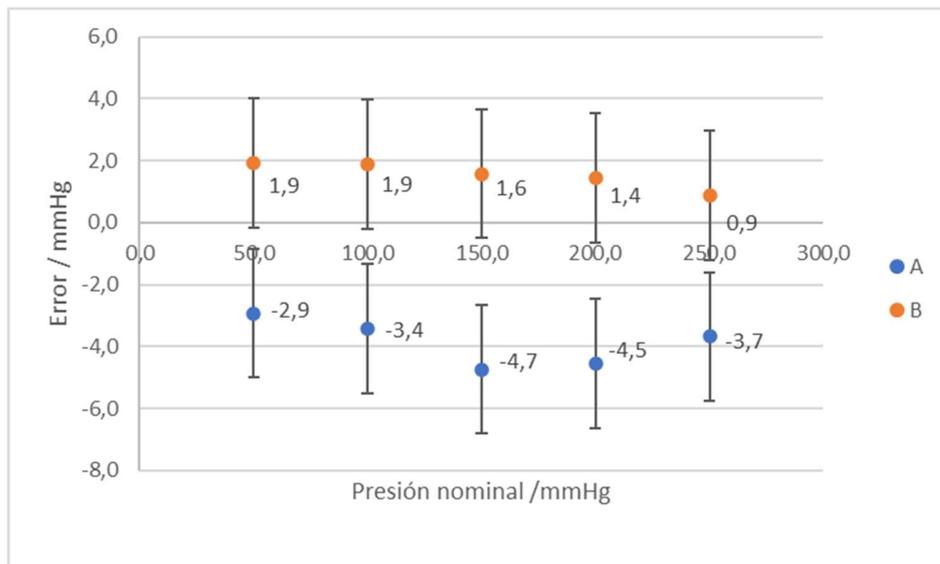


Figura 1. Resultados de la calibración de ambos esfigmomanómetros.

Aquí resalta la importancia de la verificación metrológica como actividad de evaluación de la conformidad. En Costa Rica, el Reglamento Técnico RTCR 451:2011 *Instrumentos para la Medición de la presión Arterial del Cuerpo Humano. Esfigmomanómetros Mecánicos no Invasivos Tipo Aneroide, de la Columna de Líquido Manométrico y Digitales* establece los requisitos para la verificación metrológica de esfigmomanómetros “que se comercializan en el país, para que las mediciones de presión arterial del cuerpo humano realizadas con ellos sean confiables y veraces” [10]. A diferencia del proceso de calibración, la verificación requiere de pruebas adicionales que confirmen que el instrumento cumple con los requisitos metrológicos, técnicos y administrativos definidos en el reglamento y basta con reprobado una de las pruebas para determinar que el instrumento no es apto para su uso. Otra diferencia importante es que, en los procesos de verificación metrológica, no se establece como requisito reportar una incertidumbre típica combinada o expandida en el certificado. Sin embargo, esto no quiere decir que la incertidumbre de medida del proceso de verificación no se deba considerar. Para esto existen diferentes guías y normas [11], [12].

Para el caso de un esfigmomanómetro en uso (verificación periódica o eventual); las pruebas a realizar corresponden a una inspección visual, una verificación de fuga de aire y la determinación del error máximo de indicación [10]. En el Cuadro I se presentan los resultados de las 3 pruebas, realizadas conforme a los numerales correspondientes del RTCR 451:2011, para ambos instrumentos bajo prueba.

A partir de la información presentada en el Cuadro I, es responsabilidad del OEC hacer el respectivo análisis de resultados y emitir el criterio de conformidad correspondiente. Para el caso presentado en este ejemplo, el esfigmomanómetro B es apto para su uso, mientras que el esfigmomanómetro A debe ser rechazado. El resultado de la verificación se reporta en un certificado y, adicionalmente, se puede colocar una etiqueta sobre el instrumento indicando que es conforme y hasta que fecha tiene validez el resultado. En la figura 2 se muestra un ejemplo de una etiqueta de verificación metrológica. La etiqueta simplifica al usuario la interpretación si el equipo está conforme y puede utilizarse, o de lo contrario, debe ser reparado o reemplazado.

Cuadro I. Resultados de las pruebas de verificación subsecuente para ambos instrumentos.

Numeral del RTCR	Aspecto abordado	Criterio de aceptación	Esfigmomanómetro A			Esfigmomanómetro B		
			Valores obtenidos	Cumple	No Cumple	Valores obtenidos	Cumple	No Cumple
10.1.1; 10.1.2; 11.2.1; 11.2.2 y 11.2.3	Inspección Visual	-	-	x		-	x	
10.1.4 y 10.2.2	Verificación de fugas de aire	< 4mmHg/min	1,2 mmHg/min	x		3,2 mmHg/min	x	
10.1.6 y 10.2.3	Determinación del error máximo permitido	< 4 mmHg	5,0 mmHg		x	-2,3 mmHg	x	



Figura 2. Ejemplo de etiqueta de verificación metrológica

4. Criterios de conformidad en certificados de calibración según la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017

El hecho de que una calibración no corresponda a una actividad de evaluación de la conformidad, no limita a un laboratorio de calibración a no poder emitir un certificado de calibración que incluya declaraciones de conformidad. De acuerdo con los numerales 7.8.4 y 7.8.6 de la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017, los certificados de calibración pueden incluir declaraciones de conformidad, siempre que se documente la regla de

decisión utilizada [13]. Está claro que este tipo de interpretaciones pueden facilitar la comprensión de los resultados obtenidos en un proceso de calibración; pero igualmente deben ser analizados con criterio por parte del usuario, considerando en que proceso se utiliza el instrumento, cómo se utilizan estos resultados y cuál es su nivel de riesgo, ya que puede implicar costos innecesarios de reparación, recalibración o reemplazo del instrumento.

