

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Diseño e Implementación de un Prototipo de Cámara de Ambiente Controlado para la Caracterización de Sensores

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Presenta:

Marco Antonio Contreras Moraga

Cartago, Costa Rica

2 de diciembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa del Trabajo Final de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del Trabajo Final de Graduación denominado Diseño e Implementación de un Prototipo de Cámara de Ambiente Controlado para la Caracterización de Sensores, realizado por el señor Marco Antonio Contreras Moraga, y hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

**SERGIO ALBERTO
ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)** Firmado digitalmente por
SERGIO ALBERTO ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)
Fecha: 2025.12.02 12:42:40
-06'00'

Ing. Sergio Arriola Valverde

Profesor lector

JAVIER MAURICIO PEREZ RODRIGUEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1110-0856.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:44:00 a. m.

M.Sc.Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector

PAOLA VEGA CASTILLO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0937-0493.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:18:26 AM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Profesor asesor

Cartago, 28 de noviembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR
ACTA DE EVALUACIÓN

Defensa del Trabajo Final de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Estudiante: Marco Antonio Contreras Moraga Carné: 2020045066

Nombre del Trabajo Final de Graduación: Diseño e Implementación de un Prototipo
de Cámara de Ambiente Controlado para la Caracterización de Sensore

Los miembros de este Tribunal hacen constar que este Trabajo Final de Graduación ha
sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería
Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Nota de Trabajo Final de Graduación: 85

Miembros del Tribunal

SERGIO ALBERTO
ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)
Firmado digitalmente por
SERGIO ALBERTO ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)
Fecha: 2025.12.02 12:42:06
-06'00'

JAVIER MAURICIO PEREZ RODRIGUEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1110-0856.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:45:39 a. m.

Ing. Sergio Arriola Valverde

M.Sc.Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector

Profesor lector

PAOLA VEGA CASTILLO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0937-0493.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:19:16 AM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Profesor asesor

Cartago, 21 de noviembre de 2025

Yo, Marco Antonio Contreras Moraga, declaro que el presente proyecto de graduación ha sido realizado en su totalidad por mi persona, aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Marco Antonio Contreras Moraga
Cédula 5-0439-0014
Cartago, 2 de diciembre de 2025

Resumen

El presente informe de trabajo final de graduación describe el diseño e implementación de un sistema para la caracterización de sensores mediante una cámara de ambiente controlado, utilizando un microcontrolador *Arduino UNO R3*. El sistema permite regular temperatura, humedad, iluminación y campo magnético para evaluar el desempeño de sensores bajo condiciones reproducibles.

Como sensores de referencia se emplearon los módulos KY-001, KY-015, KY-018 y KY-024, encargados de monitorear las variables ambientales y retroalimentar el control en lazo cerrado. Los actuadores, resistencia; humidificador ultrasónico, matriz de LED y bobina de inducción son gestionados por el microcontrolador, garantizando la estabilidad del entorno de prueba.

El software desarrollado en Arduino IDE permite la adquisición, comparación y visualización de datos en tiempo real mediante una pantalla LCD. Las pruebas demostraron un control estable con márgenes de ± 1.5 °C en temperatura, ± 1 %HR en humedad y la intensidad luminica con estabilidad de ± 2 , validando la utilidad del sistema como herramienta de apoyo para laboratorios académicos.

Palabras clave: Arduino UNO R3, Cámara de ambiente controlado, Sensores, Adquisición de datos, Control en lazo cerrado.

Abstract

This report describes the design and implementation of a system for sensor characterization using a controlled-environment chamber, operated by an *Arduino UNO R3* microcontroller. The system allows regulation of temperature, humidity, illumination, and magnetic field in order to evaluate sensor performance under reproducible conditions.

The reference sensors used were the KY-001, KY-015, KY-018, and KY-024 modules, responsible for monitoring environmental variables and providing feedback for the closed-loop control. The actuators; quartz heater, ultrasonic humidifier, LED matrix, and induction coil are managed by the microcontroller, ensuring stability within the testing environment.

The software developed in Arduino IDE enables real-time data acquisition, comparison, and visualization through an LCD display. Experimental results demonstrated stable control with margins of ± 1.5 °C for temperature, ± 1 %RH for humidity, and a lighting stability of ± 2 , validating the system's usefulness as a support tool for academic laboratories.

Keywords: Arduino UNO R3, Controlled-environment chamber, Sensors, Data acquisition, Closed-loop control.

A Dios, Padre dador de vida . . .

Agradecimientos

A mi padre, Carlos, cuya sabiduría, ejemplo y apoyo incondicional han sido mi guía en este camino; a mi madre, Xinia, cuyo amor constante me ha dado fuerza y esperanza en cada paso; y a mis padrinos, José y Xiomara, quienes han sido como segundos padres, siempre presentes y brindándome su cariño y confianza.

A mis hermanas, Daniza y Esther, por su amor fraternal, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por recordarme siempre el valor de la familia.

A mis amigos:

Diego Ramírez, por su apoyo leal y su amistad sincera.

Jesús Alfaro, por su entusiasmo y optimismo, que siempre logran motivar, por tanto cariño.

Paula Vargas, por su comprensión, inspiración y apoyo en los días más exigentes.

Krisdel Guido, por su amistad sincera y su confianza constante, por estar presente en los momentos más importantes y ofrecer siempre una palabra de apoyo que me impulsó a seguir adelante.

A mis hermanos:

Johnny, Felipe y Bryan, por su cercanía, por todas las risas y el compañerismo incondicional que hicieron este camino más ligero.

A mi novia, Génesis, por su amor, paciencia y fe en mí; por acompañarme con ternura y fortaleza en cada etapa de este proceso, y por ser una fuente constante de motivación, alegría y equilibrio en mi vida.

A mi asesora, Paola Vega Castillo, por creer en mí en el momento más complicado de mi carrera, por su guía, paciencia y por recordarme que la perseverancia siempre encuentra su recompensa.

Finalmente, a Dios, fuente de toda bendición, por concederme la fortaleza, la sabiduría y las personas maravillosas que hicieron posible este logro.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIV
1. Introducción	1
1.1. Entorno del Proyecto	1
1.1.1. Ubicación Académica del Proyecto	3
1.1.2. Antecedentes	3
1.2. Síntesis del problema	4
1.3. Enfoque de la solución	4
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Meta	6
1.4.2. Objetivo General	6
1.4.3. Objetivos específicos	6
1.5. Estructura del documento	6
2. Marco teórico	7
2.1. Variables físicas de control	7
2.1.1. Temperatura	7
2.1.2. Humedad	8
2.1.3. Iluminación	9
2.1.4. Campo magnético	10
2.2. Fundamentos sobre sensores	11
2.2.1. Calibración, caracterización y precisión	12
2.2.2. Parámetros importantes de los sensores	12
2.2.3. Tabla de sensores utilizados en la cámara	12
2.3. Actuadores del sistema	12
2.3.1. Resistencia de cuarzo	13
2.3.2. Ventilador de 12 V DC	14
2.3.3. Matriz LED 16×16	17
2.3.4. Humidificador ultrasónico de 5 V	18
2.3.5. Bobinas de Helmholtz	19

2.4. Microcontroladores	20
2.4.1. Componentes principales de un microcontrolador	21
2.4.2. Microcontrolador Arduino UNO R3 en el proyecto	21
2.4.3. Módulo de relé	22
2.4.4. Pantalla LCD 16×2	23
3. Propuesta de Diseño	25
3.1. Especificaciones Técnicas y Montaje del sistema de ambiente controlado	25
3.1.1. Sensor de temperatura KY-001	25
3.1.2. Sensor de temperatura y humedad KY-015	26
3.1.3. Sensor de intensidad lumínica KY-018	27
3.1.4. Sensor magnético digital KY-003	29
3.1.5. Montaje del sistema	30
3.2. Diseño del Circuito	31
3.2.1. Descripción General del Esquemático	32
3.2.2. Distribución de Señales	33
3.2.3. Diseño Físico Principal	34
3.2.4. Montaje Final	35
3.3. Programación y Software Implementado	38
3.3.1. Diagramas de bloques de la solución	38
3.4. Lógica para Control de Temperatura	40
3.4.1. Bibliotecas Utilizadas en el Control de Temperatura	40
3.4.2. Control de Temperatura mediante el Sensor KY-001	41
3.5. Lógica para el Control de Humedad	43
3.5.1. Bibliotecas Utilizadas	43
3.5.2. Adquisición de Datos del Sensor KY-015	44
3.5.3. Arquitectura de Control Basada en Máquina de Estados	44
3.5.4. Control de Actuadores	45
3.5.5. Lógica de Control de Humedad y Estabilidad	46
3.5.6. Descripción Completa del Ciclo Operativo	46
3.5.7. Registro y Procesamiento de Datos en Excel	47
3.5.8. Visualización en Pantalla LCD	47
3.6. Lógica para Control de intensidad lumínica	47
3.6.1. Configuración de la Matriz LED y del Sensor KY-018	48
3.6.2. Definición de Escalones de Iluminación	48
3.6.3. Procedimiento de Medición y Registro de Datos	49
3.6.4. Registro CSV trazable para análisis de datos	49
3.7. Limitaciones encontradas	50
3.7.1. No implementación del control de corriente constante en las bobinas de Helmholtz	50
3.7.2. Ubicación externa de las bobinas de Helmholtz	53

4. Resultados y Análisis	54
4.1. Resultados del Control de Intensidad Lumínica	54
4.1.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-018	54
4.1.2. Datos experimentales	55
4.2. Resultados del Módulo de Control de Temperatura	57
4.2.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-001	57
4.2.2. Datos experimentales	59
4.2.3. Análisis y caracterización del sensor KY-001	60
4.2.4. Análisis de resultados del lazo térmico por setpoints	61
4.3. Resultados del Módulo de Control de Humedad	64
4.3.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-015	64
4.3.2. Datos experimentales	66
4.3.3. Análisis y caracterización del sensor KY-015	67
4.3.4. Tercera prueba con humedades de setpoint de 40 %, 67 % y 100 %	68
5. Conclusiones y Recomendaciones	71
5.1. Conclusiones	71
5.2. Recomendaciones	72
Bibliografía	73

Índice de figuras

1.1. Cámara de calibración de temperatura y humedad. Tomado de [3]	2
2.1. Ejemplo de curva característica de un termistor NTC. Tomado de [10]	8
2.2. Distribución del campo magnético en un par de bobinas de Helmholtz. Tomado de [12].	11
2.3. Resistencia de cuarzo de 230 V. Tomado de [20]	14
2.4. Ventilador 12V. Tomado de [26]	16
2.5. Matriz led 16x16 . Tomado de [27]	17
2.6. Funcionamiento básico del humidificador ultrasónico. Tomado de [28].	19
2.7. Bobinas de Helmholtz. Tomado de [41]	20
2.8. Estructura Arduino UNO. Tomado de [33].	21
2.9. Módulo de relé de 1 canal de 5 V empleado para el control de actuadores. Tomado de [37].	23
2.10. Pantalla LCD 16x2 empleada en el sistema. Tomado de [38].	24
3.1. Sensor de temperatura KY-001. Tomado de [42]	26
3.2. Sensor de Temperatura KY-015. Tomado de [43]	27
3.3. Sensor de Temperatura KY-015. Tomado de [44]	28
3.4. Sensor KY-003. Tomado de [45].	29
3.5. Esquemático del sistema.	31
3.6. Inicio del montaje de los actuadores principales dentro del sistema: resistencia de cuarzo, ventilador extractor y matriz LED.	35
3.7. Pruebas de activación de los actuadores controlados por el microcontrolador Arduino durante la etapa de validación funcional.	36
3.8. Colocación y sellado del vidrio frontal, garantizando la hermeticidad y permitiendo la visualización interna durante las pruebas.	37
3.9. Vista general del sistema ensamblado.	38
3.10. Detalle del cableado y disposición final de los módulos electrónicos.	38
3.11. Diagrama de bloques de primer nivel.	39
3.12. Diagrama de bloques de segundo nivel.	40
3.13. Setpoints y parámetros coherentes con relés activos en LOW.	41
3.14. Lectura filtrada y seguridad ante desconexión.	42

3.15. Control con exclusión, histéresis y avance temporal.	43
3.16. Cierre seguro: enfriamiento y parada.	44
3.17. Encabezado y línea de registro CSV.	44
3.18. Lectura del sensor KY-015.	44
3.19. Control básico de actuadores.	45
3.20. Verificación de estabilidad por 60 s.	46
3.21. Generación del archivo CSV para análisis.	47
3.22. Actualización de la pantalla LCD.	47
3.23. Inclusión de Bibliotecas para el módulo de iluminación.	48
3.24. Definición de la matriz LED y el sensor KY-018.	48
3.25. Mapeo de coordenadas y orden de encendido de los píxeles.	49
3.26. Escalones de cantidad de LEDs encendidos.	49
3.27. Encendido de un número específico de LEDs.	50
3.28. Ciclo de medición por escalones de LEDs.	51
3.29. Encabezado CSV para registro de datos.	51
4.1. Configuración final de la prueba de iluminación con el sensor KY-018.	55
4.2. Caracterización del sensor KY-018 bajo incremento de luminosidad.	55
4.3. Respuesta del sensor KY-018 en función del número de LEDs encendidos.	55
4.4. Inicio del proceso de calentamiento; activación de la resistencia de cuarzo.	57
4.5. Evolución de la temperatura durante la prueba.	57
4.6. Fin del proceso.	58
4.7. Aproximación al punto de equilibrio térmico.	58
4.8. Etapa final de estabilización térmica del sistema.	58
4.9. Gráfica en Excel: comportamiento térmico del sensor KY-001 durante el proceso de calentamiento y estabilización.	59
4.10. Ciclo térmico completo: ascensos por etapas.	61
4.11. Detalle del setpoint de 40 C: tramo estable (Heater=0, Fan=0) y posterior entrada de ventilación.	62
4.12. Captura de setpoint estable	62
4.13. Inicio de la prueba: activación de la resistencia y descenso progresivo de la humedad.	64
4.14. Etapa de secado, hasta estabilidad de humedad	64
4.15. Inicio de etapa humificado	65
4.16. Etapa por terminar, humedad relativa al 80 %	65
4.17. Gráfica completa del ciclo de control de humedad relativa dentro de la cámara.	65
4.18. Detalle del incremento de humedad durante la fase de humidificación en segunda prueba.	66
4.19. Respuesta completa de la humedad relativa respecto al tiempo, mostrando los tres setpoints programados.	68
4.20. Detalle del comportamiento de la humedad alrededor del setpoint de 67 %, mostrando un error menor o igual a 1 %.	69

4.21. Fragmento del registro generado por el monitor serial de Arduino durante la prueba.	70
---	----

Índice de tablas

2.1. Resumen de sensores KY utilizados y su principio de operación	12
3.1. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura KY-001 [42]	26
3.2. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad KY-015 [43]	27
3.3. Especificaciones técnicas del sensor de intensidad lumínica KY-018 [44]	28
3.4. Especificaciones técnicas del sensor magnético digital KY-003 [45]	30
3.5. Resumen de pines utilizados en el Arduino UNO R3 para el sistema completo.	33
4.1. Valores experimentales del sensor KY-018 para distintos niveles de iluminación.	56
4.2. Valores experimentales del sensor KY-001 durante la prueba.	60
4.3. Muestras en régimen <i>estable</i> (Heater=0, Fan=0) por setpoint.	63
4.4. Datos experimentales de temperatura y humedad.	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Entorno del Proyecto

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) es una institución nacional autónoma de educación superior universitaria, dedicada a la formación, investigación y extensión en las áreas científicas y tecnológicas que impulsan el desarrollo del país. Fundado el 10 de junio de 1971 [1] en la provincia de Cartago, el TEC se ha consolidado como un referente en innovación y aplicación de la ingeniería a la solución de problemas reales de la sociedad costarricense.

Entre sus programas de estudio se encuentra la Licenciatura en Ingeniería Electrónica, ofrecida por la *Escuela de Ingeniería Electrónica* desde 1976 [2]. Dicha carrera tiene como propósito formar profesionales competentes en el diseño, desarrollo e integración de sistemas electrónicos en diversas áreas, tales como instrumentación, control, telecomunicaciones, electrónica analógica y sistemas embebidos.

En esta Escuela, los laboratorios constituyen un pilar esencial del proceso de enseñanza-aprendizaje, al permitir la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos y fomentar la investigación aplicada. Estos espacios proporcionan a los estudiantes la oportunidad de desarrollar proyectos orientados al diseño, validación y evaluación de sistemas electrónicos reales, integrando componentes analógicos, digitales y de control.

En los laboratorios de ingeniería y tecnología a nivel mundial, es común contar con equipos especializados para la calibración y evaluación de sensores, los cuales resultan fundamentales en aplicaciones industriales, de investigación y desarrollo [3]. Estos dispositivos permiten garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones, aspectos críticos en áreas como automatización, robótica, monitoreo ambiental y control de procesos, un ejemplo de esto se muestra en la figura [3].



Figura 1.1. Cámara de calibración de temperatura y humedad. Tomado de [3]

En el caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica, los laboratorios de las escuelas de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Física, Ingeniería en Mantenimiento Industrial e Ingeniería en Salud Laboral e Higiene Ambiental representan espacios clave para el desarrollo de habilidades prácticas, la validación experimental y la ejecución de proyectos de investigación aplicada. En estos entornos se utilizan sensores como herramientas esenciales para la adquisición de datos, la automatización de procesos y la validación de teorías. Entre los más empleados se encuentran sensores térmicos, ópticos, de movimiento y magnéticos, que permiten abordar una amplia gama de aplicaciones en distintas disciplinas de la ingeniería.

