

Implementación de una Cámara Climática Automatizada para la Calibración de Equipos de Medición utilizando Arduino MEGA y un Módulo LCD

Bejarano Bazan Jhonatan Fredy¹; Llancares Sánchez Keneth²; Guevara Alegría Gabriel Antonio³
^{1,2,3}Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, jbejarano@senati.pe, 1324267@senati.pe,
1349186@senati.pe

Resumen– El presente artículo describe la implementación de una cámara climática automatizada diseñada para la calibración precisa de termohigrómetros y otros equipos de medición de temperatura y humedad. Tratando las limitaciones actuales en el proceso de calibración, que provocan ciertos retrasos en la producción, insatisfacción del cliente y aumento de costos operativos para la empresa EQUINLAB SAC, este proyecto propone una solución de bajo costo basada en la tecnología que nos ofrece Arduino MEGA. La cámara automatizada integra sistemas de calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación controlados por un Arduino MEGA, con una visualización de datos en tiempo real a través de un módulo LCD. El diseño incluye una tarjeta electrónica personalizada, esquemas electrónicos y eléctricos detallados, y planos 3D de la cámara. Esta innovación busca mejorar la capacidad y eficiencia de calibración, ofreciendo una alternativa robusta y económica a las soluciones que ya existen en el mercado, lo que finalmente mejora la calidad del servicio y reduce los gastos operativos.

Palabras clave

Cámara Climática, Calibración Automatizada, Arduino MEGA, Termohigrómetro, Humedad, Temperatura.

I. INTRODUCCIÓN

La metrología, como ciencia de la medición, constituye un eje esencial en la calidad y competitividad de la industria moderna. La calibración de instrumentos es crucial para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos en procesos productivos y de investigación. Hablaremos sobre los termohigrómetros que son muy usados en sectores como el farmacéutico, alimentario, agrícola y de salud, donde el control ambiental es crítico para la calidad y seguridad.

En el contexto peruano, EQUINLAB SAC es una empresa referente en calibración y comercialización de equipos, operando bajo la norma ISO/IEC 17025 [1]. Una documentación rigurosa y verificable de todos los procesos de medición y calibración [2]. Pero enfrenta limitaciones en la calibración de termohigrómetros debido a una infraestructura manual que genera tiempos elevados, riesgo de errores humanos, una baja productividad y por lo tanto insatisfacción del cliente y altos costos operativos. La ausencia de una cámara climática automatizada impide una calibración eficiente y fluida de múltiples equipos, afectando directamente la trazabilidad, la documentación digital y la competitividad.

Ante este problema, se propone el desarrollo de un prototipo de cámara climática automatizada, orientado a

optimizar los procesos de calibración, reducir tiempos de entrega y mejorar la eficiencia operativa, todo bajo un enfoque de bajo costo y alta precisión. Este artículo describe la metodología de diseño y construcción del sistema, incluyendo la selección de componentes como el Arduino MEGA, sensores Pt100 y DHT22, y el desarrollo del software de control. Se presentan resultados de pruebas que validan la estabilidad del sistema

II. REVISIÓN LITERARIA

Esta sección establece la base conceptual y contextual del proyecto, presentando investigaciones previas relevantes y los fundamentos teóricos esenciales que sustentan el diseño y la implementación de la cámara climática automatizada.

La búsqueda de eficiencia y precisión en la calibración de instrumentos de medición ha sido objeto de diversas investigaciones a nivel internacional y nacional, lo que demuestra una tendencia creciente hacia la automatización de procesos y el desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de la metrología. Estos estudios proporcionan una base valiosa y un marco de referencia para el presente proyecto.

En estudios previos como los de Edison y Moreira [3], en su trabajo desarrollado en la Universidad de Fuerzas Armadas de Ecuador, pudieron automatizar una cámara climática para ser usada en laboratorio. La implementación de un controlador lógico programable (PLC) Mini PLC LOGO de Siemens permitió una gestión autónoma de los módulos de generación de temperatura y humedad, eliminando la necesidad de supervisión directa. El sistema diseñado incorporó un sensor SHT20 para la medición de temperatura y humedad, un humidificador Holmes y sistemas de refrigeración y calefacción optimizados. Un resultado clave fue la mejora sustancial en el rango de calibración: se expandió el alcance de la temperatura en un 25% y el de la humedad en un 31.25%. Esto se consiguió mediante el incremento de la capacidad de calefacción, la reducción estratégica del tamaño de la cabina de la cámara y el cambio a un material aislante más eficiente. Además, la optimización del proceso de calibración y la significativa reducción del espacio físico de la cámara climática (75% en altura y 30% en ancho y profundidad) se lograron al consolidar los antiguos sistemas de control en un único controlador programable. Este antecedente es relevante por demostrar la

viabilidad y los beneficios de la automatización en cámaras climáticas a nivel de laboratorio.

Por otro lado, Vélez [4], desde el Instituto Tecnológico de Orizaba en México, trató la estimación de la incertidumbre en la medición de humedad, esto es muy importante para la acreditación de laboratorios de metrología. La investigación concluyó que, en la calibración de higrómetros de humedad relativa dentro del intervalo del 10% al 95% HR a temperatura ambiente, se pueden alcanzar incertidumbres mayores o iguales a 1.4% HR (típicamente entre 2% y 3%) con un nivel de confianza del 95.45% (factor de cobertura $k=2$). Específicamente, el procedimiento de calibración aplicado en su proyecto permitió estimar una incertidumbre expandida de $\pm 1.429\%$ HR. Este trabajo destaca la importancia de la rigurosidad metrológica y el cálculo de la incertidumbre en los procesos de calibración, un factor que nuestra cámara buscará minimizar mediante un control preciso.

En Perú, Zuta [5] desarrolló la propuesta de Automatización de una cámara climática para calibración de instrumentos de medición en una empresa de asistencia técnica instrumental en Lima, su investigación se centró en la automatización de una cámara climática preexistente usando tecnología de la marca Siemens. La programación se llevó a cabo en el software TIA Portal empleando el lenguaje Ladder para un PLC S7-1200, mientras que la interfaz gráfica se implementó con un HMI KTP400 Basic. Esta combinación permitió una mejora significativa en el tiempo de estabilización y la uniformidad de las condiciones dentro de la cámara a diferentes valores de temperatura y humedad. Los resultados mostraron que el sistema automatizado redujo los tiempos de inestabilidad y mejoró la homogeneidad en los puntos de prueba.