Para ilustrar esto se analiza otro ejemplo. En este caso se trata de la calibración de un manómetro digital, cuya exactitud, según su fabricante, es de 0,02 % de la escala total. La calibración del manómetro digital se realizó mediante una comparación directa contra una balanza de presión. Los resultados de la calibración se ilustran en la figura 3 y el cuadro II.

En este caso, se puede emitir un criterio de conformidad a partir de la exactitud declarada por el fabricante (0,02 % de la escala total; es decir, 0,14 kPa), y donde se define que el valor absoluto del error de medida (o corrección, en su defecto), más su incertidumbre, debe ser menor que el límite de aceptación anteriormente establecido.

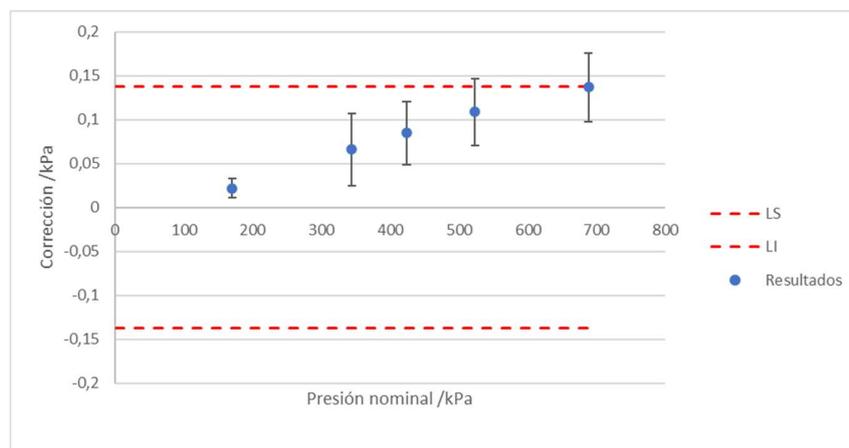


Figura 3. Resultados de la calibración de un manómetro digital

Cuadro II. Reporte de calibración de un manómetro digital

Valor del Patrón /kPa	Valor del IBC /kPa	Corrección /kPa	Incertidumbre expandida /kPa	¿Dentro de especificación? ¹
170,000	169,978	0,022	0,011	Sí
344,000	343,934	0,066	0,041	Sí
424,000	423,915	0,085	0,036	Sí
523,000	522,891	0,109	0,038	No
688,000	687,863	0,137	0,039	No

¹Especificación del fabricante $\pm 0,02$ % de la Escala Total

En este caso, se puede ver que la incertidumbre expandida de los resultados de medida ilustrados en la figura 3 exceden los límites de aceptación en dos puntos de calibración; por lo tanto, no se puede declarar conformidad con respecto a la especificación del fabricante en estos puntos. De esta forma, el certificado de calibración puede incluir una tabla como la que se muestra en el Cuadro II, donde se especifica para cada punto de calibración la declaración de conformidad correspondiente. Es importante resaltar que este tipo de criterios son opcionales en los procesos de calibración ejecutados bajo el alcance de la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017. Un laboratorio de calibración puede limitarse a reportar los resultados sin la declaración de conformidad (por ejemplo, el Cuadro II sin la columna

final), y corresponde al usuario hacer la interpretación del certificado de calibración.

5. Conclusiones

Una calibración no corresponde a una actividad de evaluación de la conformidad. Por lo tanto, no basta con exigir la calibración de un instrumento de medida como requisito de conformidad en la reglamentación técnica, sino que es necesario que se establezcan reglas de decisión sobre el uso de instrumentos de medida, de modo que garanticen la confianza en los resultados de medida correspondientes.

Por otro lado, es importante reconocer que los resultados de una calibración pueden

soportar una declaración de conformidad posterior por parte de un OEC. Finalmente, la declaración de conformidad, en certificados de calibración, es un requisito opcional de

acuerdo con la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017, siempre que se documente la regla de decisión utilizada.