Sin embargo, la falta de un sistema estandarizado para verificar sensores limita la eficiencia de los laboratorios, obligando a docentes y estudiantes a usar métodos empíricos. Esto genera pérdida de tiempo y puede afectar la exactitud de los resultados, pese a la importancia de estos sensores en la formación y en investigaciones que requieren datos confiables [4].

Dentro de esta infraestructura destaca el uso de microcontroladores como el *Arduino UNO R3*, ampliamente empleado en el ámbito académico por su versatilidad, bajo costo y facilidad de programación. Este dispositivo se convierte en una plataforma ideal para el desarrollo de prototipos orientados al control de variables físicas y la adquisición de datos, características que resultan esenciales para proyectos enfocados en la caracterización de sensores.

Ante esta necesidad, surge el proyecto “Diseño e Implementación de un Prototipo de Cámara de Ambiente Controlado para la Caracterización de Sensores”, desarrollado principalmente en la Escuela de Ingeniería Electrónica del TEC, como respuesta a la carencia de un sistema que permita verificar y caracterizar sensores bajo condiciones ambientales controladas. Esta iniciativa busca proveer una herramienta didáctica y funcional que facilite la calibración y el análisis de desempeño de sensores antes de su uso en prácticas o proyectos.

Cabe destacar que, aunque el proyecto se desarrolla inicialmente para la Escuela de Ingeniería Electrónica, se contempla su posible aplicación futura en la Escuela de Física, la Escuela de Ingeniería en Mantenimiento Industrial y la Escuela de Ingeniería en Salud Laboral e Higiene Ambiental, ampliando su alcance y beneficiando a un mayor número de estudiantes, docentes e investigadores.

1.1.1. Ubicación Académica del Proyecto

El desarrollo del prototipo se enmarca dentro de los cursos *Taller de Instrumentación* y *Taller de Sensórica*, el primero pertenece al plan de estudios de la carrera de Ingeniería Electrónica.

En el *Taller de Instrumentación* se abordan los principios de adquisición, procesamiento y visualización de señales físicas mediante sistemas electrónicos, permitiendo implementar estrategias de medición precisas y confiables. Por su parte, el *Taller de Sensórica* profundiza en la selección, caracterización y uso de sensores para la medición de variables ambientales y de proceso, integrando conocimientos de electrónica analógica, digital y control automático.

La combinación de ambos cursos proporciona el entorno ideal para el desarrollo del proyecto, ya que permite aplicar conceptos teóricos en un contexto práctico, fortaleciendo las competencias en diseño de sistemas embebidos, instrumentación electrónica y análisis de datos experimentales.

De esta forma, el entorno institucional, académico y tecnológico del Instituto Tecnológico de Costa Rica ofrece las condiciones propicias para el desarrollo de soluciones innovadoras y replicables que apoyen la formación de futuros ingenieros en electrónica, alineándose con la misión institucional de impulsar el avance científico y tecnológico del país.

1.1.2. Antecedentes

A inicios del año 2025, la Dra. Paola Vega Castillo, profesora de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, realizaba una serie de pruebas experimentales con sensores de humedad con el propósito de evaluar su comportamiento en distintas condiciones ambientales. Durante el desarrollo de dichas pruebas, identificó que en los laboratorios del campus no existía ningún sistema o equipo capaz de recrear condiciones específicas y controladas de humedad, temperatura o iluminación. Esta limitación dificultaba la caracterización adecuada de sensores y la validación de sus respuestas ante variaciones controladas del entorno.

La falta de un espacio o dispositivo de este tipo evidenció una necesidad importante dentro de los cursos de laboratorio, particularmente en *Taller de Instrumentación* y *Taller de Sensórica*, donde los estudiantes emplean una amplia variedad de sensores para prácticas experimentales. La ausencia de un sistema estandarizado para verificar su funcionamiento obligaba al uso de métodos empíricos, afectando la precisión de los resultados y el aprovechamiento del tiempo de laboratorio.

A partir de esta situación, surgió la idea de desarrollar un prototipo de cámara de ambiente controlado que permitiera recrear de forma reproducible condiciones ambientales específicas. Este sistema no solo busca solventar la necesidad detectada por la Dra. Vega, sino también brindar una herramienta útil para la calibración y caracterización de sensores en los diferentes laboratorios de la Escuela de Ingeniería Electrónica, fortaleciendo las capacidades experimentales y de investigación de la institución.

1.2. Síntesis del problema

La ausencia de un sistema estandarizado para la verificación y caracterización de sensores en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica limita la precisión de las mediciones y la eficiencia en las prácticas académicas.

Requerimientos del proyecto

1. Control ambiental

- Regular temperatura en un rango configurable.
- Regular humedad relativa en un rango configurable.
- Mantener estabilidad de las variables con márgenes de tolerancia definidos.

2. Iluminación controlada

- Contar con una fuente de luz ajustable en intensidad.
- Permitir la programación de ciclos de iluminación.

3. Registro y monitoreo de datos

- Medir continuamente las variables ambientales internas.
- Guardar datos históricos para análisis posterior.
- Visualizar en tiempo real las variables controladas.

1.3. Enfoque de la solución

El diseño de un sistema para la caracterización de sensores en un entorno controlado requiere la integración de principios de instrumentación, control y transferencia de energía, con el propósito de garantizar la reproducibilidad de las mediciones y la estabilidad de las condiciones ambientales. En los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica se desarrolló una cámara de ambiente controlado que permite evaluar sensores de temperatura, humedad, iluminación y campo magnético bajo condiciones reproducibles, utilizando un microcontrolador como núcleo del sistema.

El principio operativo de la cámara consiste en mantener las variables ambientales dentro de rangos predefinidos mediante un sistema de control en lazo cerrado. El microcontrolador recibe las lecturas de los sensores de referencia, compara los valores medidos con los valores de consigna y ajusta el estado de los actuadores hasta minimizar el error de control. Este enfoque garantiza que las condiciones de temperatura, humedad, intensidad luminosa y campo magnético permanezcan estables durante la caracterización de los sensores bajo prueba.

Para la regulación térmica se emplea un elemento calefactor alimentado a tensión de red, cuya disipación de calor permite alcanzar un gradiente de temperatura controlable dentro de la cámara. El control de temperatura se realiza modulando la potencia aplicada al calefactor según la demanda térmica. Un ventilador interno distribuye el aire caliente y contribuye a mantener la temperatura uniforme dentro del sistema.

El control de humedad se implementa mediante un módulo de humidificación ultrasónica, que utiliza un transductor piezoeléctrico para generar microgotas de agua mediante vibración de alta frecuencia. Este proceso produce una neblina fina que incrementa la humedad relativa en el interior de la cámara. El microcontrolador monitorea la variable mediante un sensor de referencia y ajusta los tiempos de activación del humidificador para mantener los niveles dentro del rango establecido.

La iluminación interna se regula mediante una matriz de LEDs cuyo brillo se controla mediante modulación de ancho de pulso. Un sensor fotosensible mide la intensidad lumínica incidente y permite ajustar la potencia de los LEDs para alcanzar un nivel de iluminancia estable y homogénea dentro de la cámara.

La generación del campo magnético controlado se obtiene mediante un par de bobinas configuradas para producir un campo aproximadamente uniforme en la región central. Este campo es medido por un sensor de referencia de efecto Hall y controlado a través de un transistor de potencia, que ajusta la corriente de excitación según las señales generadas por el microcontrolador.

El firmware, desarrollado en lenguaje C, implementa módulos de lectura de sensores, control de actuadores, adquisición de datos y visualización en pantalla. Cada variable ambiental se muestrea con una frecuencia adecuada a su dinámica, asegurando que el sistema responda de manera estable ante perturbaciones. El algoritmo de control calcula el error instantáneo entre la consigna y la medición actual y aplica una estrategia proporcional o proporcional–integral para ajustar la acción de control.

Las lecturas de los sensores bajo prueba se registran simultáneamente con las mediciones de los sensores de referencia, lo que permite comparar su comportamiento bajo condiciones controladas y determinar parámetros de desempeño como linealidad, precisión, histéresis y repetibilidad.

El sistema completo se diseña bajo criterios de modularidad, bajo costo y replicabilidad. Cada subsistema puede operar de manera independiente o integrada dentro de la cámara, facilitando expansiones futuras o la sustitución de componentes. En conjunto, la solución desarrollada constituye una herramienta didáctica y experimental que fortalece la enseñanza práctica en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica, permitiendo la estandarización de pruebas y el desarrollo de prácticas de calibración y validación con rigor técnico y reproducibilidad experimental.

1.4. Objetivos

1.4.1. Meta

Mejorar la eficiencia en la caracterización y validación de sensores en los laboratorios de las Escuelas de Ingeniería Electrónica, Física y Mantenimiento Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

1.4.2. Objetivo General

Desarrollar un sistema para caracterizar sensores utilizados en los laboratorios de las Escuelas de Ingeniería Electrónica, Física, Mantenimiento Industrial y Salud laboral e higiene ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica, optimizando el tiempo y la calidad de las prácticas académicas y experimentales.

1.4.3. Objetivos específicos

- Analizar los métodos actuales de verificación y uso de sensores en los cursos de Taller de Instrumentación y Taller de Sensórica, identificando los tipos de sensores empleados, sus características eléctricas y funcionales, así como las limitaciones presentes en su evaluación.
- Diseñar una cámara de ambiente controlado capaz de simular condiciones específicas de temperatura, humedad, iluminación y campo magnético, que permita la caracterización precisa y reproducible de diferentes tipos de sensores.
- Implementar un sistema de adquisición de datos que registre y procese las lecturas de los sensores en tiempo real, comparando su respuesta con sensores de referencia para determinar su desempeño y confiabilidad.
- Validar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas experimentales en laboratorio, evaluando parámetros como repetibilidad, exactitud y estabilidad de las mediciones bajo distintas condiciones ambientales.

1.5. Estructura del documento

Este documento se estructura de la siguiente forma: el capítulo [2](#) presenta el marco teórico que sustenta el proyecto; el capítulo [3](#) describe la propuesta de diseño y el desarrollo de cada fase; el capítulo [4](#) expone los resultados obtenidos y el análisis del funcionamiento del sistema; y finalmente, el capítulo [5](#) incluye las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo realizado.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del diseño de la cámara de ambiente controlado. Se explican los principios físicos y electrónicos asociados al control de variables como temperatura, humedad, iluminación y campo magnético, así como el funcionamiento de los sensores y actuadores utilizados. Finalmente, se aborda el proceso de adquisición, acondicionamiento y comunicación de las señales con el microcontrolador, base del sistema propuesto.

2.1. Variables físicas de control

En este capítulo se abordan las principales variables físicas que controla la cámara de ambiente desarrollada: temperatura, humedad, iluminación y campo magnético. Cada una de ellas requiere un tratamiento teórico distinto para comprender los fenómenos físicos involucrados, su relación con los sensores utilizados y la forma en que pueden ser controladas y medidas con precisión.

2.1.1. Temperatura

La temperatura es una magnitud escalar que refleja el nivel de energía térmica de un cuerpo o sistema. Su medición se realiza en unidades del Sistema Internacional (Kelvin) o en grados Celsius, y constituye una de las variables más fundamentales en la ingeniería de instrumentación. Los sensores térmicos más comunes incluyen termistores NTC/PTC, sensores de resistencia RTD y sensores digitales como el DS18B20, empleado en el módulo KY-001.

En el diseño de la cámara de ambiente controlado, el aumento de temperatura se logra mediante una resistencia de tubo de cuarzo alimentada con 120 V. La transferencia de calor por convección entre la resistencia y el aire se modela mediante la ecuación:

$$Q = h A (T_s - T_a) \quad (2.1)$$

donde Q es la potencia transferida [W], h el coeficiente de convección [$W/m^2 \cdot K$], A el área de intercambio térmico [m^2], T_s la temperatura superficial [K] y T_a la temperatura ambiente [K] [5].

El control térmico dentro del sistema se complementa con un ventilador de 12 V encargado de extraer el aire caliente, este se evacúa a través de la apertura ubicada en la parte trasera de la cámara, favoreciendo así la disminución de la temperatura interna cuando esta supera el valor de consigna. El ventilador es controlado mediante un relé activado por el microcontrolador Arduino UNO R3, el cual monitorea constantemente la lectura del sensor KY-001. Este sensor, basado en el protocolo 1-Wire, proporciona mediciones digitales de alta resolución, permitiendo al sistema regular de manera precisa la temperatura mediante la conmutación automática del ventilador y del elemento calefactor.

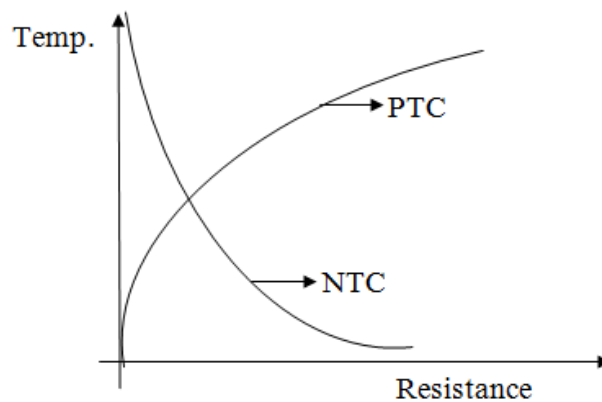


Figura 2.1. Ejemplo de curva característica de un termistor NTC. Tomado de [10]

2.1.2. Humedad

La humedad es una propiedad atmosférica que representa la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Esta se origina a partir del proceso natural de evaporación del agua de los océanos, ríos, suelos y organismos vivos, y desempeña un papel fundamental en el equilibrio térmico y climático de la Tierra. Su presencia influye en fenómenos como la condensación, la precipitación, la formación de nubes y la sensación térmica percibida por los seres humanos.

Existen distintas formas de expresar la humedad, siendo las más comunes la *humedad absoluta* y la *humedad relativa*. La humedad absoluta corresponde a la masa de vapor de agua contenida por unidad de volumen de aire (g/m^3), mientras que la humedad relativa (ϕ) se define como la relación entre la presión parcial del vapor de agua (p_v) y la presión de saturación (p_{vs}) a una temperatura determinada, según:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \times 100 \quad (2.2)$$

La humedad relativa varía de forma directa con la temperatura: a medida que esta

aumenta, la capacidad del aire para retener vapor de agua se incrementa, lo que reduce el valor relativo de humedad si la cantidad de vapor permanece constante. Este fenómeno es especialmente relevante en aplicaciones de medición y calibración, ya que incluso pequeñas variaciones térmicas pueden alterar la lectura de sensores sensibles a la humedad [6].

En el ámbito de la ingeniería y la instrumentación, la humedad es una de las variables ambientales más difíciles de controlar con precisión, debido a su dependencia simultánea de la presión, la temperatura y el movimiento del aire. Su monitoreo y regulación son fundamentales en procesos industriales, laboratorios de calibración, sistemas de climatización, y en la caracterización de sensores que operan bajo diferentes condiciones ambientales.

2.1.3. Iluminación

La iluminación es una de las variables físicas más importantes en los estudios de percepción visual, óptica aplicada y calibración de sensores fotoeléctricos. Se define como la cantidad de flujo luminoso incidente sobre una superficie, determinada por la potencia radiante que llega al ojo humano ponderada por la sensibilidad espectral del mismo. En el Sistema Internacional (SI), la iluminancia (E) se mide en lux (lx), equivalente a un lumen por metro cuadrado ($1 lx = 1 lm/m^2$).

La relación entre el flujo luminoso (Φ) y la iluminancia se expresa como:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2.3)$$

donde A es el área sobre la cual incide el flujo luminoso. Esta magnitud permite cuantificar la intensidad lumínica sobre una superficie, siendo un parámetro esencial para el diseño de entornos controlados y la caracterización de sensores ópticos [7].

La distribución del flujo luminoso sobre una superficie depende del ángulo de incidencia de la radiación. Según la *ley del coseno de Lambert*, la iluminancia disminuye proporcionalmente al coseno del ángulo de incidencia (θ):

$$E = E_0 \cos \theta \quad (2.4)$$

donde E_0 representa la iluminancia máxima cuando la radiación incide perpendicularmente. Esta ley es fundamental para el análisis de superficies difusas y el cálculo de irradiancia en fotometría [10].

Además de la iluminancia, existen otras magnitudes relevantes en la óptica y fotometría, tales como la luminancia (L) y la intensidad luminosa (I). La luminancia se define como la cantidad de flujo luminoso emitido o reflejado por una superficie en una dirección específica, expresada como:

$$L = \frac{I}{A \cos \theta} \quad (2.5)$$

donde I es la intensidad luminosa [cd], A el área emisora o reflectante [m^2] y θ el ángulo de observación. Por su parte, la intensidad luminosa describe el flujo emitido por unidad de ángulo sólido (Ω), según:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.6)$$

Estas relaciones son de especial interés en la calibración de sensores fotoresistivos y fotodiodos, donde la respuesta eléctrica varía con la cantidad de luz incidente.