También en Perú, Romero [6] Propuso el diseño de un procedimiento para la calibración de equipos de medición electrónica de flujo de gases, en un banco automatizado de toberas bajo la norma ISO 17025, su labor en la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, se enfocó en la acreditación de laboratorios bajo la norma ISO 17025 para la calibración de medidores de flujo de gases. Se determinó que su propuesta cumplía con todos los requerimientos técnicos de la norma metrológica peruana NMP016:2012 y el INACAL. Además, estableció un alcance de trabajo para caudales entre 0.016 m^3 a 6.5 m^3 , siguiendo la norma de construcción 9300-2005 para un banco de toberas de flujo crítico. Este antecedente resalta la importancia del diseño de procedimientos metrológicos bajo estándares ISO/INACAL para garantizar la trazabilidad y la calidad de las mediciones, un principio que guía el desarrollo de nuestra cámara.

Estos antecedentes resaltan la importancia de la automatización en el ámbito metrológico y la necesidad de soluciones efectivas que hablen de las limitaciones de los sistemas existentes, al mismo tiempo que aseguren la precisión y cumplan con los estándares de calidad y trazabilidad. Nuestro

proyecto se beneficia de las lecciones aprendidas de estas investigaciones, adaptando tecnologías probadas para crear una solución de bajo costo específica para las necesidades de EQUINLAB SAC.

Para comprender el diseño y funcionamiento de la cámara climática automatizada que se propuso en este proyecto, es necesario revisar los conceptos físicos y tecnológicos que justifican sus componentes y el proceso de calibración. La cámara climática es un equipo de laboratorio especializado que nos permite simular y mantener condiciones ambientales controladas de temperatura y humedad relativa dentro de un volumen confinado. Su función principal es someter muestras, productos o materiales a ensayos y pruebas que requieren entornos estables y específicos, como pruebas de envejecimiento acelerado, estudios de corrosión, almacenamiento controlado de sustancias sensibles, y lo más importante para este proyecto, la calibración de instrumentos de medición [7]. Las características más críticas de estas cámaras incluyen su rango de operación que pueden ir desde -70°C hasta $+180^\circ\text{C}$ en modelos avanzados, y niveles de humedad relativa entre el 10% y el 98% HR [8]. La capacidad de reproducir condiciones específicas de forma consistente y controlada convierte a estas cámaras en herramientas esenciales en laboratorios de metrología, investigación y desarrollo industrial. El diseño típico de una cámara climática incorpora paredes multicapa con materiales aislantes de alta eficiencia, como poliuretano, lana mineral o fibra de vidrio, que reducen la transferencia térmica con el exterior. Para el control térmico, se utilizan resistencias eléctricas o bombillas cerámicas en el sistema de calefacción, mientras que para la etapa de enfriamiento puede lograrse mediante compresores, celdas Peltier o sistemas de nitrógeno líquido. La regulación de humedad se realiza mediante generadores de vapor, atomizadores ultrasónicos o sistemas de humidificación por inyección, y la deshumidificación se logra con compresores que condensan la humedad, agentes desecantes o control térmico.

La circulación interna de aire se garantiza mediante ventiladores que distribuyen homogéneamente las condiciones en todo el volumen de trabajo. Finalmente, el sistema de control está compuesto por un microcontrolador o un PLC, que gestiona los actuadores en función de las lecturas obtenidas por sensores de temperatura y humedad, permitiendo una regulación precisa y automatizada del entorno. La metrología, es la ciencia de la medición. Garantiza la uniformidad y fiabilidad de las mediciones a nivel mundial. La calibración es el conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, una relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medición y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones. La trazabilidad metrológica es la propiedad de un resultado de medida que lo vincula con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones. Dicha trazabilidad contribuye de forma directa a la estimación de la incertidumbre de medida. En el caso de instrumentos como el termohigrómetro, este es un proceso crítico que garantiza que

las lecturas del instrumento sean precisas y consistentes con un patrón de referencia reconocido.

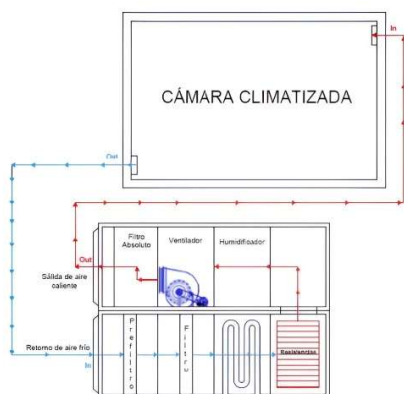


Fig1. Proceso de calentamiento y humidificación.

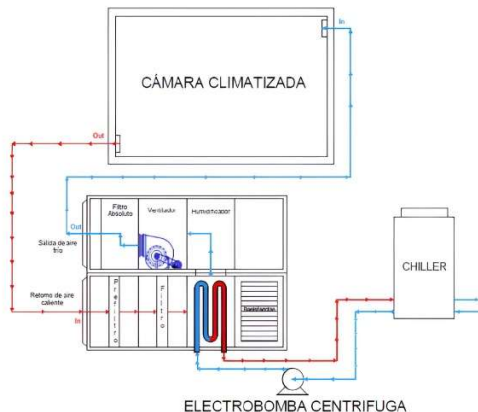


Fig2. Proceso de enfriamiento y deshumidificación

La medición de temperatura y humedad es fundamental en el control ambiental. La temperatura representa el nivel de energía térmica de las partículas en un cuerpo o ambiente, y se expresa comúnmente en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) o Kelvin (K).

La humedad relativa (HR), por su parte, se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua en una muestra de aire y la cantidad máxima de vapor de agua que el aire podría contener a la misma temperatura y presión, esta expresada como porcentaje (%). Es la forma más común de expresar la humedad en aplicaciones prácticas. Otro parámetro relevante es el punto de rocío, nos indica la temperatura a la cual el aire se satura y comienza la condensación. Es otra forma de expresar la humedad absoluta. Para medir estos parámetros, se emplean instrumentos como el termohigrómetro, que integra sensores de temperatura y humedad relativa en una sola unidad, se utiliza mucho en sectores que requieren monitoreo ambiental preciso.