6. Referencias

- [1] International Organization of Legal Metrology, «OIML V 1 International vocabulary of terms in legal metrology,» 2022.
- [2] Asamblea Legislativa, *Sistema Nacional Para la Calidad, Ley 10473*, 2024.
- [3] United Nations Economic Commission for Europe, «Recommendation K Metrological Assurance of Conformity Assessment and Testing. Third Edition,» United Nations, Geneva, 2024.
- [4] International Organization of Legal Metrology, «OIML D 3 Legal qualification of measuring instruments,» 1979.
- [5] CGPM, *Resolution 11 of the 22 General Conference of Weights and Measures*, 2003.
- [6] INTECO. (2020). INTE/ISO/IEC 17000:2020 Evaluación de la conformidad - Vocabulario y principios generales.
- [7] JCGM, JCGM 200:2012 Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados, 3ra Edición en Español ed., CEM, 2012.
- [8] International Organization of Legal Metrology, «OIML R 148 Non-invasive non-automated sphygmomanometers, parts 1,2 and 3,» 2020.
- [9] International Organization of Legal Metrology, «OIML R 149 Non-invasive automated sphygmomanometers, parts 1,2 and 3,» 2020.
- [10] Ministerio de Economía Industria y Comercio, *RTCR 451:2011 Reglamento técnico Metrología. Instrumentos para la medición de la presión arterial del cuerpo humano. Esfigmomanómetros mecánicos no invasivos tipo aneroide, de la columna de líquido manométrico y digitales*, 2011.
- [11] International Organization of Legal Metrology, «OIML G 1-106 Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment,» 2012.
- [12] International Organization of Legal Metrology, «OIML G 19 The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology,» 2017.
- [13] INTECO, «INTE/ISO/IEC 17025:2017 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración,» 2017.

Diseño de un sistema semiautomatizado para la lectura del menisco en pruebas de calibración de contenedores volumétricos

Kenneth Gutiérrez-Bravo. Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, Email: gutierrezkenneth13@gmail.com

Luis Rodríguez-Araya. Encargado del Laboratorio de Volumen, Lacomat, lrodriguez@lcm.go.cr

Resumen Se detalla el proceso de diseño de un sistema para la visualización de meniscos en pruebas de calibración de matraces aforados para el Laboratorio de Volumen del Laboratorio Costarricense de Metrología. El proceso de diseño abarcó desde la identificación de necesidades del cliente hasta la elaboración y validación de un prototipo funcional. Mediante un diagnóstico, se identificaron los aspectos a mejorar, además, se evaluó el equipo disponible en el laboratorio para la construcción del prototipo. Con manufactura aditiva, corte láser, uso de un sistema de control electrónico y la programación en LabVIEW se implementó un prototipo funcional del Sistema Identificador de Menisco (SIM), el cual es un sistema capaz de identificar la cercanía del menisco con respecto a la línea de aforo y mostrarlo en una interfaz gráfica. Se realizó un análisis de los elementos mecánicos críticos para determinar el cuál determinó que se cuenta con un factor de seguridad mayor a 3. Finalmente, se utilizó el sistema para realizar tres calibraciones de matraces aforados de 100 mL las cuales determinaron que el uso del mecanismo mejora la exactitud del proceso en un 35% y una disminución en la incertidumbre final expandida del 40% con respecto al proceso actual.

Palabras Clave: Calibración, incertidumbre expandida, manufactura aditiva, sistema de visión.

1. Introducción y generalidades

La calibración de material volumétrico es esencial para llevar a cabo ensayos experimentales en una variedad de contextos, como productos químicos, industriales, de investigación y para la enseñanza, entre otros. Además, los instrumentos volumétricos, como la cristalería del laboratorio, son fundamentales, ya que permiten la medición precisa de volúmenes de líquidos, tanto para contenerlos como para transferirlos durante la realización de experimentos y ensayos [1].

Un método muy empleado para calibrar cristalería de laboratorio es el gravimétrico, el cual consiste en medir la masa del líquido que contiene o entrega en un nivel específico (línea de aforo o medida volumétrica) [2]. Un

proceso fundamental es determinar cuándo el líquido contenido por el equipo se encuentra en el punto de referencia. Esto se conoce como la corrección de menisco. El menisco es la curvatura que se forma en la superficie de un líquido cuando está contenido en un recipiente. Debido a las fuerzas de cohesión entre la pared del equipo de laboratorio y el líquido se da este fenómeno [3]. Para leer el menisco sin error de paralaje [4], el equipo a calibrarse debe estar en posición vertical y los ojos del ejecutor de la calibración deben encontrarse a la altura del menisco, asegurándose de que la línea de visión del observador esté perpendicular a la escala graduada al realizar una medición.

Durante las pruebas de medición del volumen de matraces se llevan a cabo varias repeticiones del procedimiento ilustrado en la figura 1. La determinación del aforo del

menisco es fundamental ya que genera más del 50 % de la incertidumbre expandida del proceso de calibración completo. El laboratorio cuenta con lupas manuales y una cámara para realizar esta medición de una mejor manera, las primeras ya son un equipo obsoleto y altamente dependientes de la manipulación humana, mientras que la cámara no cuenta con la estructura indicada para su correcta sujeción y manipulación. Otro detalle para recalcar es que dada la naturaleza manual del proceso, no se cuenta con una interfaz que conecte los datos captados por la cámara al software actual del laboratorio. Todo lo anterior ocasiona que el proceso presente una alta variabilidad en el tiempo de ejecución y alta incertidumbre de medición.

Dado a todo lo anterior, se determinó la necesidad de diseñar un dispositivo capaz de identificar y notificar al ejecutor de las calibraciones cuando el nivel del líquido se encuentra en la posición de ajuste. El diseño del dispositivo se realizó con la metodología expuesta por Ulrich-Eppinger [5], el cual se encuentra dividido en dos partes, una plataforma mecánica para acomodar todo el equipo necesario para las mediciones y un módulo de control e identificación de menisco encargado de identificar la posición de este con respecto a la línea de aforo de la cristalería de laboratorio. Los resultados obtenidos se contrastaron contra los presentados por el proceso empleado actualmente en el laboratorio.