El comportamiento eléctrico de los materiales fotosensibles, como las fotorresistencias (LDR), puede modelarse mediante una relación de tipo potencia inversa entre la resistencia eléctrica (R) y la iluminancia (E):

$$R = K E^{-\alpha} \quad (2.7)$$

donde K es una constante dependiente del material semiconductores, y α es el coeficiente de sensibilidad óptica, que usualmente varía entre 0.7 y 0.9 [11]. Esta relación caracteriza la respuesta no lineal de los materiales fotoactivos, fenómeno crucial en la calibración de sistemas de medición de luz ambiental o artificial.

Por otro lado, la irradiancia energética (H) de una fuente luminosa puede expresarse como la energía incidente por unidad de área en un intervalo de tiempo t :

$$H = \frac{E t}{\eta} \quad (2.8)$$

donde η representa la eficiencia luminosa del sistema, que relaciona la potencia radiante emitida con la energía luminosa percibida. La eficiencia varía según la longitud de onda, ya que la sensibilidad del ojo humano se concentra principalmente en el rango de 555 nm, correspondiente a la luz verde [5].

El análisis de la iluminación y su control es fundamental en laboratorios donde se estudian sensores ópticos, ya que la intensidad y el ángulo de incidencia pueden modificar significativamente la respuesta eléctrica de dichos dispositivos. Por ello, comprender las leyes fotométricas y radiométricas permite reproducir condiciones lumínicas controladas con un alto grado de precisión y repetibilidad experimental.

2.1.4. Campo magnético

El campo magnético (B) es una magnitud vectorial expresada en teslas (T), responsable de la fuerza magnética que actúa sobre cargas en movimiento. En la cámara de ambiente controlado, se genera un campo uniforme mediante un par de bobinas de Helmholtz, configuradas de modo que la distancia entre ellas sea igual a su radio R . El campo magnético en el centro del sistema se determina mediante:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 NI}{R} \quad (2.9)$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m es la permeabilidad del vacío, N el número de espiras de cada bobina, I la corriente eléctrica [A] y R el radio de las bobinas [m] [8,9].

Las bobinas son alimentadas por una fuente controlada a través de un transistor MOSFET, modulando la corriente según las lecturas del sensor de referencia KY-024 (sensor Hall lineal). La uniformidad del campo magnético dentro de la región central permite una caracterización precisa de sensores magnéticos bajo condiciones reproducibles.

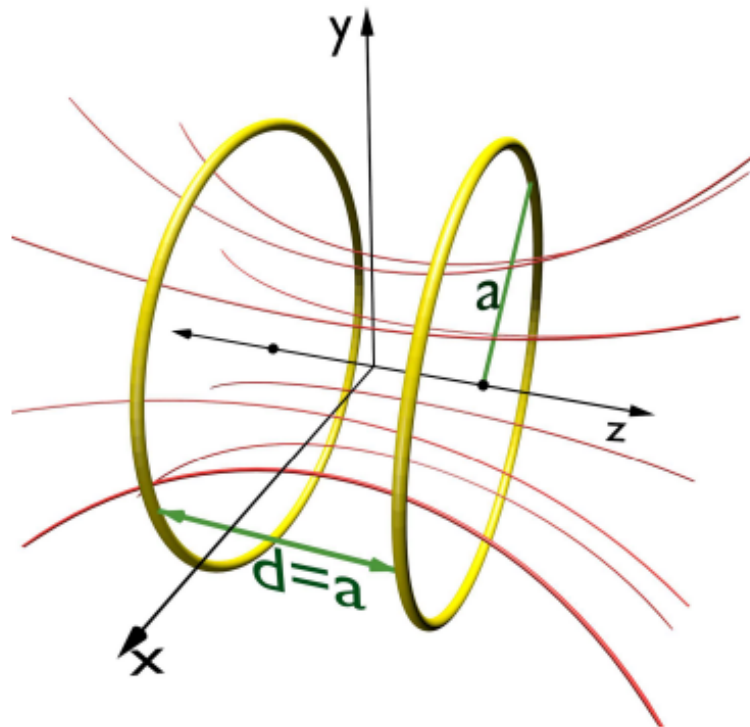


Figura 2.2. Distribución del campo magnético en un par de bobinas de Helmholtz. Tomado de [12].

2.2. Fundamentos sobre sensores

Un sensor es un dispositivo que convierte una magnitud física, química o biológica en una señal eléctrica medible. [16] Esta definición cubre la función básica de los sensores: detectar una variable y transformarla para su procesamiento.

2.2.1. Calibración, caracterización y precisión

La calibración es el proceso de alinear la salida del sensor con un estándar conocido para garantizar que los valores medidos sean correctos. [13] La caracterización es la evaluación del comportamiento del sensor a través de su rango operativo, para determinar parámetros tales como linealidad, sensibilidad, histéresis, repetibilidad y resolución. [15] La precisión de un sensor se refiere a cuán cerca están las mediciones entre sí (repetibilidad) y cuánto se acercan al valor verdadero (exactitud).

2.2.2. Parámetros importantes de los sensores

A continuación se explican algunos de los parámetros clave para la evaluación de sensores:

- **Sensibilidad:** Cambio en la salida por unidad de cambio de la magnitud medida.
- **Rango:** Intervalo de valores de la magnitud que el sensor puede medir.
- **Resolución:** Menor variación de la magnitud que se puede detectar.
- **Histéresis:** Diferencia de salida cuando la magnitud se incrementa o disminuye a través del mismo valor.
- **Repetibilidad:** Capacidad de obtener el mismo resultado al medir la misma magnitud bajo condiciones idénticas.
- **Linealidad:** Grado en que la salida del sensor es directamente proporcional a la magnitud medida.

2.2.3. Tabla de sensores utilizados en la cámara

Tabla 2.1. Resumen de sensores KY utilizados y su principio de operación

Módulo	Magnitud medida	Principio de operación
KY-001	Temperatura	Sensor digital (1-Wire) de contacto
KY-015	Temperatura y Humedad	Elemento capacitivo para humedad + sensor digital
KY-018	Intensidad de luz	Fotorresistencia (LDR) que varía su resistencia con la luz
KY-024	Campo magnético	Sensor Hall lineal que mide la densidad de flujo magnético

2.3. Actuadores del sistema

El control de las condiciones ambientales dentro de la cámara se logra mediante la acción de diversos actuadores eléctricos y electrónicos, encargados de modificar las variables físicas de interés: temperatura, humedad, iluminación y campo magnético. Estos dispositivos operan

bajo distintos principios físicos y su interacción controlada permite mantener un entorno estable y reproducible para la caracterización de sensores. A continuación, se detallan los fundamentos de funcionamiento de cada actuador implementado en el sistema.

2.3.1. Resistencia de cuarzo

La resistencia de cuarzo es un elemento calefactor ampliamente empleado en aplicaciones de control medioambiental debido a su alta eficiencia térmica, tiempos de respuesta rápidos y capacidad para operar a temperaturas elevadas de forma estable. Su estructura típica consiste en un alambre resistente eléctrico alojado dentro de un tubo de cuarzo sellado, el cual actúa como envoltura aislante y como transmisor de radiación infrarroja hacia el entorno.

El mecanismo principal de funcionamiento es el efecto Joule, por el cual la potencia disipada P en un conductor es proporcional al cuadrado de la corriente que lo atraviesa y a su resistencia eléctrica:

$$P = I^2 R \quad (2.10)$$

donde P es la potencia en vatios, I la corriente en amperios y R la resistencia en ohmios. Esta ley refleja la conversión directa de energía eléctrica en calor, proceso que en el caso del tubo de cuarzo permite la emisión de radiación infrarroja cuando el alambre alcanza temperaturas elevadas [17,18].

El tubo de cuarzo tiene varias ventajas: ofrece baja absorción de radiación infrarroja, buena resistencia térmica y transparencia para la emisión radiante, lo que permite que la mayor parte del calor generado se transfiera eficazmente al ambiente o a las superficies a calentar. [19], la estructura interna de estos elementos calefactores incluye, además del tubo de cuarzo, un hilo calefactor enrollado y materiales de aislamiento que optimizan la uniformidad térmica y reducen pérdidas por convección no deseada.

En la práctica industrial, estos elementos calefactores se utilizan por su capacidad de alcanzar temperaturas de operación superiores a 500 C y por su rápida puesta en marcha, lo que resulta esencial en procesos que requieren momentos de calentamiento breves o encendidos frecuentes. Por ejemplo, el elemento "FQE-K" presenta una gama de operación de 250 W a 1 000 W, temperaturas de hasta 772 C y longitudes de onda de radiación entre 1.5 y 8 μm [18]. Esta capacidad de radiación infrarroja directa hace que el calentamiento sea más eficiente, ya que gran parte de la energía se transfiere por radiación en lugar de depender únicamente de la convección del aire.

Para dimensionar el elemento calefactor, se puede estimar la cantidad de energía térmica requerida en el volumen de aire que se desea calentar:

$$Q = m c_p \Delta T \quad (2.11)$$

donde Q es la energía en julios, m la masa de aire en kilogramos, c_p la capacidad calorífica del aire (aproximadamente 1 005 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) y ΔT el cambio de temperatura

deseado en kelvin. Esta estimación permite seleccionar la potencia eléctrica necesaria en la resistencia para alcanzar la temperatura objetivo en un tiempo razonable.

Además, al considerar la envoltura de cuarzo, es importante tener en cuenta la densidad de potencia superficial, el emplazamiento del elemento, la distancia mínima de radiación y la ventilación del sistema, ya que la uniformidad del campo térmico depende tanto de la emisión radiante como de la circulación de aire. Uno de los beneficios del calentamiento de cuarzo radica en que gran parte del calor es irradiado directamente hacia los objetos, lo cual reduce la interferencia del aire circundante y evita pérdidas por convección no controlada.

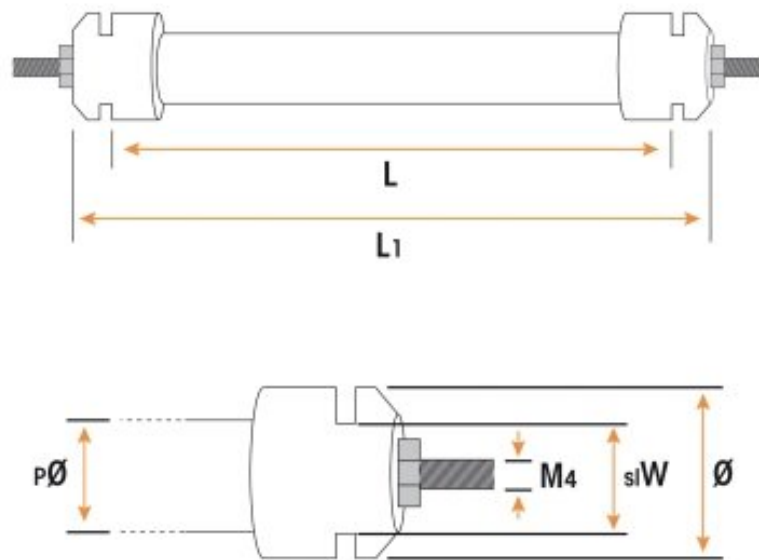


Figura 2.3. Resistencia de cuarzo de 230 V. Tomado de [20]

2.3.2. Ventilador de 12 V DC

El ventilador de 12 V DC cumple una doble función en el sistema: regular la temperatura interna mediante la extracción del aire caliente y contribuir al control de la humedad relativa al favorecer el recambio de aire dentro del sistema. Su operación se basa en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica rotacional a través de un motor de corriente continua, que acciona las aspas del ventilador para generar un flujo de aire forzado.

El principio físico fundamental detrás de su funcionamiento es la convección forzada, mecanismo mediante el cual el movimiento del aire mejora la transferencia de calor desde una superficie caliente hacia el fluido circundante. Este proceso se describe mediante la ecuación general de transferencia convectiva de calor:

$$Q = h A (T_s - T_a) \quad (2.12)$$

donde Q es la tasa de transferencia de calor (W), h el coeficiente de convección (W/m^2K), A el área superficial expuesta (m^2), T_s la temperatura de la superficie y T_a la temperatura del aire [21]. En sistemas de calefacción cerrados, la convección forzada inducida por ventiladores permite mantener gradientes térmicos mínimos, logrando una temperatura más uniforme dentro del volumen de prueba.

El flujo de aire generado por el ventilador puede describirse en términos de su caudal volumétrico:

$$\dot{V} = vA \quad (2.13)$$

donde \dot{V} es el caudal de aire (m^3/s), v la velocidad promedio del aire (m/s) y A el área de salida del ventilador. Los ventiladores axiales de 12 V, como los empleados en equipos electrónicos o sistemas de refrigeración, presentan velocidades de rotación entre 1500 y 4000 rpm, con caudales que oscilan entre 20 y 100 CFM, dependiendo del diámetro y diseño de las aspas [22].

Para la cámara de ambiente controlado, el ventilador tiene tres funciones principales:

- **Disipación térmica:** permite expulsar el aire caliente generado por la resistencia de cuarzo cuando la temperatura supera el umbral definido, evitando el sobrecalentamiento del sistema.
- **Homogeneización del campo térmico:** distribuye el aire caliente dentro de la cámara, reduciendo las zonas frías o calientes localizadas y garantizando condiciones uniformes de temperatura para la calibración de sensores.
- **Extracción de humedad:** al incrementar el flujo de aire, contribuye a disminuir la humedad relativa cuando el sistema de humidificación cesa su operación, ayudando a estabilizar la variable en el rango deseado.

El comportamiento aerodinámico del ventilador puede aproximarse mediante la ecuación de Bernoulli para flujo incompresible:

$$P_t = P_s + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (2.14)$$

donde P_t es la presión total, P_s la presión estática, ρ la densidad del aire (aproximadamente 1.2 kg/m^3 a temperatura ambiente) y v la velocidad del aire. En términos prácticos, el ventilador aumenta la presión dinámica del aire dentro del sistema, promoviendo su circulación y salida controlada a través de orificios o ductos de ventilación.

Para optimizar la eficiencia del flujo, la velocidad del ventilador se controla mediante modulación por ancho de pulso (PWM), lo que permite ajustar la tasa de rotación del motor sin pérdidas energéticas significativas. El control digital del ciclo de trabajo D modula la tensión promedio aplicada al motor:

$$V_{avg} = D \times V_{max} \quad (2.15)$$

donde V_{avg} es la tensión promedio, V_{max} la tensión máxima del sistema (12 V) y D el ciclo de trabajo (0–1). Esta técnica proporciona una respuesta rápida, bajo consumo y una regulación estable del flujo de aire, adecuada para mantener la cámara dentro de los límites térmicos y de humedad establecidos.



Figura 2.4. Ventilador 12V. Tomado de [26]

2.3.3. Matriz LED 16×16

La iluminación controlada dentro de una cámara de pruebas puede implementarse con una matriz de 16×16 diodos emisores de luz LED, la cual permite reproducir niveles de iluminancia estables y repetibles. A escala de dispositivo, un LED es una unión $p-n$ que emite radiación al recombinar pares electrón–hueco; la potencia óptica emitida es, en régimen lineal, aproximadamente proporcional a la corriente directa I que circula por el diodo. La eficiencia luminosa efectiva depende de la longitud de onda y de la temperatura de unión T_j .

Relaciones óptico–eléctricas básicas. Para un LED polarizado en directa, la potencia óptica Φ_v (o flujo luminoso) puede aproximarse como:

$$\Phi_v \approx \eta_v I, \quad (2.16)$$

donde η_v es la eficacia luminosa del dispositivo en lm/A (válida en un margen de corriente y temperatura). El brillo percibido se controla variando I o su valor medio. El balance térmico del LED viene dado por:

$$P_d = V_f I, \quad \Delta T_j = P_d \theta_{JA}, \quad (2.17)$$

donde P_d es la potencia disipada, V_f la caída directa, θ_{JA} la resistencia térmica unión–ambiente y ΔT_j el incremento de temperatura de unión.

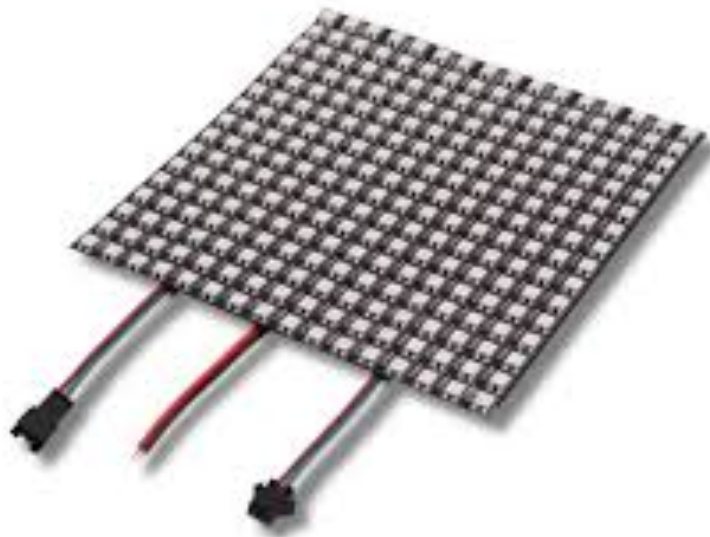


Figura 2.5. Matriz led 16x16 . Tomado de [27]

2.3.4. Humidificador ultrasónico de 5 V

El control de la humedad es un aspecto esencial en sistemas de ambiente controlado, pues esta variable afecta directamente la estabilidad de materiales, sensores y equipos electrónicos. Una de las tecnologías más eficientes para la generación de humedad artificial es la atomización ultrasónica, empleada en los módulos de humidificador tipo ACEBOTT de 5 V [28]. Estos dispositivos se utilizan comúnmente en experimentos de laboratorio, sistemas de climatización de pequeña escala y cámaras de calibración por su bajo consumo de potencia y alta eficiencia de atomización.