La selección de sensores adecuados es crítica para la precisión y estabilidad del sistema de control. En este proyecto se emplea el sensor de temperatura Pt100, un detector de temperatura por resistencia (RTD) fabricado en platino, cuya resistencia eléctrica varía de forma predecible con la

temperatura. Su resistencia nominal es de 100 ohmios a 0°C , se caracteriza por su alta precisión y estabilidad a largo plazo y reproducibilidad. La relación entre resistencia y temperatura se describe mediante la ecuación de Callendar-Van Dusen, que permite una conversión precisa, especialmente cuando se utilizan configuraciones de 3 o 4 hilos para compensar la resistencia de los cables. Para facilitar la lectura del Pt100, se incorpora el módulo MAX31865, un conversor analógico-digital (ADC) diseñado específicamente para RTDs. Este módulo permite una lectura digital directa mediante interfaz SPI, simplificando el diseño del sistema y ofreciendo funciones como detección de fallas y alta resolución.

Complementariamente, se utiliza el sensor DHT22 (AM2302), que nos da lecturas digitales de temperatura y humedad relativa a través de un bus de datos de un solo cable. La medición de humedad se realiza mediante un sensor capacitivo, mientras que la temperatura se mide con un termistor. Este sensor se caracteriza por su bajo costo, fácil integración con microcontroladores y precisión aceptable para aplicaciones generales ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en temperatura y $\pm 2-5\%$ HR en humedad). En este proyecto, el DHT22 se emplea principalmente para la lectura de humedad dentro de la cámara climática, y como sensor de respaldo para la temperatura.

El sistema de control trabaja en base al microcontrolador Arduino MEGA 2560, que utiliza el chip ATmega2560 de Atmel. Este dispositivo ofrece 54 pines digitales (15 con capacidad PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs y una memoria Flash de 256 KB. Su amplia capacidad de entrada/salida permite conectar múltiples sensores, actuadores y elementos de interfaz sin consumir recursos. Además, su memoria facilita la implementación de algoritmos de control complejos y la gestión de modos de operación autónomos. El entorno de librerías y la comunidad de desarrollo de Arduino contribuyen significativamente a la eficiencia en el diseño y programación del sistema.

El sistema de control climático activo está compuesto por diversos actuadores. La celda Peltier TEC1-12706, también conocida como termoelectrico cooler (TEC), es un dispositivo de estado sólido que su función es la de transferir calor entre sus caras mediante el efecto Peltier al recibir corriente continua. Una cara se enfría mientras la otra se calienta, y su operación eficiente requiere disipación térmica adecuada mediante disipadores y ventiladores. Para la calefacción, se usa una bombilla de cerámica que irradia calor infrarrojo sin emitir luz visible, lo cual es ideal para mantener condiciones térmicas sin interferencias ópticas en los instrumentos [9].

El control de humedad se realiza mediante un humidificador ultrasónico, que genera una niebla fría de agua usando vibraciones de alta frecuencia de un transductor piezoeléctrico. Este vapor se dispersa en la cámara para elevar la humedad relativa, y requiere un suministro constante de agua. Para la conmutación de cargas, se utiliza un relé de estado sólido (SSR), que permite controlar dispositivos de alta potencia con señales de baja potencia provenientes del microcontrolador. A diferencia de los relés electromecánicos,

los SSR no tienen partes móviles, lo que mejora su durabilidad, velocidad de respuesta y precisión.

El sistema también incorpora un módulo driver de motor tipo puente H (como el L298N), que nos permite controlar la dirección de corriente en una carga. Aunque comúnmente se usa para motores DC, en este proyecto se emplea para gestionar la celda Peltier, permitiendo su activación y, potencialmente, la inversión de polaridad si se requiere un control dinámico. Para garantizar la uniformidad de las condiciones internas, se utilizan ventiladores DC que fuerzan la circulación de aire dentro de la cámara, además de disipar el calor generado por la celda Peltier.

La interfaz de usuario está compuesta de una pantalla LCD con módulo I2C, que permite mostrar información en tiempo real como temperatura, humedad y mensajes de estado. El uso del protocolo I2C disminuye significativamente el número de pines requeridos, simplificando el cableado y liberando recursos para otros componentes. Adicionalmente, se incorpora un teclado numérico 4x4 que permite al usuario ingresar valores de temperatura y humedad deseados (setpoints) y navegar por las opciones del sistema. Esta interfaz sencilla y funcional resulta adecuada para aplicaciones empotradas en entornos de laboratorio.

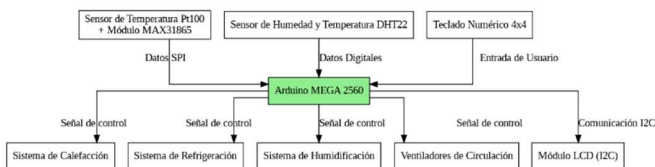


Fig3. Diagrama de bloques general de la cámara climática con Arduino

III. METODOLOGÍA Y PROPUESTA TÉCNICA

Para visualizar la mejora propuesta, se desarrolló un Diagrama de Actividades del Proceso (DAP) para la situación actual y la situación mejorada. El análisis del DAP del proceso de calibración manual reveló una secuencia con múltiples operaciones, transportes, inspecciones y demoras, evidenciando la ineficiencia. Los principales puntos de pérdida de tiempo eran la estabilización manual de las condiciones de temperatura y humedad y la espera por la disponibilidad de equipos.

En el DAP de la situación mejorada, se observa una significativa reducción de pasos. La automatización de la cámara elimina la necesidad de supervisión constante y ajustes manuales, transformando una serie de operaciones en un único proceso automatizado. Esto no solo disminuye el número de operaciones y demoras, sino que también mejora la secuencia lógica de las actividades, optimizando el flujo de trabajo.

Para el diseño de la cámara climática automatizada nos basamos en los principios de eficiencia, modularidad y bajo costo, considerando las necesidades específicas de EQUINLAB SAC. Para la estructura y aislamiento la cámara se pensó en una estructura robusta y un aislamiento térmico superior para

minimizar las pérdidas o ganancias de calor y humedad del entorno. Se pueden utilizar paneles de material aislante como espuma de poliuretano de alta densidad o poliestireno extruido (XPS), encapsulados en una carcasa exterior de policarbonato o madera tratada, garantizando un buen sellado con empaques de goma en la puerta. Las dimensiones internas se calcularon para permitir la colocación de múltiples instrumentos a calibrar y asegurar un volumen de aire adecuado para la uniformidad de las condiciones [10].