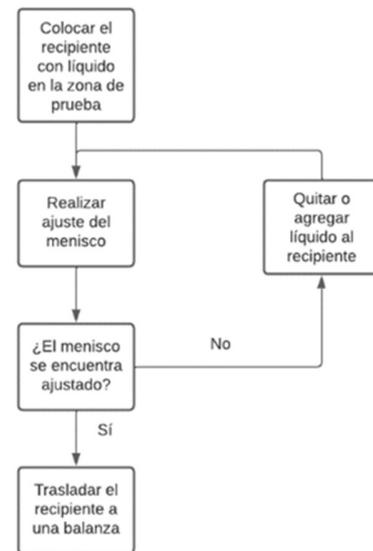


Figura 1. Diagrama del proceso de ajuste del menisco.

2. Diseño de la plataforma mecánica

La plataforma mecánica se encarga de contener y movilizar todo el equipo necesario para visualizar el menisco. Se encuentra conformado por cuatro partes principales que se explican a continuación:

2.1. Sistema de movimiento vertical

Es la parte de la estructura que convierte el movimiento de los motores en un movimiento lineal para variar la posición de la cámara. Está conformado por dos módulos de tornillo de avance colocados en espejo y unidos mediante pernos como se puede apreciar en la figura 2. Este posee dos tornillos sin fin que convierten el movimiento rotacional de los motores a movimiento lineal con el fin de mover la cámara y se encuentran en diagonal con el fin de minimizar posibles inclinaciones de la cámara con el fin de evitar paralaje en las pruebas. Además, cuenta con dos barras lisas en diagonal con el fin de brindar estabilidad al sistema y disminuir las vibraciones.

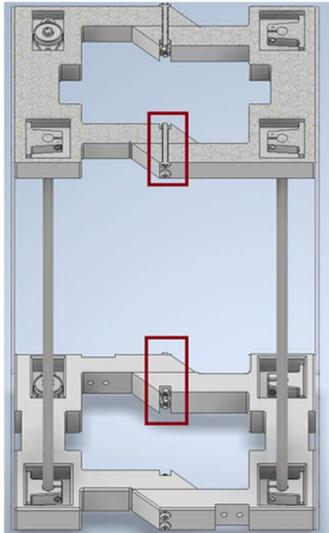


Figura 2. Sistema de movimiento vertical.

2.2. Plataforma de la cámara

Es la parte donde se coloca la cámara, esta debe ser lo suficientemente firme para no experimentar desniveles. Está conformada por diversas partes: unas placas que unen a las barras lisas con los tornillos de avance, cuatro piezas que unen a estas placas con la plataforma y la jaula de la cámara. Este diseño da muchas ventajas; primero queda más centrada la jaula, lo que mejora el centro de masas del sistema; segundo, permite que, en el caso de un cambio en la cámara se ajuste con desarmar los sujetadores, diseñar una nueva plataforma con los agujeros pasantes en el mismo sitio, rediseñar la jaula y volver a colocar todas las piezas nuevas para su funcionamiento.

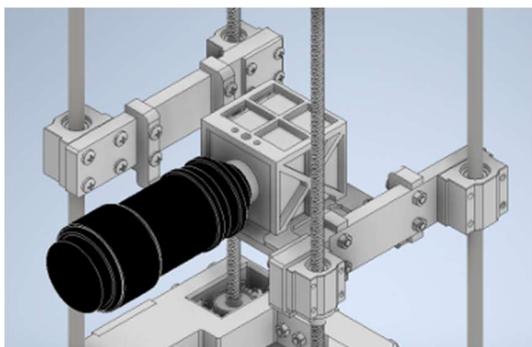


Figura 3. Montaje de la cámara propuesto.

2.3. Sistema de energía y potencia

Abarca las conexiones eléctricas para la interacción de los motores, fuentes de energía y el microcontrolador necesario para brindar movimiento al sistema. Este se encuentra conformado por los siguientes componentes:

- Motor – Stepper: se emplearon dos motores “Paso a Paso” Nema 17 lo suficientemente potentes para mover la cámara y su base, con su respectivo controlador.
- Acople rígido para unir al motor con el tornillo de avance.
- Fuente de poder de 12V y 10 A.

En la figura 4 se puede apreciar la conexión entre la fuente de poder, los controladores y los Steppers. Es importante resaltar que el conector de *Enable* del controlador (pin de la esquina superior más cercano al potenciómetro) tiene que encajar con el pin de *Enable* del Shield para una correcta conexión.

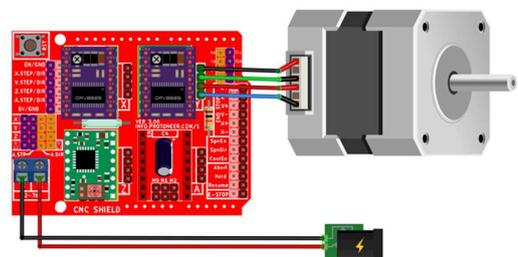


Figura 4. Conexiones del Shield V3 de Arduino UNO al Stepper.