El principio de funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico inverso, mediante el cual un material piezoeléctrico (como el titanato de plomo y circonio, PZT) se deforma mecánicamente al ser sometido a una señal eléctrica alterna de alta frecuencia. Este fenómeno se describe matemáticamente por la relación:

$$S = d_{33} E \quad (2.18)$$

donde S representa la deformación mecánica, E la intensidad del campo eléctrico aplicado, y d_{33} el coeficiente piezoeléctrico del material (m/V). Cuando la frecuencia de excitación eléctrica coincide con la frecuencia de resonancia mecánica del disco piezoeléctrico (f_r), se produce una vibración de gran amplitud que genera ondas acústicas en el agua, provocando la ruptura superficial de las moléculas y la formación de microgotas de niebla fría [29].

El rango típico de operación para los humidificadores ultrasónicos se sitúa entre 1.6 MHz y 2.4 MHz, frecuencias que permiten producir gotas con un diámetro medio entre 1 μ m y 5 μ m, apropiadas para su suspensión en el aire sin condensación visible

Desde el punto de vista eléctrico, el módulo está compuesto por una placa de oscilación y un disco atomizador que actúan conjuntamente. La placa genera una señal alterna senoidal de alta frecuencia a partir de la tensión continua de 5 V suministrada al módulo. El circuito incorpora un transistor de conmutación, una bobina de realimentación y un transformador resonante que alimenta el piezoeléctrico con una señal de aproximadamente 24 V_{p-p} a frecuencia ultrasónica. El consumo promedio del módulo es inferior a 2 W, lo que lo hace adecuado para ser alimentado directamente desde controladores como Arduino mediante un transistor o relé de conmutación.



Figura 2.6. Funcionamiento básico del humidificador ultrasónico. Tomado de [28].

2.3.5. Bobinas de Helmholtz

Las bobinas de Helmholtz constituyen un conjunto de dos solenoides idénticos, dispuestos de manera coaxial y separados por una distancia igual a su radio. Esta configuración permite generar un campo magnético prácticamente uniforme en la región central comprendida entre ambas bobinas, lo que las hace especialmente útiles en procesos de calibración de sensores magnéticos o pruebas experimentales donde se requiere control y repetibilidad del campo.

Cada bobina está formada por N espiras de alambre conductor enrolladas sobre un núcleo no magnético.

La disposición geométrica de Helmholtz permite minimizar las variaciones de campo ($\frac{dB}{dx} \approx 0$) en la zona central, asegurando un entorno magnético estable para la caracterización de sensores Hall como los KY-003 y KY-024.

Para de este proyecto, las bobinas de Helmholtz se emplean para generar un campo magnético controlado en el interior de la cámara de ambiente. La corriente que las alimenta proviene de una fuente de alimentación regulada de corriente continua, controlada indirectamente por el microcontrolador Arduino UNO R3. El ajuste de corriente se realiza a través de un módulo de conversión digital-analógico o por modulación de ancho de pulso, lo que permite variar la intensidad del campo magnético de manera precisa.

El valor teórico del campo magnético obtenido puede compararse con la respuesta de los sensores baja prueba, permitiendo su calibración y verificación. La linealidad entre la corriente y la densidad de flujo facilita establecer curvas de referencia experimentales. El rango de

operación típico en este tipo de ensayos es de unos pocos miliTesla (10^{-3} T), suficientes para verificar el comportamiento de sensores de efecto Hall de baja sensibilidad.

El consumo de potencia asociado a las bobinas depende de su resistencia eléctrica R_b y de la corriente aplicada, lo cual puede estimarse mediante la ley de Joule:

$$P = I^2 R_b \quad (2.19)$$

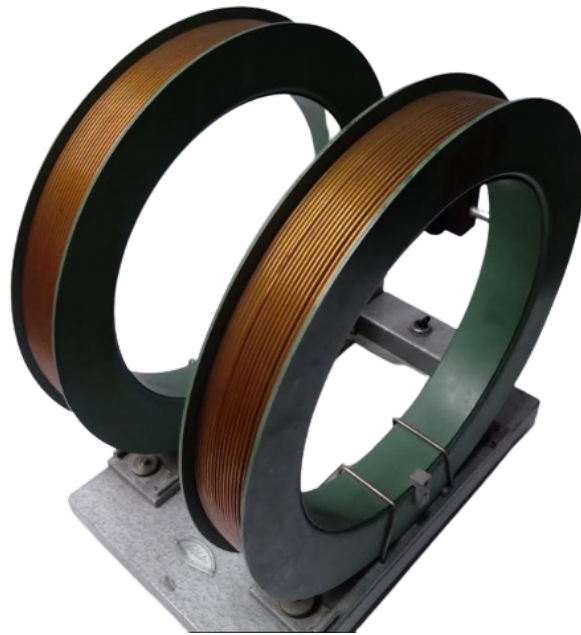


Figura 2.7. Bobinas de Helmholtz. Tomado de [41]

2.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado que combina en un solo chip una unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada y salida, permitiendo ejecutar tareas de control específicas en sistemas embebidos. A diferencia de los microprocesadores, que requieren módulos externos de memoria y periféricos, los microcontroladores están diseñados para operar de forma autónoma en aplicaciones dedicadas, como control de procesos, instrumentación o automatización [30].

El funcionamiento de un microcontrolador se basa en la ejecución secuencial de instrucciones almacenadas en su memoria de programa. La CPU interpreta estas instrucciones y gestiona los datos recibidos de sensores o periféricos a través de sus pines de entrada y salida (E/S). Este proceso permite que el dispositivo realice operaciones lógicas, aritméticas y de control en tiempo real, interactuando con su entorno mediante actuadores y dispositivos externos [31].

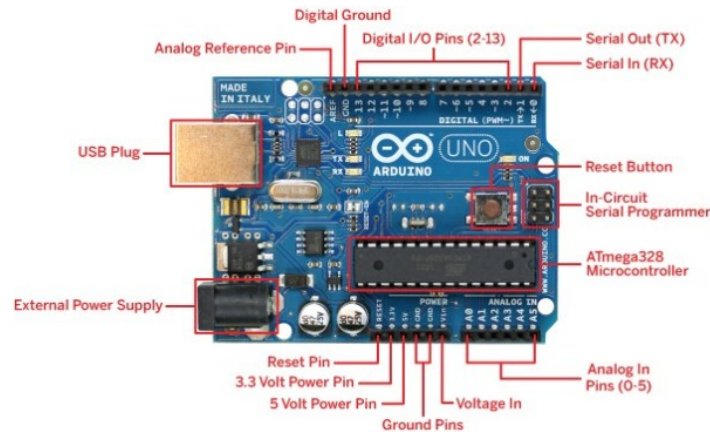


Figura 2.8. Estructura Arduino UNO. Tomado de [33].

2.4.1. Componentes principales de un microcontrolador

Los elementos esenciales que integran un microcontrolador son los siguientes:

- **Unidad Central de Procesamiento (CPU):** Encargada de ejecutar las instrucciones del programa y coordinar el flujo de información entre los distintos módulos del sistema.
- **Memorias:** Incluyen memoria de programa (Flash o ROM), memoria de datos (RAM) y memoria EEPROM, utilizada para almacenar configuraciones permanentes.
- **Periféricos de E/S:** Permiten la conexión con sensores, actuadores, pantallas y otros dispositivos mediante interfaces digitales y analógicas.
- **Temporizadores y contadores:** Empleados para medir intervalos de tiempo o generar señales de control de precisión.
- **Convertidores analógico–digitales (ADC):** Transforman las señales analógicas provenientes de los sensores en valores digitales que pueden ser procesados por la CPU.

2.4.2. Microcontrolador Arduino UNO R3 en el proyecto

El Arduino UNO R3 ofrece un entorno de programación accesible y una amplia compatibilidad con módulos y sensores. El esquema de control general se basa en un bucle de retroalimentación: el microcontrolador adquiere las variables físicas como temperatura, humedad, iluminación y campo magnético, las compara con los valores de referencia, y actúa sobre los dispositivos correspondientes para mantener condiciones estables dentro del sistema. Este enfoque cierra el lazo de control, permitiendo reproducir condiciones ambientales específicas necesarias para la verificación de sensores.

El Arduino UNO R3 emplea un conversor analógico–digital de 10 bits, lo que permite una resolución de $\frac{5V}{2^{10}} = 4,88\text{ mV}$ por paso, suficiente para la lectura precisa de señales provenientes de los sensores KY. Asimismo, mediante el uso de temporizadores internos y librerías de control PWM, se regula la intensidad de la matriz LED, el tiempo de encendido del humidificador y la activación del ventilador de extracción.

En términos de eficiencia energética, el consumo promedio del Arduino UNO R3 se encuentra en torno a 50–60 mA durante el funcionamiento normal, lo cual lo convierte en una opción viable para un sistema de medición de bajo consumo, especialmente en aplicaciones experimentales de laboratorio y desarrollo académico.

En resumen, el microcontrolador Arduino UNO R3 se constituye como el núcleo operativo del sistema, proporcionando una plataforma robusta, económica y fácilmente reconfigurable para la automatización del entorno de pruebas y la caracterización precisa de sensores.

2.4.3. Módulo de relé

Un módulo relé es un dispositivo que permite controlar cargas eléctricas de mayor voltaje o corriente utilizando una señal de bajo voltaje proveniente de un microcontrolador. En esencia, funciona como un interruptor eléctrico que se activa de manera automática: el microcontrolador envía una señal y el relé abre o cierra un circuito independiente, lo que permite encender o apagar equipos como resistencias calefactoras, motores, lámparas o ventiladores.

En sistemas de control basados en microcontroladores, es común encontrar actuadores que requieren tensiones o corrientes superiores a las que los pines de salida pueden suministrar directamente. Para estos casos, se emplean módulos de relé, que actúan como interruptores electromecánicos capaces de controlar cargas de alta potencia a partir de señales de bajo nivel provenientes del microcontrolador [35].

El módulo de relé de 1 canal de 5V utilizado en este proyecto cumple la función de aislar eléctricamente el microcontrolador de los actuadores de mayor consumo, como la resistencia de cuarzo alimentada a 120 V AC y el ventilador de extracción de 12 V DC. Este módulo incorpora un relé electromecánico activado por una señal lógica de 5 V proveniente del Arduino UNO R3, lo que permite su conmutación segura sin exponer la placa a sobrecorrientes o tensiones elevadas.

El principio de funcionamiento del relé se basa en el efecto electromagnético. Cuando circula corriente por la bobina interna, se genera un campo magnético que atrae una lámina metálica, cambiando la posición de los contactos.

En este tipo de módulos, la corriente nominal de activación de la bobina es del orden de 70 mA, valor compatible con los pines de salida digital del Arduino UNO. Además, el circuito de entrada incluye un transistor de conmutación, un diodo de protección flyback que suprime los picos de tensión generados al desenergizar la bobina, y un LED indicador que señala el estado de activación.

Desde el punto de vista energético, la potencia controlada por el relé puede expresarse como:

$$P = VI \quad (2.20)$$

donde P es la potencia entregada al actuador (W), V la tensión de alimentación (V) e I la corriente del dispositivo (A). En el caso de la resistencia de cuarzo, con una alimentación de 120 V AC y una potencia aproximada de 650 W, el relé debe soportar al menos 6 A de corriente nominal.

El empleo de relés en este sistema permite al Arduino controlar de forma indirecta dispositivos de potencia media y alta, sin comprometer la integridad del microcontrolador. Este aislamiento, tanto eléctrico como funcional, resulta esencial en entornos donde conviven señales de control de baja potencia con cargas que operan a tensiones elevadas, garantizando así la seguridad del sistema y la durabilidad de los componentes.



Figura 2.9. Módulo de relé de 1 canal de 5 V empleado para el control de actuadores. Tomado de [37].

2.4.4. Pantalla LCD 16×2

La pantalla LCD 16×2 es un dispositivo de visualización de bajo consumo ampliamente utilizado en sistemas embebidos para mostrar información en tiempo real. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de cristales líquidos nemáticos, los cuales cambian su orientación molecular al aplicarles un campo eléctrico, modulando así la cantidad de luz transmitida. Cada carácter mostrado corresponde a una matriz de puntos activados eléctricamente, lo que permite representar texto y valores numéricos de manera clara y eficiente.

Tradicionalmente, este tipo de pantallas requiere múltiples líneas de conexión (8 para datos y 6 para control), lo que ocupa gran cantidad de pines del microcontrolador. Para optimizar su

integración, se utiliza un adaptador basado en el circuito integrado PCF8574, que convierte la comunicación paralela en un bus serial de tipo I²C (Inter-Integrated Circuit). Este protocolo emplea solo dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj), reduciendo significativamente el cableado necesario [39].

La frecuencia típica del bus I²C en modo estándar es de 100 kHz, aunque puede alcanzar hasta 400 kHz en modo rápido, lo que resulta suficiente para la transmisión de los comandos y datos requeridos por la pantalla. El microcontrolador Arduino UNO R3 actúa como maestro, enviando instrucciones y caracteres al LCD, que opera como dispositivo esclavo dentro del bus.

El consumo del conjunto LCD-I²C es bajo (del orden de 15–20 mA), compatible con la capacidad de alimentación del Arduino. Su retroiluminación LED proporciona buena visibilidad y puede regularse mediante una resistencia o modulación PWM. En este proyecto, la pantalla se emplea para visualizar las variables medidas —temperatura, humedad, iluminación y campo magnético—, facilitando la supervisión directa del entorno controlado.

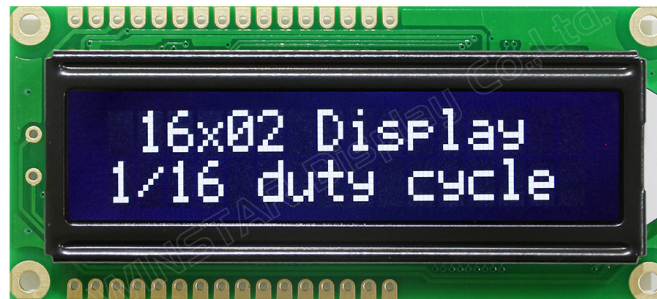


Figura 2.10. Pantalla LCD 16×2 empleada en el sistema. Tomado de [38].

Capítulo 3

Propuesta de Diseño

Este capítulo aborda el proceso de implementación de la cámara de ambiente controlado, abarcando la selección, montaje y calibración de los sensores empleados para medir temperatura, humedad relativa, iluminación y campo magnético. Se describe el diseño y ensamblaje del sistema electrónico basado en el microcontrolador Arduino UNO R3, incluyendo la integración de los módulos de potencia y control de los actuadores. Asimismo, se detalla el desarrollo del circuito de control y su disposición física dentro de la cámara, las técnicas de prototipado utilizadas y el proceso de cableado. Finalmente, se describe la programación del sistema embebido, la comunicación entre sensores y actuadores.

3.1. Especificaciones Técnicas y Montaje del sistema de ambiente controlado

3.1.1. Sensor de temperatura KY-001

El sensor de temperatura KY-001 permite la medición precisa de la temperatura ambiente o superficial dentro de la cámara de ambiente controlado. Este sensor incorpora el módulo digital DS18B20, un dispositivo de alta estabilidad fabricado por Maxim Integrated, que utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire para transmitir los datos de temperatura de forma digital y con alta inmunidad al ruido eléctrico.

El principio de funcionamiento del KY-001 se basa en la variación de la tensión interna del diodo semiconductor del DS18B20, la cual depende de la temperatura del chip. Este cambio es convertido internamente en una señal digital mediante un convertidor analógico–digital de 12 bits, lo que permite obtener resoluciones de hasta 0.0625 C. A diferencia de los sensores analógicos tradicionales, el KY-001 no requiere circuitos externos de amplificación ni calibración adicional, ya que el DS18B20 posee una compensación térmica y un registro de calibración en memoria ROM.

En el sistema, el KY-001 se emplea para medir la temperatura interna de la caja, sirviendo como referencia principal para el control de la resistencia de cuarzo y el ventilador de

extracción, garantizando así la estabilidad térmica durante los procesos de caracterización de sensores.