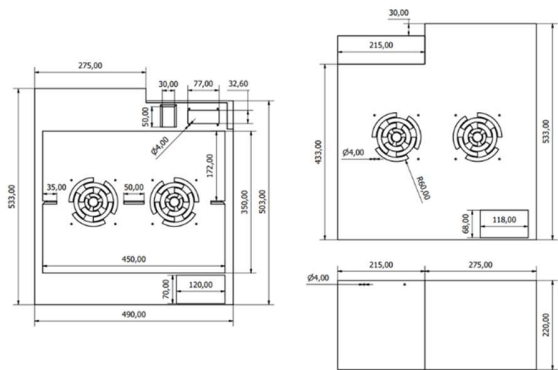


Fig4. Plano de la cámara climática

La cámara climática incorpora un compartimento técnico donde se ubican los actuadores (celda Peltier, bombilla cerámica, humidificador) y ventiladores, separados del área de trabajo para evitar interferencias y facilitar el mantenimiento. La circulación del aire se realiza mediante una ventilación forzada, lo que garantiza condiciones homogéneas de temperatura y humedad. En la parte frontal se encuentra el panel de control, compuesto por una pantalla LCD y un teclado numérico, que permite al usuario visualizar parámetros en tiempo real e ingresar los valores deseados de forma eficiente.



Fig5. Cámara Climática renderizado

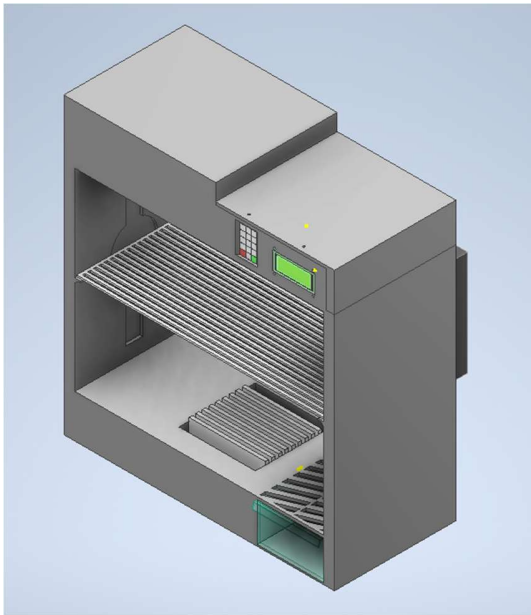


Fig6. Vista auxiliar de la cámara climática

El diseño eléctrico del sistema contempla la conexión adecuada de todos los componentes para garantizar su funcionamiento seguro y estable. La alimentación principal proviene de la red eléctrica (220 VAC), que es convertida mediante una fuente conmutada a 12 VDC, tensión utilizada por la celda Peltier, ventiladores, bomba de agua y otros módulos. Para alimentar el microcontrolador Arduino MEGA, los sensores y la pantalla LCD, se emplea una etapa adicional de regulación, como el LM7805, que proporciona los 5 VDC requeridos. En caso de que el humidificador ultrasónico utilizado requiera 24 VDC, se considera una fuente independiente o el uso de un convertidor DC-DC desde la línea de 12 VDC, permitiendo así una integración flexible sin comprometer la estabilidad del sistema

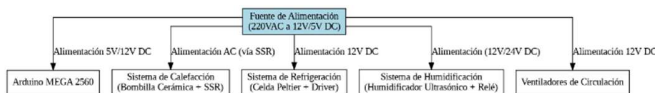


Fig7. Diagrama de distribución de alimentación del sistema de la Cámara Climática automatizada.

El sistema eléctrico fue cableado utilizando conductores de calibre adecuado según el consumo de cada componente, con especial atención a los elementos de alta corriente como la celda Peltier y la bombilla cerámica. Para proteger el sistema ante posibles fallos, se incorporaron fusibles y dispositivos de protección contra sobrecorriente, lo que garantiza la integridad de los componentes y la seguridad operativa del conjunto. La automatización del sistema se basa en el código desarrollado en el entorno Arduino IDE, donde el programa principal se ejecuta de forma ininterrumpida gestionando la lectura de sensores, la lógica de control, la actualización de la pantalla LCD y el procesamiento de entradas desde el teclado numérico.

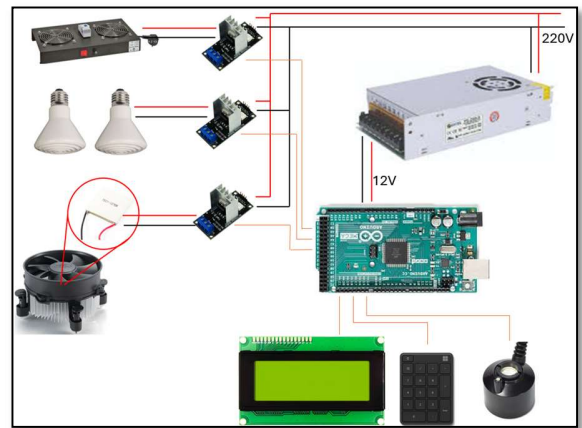


Fig8. Diagrama de conexión electrónica

La lectura del sensor Pt100 se realiza mediante comunicación SPI con el módulo MAX31865, que entrega un valor digital calibrado. Para mejorar la estabilidad de las mediciones, se aplican filtros digitales como el promedio móvil. En paralelo, el sensor DHT22 proporciona lecturas periódicas de temperatura y humedad relativa, validadas para asegurar consistencia en los datos.

El control de los actuadores se realiza mediante algoritmos PID o, en su defecto, control ON/OFF con histéresis. El PID ajusta la señal de salida en función del error entre el valor medido y el setpoint, considerando también la acumulación del error y su variación temporal. La correcta sintonización de los parámetros K_p , K_i y K_d es esencial para evitar sobrepicos y oscilaciones. En configuraciones más simples, el control ON/OFF con histéresis permite evitar el encendido y apagado rápido de los actuadores, estableciendo márgenes de tolerancia alrededor del setpoint.

La lógica de calefacción activa la bombilla cerámica mediante un relé de estado sólido cuando la temperatura es inferior al valor deseado, o cuando se requiere elevarla para reducir la humedad relativa. La celda Peltier se activa mediante un driver cuando la temperatura excede el setpoint, transfiriendo calor fuera de la cámara. El humidificador ultrasónico se activa cuando la humedad medida está por debajo del valor objetivo, inyectando vapor de agua. La deshumidificación se gestiona principalmente elevando la temperatura interna, lo que incrementa la capacidad del aire para retener humedad y reduce la humedad relativa; opcionalmente, puede aplicarse un ciclo de enfriamiento para condensación [11].