2.4. Espacio de almacenamiento

Este componente corresponde a la base donde se unen el Sistema de movimiento Vertical y el Sistema de energía y potencia, para así conformar un sistema móvil que se pueda guardar y utilizar sin necesidad de desarmar todo el sistema. En la figura 5 se

puede apreciar la plataforma mecánica en el laboratorio de volumen.

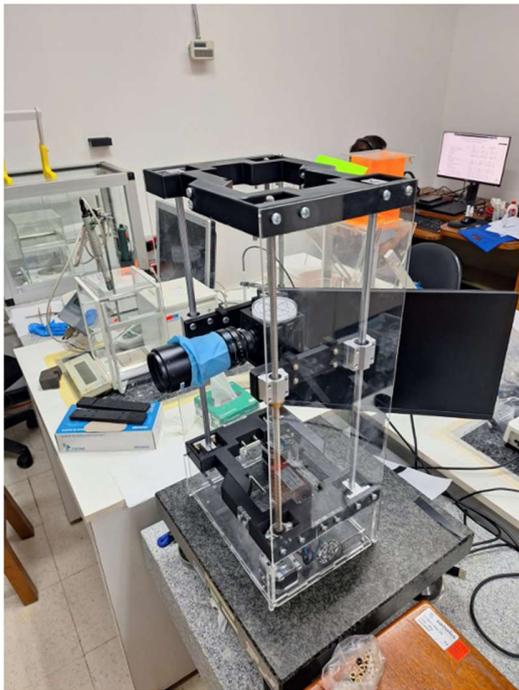


Figura 5. Montaje de la cámara en el laboratorio.

3. Diseño del sistema de Control

3.1. Sistema de captura de la imagen

Un aspecto importante es la posición de la cámara y la iluminación necesaria para resaltar mejor las características que se desean. Con respecto a la posición de la cámara, para la correcta visualización del menisco, este se debe observar desde el lateral de la cristalería de laboratorio y, dada la disposición de las mesas de planitud, la mejor ubicación es la presentada en la figura 6.



Figura 6. Disposición de la cámara y la cristalería del laboratorio.

En el caso de la iluminación, por indicación del laboratorio se utilizarán luces fluorescentes que ya iluminan el cuarto y el espacio donde se realizan las imágenes se encuentra aislado del exterior. La luz del laboratorio posee una buena disposición lo que crea una iluminación uniforme suficiente para evitar reflejos.

3.2. Algoritmo de Visión Artificial

Se llama algoritmo de visión artificial a todo el proceso que experimenta la imagen desde el momento en ser obtenida hasta que da información útil para tomar decisiones. El algoritmo utilizado cuenta con las siguiente etapas y orden: Obtención de la imagen, preprocesado, segmentación por detección de bordes e Identificación de la distancia mínima entre bordes. El algoritmo se divide en dos secciones principales: el preprocesado y la segmentación e identificación de bordes, este proceso se puede apreciar en la figura 7. La implementación se realizó en Python mediante la biblioteca OpenCV.

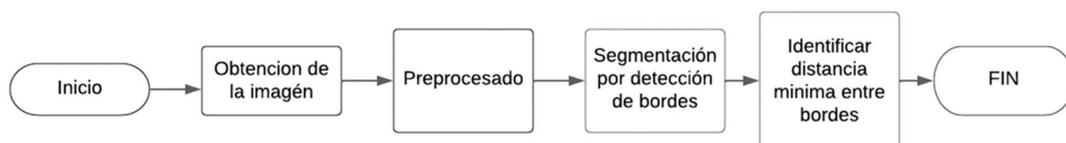


Figura 7. Flujo empleado para el procesamiento de la imagen en Visión Artificial.

3.2.1. Preprocesamiento

Los pasos descritos en esta sección son fundamentales para realizar una extracción o fortalecer las características que se desean analizar en la aplicación. Este proceso se encuentra conformado por los siguientes procesos:

Recortar imagen original: Este paso surge de la necesidad de eliminar información innecesaria de la imagen original. Al observar la figura 8, se puede apreciar que la cámara captura todo el menisco, las paredes laterales del balón aforado, la línea de aforo y la cinta negra que se coloca por debajo. Esto resulta en un exceso de información ya que lo único que se quiere analizar es la parte más cercana del menisco con la línea de aforo. El usuario del sistema es capaz de seleccionar mediante un cuadro azul la zona de la imagen que se desea analizar.

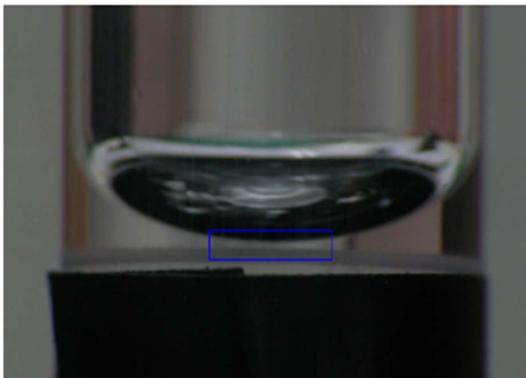


Figura 8. Imagen original del proceso de VA.