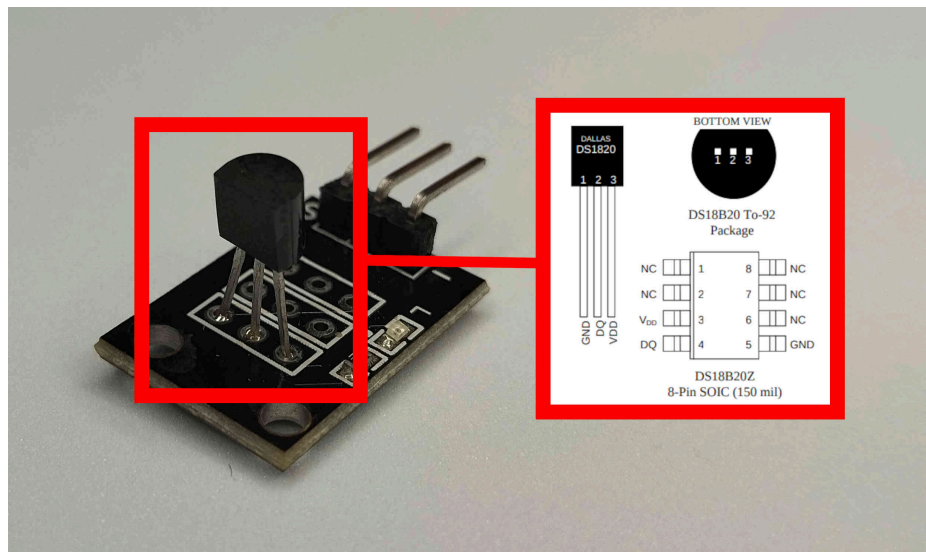


Figura 3.1. Sensor de temperatura KY-001. Tomado de [42]

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura KY-001 [42]

Especificación	Valor
Rango de medición	-55 C a +125 C
Precisión	± 0.5 C (-10 C a +85 C)
Resolución programable	9 – 12 bits (0.5 C a 0.0625 C)
Voltaje de operación	3.0 V – 5.5 V DC
Tipo de salida	Digital (protocolo 1-Wire)
Tiempo de conversión	93.75 ms a 750 ms (según resolución)
Tipo de montaje	Módulo con encabezado de 3 pines (GND, VCC, DQ)
Dimensiones del módulo	18 mm \times 15 mm
Temperatura de almacenamiento	-55 C a +125 C

3.1.2. Sensor de temperatura y humedad KY-015

El sensor KY-015 es un módulo combinado que permite la medición simultánea de temperatura y humedad relativa del aire. Este módulo integra el sensor digital DHT11, ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo ambiental y control debido a su bajo costo, estabilidad y facilidad de comunicación con microcontroladores.

El DHT11 utiliza un principio de medición capacitivo para determinar la humedad relativa. Internamente contiene un sustrato polimérico higroscópico cuya constante dieléctrica varía con el contenido de vapor de agua presente en el aire. Este cambio se convierte en una variación

de capacitancia que es procesada electrónicamente y digitalizada mediante un convertidor analógico–digital integrado en el sensor.

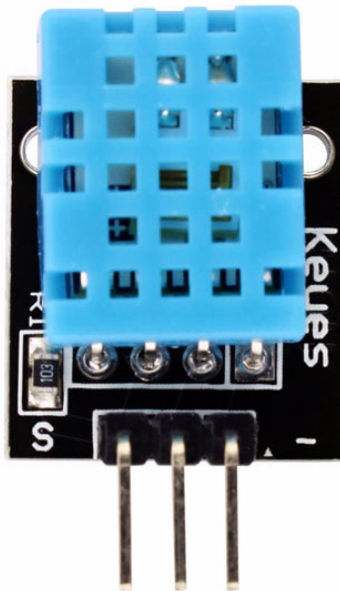


Figura 3.2. Sensor de Temperatura KY-015. Tomado de [43]

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad KY-015 [43]

Especificación	Valor
Rango de humedad	20 % – 90 % RH
Precisión de humedad	± 5 % RH
Rango de temperatura	0 C – 50 C
Precisión de temperatura	± 2 C
Resolución	8 bits (humedad y temperatura)
Voltaje de operación	3.3 V – 5.5 V DC
Tiempo de muestreo	1 s (1 Hz)
Tipo de salida	Digital serial (protocolo DHT)
Dimensiones del módulo	25 mm × 15 mm × 12 mm

3.1.3. Sensor de intensidad lumínica KY-018

El sensor KY-018 es un módulo que permite medir la intensidad de luz ambiental mediante una fotorresistencia o Light Dependent Resistor (LDR). Este componente varía su resistencia eléctrica en función de la cantidad de radiación luminosa que incide sobre su superficie. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico en materiales semiconductores,

como el sulfuro de cadmio (CdS), que reduce la resistividad del material a medida que aumenta la cantidad de fotones incidentes [44].

El módulo KY-018 proporciona una señal analógica proporcional a la iluminancia percibida. En condiciones de baja luminosidad, la resistencia del LDR puede superar los 1 M Ω , mientras que en alta luminosidad puede descender a valores cercanos a los 10 k Ω . Esta característica lo convierte en un sensor ideal para mediciones relativas o comparativas de luz, especialmente en aplicaciones donde no se requiere una calibración absoluta en lux.

En la cámara de ambiente controlado, el KY-018 permite evaluar el comportamiento de los sensores ópticos bajo diferentes condiciones de iluminación, generadas por la matriz LED 16 \times 16. Su respuesta rápida y naturaleza pasiva facilitan la integración con el microcontrolador Arduino UNO R3, a través de una entrada analógica (ADC).

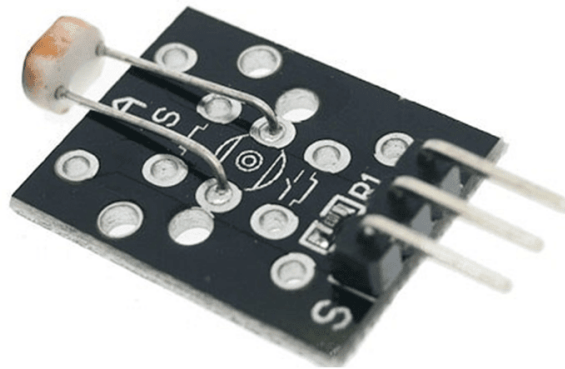


Figura 3.3. Sensor de Temperatura KY-015. Tomado de [44]

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del sensor de intensidad lumínica KY-018 [44]

Especificación	Valor
Tipo de sensor	Fotorresistencia (LDR CdS)
Rango de resistencia	10 k Ω – 1 M Ω (dependiente de la luz)
Tipo de salida	Analógica
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V DC
Tiempo de respuesta	20 – 30 ms
Temperatura de operación	–30 C a +70 C
Dimensiones del módulo	30 mm \times 15 mm \times 8 mm
Longitud de onda efectiva	540 nm

3.1.4. Sensor magnético digital KY-003

El sensor KY-003 es un módulo de detección magnética digital basado en el efecto Hall, diseñado para detectar la presencia o ausencia de un campo magnético. A diferencia del KY-024, que ofrece una salida proporcional a la intensidad del campo, el KY-003 funciona como un sensor *todo o nada*, generando una salida digital que cambia de estado al detectar un campo magnético con la polaridad adecuada [45].

El principio físico de funcionamiento es el mismo que en los sensores Hall lineales: cuando un conductor o semiconductor por el que circula una corriente eléctrica se somete a un campo magnético perpendicular, se genera una diferencia de potencial transversal denominada voltaje Hall:

El módulo KY-003 integra un sensor Hall digital junto con una resistencia de polarización interna y una salida de colector abierto. Este tipo de sensor solo responde a campos magnéticos con una polaridad determinada, activándose al acercarse el polo norte del imán al lado sensible del dispositivo y desactivándose cuando el campo desaparece o se invierte.

La salida digital pasa de un nivel alto (5 V) a bajo (0 V) cuando se detecta un campo magnético superior a un umbral característico (B_{on}), y retorna al nivel alto cuando el campo cae por debajo del umbral de desconexión (B_{off}).

Este comportamiento de conmutación lo hace especialmente útil para detectar la activación o desactivación de un campo magnético en pruebas de linealidad o en el control de las bobinas de Helmholtz del sistema, donde permite verificar la presencia del campo generado sin necesidad de realizar una medición continua de su magnitud.

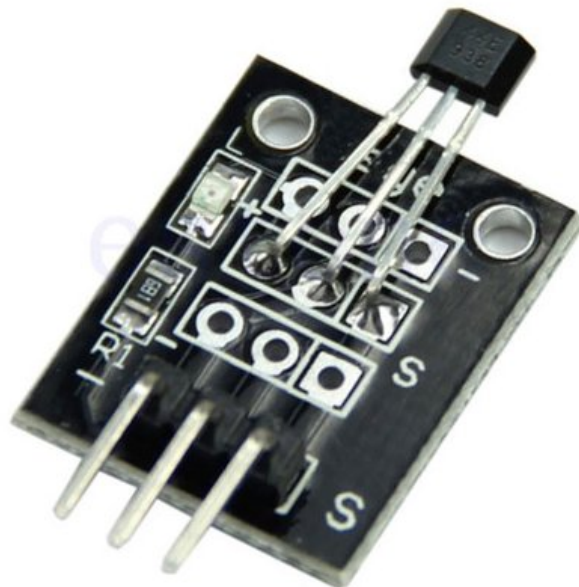


Figura 3.4. Sensor KY-003. Tomado de [45].

Tabla 3.4. Especificaciones técnicas del sensor magnético digital KY-003 [45]

Especificación	Valor
Tipo de sensor	Hall digital unipolar (A3144E)
Tipo de salida	Digital (colector abierto)
Voltaje de operación	4.5 V – 24 V DC
Corriente típica de consumo	4 mA
Campo de activación (B_{on})	35 – 50 mT
Campo de desactivación (B_{off})	15 – 25 mT
Histéresis	10 – 20 mT
Temperatura de operación	-40 C a +125 C
Tiempo de respuesta	<3 μ s
Dimensiones del módulo	30 mm × 15 mm × 8 mm

3.1.5. Montaje del sistema

El montaje del sistema integra los diferentes sensores y actuadores dentro de la cámara de ambiente controlado, interconectados con el microcontrolador Arduino UNO R3, que actúa como unidad central de control y adquisición de datos. Los sensores KY-001 y KY-015 se conectan a las entradas digitales y analógicas para la medición de temperatura y humedad relativa, mientras que el KY-018 se acopla a una entrada analógica para registrar la intensidad lumínica dentro del sistema, por último el sensor KY-003 se conectan a entrada la digital.

Los actuadores del sistema incluyen una resistencia de cuarzo de 120 V utilizada como elemento calefactor, un humidificador ultrasónico de 5 V, una matriz LED 16×16 WS2812B para el control de iluminación, un ventilador de 12 V para la disipación térmica y las bobinas de Helmholtz para la generación del campo magnético controlado. Todos los actuadores que requieren una alimentación independiente o de mayor potencia son gobernados mediante un módulo de relevador de un canal (5 V Relay Module), el cual actúa como interfaz de conmutación segura entre el Arduino y los dispositivos de potencia.

El microcontrolador Arduino UNO R3 es programado y depurado mediante su puerto USB tipo B, utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. Las señales de control hacia los actuadores se gestionan mediante salidas digitales configuradas en modo PWM cuando es necesario (por ejemplo, para el control de brillo de la matriz LED). La alimentación general del sistema se realiza mediante una fuente externa de 12 V DC, regulada internamente a 5 V mediante convertidores DC–DC para los módulos que así lo requieren.

Para garantizar la seguridad y estabilidad operativa, los componentes se alojan dentro de una estructura cerrada, fabricada en material aislante térmico. Se recomienda el uso de conectores sellados y pasacables con recubrimiento siliconado, con el fin de evitar la entrada de humedad y la acumulación de polvo. Esta disposición asegura la protección de los componentes electrónicos, facilita las labores de mantenimiento y permite el ensamblaje y desensamblaje del sistema de forma rápida y ordenada.

Finalmente, el montaje eléctrico y físico del sistema permite la interacción coordinada entre sensores y actuadores, posibilitando la creación de condiciones ambientales controladas y reproducibles para la caracterización de los sensores de temperatura, humedad, luz y campo magnético dentro del sistema.

3.2. Diseño del Circuito

El diseño del sistema se fundamenta en la integración de un microcontrolador Arduino UNO, encargado de la adquisición, control y monitoreo de variables ambientales dentro de la cámara. En su arquitectura se incorporan sensores de temperatura, humedad, intensidad lumínica y campo magnético, junto con actuadores como una matriz LED 16×16 WS2812B, resistencias de cuarzo para calefacción, humidificadores ultrasónicos y un ventilador para la recirculación del aire. A continuación, en [3.5](#) se presenta el diagrama esquemático del sistema

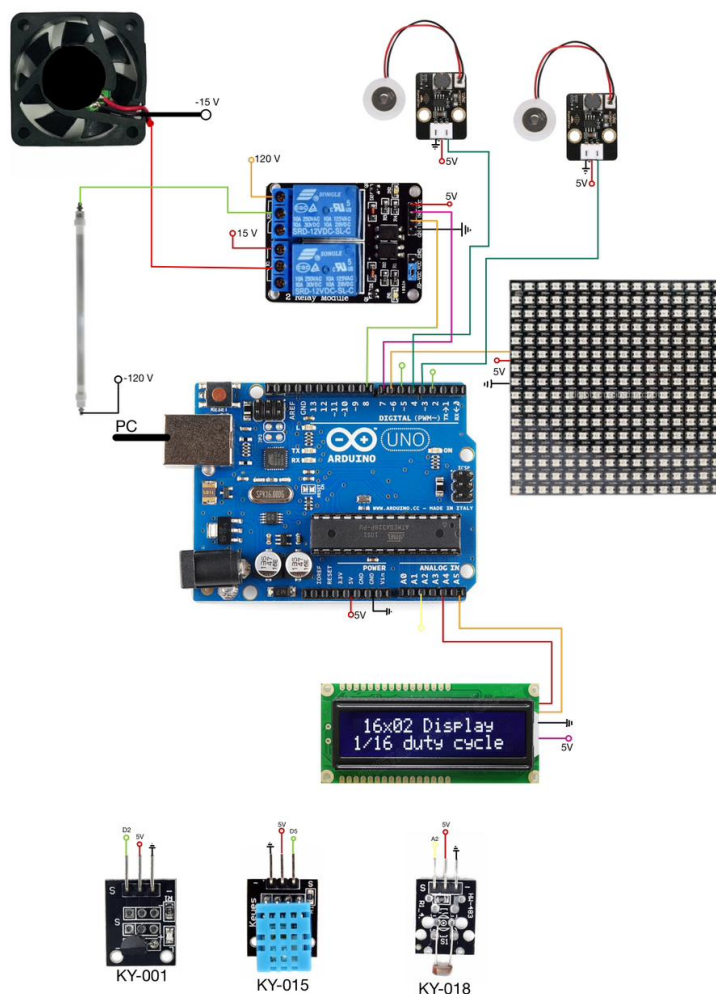


Figura 3.5. Esquemático del sistema.

3.2.1. Descripción General del Esquemático

El sistema propuesto se fundamenta en la integración del microcontrolador Arduino UNO R3, el cual constituye el núcleo de control encargado de la adquisición de datos, el procesamiento de señales y la gestión de los actuadores ambientales. Este dispositivo coordina las operaciones de medición de las variables físicas (temperatura, humedad, iluminación y campo magnético) y la regulación de los elementos encargados de modificarlas.

El Arduino UNO R3 cuenta con una frecuencia de reloj de 16 MHz, proporcionada por un cristal de cuarzo externo acompañado de capacitores de 22 pF, que garantizan la estabilidad del oscilador. La programación y depuración del sistema se realiza mediante su interfaz USB-TTL integrada, que facilita la carga del firmware desde el entorno Arduino IDE y la comunicación serial para el monitoreo en tiempo real.

Un botón de reinicio (RESET) permite reiniciar manualmente el microcontrolador, mientras que su sistema de alimentación se deriva de una fuente externa (PC).

Los sensores KY se distribuyen en las entradas analógicas y digitales del microcontrolador, según su tipo y naturaleza de señal:

- **KY-001:** conectado al pin D2, utiliza el protocolo 1-Wire para enviar datos de temperatura en formato digital.
- **KY-015 :** conectado al pin D5, emplea un bus digital unidireccional basado en tiempos para la transmisión de datos combinados de temperatura y humedad relativa.
- **KY-018:** conectado al pin A2, entrega una señal analógica proporcional a la intensidad luminosa, que varía su resistencia en función de la cantidad de luz incidente.
- **KY-003 :** conectados a A1 salida analógica proporcional al flujo magnético.

En cuanto a los actuadores, el sistema cuenta con los siguientes dispositivos:

- **Resistencia de cuarzo (120 V):** utilizada para generar calor dentro del sistema. Se controla a través de un módulo de relé de 1 canal, aislando el circuito de potencia del control de bajo voltaje del Arduino (pin D7).
- **Ventilador de 12 V DC:** encargado de extraer el aire caliente o húmedo del interior de la cámara. También controlado mediante un relé (pin D8) para conmutar su alimentación.
- **Humidificadores ultrasónicos de 5 V:** conectados directamente a dos pines de salida digital (D3 y D4), se activa según los niveles de humedad detectados por el sensor KY-015.
- **Matriz LED 16×16 WS2812B:** conectada al pin D6, controlada mediante la Biblioteca *Adafruit NeoPixel* para generar niveles de iluminación regulables vía PWM.

- **Bobinas de Helmholtz (12 V):** conectadas a través de un relé (pin D10), permiten la generación de un campo magnético controlado por corriente continua en función de la calibración de sensores magnéticos.

Finalmente, la pantalla LCD 16×2 con módulo I2C se conecta a las líneas SDA (A4) y SCL (A5), facilitando la visualización de las variables medidas y los estados de los actuadores en tiempo real.

El diseño del circuito prioriza una configuración modular, robusta y escalable, que permite la integración de nuevos sensores o actuadores sin rediseñar completamente la placa. Además, se ha buscado mantener una disposición eléctrica que minimice interferencias electromagnéticas, especialmente en la medición de señales analógicas sensibles.