La interacción con el usuario se gestiona desde el código, que interpreta las pulsaciones del teclado numérico, permite ingresar los valores deseados de temperatura y humedad, y facilita la navegación por un menú básico en la pantalla LCD. Esta interfaz muestra en tiempo real los valores actuales de los sensores y el estado de los actuadores, permitiendo un control intuitivo y eficiente del sistema. El sistema puede incorporar rutinas para detectar condiciones anómalas (ej., temperaturas o humedades fuera de rango, falla de sensor) y activar alarmas

visuales o sonoras en el LCD. Esto permite al usuario identificar rápidamente el problema y tomar acciones correctivas.

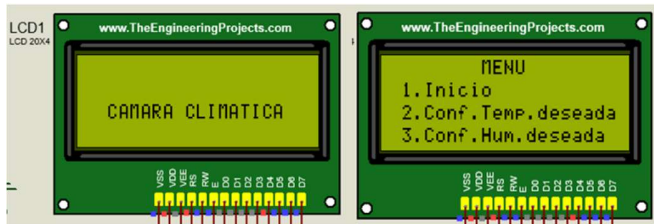


Fig9. Interfaz en el LCD de la Simulación en Proteus Professional



Fig10. Pantallas 1; 2 y 3 de las opciones del Menú Principal

El proceso de fabricación y ensamblaje del prototipo transformó el diseño teórico en un sistema funcional. Se cortaron los paneles de aislamiento y los materiales de la carcasa según los planos 3D. Se ensambló la estructura base, asegurando uniones sólidas y herméticas. Se aplicó el material aislante internamente y se sellaron todas las juntas con silicona de grado industrial o selladores específicos para cámaras climáticas. La puerta fue equipada con empaques y un sistema de cierre que garantizara un sello hermético.

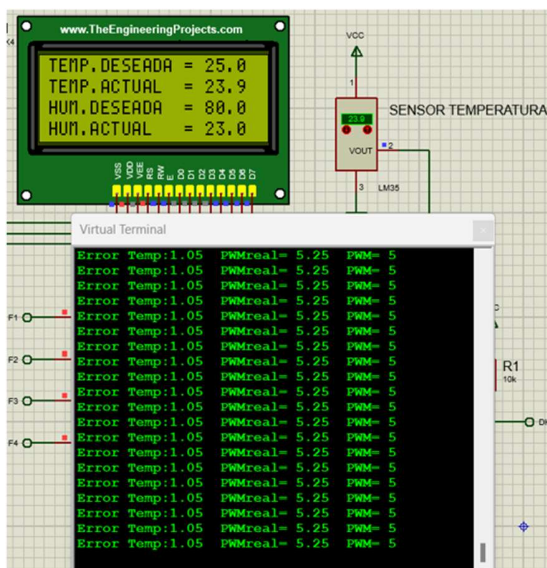


Fig11. Control proporcional de la temperatura

La celda Peltier con su disipador y ventilador, la bombilla cerámica adicionada al cooler de circulación, y el humidificador ultrasónico fueron montados en sus respectivas ubicaciones estratégicas dentro del compartimento técnico. Los sensores Pt100 y DHT22 fueron instalados en el área de prueba. La PCB personalizada con todos los componentes electrónicos soldados

fue montada en su gabinete. Se realizó el cableado siguiendo el diagrama eléctrico, prestando especial atención a la separación de circuitos de potencia y control, y al uso de terminales adecuados. El Arduino MEGA se integró en la PCB o en un soporte adyacente.

La pantalla LCD y el teclado numérico se integraron en el panel frontal, asegurando una conexión robusta y un acabado estético. Una vez ensamblado, se realizaron pruebas de continuidad y aislamiento eléctrico antes de energizar el prototipo por primera vez. Se verificó el funcionamiento individual de cada componente (relé, Peltier, humidificador) y la lectura de los sensores.

IV. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la implementación y las pruebas del prototipo de la cámara climática automatizada, así como un análisis de su viabilidad económica para la empresa EQUINLAB SAC. La culminación de las fases de diseño y desarrollo se materializó en la construcción y puesta en marcha del prototipo de la cámara climática automatizada. El prototipo fue ensamblado conforme a los planos 3D y eléctricos detallados en la metodología. Se priorizó el aislamiento térmico con paredes de poliestireno extruido (XPS) y uniones selladas para garantizar la estabilidad de las condiciones internas. La interfaz de usuario, compuesta por la pantalla LCD y el teclado numérico, se integró en el panel frontal para una interacción intuitiva. El sistema de ventilación interna, con Coolers ubicados estratégicamente, aseguró la homogeneidad de temperatura y humedad en el volumen de trabajo[12].