Convertir a escala de grises: es un proceso que se realiza para eliminar los distintos colores y analizar la imagen en una escala de grises, con el fin de resaltar el contorno del menisco y línea de aforo.

Mejorar contraste de la imagen: en la figura 9.a se puede apreciar el segmento recortado original en el cual se aprecia el menisco y la línea de aforo, por lo cual se decidió estudiar su histograma que se puede apreciar en la figura 10 donde se nota que los valores de grises de la imagen todos se encuentran por

debajo de 100, lo que nos deja la información a analizar en una resolución sumamente pequeña. Entonces al implementar una normalización de 0 - 255 de cada píxel de la imagen se obtuvo la imagen de la figura 9.b y en su histograma de la figura 11 podemos apreciar la disminución de la saturación, además, se pueden apreciar mejor los contornos en la figura 9.b lo que facilitará los pasos futuros.



(a) Antes de mejorar contraste



(b) Contraste mejorado.

Figura 9. Imagen recortada con y sin contraste mejorado.

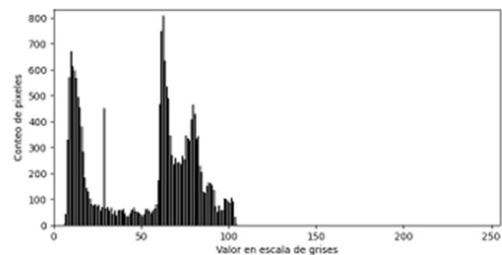


Figura 10. Histograma de la imagen antes de realizar la mejora de contraste.

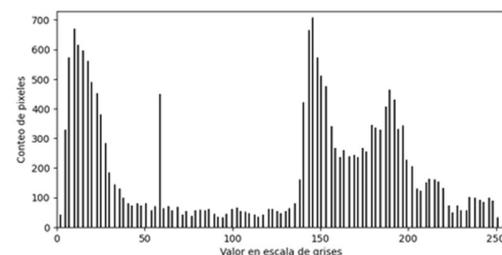


Figura 11. Histograma de la imagen después de realizar la mejora de contraste.

“Binarizar” la imagen: Esta etapa del proceso sigue la misma línea que el proceso anterior. Ahora se “binarizará” la imagen para obtener una imagen con solo valores negros y blancos, lo que en el futuro facilitará la

identificación de las fronteras de los elementos y así eliminar las líneas difusas. En la figura 12 se puede apreciar la “binarización” de la imagen mostrada en la figura 9.b donde se puede apreciar la eliminación de información innecesaria y se ve únicamente el menisco y línea de aforo en negro y el líquido en blanco.



Figura 12. Imagen “binarizada”.

3.2.2. Identificación de distancia del menisco

Una vez realizado el preprocesamiento, es momento de identificar la distancia entre el menisco y la línea de aforo. Esto se realiza mediante las dos etapas finales indicadas en la figura 7.

Segmentación por detección de bordes: En esta etapa se busca identificar los píxeles que constituyen los bordes, ya que estos son los que interesa conocer para determinar la cercanía del menisco con la línea de aforo. Este proceso se realiza mediante el siguiente proceso:

- **Detección de bordes:** se aplica un filtro Sobel, que es un operador de convolución que resalta los cambios de intensidad en una imagen, en el eje y para resaltar los bordes horizontales.
- **“Umbralización”:** se aplica una “umbralización” al gradiente vertical obtenido con el filtro Sobel, dejando una figura con los bordes en blanco y el resto en negro.
- **Encontrar contornos:** Se encuentran todos los contornos de la imagen “binarizada” con los bordes horizontales para identificar la cantidad de líneas y determinar el estatus del menisco.

- **Dibujar contornos:** Se crea una nueva imagen con los contornos identificados.
- **Contar contornos:** Se cuentan la cantidad de contornos para determinar el estatus del menisco.

Después de realizar este proceso, se esperan tres posibles resultados o estados del menisco: menisco lejano de la línea de aforo, menisco casi tocando la línea de aforo y menisco tocando la línea de aforo. A partir de estos resultados se toman distintas decisiones. Si el menisco se encuentra lejano o muy cercano, el sistema solo identificará dos contornos y procederá a medir la distancia entre los elementos. Si hay más de dos contornos, el sistema omite el paso de medir la distancia entre ellos y da un mensaje indicando que el menisco ya se encuentra sobre la línea de aforo.



(a) Gran distancia entre menisco y línea.



(b) Menisco cercano a la línea de aforo.



(c) Menisco tocando la línea de aforo.

Figura 13. Resultado esperado después de la identificación de bordes.

Identificar distancia mínima entre bordes:

Una vez obtenidas las imágenes mostradas en la figura 13 se realizan tres procesos distintos. En el caso a) lo que se realiza es recorrer los dos contornos identificando el punto más cercano entre ellos que se colorea

de rojo. En el caso b) y c) que revisa si hay algún espacio en la imagen sin contornos, lo que confirma que verdaderamente está tocando o este se encuentra muy cerca de la línea de aforo. Lo que se calcula es el porcentaje del ancho de la imagen que posee dos contornos.

- Menor al 10%: el menisco está a punto de tocar la línea de aforo.
- Entre el 40% y el 10%: el menisco está tocando la línea de aforo sin pasar por debajo en gran proporción.
- Mayor al 40%: el menisco está tocando o por debajo de la línea de aforo.