Tabla 3.5. Resumen de pines utilizados en el Arduino UNO R3 para el sistema completo.

Módulo	Elemento	Pin Arduino UNO R3
General	Pantalla LCD I2C Alimentación común	SDA (A4), SCL (A5) 5V, GND
Intensidad luminosa	Matriz LED WS2812B Sensor KY-018	D6 A2
Temperatura	Sensor KY-001 Resistencia de cuarzo Ventilador extractor	D2 D7 D8
Humedad	Sensor KY-015 Humidificador 1 Humidificador 2	D5 D3 D4

3.2.2. Distribución de Señales

Alimentación: La cámara cuenta con una fuente principal de 12 V DC, para los actuadores que lo necesiten. A partir de la PC se alimenta el Arduino, la pantalla LCD, el humidificador y los sensores KY. Los dispositivos de mayor consumo (ventilador, bobinas y matriz LED) permanecen alimentados directamente con los 12 V, conmutados mediante relés.

Entradas Analógicas: Las entradas A0 y A1 del Arduino reciben señales analógicas del KY-018 (luz) y KY-024 (campo magnético) respectivamente.

Entradas/Salidas Digitales: Los pines digitales D2, D3 y D4 se reservan para los sensores KY-001, KY-015 y KY-003 respectivamente. Los pines D7, D8, D9 y D10 controlan los actuadores (humidificador, resistencia, ventilador y bobinas), mientras que D6 se utiliza para la matriz LED.

Interfaz I2C: Los pines A4 (SDA) y A5 (SCL) se destinan a la comunicación con la pantalla LCD 16×2 mediante el protocolo I2C, simplificando el cableado y permitiendo futuras expansiones con otros periféricos compatibles.

Aislamiento y Protección: Los módulos de relé de 1 canal aíslan el circuito de potencia (120 V y 12 V) del circuito de control de 5 V, garantizando la seguridad del microcontrolador y del usuario. Además, se recomienda integrar diodos *flyback* y fusibles de protección en las líneas de corriente continua para proteger los componentes en caso de sobrecarga o inversión de polaridad.

3.2.3. Diseño Físico Principal

La cámara de ambiente controlado constituye el núcleo físico del sistema experimental, diseñada para alojar los sensores de medición y los actuadores ambientales que permiten la caracterización de dispositivos bajo condiciones controladas. El sistema posee dimensiones de 25 cm × 25 cm × 25 cm, construido en acero inoxidable para asegurar la resistencia térmica, durabilidad y aislamiento del entorno exterior, estas dimensiones se definen por el tamaño de la resistencia de cuarzo y de la matriz LED, ya que se requiere el espacio suficiente para que ambos actuadores tengan un funcionamiento adecuado. Además, se selecciona un volumen reducido para lograr un control más rápido de las variables internas.

Una de sus caras está fabricada en vidrio templado transparente, lo que permite la observación directa del interior durante las pruebas sin comprometer la estanqueidad del sistema. En la cara opuesta al vidrio se dispone un orificio cuadrado de 12 cm × 12 cm, sobre el cual se fija un ventilador axial de 12 V, encargado de la extracción de aire caliente y exceso de humedad generados por los actuadores internos. Este flujo de aire controlado garantiza la estabilidad de la temperatura y la humedad relativa dentro del sistema.

En el interior se ubican los sensores KY-001, KY-015, KY-018, KY-003 y KY-024, distribuidos a la mitad de altura de la cámara para captar mediciones representativas de cada variable física. Los actuadores; la resistencia de cuarzo, el humidificador ultrasónico, la matriz LED 16×16 y las bobinas de Helmholtz, se fijan mediante soportes aislantes que evitan interferencias térmicas o electromagnéticas entre ellos.

La resistencia de cuarzo se instala en la base interna, en orientación diagonal, para favorecer la distribución homogénea del calor por convección natural. El humidificador ultrasónico se posiciona lateralmente para dispersar el vapor hacia el centro del sistema, mientras que la matriz LED se ubica en el techo interior, garantizando una iluminación uniforme sobre la superficie de prueba. Las bobinas de Helmholtz se colocan externamente, enfrentadas en los laterales del sistema, de modo que el campo magnético uniforme atraviese el volumen de prueba sin obstáculos mecánicos.

El Arduino UNO R3, los módulos de relé y la fuente de alimentación de 12V DC se montan en el exterior del sistema. De este modo, solo las conexiones de señal y potencia necesarias ingresan al interior mediante pasacables, preservando la integridad del sistema.

Esta configuración estructural asegura:

- La protección física de los componentes frente a condensación o corrosión.
- La estabilidad térmica y lumínica durante las pruebas de calibración.

- Un mantenimiento sencillo, gracias a la tapa frontal de vidrio desmontable.
- La seguridad eléctrica, al mantener las líneas de potencia fuera del sistema principal.

3.2.4. Montaje Final

En esta etapa se integraron todos los subsistemas diseñados previamente, consolidando la cámara de ambiente controlado como un sistema funcional y robusto. El proceso de ensamblaje se realizó de forma progresiva, garantizando la correcta disposición mecánica de los actuadores, sensores y módulos electrónicos, así como la seguridad eléctrica y la hermeticidad.

La estructura principal, construida en acero inoxidable con una cara frontal de vidrio templado, ofrece alta resistencia mecánica, aislamiento térmico y facilidad de limpieza. El interior alberga la matriz LED WS2812B en el techo, la resistencia de cuarzo en posición diagonal sobre la base, el ventilador extractor alineado al orificio posterior de 12×12 cm y los humidificadores ultrasónicos, todos dispuestos estratégicamente para optimizar la distribución térmica y del flujo de aire. Los sensores KY-001 KY-015 y KY-018 se ubicaron en puntos representativos del volumen de aire, con el fin de obtener mediciones estables y reproducibles.

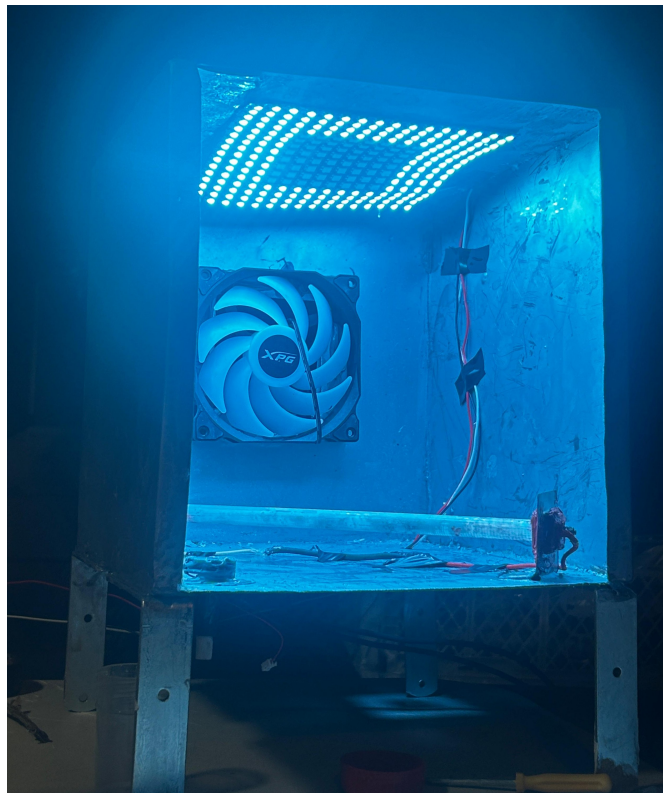


Figura 3.6. Inicio del montaje de los actuadores principales dentro del sistema: resistencia de cuarzo, ventilador extractor y matriz LED.

Posteriormente, se realizaron las pruebas iniciales de funcionamiento para verificar la correcta respuesta de los actuadores bajo control del microcontrolador. En esta etapa se validó el encendido y apagado de la resistencia, el funcionamiento de los humidificadores y la iluminación progresiva de la matriz LED según los niveles de prueba definidos en el software.



Figura 3.7. Pruebas de activación de los actuadores controlados por el microcontrolador Arduino durante la etapa de validación funcional.

Una vez verificado el correcto desempeño de los sistemas internos, se procedió al sellado frontal mediante la fijación del vidrio templado con silicón de alta temperatura. Este paso fue esencial para asegurar la hermeticidad y permitir la observación directa del interior durante los pruebas experimentales.

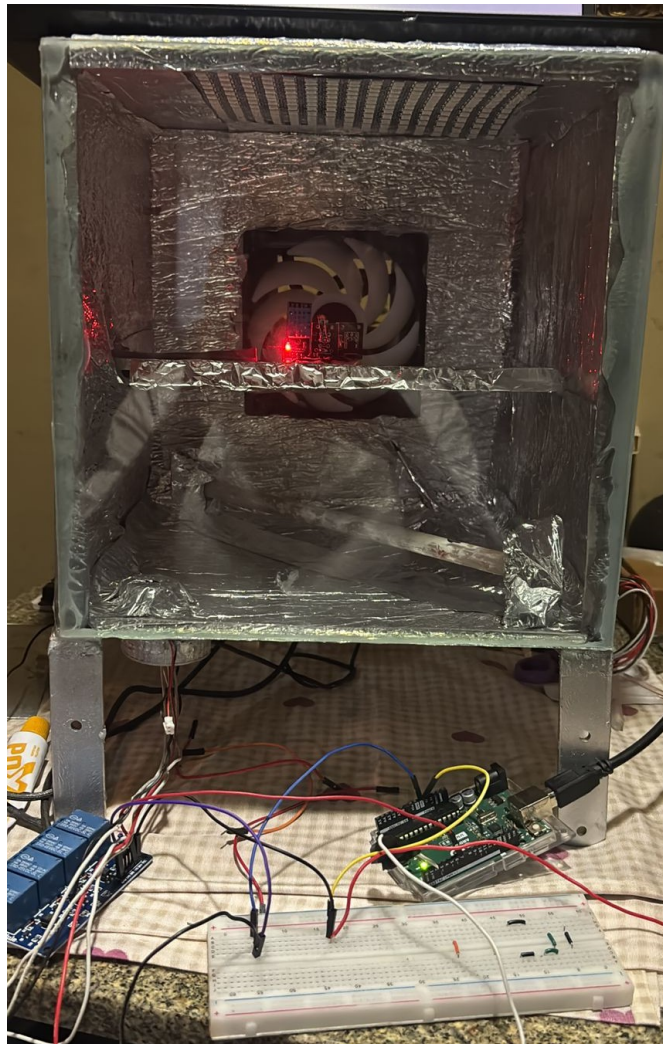


Figura 3.8. Colocación y sellado del vidrio frontal, garantizando la hermeticidad y permitiendo la visualización interna durante las pruebas.

Finalmente, se completó la instalación de los módulos electrónicos externos, incluyendo la placa Arduino UNO, los relés y la pantalla LCD 16×2 con interfaz I2C. Las conexiones fueron organizadas con canaletas, terminales aisladas y etiquetado de cables, resultando en un montaje limpio, seguro y funcional. El sistema completo permitió alcanzar rangos de 25–80 C en temperatura, 20–100 % en humedad relativa y 10–100 % en intensidad luminosa, validando la efectividad del diseño propuesto.

El resultado final evidencia un montaje ordenado, resistente y funcional, alineado con los objetivos del proyecto y apto para futuras fases de mejora y calibración experimental.

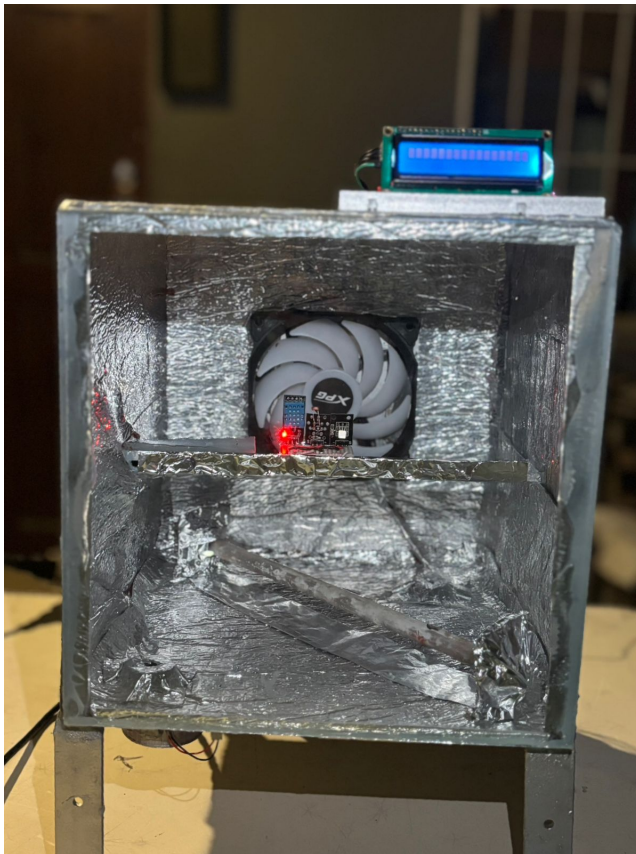


Figura 3.9. Vista general del sistema ensamblado.

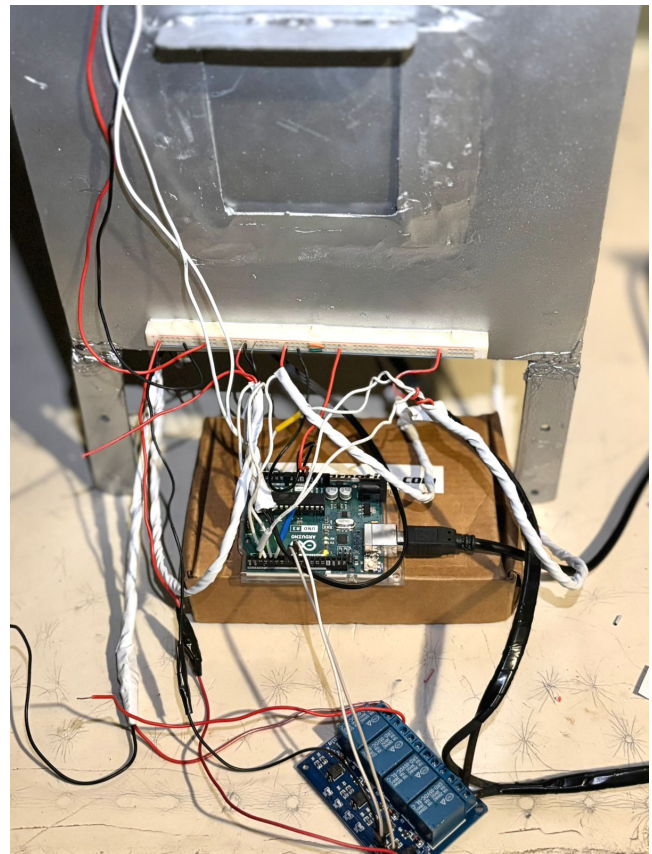


Figura 3.10. Detalle del cableado y disposición final de los módulos electrónicos.

3.3. Programación y Software Implementado

El sistema desarrollado cuenta con dos componentes principales de software: el firmware del microcontrolador Arduino UNO R3, encargado del control en tiempo real de los actuadores y la lectura de los sensores, y el software de procesamiento y análisis de datos realizado mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel.

El firmware del microcontrolador fue implementado en el entorno de desarrollo Arduino IDE, utilizando el lenguaje C/C++ con bibliotecas específicas para cada módulo empleado. El código se estructura en rutinas independientes que gestionan la lectura, el control y la comunicación de los distintos elementos del sistema, donde la distribución de pines usados por el sistema se muestra en [3.5](#)

3.3.1. Diagramas de bloques de la solución

La solución propuesta para la caracterización de sensores dentro de una cámara de ambiente controlado se puede representar mediante dos niveles de diagramas de bloques: un

diagrama de primer nivel que muestra la vista general del sistema y un **diagrama de segundo nivel** que detalla el flujo interno de pruebas a los sensores.

Diagrama de primer nivel

El diagrama de primer nivel [3.11](#) representa la estructura general del sistema dentro de la cámara de ambiente controlado. Un microcontrolador es el núcleo del sistema y se encarga de recibir datos de sensores de referencia confiables, así como de visualizar la información en una pantalla LCD.

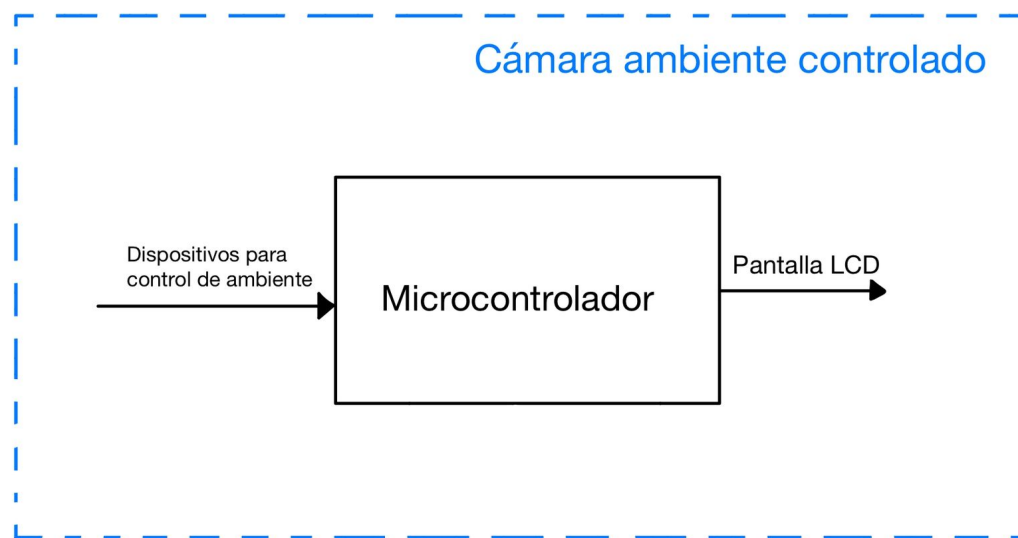


Figura 3.11. Diagrama de bloques de primer nivel.