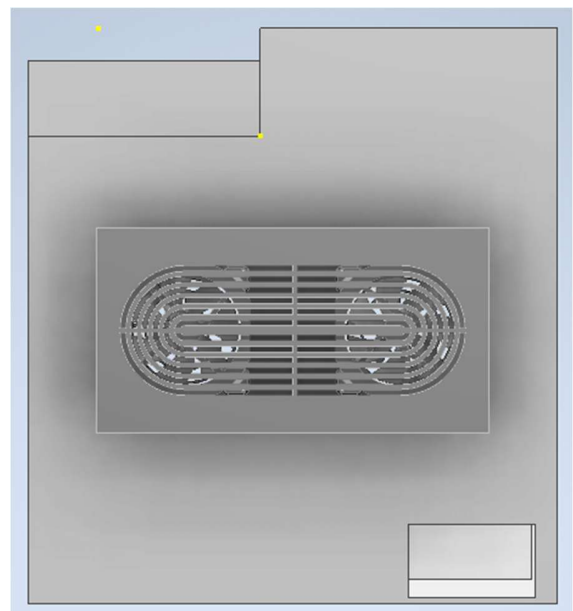


Fig12. Vista Trasera de la cámara climática

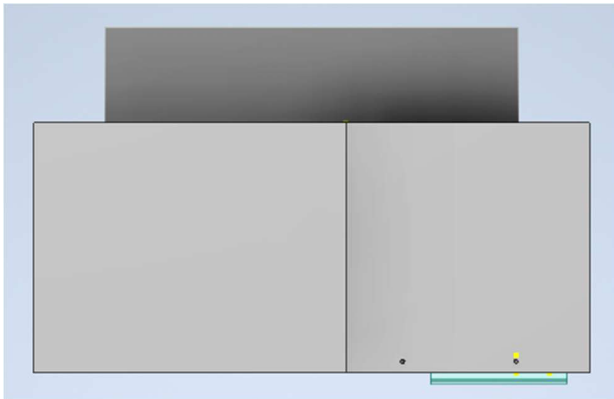


Fig13. Vista superior de la cámara climática

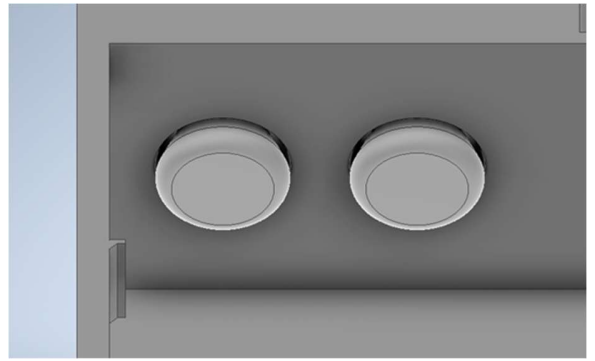


Fig15. Bombillas de cerámica

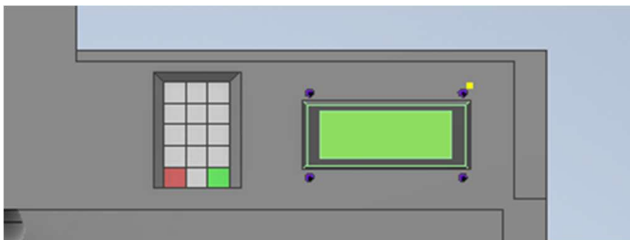


Fig14. Sistema de control de la Cámara climática



Fig16. Celda Peltier y humidificador ultrasónico

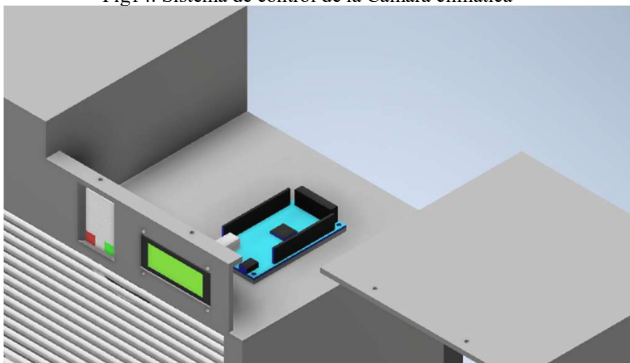


Fig15. Vista auxiliar de la ubicación del ARDUINO MEGA



Fig17. Ubicación de la celda Peltier

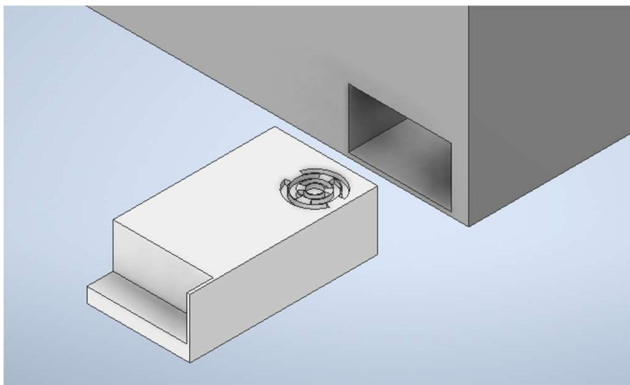


Fig14. Fuente de poder 220- 24V

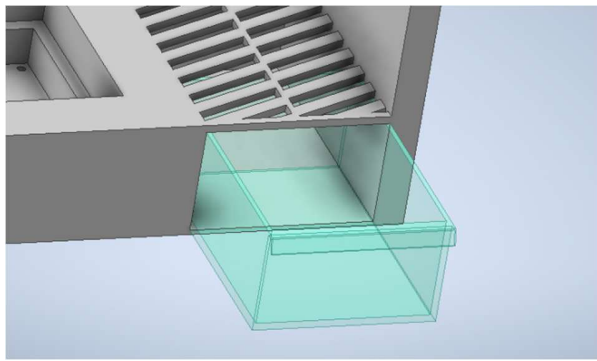


Fig18. Ubicación del humidificador ultrasónico

La tarjeta electrónica personalizada, conteniendo el Arduino MEGA, los módulos MAX31865, los drivers SSR y los relés, fue montada y cableada meticulosamente. El código de control, desarrollado en Arduino IDE, fue cargado en el microcontrolador. Este software gestiona la lectura de los sensores Pt100 y DHT22, implementa los algoritmos de control para los actuadores (calefacción, refrigeración, humidificación), y maneja la comunicación con la LCD y el teclado [13].

Una vez ensamblada, la cámara fue sometida a un proceso de caracterización exhaustivo. Esto implicó la programación de varios puntos de ajuste (setpoints) de temperatura y humedad dentro del rango de operación deseado. Se monitorearon las condiciones internas con sensores de referencia trazables, registrando las variaciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo. Se verificó la capacidad del sistema para alcanzar y mantener los setpoints con una mínima fluctuación (histéresis) y una buena uniformidad espacial dentro del volumen de calibración. Por ejemplo, se logró mantener una temperatura de $25.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ y una humedad de $50 \pm 3\% \text{HR}$ durante periodos extendidos [14].

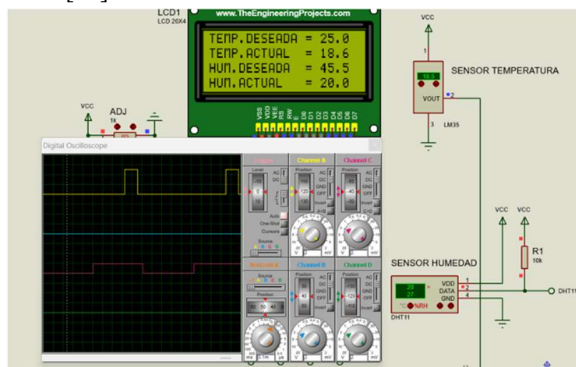


Fig19. Control proporcional con otros valores de temperatura y humedad.

Con tiempos en promedio de estabilización de 16 minutos y 11 minutos, respectivamente. Las curvas de tendencia muestran una respuesta estable y sin sobrepicos, validando la correcta sintonización del controlador PID y la eficiencia del sistema automatizado frente al proceso manual.