3.3 Implementación de LabVIEW

La ejecución de las funciones de procesamiento de imágenes y control de los motores se realiza por medio de LabVIEW, ya que el laboratorio posee sus demás programas en esta plataforma y se desea seguir por la misma línea. Esta implementación está dividida en tres estados distintos:

Estado de espera: aquí no se realiza ninguna función específica además de reiniciar datos y entrar en un modo conocido. Funciona como un estado de espera para cuando el usuario se encuentra preparando otros detalles de la calibración.

Captura de imagen: En este modo se realiza el control de la cámara para enviarle las señales de tomar una fotografía y procesarla para determinar el estado del menisco.

Control de motores: En esta sección se realiza el control de los motores para variar la posición de la cámara con el fin de poder identificar meniscos de distintos recipientes o para otras aplicaciones que el personal de laboratorio quiera realizar.

4. Validación del prototipo funcional

4.1 Análisis del Factor de Seguridad

Un aspecto fundamental al momento de realizar la implementación de una estructura mecánica es la determinación del factor de seguridad para el sistema, o al menos, las piezas que son consideradas los puntos críticos del sistema ya sea por su ubicación, porque reciben la mayor carga o mayor estrés, o porque sirven de sujeción para un elemento importante. Para esto se realizó un análisis de elementos finitos al sistema que sujeta la cámara, que es la parte más crítica del diseño mecánico, que se muestra en la figura 14, se observa que el valor máximo experimentado por el sistema es de 3,08, lo cual está 0,508 por encima del valor deseado. Esto garantiza la seguridad de la cámara utilizada y permite el uso de ópticas con un mayor peso.

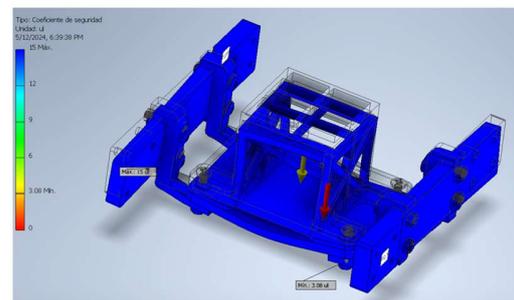


Figura 14. Factor de seguridad del sistema de sujeción de la cámara

4.2 Pruebas de calibraciones en matraces aforados de 100 mL.

4.2.1 Determinación de la resolución del sistema

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al realizar calibraciones de matraces aforados de un valor nominal de 100 mL con el uso del Sistema Identificador de

Menisco (SIM). Se llevaron a cabo la calibración de tres matraces distintos para constatar la reproducibilidad de los resultados y verificar que el volumen y la incertidumbre expandida obtenidas al realizar este proceso cumpliera con los estándares del laboratorio. Primero, se determinó la resolución del SIM, el cual consiste en el cambio mínimo de volumen que puede percibir el sistema. Posteriormente, se calculó la incertidumbre debida al menisco.

En lugar de realizar las cinco mediciones habituales del menisco tocando la línea de aforo que es como se realiza en el procedimiento usual, se realizaron 10 mediciones en cada matraz, agrupadas en 5 repeticiones por matraz. Primero se realizaron las mediciones cuando el SIM identificó que el menisco se encontraba a punto de tocar la línea de aforo, es decir que este se encuentra muy cerca pero no tocando la línea de aforo. Después se sustrajo más volumen hasta que el sistema indique que el menisco se encuentra tocando la línea. El cambio entre estos dos estados se tomará como el cambio de volumen mínimo que puede identificar la solución y por consiguiente la resolución del sistema.

Actualmente, en el laboratorio se utiliza una altura de 0,1 mm para definir la incertidumbre debida a la resolución de visualización del menisco, este valor fue definido en un experimento realizado en el pasado en el laboratorio como parte del cálculo de la CMCs actuales de laboratorio, se considera como valor de referencia para las pruebas a realizar. Las alturas correspondientes a las diferencias se calcularon de la siguiente manera:

$$h = \frac{4V_R}{\pi d^2} \quad (1)$$

Donde V_R es el volumen de líquido y d es el diámetro del cuello del matraz.

CUADRO I. Mínima altura detectada en matraces aforados de 100 mL.

Matraz	A	B	C
Repetición	h	h	h
	(mm)	(mm)	(mm)
1	0,019	0,071	0,045
2	0,058	0,032	0,050
3	0,104	0,058	0,065
4	0,039	0,052	0,035
5	0,026	0,08	0,032
		9	
Promedio	0,04	0,061	0,04
	9		6
Promedio General	0,052 mm		
Incertidumbre	0,006 mm		

Se puede apreciar que en los tres matraces se obtiene una altura cercana a 0,05 mm, de hecho, el promedio entre los tres corresponde a $(0,052 \pm 0,006)$ mm de distancia el cual disminuye la resolución para esta incertidumbre en un 52% con respecto al valor actual utilizado. El impacto en la disminución de la resolución del proceso se apreciará mejor al analizar la incertidumbre expandida.