En esta etapa, el propósito principal es mantener y verificar que las condiciones ambientales, como temperatura, humedad, luz, campo magnético e intensidad de luz o bien, dentro de la cámara estén en rangos esperados y pueden ser controladas, lo cual es fundamental para garantizar la validez de las pruebas a realizar posteriormente.

Diagrama de segundo nivel

El diagrama de segundo nivel descompone el proceso interno de caracterización de sensores. Una vez que el ambiente está estabilizado, se conectan los sensores que se desean evaluar. Estos son gestionados también por el microcontrolador, el cual compara sus respuestas con las condiciones conocidas proporcionadas por los sensores referencia.

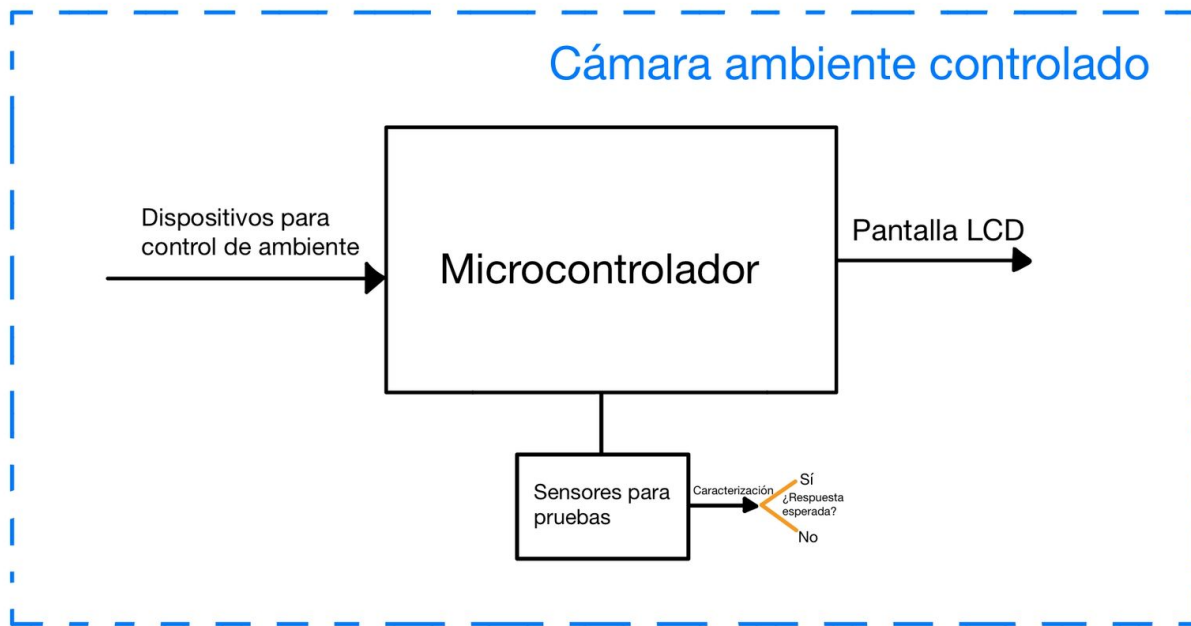


Figura 3.12. Diagrama de bloques de segundo nivel.

Durante este proceso, el microcontrolador analiza si la salida del sensor bajo prueba coincide con la respuesta esperada. Si la respuesta es válida, se considera que el sensor está caracterizado correctamente. En caso contrario, el sensor puede ser descartado o calibrado nuevamente.

Este flujo permite estandarizar y automatizar la verificación funcional de sensores bajo condiciones reproducibles, facilitando su uso posterior en entornos académicos o industriales.

3.4. Lógica para Control de Temperatura

3.4.1. Bibliotecas Utilizadas en el Control de Temperatura

Para la implementación del control de temperatura se utilizaron cuatro Bibliotecas principales, orientadas tanto a la adquisición de datos del sensor digital DS18B20 (módulo KY-001) como a la visualización de la información en la pantalla LCD. A continuación se describen brevemente:

- `OneWire.h`: implementa el protocolo de comunicación *One-Wire*, utilizado por el sensor DS18B20. Esta Biblioteca permite establecer el bus de datos en un único pin digital (D2) y gestionar el envío y recepción de tramas entre el microcontrolador y el sensor.
- `DallasTemperature.h`: se construye sobre la Biblioteca `OneWire.h` y proporciona una interfaz de alto nivel para trabajar con sensores de la familia DS18B20. Ofrece funciones

como `requestTemperatures()` y `getTempCByIndex()`, que permiten obtener directamente la temperatura en grados Celsius sin manejar los detalles internos del protocolo.

- `Wire.h`: biblioteca estándar de Arduino para la comunicación mediante el bus I²C. En este proyecto se utiliza como capa de bajo nivel para la comunicación entre el Arduino UNO R3 y la pantalla LCD.
- `LiquidCrystal_I2C.h`: facilita el control de la pantalla LCD 16×2 a través de la interfaz I²C (dirección 0x27). Permite inicializar el display, posicionar el cursor con `setCursor()` y mostrar mensajes que indican el estado del proceso de calentamiento y enfriamiento.

3.4.2. Control de Temperatura mediante el Sensor KY-001

El control térmico de la cámara se implementa con el sensor digital KY-001 (DS18B20) sobre bus *One-Wire* conectado al pin D2 del Arduino UNO R3, empleando las Bibliotecas `OneWire.h` y `DallasTemperature.h`. La visualización se realiza en una LCD 16×2 con interfaz I²C (Bibliotecas `Wire.h` y `LiquidCrystal_I2C.h`). Los actuadores son una resistencia de cuarzo (D7) y un ventilador extractor (D8) comandados por un módulo de relés activo en nivel LOW.

Setpoints, bandas y criterios de control

Se definen cinco setpoints térmicos: 30, 40, 50, 60 y 70 C. Cada nivel se considera alcanzado sólo si la temperatura permanece 30 s dentro de una banda estrecha $\pm 2^\circ\text{C}$ sin accionar relés (criterio de estabilidad). Para suavizar las lecturas se aplica una media móvil de ventana 5. La lógica incorpora: (i) *histéresis* para evitar *chattering*, (ii) *retención mínima* de 2 s por relé y (iii) exclusión mutua (nunca calentador y ventilador simultáneamente).

```
float setpoints[] = {30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0};
const int NUM_STEPS = sizeof(setpoints) / sizeof(setpoints[0]);

// Muestreo, bandas e hist resis
const unsigned long SAMPLE_INTERVAL_MS = 1000;
const float BAND_C = 2.0; // banda fina 2 C
const float MAX_ERROR_C = 5.0; // error m ximo aceptable
const float COOL_MARGIN_C = 1.5; // sobrepaso que fuerza ventilaci n
const float COOL_HYST_C = 0.5; // hist resis para apagar ventilador

// Permanencia m nima estable en setpoint
const unsigned long HOLD_TIME_MS = 30000;

// Retenci n m nima de rel s (evita parpadeo)
const unsigned long MIN_RELAY_TIME_MS = 2000;
```

Figura 3.13. Setpoints y parámetros coherentes con relés activos en LOW.

Adquisición robusta y manejo seguro de fallas

La lectura se filtra y, si el KY-001 se desconecta, el sistema apaga ambos relés, informa en LCD y entra en estado seguro, como se muestra en [3.14](#)

```
float filteredTemp() {
  sensors.requestTemperatures();
  float t = sensors.getTempCByIndex(0);
  if (t == DEVICE_DISCONNECTED_C) return DEVICE_DISCONNECTED_C;
  // Media móvil (ventana 5) ya preinicializada en setup()
  tempBuf[bufIdx] = t;
  bufIdx = (bufIdx + 1) % FILTER_WINDOW;
  int n = bufFilled ? FILTER_WINDOW : bufIdx;
  float acc = 0; for (int i = 0; i < n; ++i) acc += tempBuf[i];
  return acc / n;
}
```

Figura 3.14. Lectura filtrada y seguridad ante desconexión.

Lazo por bandas con histéresis y retención mínima

La decisión de actuadores prioriza enfriar cuando hay sobrepaso y respeta retención mínima. El avance de etapa ocurre tras 30 s estables dentro de la banda:

```
bool wantHeater=false, wantFan=false;

// 1) Enfriar si temp > SP + margen
if (tempC > sp + COOL_MARGIN_C) {
  wantFan = true;           // forzar extracción
  wantHeater = false;
  holding = false;
}
```

Finalización segura del ciclo

Al completar los cinco setpoints, se entra en enfriamiento con ventilador hasta ≈ 38 C, y luego se detiene todo:

Registro CSV trazable para análisis

Se registra *Tiempo_s*, *Temp_C*, *Heater*, *Fan*, *Setpoint_C*, *Step*, *Holding_s*. Este formato permite analizar *sobreimpulso*, tiempos de subida y estabilidad en Excel.

```

}
// 2) Calentar si temp < SP - banda
else if (tempC < sp - BAND_C) {
    wantHeater = true;
    wantFan = false;
    holding = false;
}
// 3) Dentro de banda fina: mantener estado con hist resis
else {
    if (fanCmd && tempC > sp + COOL_HYST_C) wantFan = true;
    if (heaterCmd && tempC < sp - COOL_HYST_C) wantHeater = true;
}

// Aplicar exclusión + retención mínima por rel
applyRelays(wantHeater, wantFan);

// Temporizador de estabilidad
float absErr = fabs(tempC - sp);
bool inTight = (absErr <= BAND_C);
bool okErr = (absErr <= MAX_ERROR_C);

if (inTight && okErr && !fanCmd && !heaterCmd) {
    if (!holding) { holding = true; holdStart = now; }
} else {
    holding = false;
}

if (holding && (now - holdStart) >= HOLD_TIME_MS) {
    holding = false; currentStep++; // siguiente SP
    applyRelays(false, false); // pausa limpia
    lcd.clear(); lcd.print("SP 30s OK; Avanza");
    delay(800);
}

```

Figura 3.15. Control con exclusión, histéresis y avance temporal.

3.5. Lógica para el Control de Humedad

3.5.1. Bibliotecas Utilizadas

El firmware encargado del control de temperatura y humedad en la cámara de ambiente controlado fue implementado en Arduino IDE y se sustenta en la utilización de la biblioteca `DHT.h`, responsable de gestionar la comunicación con el sensor digital DHT11 incluido en el módulo KY-015. Esta Biblioteca abstrae la temporización interna del protocolo propietario del sensor, permitiendo acceder de forma directa a funciones como `readTemperature()` y `readHumidity()`.

Dado que en esta versión del sistema no se emplean periféricos I²C como pantallas LCD, las Bibliotecas `Wire.h` y `LiquidCrystal_I2C.h` ya no forman parte del código actualizado. Esto simplifica la estructura del firmware y reduce el tiempo de ejecución asociado al manejo de dispositivos externos, dejando el procesamiento centrado en la máquina de estados y en los actuadores de control ambiental.

En conjunto, estas herramientas permiten un manejo confiable del sensor KY-015 y una implementación más eficiente y robusta de la lógica de control de humedad y temperatura.

```

if (currentStep >= NUM_STEPS) {
  bool wantFan = (tempC > 38.0 + COOL_MARGIN_C);
  applyRelays(false, wantFan); // nunca ambos a la vez
  showLCD(tempC, setpoints[NUM_STEPS-1], "FIN/COOL");
  // ... (registro CSV) ...
  return;
}

```

Figura 3.16. Cierre seguro: enfriamiento y parada.

```

Serial.println("Tiempo_s,Temp_C,Heater,Fan,Setpoint_C,Step,Holding_s");
Serial.print(now/1000.0,1); Serial.print(",");
Serial.print(tempC,2); Serial.print(",");
Serial.print(heaterCmd?1:0); Serial.print(",");
Serial.print(fanCmd?1:0); Serial.print(",");
Serial.print(sp); Serial.print(",");
Serial.print(currentStep); Serial.print(",");
Serial.println(holding ? (now-holdStart)/1000UL : 0);

```

Figura 3.17. Encabezado y línea de registro CSV.

3.5.2. Adquisición de Datos del Sensor KY-015

El módulo KY-015, basado en el sensor digital DHT11, es el elemento encargado de medir tanto la temperatura como la humedad relativa dentro de la cámara. Su comunicación es establecida a través del pin digital D5 del microcontrolador y se gestiona exclusivamente mediante la Biblioteca DHT.h.

El sistema realiza lecturas periódicas cada 2 segundos, validando la integridad de los valores obtenidos. En caso de fallas de comunicación, la lectura se descarta para prevenir decisiones erróneas en el proceso de control. El siguiente fragmento muestra el esquema general de adquisición:

```

float h = dht.readHumidity();
float t = dht.readTemperature();

if (isnan(h) || isnan(t)) {
  return; // No usar valores inv lidos
}

```

Figura 3.18. Lectura del sensor KY-015.

Esta rutina asegura que sólo valores correctos alimenten la máquina de estados del sistema.

3.5.3. Arquitectura de Control Basada en Máquina de Estados

El comportamiento del sistema se organiza mediante una máquina de estados finitos, lo que permite dividir el proceso ambiental en fases claramente definidas. Esta estructura mejora la legibilidad del código, facilita la depuración y garantiza que cada etapa opere bajo condiciones estrictamente controladas.

Los estados principales son:

1. **Calentamiento a 40 C:** se activa exclusivamente la resistencia de cuarzo hasta alcanzar la temperatura objetivo.
2. **Espera de estabilización (90 s):** todos los actuadores permanecen apagados para permitir que la cámara se estabilice térmicamente.
3. **Incremento de humedad:** se emplea control ON/OFF de los humidificadores para alcanzar un rango alrededor del setpoint de humedad.
4. **Estabilización de humedad:** el sistema mantiene la humedad dentro de la banda definida durante 60 s continuos.
5. **Finalización del ciclo:** todo el sistema se apaga y únicamente se continúa registrando datos por puerto serie.

Esta estructura permite un control progresivo y reproducible de las condiciones ambientales internas.

3.5.4. Control de Actuadores

El sistema incorpora tres actuadores:

- **Resistencia de cuarzo (D7)**, encargada del incremento térmico.
- **Ventilador (D8)**, usado únicamente en etapas donde se requiera evitar sobrecalentamientos, aunque en esta versión permanece apagado tras superar los 40 C.
- **Dos humidificadores ultrasónicos ACEBOTT (D4 y D13)**, empleados para ajustar la humedad relativa.

Los módulos de relé utilizados para la resistencia y el ventilador poseen lógica *activo en bajo*, mientras que los humidificadores operan con nivel lógico *alto* para encendido. La encapsulación en funciones permite un control más limpio y seguro:

```
void encenderHumidificadores() {
    digitalWrite(humidifier1Pin, HIGH);
    digitalWrite(humidifier2Pin, HIGH);
}

void apagarResistenciaYVentilador() {
    digitalWrite(heaterRelayPin, HIGH); // OFF
    digitalWrite(fanRelayPin, HIGH); // OFF
}
```

Figura 3.19. Control básico de actuadores.

3.5.5. Lógica de Control de Humedad y Estabilidad

A diferencia de la versión anterior basada en escalonamiento por saltos de 10 %, esta implementación utiliza un **setpoint único** con una **banda de histéresis** simétrica definida como:

$$[\text{setpointRH} - \text{bandRH}, \text{setpointRH} + \text{bandRH}]$$

Por defecto:

$$\text{setpointRH} = 70\%, \quad \text{bandRH} = \pm 3\%$$

La fase de estabilidad requiere mantener la humedad dentro de ese rango durante al menos 60 s continuos, asegurando así que el ambiente interno ha alcanzado una condición completamente estable y medible.

```
if (h >= lowerLimit && h <= upperLimit) {
  if (!inRange) {
    inRange = true;
    inRangeStartTime = now;
  }
} else {
  inRange = false;
}

if (inRange && now - inRangeStartTime >= requiredStableTime) {
  estadoActual = ESTADO_FINALIZADO;
}
```

Figura 3.20. Verificación de estabilidad por 60 s.

Esta lógica garantiza que las mediciones posteriores correspondan a condiciones reales de equilibrio térmico-hídrico, crucial para experimentos de caracterización de sensores.

3.5.6. Descripción Completa del Ciclo Operativo

El flujo final llevado a cabo por el sistema es el siguiente:

1. Se eleva la temperatura hasta 40 C activando únicamente la resistencia.
2. Una vez alcanzados los 40 C, se desactiva todo y se espera 90 s.
3. Se activan los humidificadores bajo control ON/OFF para llevar la humedad al rango alrededor del setpoint.
4. Se mantiene la humedad entre los límites definidos durante 60 s continuos.
5. Todos los actuadores se apagan y el sistema concluye el proceso.