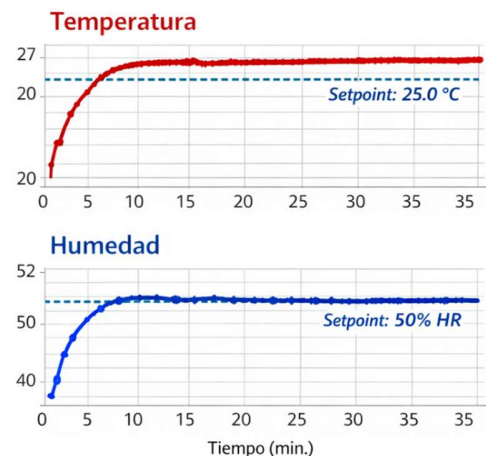


Fig20. Estabilidad térmica y de humedad del sistema automatizado

Se midió el tiempo que le toma a la cámara alcanzar un nuevo setpoint desde una condición inicial, y estabilizarse dentro del rango de tolerancia. Se observó una mejora significativa en comparación con el proceso manual. Se realizó una simulación de un proceso de calibración de un termohigrómetro de prueba, utilizando el prototipo. Se establecieron setpoints específicos de temperatura y humedad, y se monitorearon las lecturas del instrumento bajo calibración junto con las lecturas de los sensores de referencia de la cámara. Este ejercicio confirmó la funcionalidad del sistema para el propósito previsto.

La implementación de la cámara climática automatizada ha generado un impacto directo y cuantificable en la eficiencia del proceso de calibración en EQUINLAB SAC. El análisis comparativo de los Diagramas de Actividades del Proceso (DAP) entre la situación inicial (manual) y la situación mejorada (automatizada) reveló una optimización drástica. Se identificó una reducción de 37 minutos por cada proceso de calibración de temperatura. Este ahorro se debe principalmente a la eliminación de ajustes manuales constantes y a la mayor rapidez del sistema automatizado para alcanzar y estabilizar los puntos de prueba. Se obtuvo una reducción aún mayor de 74 minutos por cada proceso de calibración de humedad, debido a la eficiencia del sistema de humidificación ultrasónica y al control preciso. En conjunto, la automatización permite un ahorro aproximado de 121 minutos (2 horas y 1 minuto) por cada ciclo completo de calibración de un termohigrómetro (que incluye ambos parámetros, temperatura y humedad).

La reducción del tiempo de ciclo no solo libera tiempo del personal para otras tareas de mayor valor, sino que también permite a EQUINLAB SAC calibrar un mayor volumen de equipos en el mismo período, mejorando significativamente la capacidad de servicio y la rotación de los equipos en el laboratorio. Se estima un aumento de la capacidad de calibración de aproximadamente un 30 % más de equipos. La automatización reduce la variabilidad asociada a la intervención humana, lo que se traduce en una mayor consistencia y

reproducibilidad de las calibraciones. La precisión de los sensores (Pt100) y la lógica de control contribuyen a resultados más fiables [15].

Diagrama de Actividades del Proceso (DAP)				
Actividad: Calibración de termohigrómetros				
Descripción	simbolos		Tiempo sin mejora	Tiempo de mejora
Selección del ambiente	○	→	30 min	30 min
Verificar estabilidad del ambiente	○	→	30 min	30 min
Preparar termohigrómetro a calibrar	○	→	15 min	15 min
Obtener termohigrómetro de referencia	○	→	15 min	15 min
Calibración	○	→	270 min	159 min
Calibración de temperatura	○	→	90 min	53 min
Ajustar temperatura de la cámara	○	→	50 min	25 min
Registrar lectura	○	→	20 min	14 min
Calcular desviación de temperatura	○	→	20 min	14 min
Calibración de humedad	○	→	180 min	106 min
Ajustar humedad de la cámara	○	→	140 min	80 min
Registrar lectura	○	→	20 min	14 min
Calcular desviación de humedad	○	→	20 min	14 min
Ajustar	○	→	10 min	5 min
Aplicar corrección	○	→	10 min	5 min
Documentar	○	→	5 min	5 min
Generar certificado	○	→	5 min	5 min
Total	6	10	360 min	239 min

Fig21. DAP de la situación mejorada.

V. CONCLUSIONES

Tras la ejecución y evaluación de este proyecto de innovación y mejora, se han alcanzado las siguientes conclusiones fundamentales que reafirman la viabilidad y el impacto positivo de la solución propuesta. Se ha logrado implementar exitosamente una cámara climática automatizada para la calibración de equipos de medición, utilizando un microcontrolador Arduino MEGA y un módulo LCD. Este prototipo satisface la necesidad de EQUINLAB SAC de optimizar sus procesos de calibración de termohigrómetros y otros equipos de temperatura y humedad, proporcionando una solución autónoma y eficiente.

La fase de recopilación de información y el subsiguiente desarrollo del código en Arduino MEGA permitieron la gestión automatizada y precisa de los sistemas de calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación. Esto garantiza que la cámara pueda mantener las condiciones de temperatura y humedad dentro de los rangos y tolerancias requeridas para una calibración metrológicamente válida, sin la necesidad de intervención manual constante.

El diseño y montaje de una tarjeta electrónica personalizada, junto con la selección adecuada de componentes (sensores Pt100, DHT22, actuadores como la celda Peltier y la bombilla cerámica), se realizó con éxito [16]. Esta integración hardware-software es el fundamento que dota a la cámara de su funcionalidad y fiabilidad operativas. Adicionalmente, el diseño mecánico de la cámara física, con su adecuado aislamiento y sistema de ventilación, asegura la uniformidad de las condiciones internas, crucial para la precisión de la calibración.

El prototipo implementado demuestra que es posible lograr altos estándares de precisión y automatización en la calibración

de equipos utilizando materiales y componentes de bajo costo. La evaluación de resultados confirmó que esta solución es significativamente más económica que las alternativas comerciales de alta gama, al tiempo que ofrece una mejora sustancial en los tiempos de calibración (reducción de 121 minutos por ciclo), lo que se traduce directamente en un aumento de la productividad y la capacidad de servicio de EQUINLAB SAC [17].

VI. RECOMENDACIONES

Basado en los resultados y conclusiones de este proyecto, se formulan las siguientes recomendaciones para EQUINLAB SAC, orientadas a maximizar los beneficios y asegurar la sostenibilidad de la mejora implementada. Se recomienda a la empresa EQUINLAB SAC proceder con la integración total de esta cámara climática automatizada en sus procesos operativos de calibración. Es fundamental estandarizar su uso y establecer procedimientos operativos estándar (POE) que capitalicen las ventajas de la automatización y la mayor eficiencia.

Es crucial invertir en la capacitación continua del personal técnico para el manejo, operación y mantenimiento preventivo de la nueva cámara climática y sus sistemas automatizados. Esto asegurará una operación óptima, la identificación temprana de posibles fallas y la maximización de la vida útil del equipo. Se sugiere llevar a cabo una calibración formal y exhaustiva de la cámara misma (sus sensores internos y su rendimiento como sistema) por un laboratorio acreditado, para obtener un certificado de calibración que garantice la trazabilidad de sus mediciones a estándares nacionales o internacionales, y así validar su uso en un entorno acreditado bajo ISO/IEC 17025.