4.2.2 Análisis de calibraciones de matraces de 100 mL

Antes de iniciar con el análisis de los resultados de las calibraciones realizadas con el SIM, mediante una entrevista con el cliente se obtuvieron los valores estándar obtenidos en calibraciones anteriores de cada uno de los matraces, estos son los siguientes valores:

- Matraz A: $(99,973 \pm 0,019)$ mL.
- Matraz B: $(100,046 \pm 0,020)$ mL.
- Matraz C: $(100,100 \pm 0,016)$ mL.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados medidos por el sistema de los

mismos matraces y el error normalizado con respecto a los valores actuales del laboratorio:

- Matraz A: $(99,982 \pm 0,012)$ mL, error normalizado = 0,38.
- Matraz B: $(100,033 \pm 0,012)$ mL, error normalizado = 0,46.
- Matraz C: $(100,087 \pm 0,010)$ mL, error normalizado = 0,69.

El Matraz A se calibra periódicamente como prueba de las capacidades de medición del laboratorio. Se observa que la calibración del matraz A realizada con el uso del SIM, denominada Control 2024-05-13, posee un error normalizado de 0,38, lo cual indica que es un valor comparable de manera satisfactoria a los valores históricos. En otras palabras, al obtener un valor menor a la unidad, se puede determinar que los resultados son congruentes con el histórico. En la figura 15 se puede apreciar cómo este valor se encuentra dentro del rango de valores obtenidos (el valor más a la derecha). También, se puede apreciar que como tanto para el matraz B y C poseen un error normalizado menor a 1 por lo que son valores comparables a los obtenidos anteriormente.

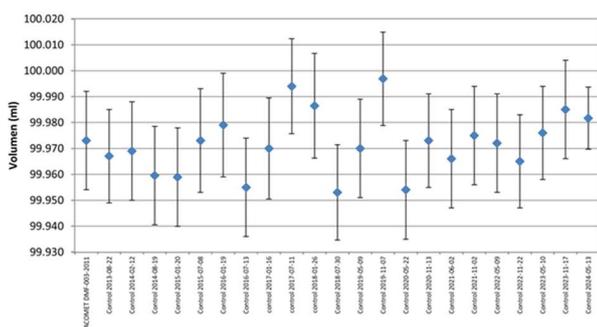


Figura 15. Distribución de los resultados en las calibraciones del Matraz A.

Con respecto a la mejora de la incertidumbre de las mediciones se puede apreciar que en el caso del Matraz A pasa de $\pm 0,019$ mL a $\pm 0,012$ mL lo que significa una mejora del 36%,

en el caso del Matraz B pasa de $\pm 0,020$ mL a $\pm 0,012$ mL lo que es una disminución del 36% en su incertidumbre expandida y finalmente en el caso del matraz C se aprecia una mejora del 44.4% en su incertidumbre. Esto demuestra que dada la implementación del sistema propuesto, se disminuye en promedio un tercio su incertidumbre expandida.

Con respecto a la exactitud se puede decir que las mediciones realizadas con el SIM se encuentran más cercanos al valor nominal de 100 mL que los reportados por el laboratorio. La mejora es de 50%, 40% y 15% para los Matraces A, B y C respectivamente lo que significa una mejora promedio del 35%.

5. Conclusiones

- Se puede concluir que con la implementación de la solución se puede disminuir la resolución de visualización del menisco de 0,10 mm a 0,05 mm lo que significa una disminución a la mitad de las capacidades actuales.
- Los resultados obtenidos de las calibraciones permiten concluir que el sistema es capaz de realizar calibraciones en matraces aforados con una incertidumbre expandida $\leq \pm 0,019$ mL.
- Los resultados obtenidos de las calibraciones realizadas muestran que la incertidumbre expandida obtenida en calibraciones utilizando el sistema es menor en un 40% con respecto a la obtenida en calibraciones anteriores en el laboratorio.
- Mediante una comparación del Error Normalizado se verificó que los resultados obtenidos por el sistema y su incertidumbre final expandida son

concordantes a los datos históricos del laboratorio.

- El estudio de los elementos mecánicos críticos de la Plataforma Mecánica de la propuesta de diseño permite

evidenciar que el diseño de la solución posee un factor de seguridad mayor 3 lo que garantiza la integridad de este y la seguridad de la cámara.

6. Referencias

- [1] N. I. s.a. “¿Qué es la calibración de material volumétrico?” (Mar. de 2023), dirección: <https://net-interlab.es/calibracion-material-volumetrico/>.
- [2] V. GmbH, *Competence in Volume Measurement*. BRAND, 2020. dirección: https://www.vitlab.com/fileadmin/user_upload/VITLAB-GmbH/Sonstiges/Druckschriften/Broschueren/Volumenmessung/PDF/Broschuere_Volumenmessung_EN.pdf.
- [3] BRAND. “Trabajar con material volumétrico en vidrio.” (mar. de 2023), dirección: <https://www.brand.de/es/aplicaciones/trabajar-con-material-volumetricoen-vidrio>.
- [4] D. Mardanbegi y D. Hansen, “Parallax error in the monocular head-mounted eye trackers,” sep. de 2012, págs. 689-694. doi: 10.1145/2370216.2370366.
- [5] L. C. de Metrología. “Laboratorio de Volumen.” (mar. de 2024), dirección: <https://lcm.go.cr/laboratorio-de-volumen/>.