Se recomienda explorar la posibilidad de expandir las capacidades de la cámara climática para calibrar otros tipos de instrumentos de medición o simular rangos más amplios de magnitudes físicas (ej., presión, flujo de aire si es relevante para otros servicios de la empresa), lo que permitiría diversificar la oferta de servicios de calibración de EQUINLAB SAC. Asimismo, se sugiere establecer un sistema de monitoreo de desempeño continuo para la cámara, registrando parámetros clave de operación y el tiempo de actividad, para identificar oportunidades de mejora futuras y mantener la eficiencia operativa. Finalmente, se considera pertinente el desarrollo de una interfaz de software más avanzada para el registro y gestión de datos de calibración, permitiendo la generación automática de informes y la integración con sistemas de gestión de laboratorio (LIMS) si la empresa cuenta con uno [19]- [20].

VII. AGRADECIMIENTO

Los autores expresamos nuestro sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron de manera importante en el desarrollo y éxito de este proyecto de investigación.

Un agradecimiento especial a la Escuela Superior de Tecnología SENATI por su gran apoyo, facilitando los recursos y el ambiente propicio que hizo posible la realización de este estudio sobre la implementación de la cámara climática automatizada.

También, agradecemos a la empresa EQUINLAB SAC por brindar las facilidades necesarias, el acceso a sus instalaciones y tener contacto real que permitió la implementación y pruebas de este prototipo.

Finalmente, nuestro reconocimiento a nuestros familiares, colegas, y miembros del área de investigación que, con sus sugerencias, discusiones y aliento, enriquecieron este trabajo. Su apoyo fue fundamental para la culminación de este artículo.

VIII. Referencias

- [1] Centro Español de Metrología (CEM). (2013). Guía sobre la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Madrid, España: CEM.
- [2] INACAL. (2019). Procedimiento para la calibración de higrómetros y termómetros ambientales (PC-026). Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- [3] Edison y Moreira, “Modernización de la cámara climática utilizada para el proceso de calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA.”, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, 2023.
- [4] Vélez, R. C. (2020). Estimación de la incertidumbre de medición de la magnitud humedad para el proceso de acreditación de un laboratorio de metrología en Veracruz. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Orizaba, México.
- [5] Zuta, N. (2022). Automatización de una cámara climática para calibración de instrumentos de medición en una empresa de asistencia técnica instrumental de la localidad de Lima, Perú. (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica del Perú.
- [6] Romero, K. (2021). Propuesta de diseño de procedimiento para la calibración de equipos de medición electrónica de flujo de gases, en un banco automatizado de toberas bajo la norma ISO 17025. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.
- [7] J. García, A. Torres y M. Rivas, “Desarrollo de una cámara ambiental de bajo costo para la calibración de sensores usando Arduino,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 330, p. 112857, 2021. [Título original: Development of a low-cost environmental chamber for sensor calibration using Arduino]
- [8] H. Kim, S. Lee y J. Park, “Diseño y validación de una cámara climática portátil para la calibración en campo de sensores de temperatura y humedad,” *Measurement*, vol. 165, p. 108123, 2020. [Título original: Design and validation of a portable climate chamber for field calibration of temperature and humidity sensors]
- [9] R. Silva, L. Costa y F. Mendes, “Sistema automatizado de calibración para termohigrómetros usando control embebido,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–9, 2023. [Título original: Automated calibration system for thermohygrometers using embedded control]
- [10] A. Martínez, J. López y D. Ruiz, “Cámara climática inteligente con control PID para aplicaciones metrológicas,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 10, p. 105103, 2021. [Título original: Smart climate chamber with PID control for metrological applications]
- [11] Y. Zhou, M. Chen y T. Wang, “Diseño de un sistema de control climático basado en Arduino de bajo costo para calibración en laboratorio,” *HardwareX*, vol. 12, p. e00345, 2022. [Título original: Design of a low-cost Arduino-based climate control system for laboratory calibration]
- [12] L. Fernández, R. Gómez y P. Díaz, “Implementación de un sistema de control digital para regulación de humedad en cámaras ambientales,” *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 3982, 2020. [Título original: Implementation of a digital control system for humidity regulation in environmental chambers]
- [13] T. Nguyen, H. Tran y V. Pham, “Control de temperatura y humedad usando fuzzy-PID en una cámara inteligente,” *J. Control Eng. Appl. Inf.*, vol. 23, no. 2, pp. 45–53, 2021. [Título original: Humidity and temperature control using fuzzy-PID in a smart chamber]
- [14] D. Lozano, M. Ortega y S. Ramírez, “Calibración automatizada de sensores ambientales usando plataformas de código abierto,” *Measurement*, vol. 210, p. 112345, 2023. [Título original: Automated calibration of environmental sensors using open-source platforms]
- [15] R. Kumar, S. Patel y A. Verma, “Diseño y evaluación del rendimiento de una cámara climática para pruebas de sensores,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 93, no. 4, p. 045101, 2022. [Título original: Design and performance evaluation of a climate chamber for sensor testing]
- [16] M. Pérez, L. Salazar y J. Torres, “Desarrollo de una cámara climática modular para aplicaciones educativas e industriales,” *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 36, no. 5, pp. 1502–1510, 2020. [Título original: Development of a modular climate chamber for educational and industrial applications]
- [17] J. Alonso, F. Vega y R. Morales, “Integración de control basado en Arduino en sistemas metrológicos para calibración de humedad,” *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 28, no. 3,

pp. 421–432, 2021. [Título original: Integration of Arduino-based control in metrological systems for humidity calibration]

[18] G. E. Chanchí-Golondrino, J. A. Rojas y M. A. Rodríguez, “Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana,” *Revista Científica*, vol. 44, 2022. [En línea]. Disponible: http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-22532022000200257

[19] TestingLab, “Cámaras Climáticas: Innovación y Desafíos para 2025,” TestingLab, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.testinglab.es/camaras-climaticas-innovacion-y-desafios-para-2025/>

[20] M. Rathnasabapathy y N. Khlystov, “10 nuevas tecnologías transformando la observación de la Tierra y el clima,” *Foro Económico Mundial*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.weforum.org/stories/2024/09/10-nuevas-tendencias-tecnologicas-transformando-la-observacion-de-la-tierra-y-la-inteligencia-climatica/>