Este algoritmo ofrece un control reproducible, estable y adecuado para ciclos de prueba en ambientes controlados, particularmente para caracterización de sensores que requieren condiciones muy precisas durante intervalos definidos.

3.5.7. Registro y Procesamiento de Datos en Excel

Durante toda la operación, los valores de temperatura, humedad, etapa de proceso y objetivo de humedad se registran en formato CSV mediante la función `logData()`. Los datos son exportados a Microsoft Excel para su posterior análisis y graficación.

```
Serial.println("millis_ms,Temp_C,Humedad_RH,Etapa,target_RH");
Serial.print(millis());
Serial.print(',');
Serial.print(t, 2);
Serial.print(',');
Serial.print(h, 2);
Serial.print(',');
Serial.print(etapa);
Serial.print(',');
Serial.println(targetRH, 2);
```

Figura 3.21. Generación del archivo CSV para análisis.

De esta forma, es posible realizar un seguimiento temporal de la evolución de la humedad y la temperatura, verificando el comportamiento de cada fase de control.

3.5.8. Visualización en Pantalla LCD

El sistema incluye una pantalla LCD de 16×2 caracteres con interfaz I²C (dirección 0x27), la cual permite visualizar en tiempo real los valores de temperatura, humedad y la etapa actual del proceso.

```
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T:");
lcd.print(t, 1);
lcd.print("C H:");
lcd.print(h, 0);
lcd.print("%");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("E3 Mant RH");
```

Figura 3.22. Actualización de la pantalla LCD.

3.6. Lógica para Control de intensidad lumínica

Bibliotecas Utilizadas en el Módulo de Iluminación

En este apartado se emplean las siguientes Bibliotecas:

- `Adafruit_NeoPixel.h`: permite el control individual de cada LED de la matriz WS2812B utilizando un único pin digital (D6). Proporciona funciones para establecer el color y actualizar el estado de todos los píxeles.

- `Wire.h`: biblioteca estándar para la comunicación I²C, utilizada como capa base para la pantalla LCD.
- `LiquidCrystal_I2C.h`: gestiona la pantalla LCD 16×2 con interfaz I²C (dirección 0x27), permitiendo mostrar el número de LEDs encendidos y la lectura del sensor KY-018.

El encabezado del código correspondiente a este módulo se muestra en la siguiente la figura 3.23:

```
#include <Adafruit_NeoPixel.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

Figura 3.23. Inclusión de Bibliotecas para el módulo de iluminación.

3.6.1. Configuración de la Matriz LED y del Sensor KY-018

La matriz LED se conecta al pin digital D6, mientras que el sensor de luz KY-018 se conecta a la entrada analógica A2. Se define una matriz de 16×16 píxeles (256 en total), y se inicializa el objeto `Adafruit_NeoPixel` con el formato de color GRB y una frecuencia de 800 kHz:

```
#define PIN 6 // pin de datos para la matriz D6
#define NUMPIXELS 256 // 16 x 16
#define WIDTH 16
#define HEIGHT 16

#define LDR_PIN A2 // KY-018 conectado a pin anal gico A2
int value = 0;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

Adafruit_NeoPixel matrix(NUMPIXELS, PIN, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
```

Figura 3.24. Definición de la matriz LED y el sensor KY-018.

Para facilitar el encendido secuencial de los LEDs, se define un arreglo `pixelOrder[]` que almacena el orden en que se irán activando los píxeles. La función `XY()` implementa el mapeo de coordenadas (x,y) al índice lineal considerando el cableado en forma serpenteante de la matriz:

3.6.2. Definición de Escalones de Iluminación

El experimento se basa en encender un número creciente de LEDs en la matriz, siguiendo potencias de dos, con el propósito de observar cómo varía la señal del sensor KY-018 con distintos niveles de iluminación. Para ello se define el siguiente arreglo de cantidades:

En cada paso del experimento, se enciende exactamente `n` LEDs (según el valor de `ledCounts[step]`) utilizando la función `showNLEDs()`, que escribe el color deseado únicamente en los primeros `n` píxeles del arreglo `pixelOrder[]`:

```

int XY(int x, int y) {
    if (y % 2 == 0) {
        return y * WIDTH + x;
    } else {
        return y * WIDTH + (WIDTH - 1 - x);
    }
}

void initPixelOrder() {
    int idx = 0;
    for (int y = 0; y < HEIGHT; y++) {
        for (int x = 0; x < WIDTH; x++) {
            pixelOrder[idx++] = XY(x, y);
        }
    }
}

```

Figura 3.25. Mapeo de coordenadas y orden de encendido de los píxeles.

```

const int ledCounts[] = {1, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256};
const int numSteps = sizeof(ledCounts) / sizeof(ledCounts[0]);

```

Figura 3.26. Escalones de cantidad de LEDs encendidos.

3.6.3. Procedimiento de Medición y Registro de Datos

El bucle principal del programa recorre todos los escalones de iluminación definidos en `ledCounts[]`. Para cada valor de `nLED`, el sistema:

1. Actualiza la pantalla LCD indicando el número de LEDs encendidos y el número de paso.
2. Enciende la cantidad correspondiente de LEDs en la matriz.
3. Mantiene ese nivel de iluminación durante 15 s.
4. Durante ese intervalo, realiza una lectura del sensor KY-018 cada segundo y registra los datos en formato CSV.

El la figura [3.28](#) se ilustra la lógica del ciclo de medición:

Al finalizar todos los escalones, se mantiene la matriz completamente encendida (256 LEDs activos), registrando de manera continua la lectura del sensor KY-018 para observar el comportamiento en iluminación máxima.

3.6.4. Registro CSV trazable para análisis de datos

Desde el inicio del programa se define un encabezado en el puerto serial con el formato de los datos que se van a registrar:

Cada línea posterior contiene el tiempo en segundos, el número de LEDs encendidos y la lectura analógica del sensor KY-018. Estos datos se copian desde el Monitor Serial y se guardan en un archivo con extensión `.csv`, que puede ser abierto directamente en Microsoft Excel para generar gráficas del tipo:

```
void showNLEDs(int n, uint32 t color) {  
    matrix.clear();  
    if (n > NUMPIXELS) n = NUMPIXELS;  
    for (int i = 0; i < n; i++) {  
        matrix.setPixelColor(pixelOrder[i], color);  
    }  
    matrix.show();  
}
```

Figura 3.27. Encendido de un número específico de LEDs.

- Lectura del LDR en función del tiempo para cada escalón de iluminación.
- Variación de la señal del sensor en función del número de LEDs encendidos.

De esta manera, el módulo de iluminación permite caracterizar experimentalmente la respuesta del sensor de luz y evaluar la distribución de iluminación proporcionada por la matriz LED dentro de la cámara.

3.7. Limitaciones encontradas

En el desarrollo del presente proyecto de diseño e implementación de una cámara de ambiente controlado, se identificaron diversas limitaciones técnicas y operativas que condicionaron el alcance final del prototipo. Entre ellas destaca la no implementación de un sistema de control de corriente constante para las bobinas de Helmholtz, así como la necesidad de ubicar dichas bobinas fuera del sistema principal de la cámara debido a las condiciones térmicas y de humedad. A continuación, se detallan los principales factores que motivaron estas decisiones y sus implicaciones técnicas.

3.7.1. No implementación del control de corriente constante en las bobinas de Helmholtz

Durante la fase de diseño inicial se contempló la posibilidad de implementar un lazo de control de corriente constante mediante un microcontrolador Arduino y etapas de potencia dedicadas. No obstante, esta funcionalidad fue descartada en la versión final del prototipo por razones de complejidad técnica, tiempo disponible, costo económico y alineamiento con los objetivos principales del proyecto.

Complejidad técnica del sistema

El desarrollo de un control de corriente constante para las bobinas de Helmholtz requiere la integración de múltiples subsistemas electrónicos que garantizan la estabilidad, precisión y seguridad del sistema. Entre ellos destacan:

```

showNLEDs(nLED, matrix.Color(255, 255, 255));

unsigned long startTime = millis();
while (millis() - startTime < 15000) {
    value = analogRead(LDR_PIN);

    // Registro en formato CSV: Tiempo_s,NLED,LDR
    float t_s = millis() / 1000.0;
    Serial.print(t_s, 1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(nLED);
    Serial.print(",");
    Serial.println(value);

    // Mostrar datos en la LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Paso ");
    lcd.print(step + 1);
    lcd.print("/");
    lcd.print(numSteps);

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("LEDs:");
    lcd.print(nLED);
    lcd.print(" LDR:");
    lcd.print(value);

    delay(1000);
}
}

```

Figura 3.28. Ciclo de medición por escalones de LEDs.

```
Serial.println("Tiempo_s,NLED,LDR");
```

Figura 3.29. Encabezado CSV para registro de datos.

- Etapas de potencia capaces de suministrar corrientes elevadas de manera estable (drivers de corriente constante, convertidores DC-DC CC/CV, disipadores térmicos y protecciones contra sobrecorriente).
- Circuitos de realimentación precisos que midan la corriente efectiva a través de sensores de efecto Hall o shunts de baja resistencia, con el respectivo acondicionamiento de señal analógica.
- Algoritmos de control (P, PI o PID) implementados en el microcontrolador para mantener la corriente deseada frente a variaciones de carga o temperatura.

La implementación, simulación y depuración de estos subsistemas demanda una inversión considerable de tiempo y recursos, además de instrumentación de prueba especializada. Dada la naturaleza multidisciplinaria del proyecto y su carácter de prototipo académico, se consideró que incorporar un sistema de control de corriente constante agregaba un nivel de complejidad no compatible con los plazos establecidos.

Restricciones de tiempo y alcance

El prototipo final integra control térmico, regulación de humedad, iluminación programable y adquisición de datos, todos estos sistemas interconectados. Añadir un sistema de control de corriente implicaba:

- Una fase de investigación adicional en electrónica de potencia.
- Desarrollo de módulos experimentales previos antes de obtener una versión funcional.
- Calibraciones con instrumentos especializados (por ejemplo, un gaussímetro).

Debido al calendario académico y la necesidad de entregar un sistema funcional y validado, se priorizó garantizar la estabilidad y desempeño de las variables ambientales principales. En consecuencia, el control de corriente se postergó como una línea de mejora futura del sistema.

Aspectos económicos y disponibilidad de componentes

El control de corriente constante requiere componentes de precisión y alta capacidad que no siempre están disponibles localmente ni resultan económicamente viables, tales como:

- Drivers de corriente constante con entrada analógica o PWM.
- Sensores de corriente de bajo ruido.
- Fuentes de alimentación con margen térmico adecuado.

A lo anterior se suman los costos de disipación térmica, protección eléctrica y equipos de medición para la validación del campo magnético. Por razones presupuestarias, se optó por mantener una arquitectura más sencilla, suficiente para demostrar el concepto funcional de la cámara.

Priorización e innovación del proyecto

El eje principal de innovación del trabajo se centra en el diseño e integración de una cámara de ambiente controlado para la caracterización de sensores, con gestión de temperatura, humedad e iluminación. Si bien la adición de un sistema magnético con control de corriente representaría un valor agregado, su desarrollo completo constituiría un subproyecto independiente.

Por ello, se decidió dejar las bobinas de Helmholtz preparadas para su futura conexión a un sistema de control más avanzado, pero sin incluir su implementación en la presente versión del prototipo.

3.7.2. Ubicación externa de las bobinas de Helmholtz

Otra limitación importante identificada fue la imposibilidad de instalar las bobinas de Helmholtz dentro del sistema de la cámara de ambiente controlado. Las condiciones internas de operación como, temperaturas que pueden superar los 40 C y niveles de humedad relativa de hasta 80 % generan un entorno poco adecuado para el funcionamiento seguro de bobinas electromagnéticas.

Riesgos térmicos y eléctricos

El calor constante dentro del sistema puede degradar el esmalte aislante del alambre de cobre, favoreciendo cortocircuitos entre espiras o variaciones indeseadas en la resistencia del conductor. Asimismo, la alta humedad relativa incrementa el riesgo de condensación y corrosión de los terminales, lo que podría afectar la uniformidad del campo magnético y representar un peligro eléctrico.

Justificación técnica de la ubicación externa

Considerando lo anterior, se determinó que la ubicación más apropiada para las bobinas era el exterior de la cámara. Esto permitiría mantenerlas en un entorno seco y con ventilación natural, evitando la exposición a calor y humedad excesiva. Además, su instalación externa facilita el mantenimiento, la conexión a fuentes de alimentación independientes y la eventual implementación futura de un sistema de control de corriente.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1. Resultados del Control de Intensidad Lumínica

4.1.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-018

En esta etapa se evaluó la respuesta del sensor fotoresistivo KY-018 frente a diferentes niveles de iluminación generados por la matriz LED WS2812B. El objetivo fue determinar la relación entre la cantidad de LEDs encendidos y el valor analógico leído por el sensor, expresado en unidades de 10 bits (0–1023).

A continuación, se presentan las imágenes correspondientes al proceso de prueba y caracterización del sensor de referencia, donde se observa la disposición del sistema y la medición de respuesta ante variaciones progresivas de iluminación.

Una vez registradas las mediciones, los datos obtenidos se exportaron a Excel para su procesamiento y graficación. La Figura 4.3 muestra la curva experimental generada, donde se aprecia el comportamiento decreciente de la resistencia del LDR conforme aumenta la cantidad de LEDs encendidos.



Figura 4.1. Configuración final de la prueba de iluminación con el sensor KY-018.

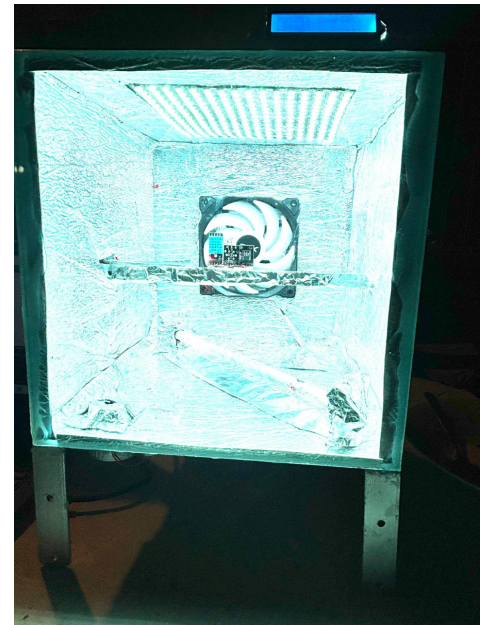


Figura 4.2. Caracterización del sensor KY-018 bajo incremento de luminosidad.



Figura 4.3. Respuesta del sensor KY-018 en función del número de LEDs encendidos.

4.1.2. Datos experimentales

A partir de los datos completos obtenidos durante el prueba, se seleccionaron tres valores promedio representativos por cada nivel de iluminación. En la Tabla [4.1](#) se presenta el resumen

de 24 mediciones experimentales (tres por cada nivel de encendido: 1, 4, 8, 16, 32, 64, 128 y 256 LEDs).

Tabla 4.1. Valores experimentales del sensor KY-018 para distintos niveles de iluminación.

N° LEDs encendidos	Tiempo (s)	Lectura LDR	Promedio
1	4.7	483	479
1	8.9	478	
1	13.0	474	
4	21.3	272	274
4	25.5	274	
4	29.6	275	
8	38.0	195	197
8	44.2	197	
8	48.4	199	
16	54.6	144	145
16	60.8	146	
16	65.0	146	
32	71.3	93	94
32	77.5	93	
32	83.7	94	
64	87.9	45	48
64	90.0	48	
64	96.2	49	
128	104.5	41	41
128	111.8	41	
128	117.0	41	
256	121.2	39	39
256	131.6	38	
256	139.9	39	

Los resultados obtenidos muestran una clara relación inversa entre la cantidad de LEDs encendidos y la lectura analógica del sensor KY-018. Al aumentar la intensidad luminosa, la resistencia del LDR disminuye, generando valores de lectura más bajos en el convertidor A/D del microcontrolador.

En la región de baja iluminación (1 a 8 LEDs), la respuesta presenta una variación pronunciada, reduciéndose de aproximadamente 480 unidades a 195. A partir de 16 LEDs, la curva se estabiliza gradualmente hasta valores cercanos a 40 unidades para la iluminación máxima (256 LEDs), lo que evidencia una respuesta no lineal característica de los fotorresistores de sulfuro de cadmio (CdS).

El comportamiento obtenido confirma que el sensor KY-018 posee una alta sensibilidad en rangos de baja intensidad luminosa, pero una saturación progresiva conforme la luz incidente

aumenta. Esta respuesta es adecuada para aplicaciones de detección cualitativa o control proporcional de luminosidad, aunque no es ideal para mediciones precisas de iluminancia sin calibración previa. El módulo de control lumínico implementado permitió caracterizar correctamente el comportamiento del sensor de referencia, validando la funcionalidad de la matriz LED WS2812B.

4.2. Resultados del Módulo de Control de Temperatura

4.2.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-001

El módulo de control térmico fue evaluado para verificar la capacidad del sistema de elevar y mantener la temperatura interna de la cámara, utilizando la resistencia de cuarzo como elemento calefactor y el sensor digital KY-001 (DS18B20) como referencia de medición. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas de humedad y con registro continuo de datos a través del puerto serial.

En la Figura 4.4 a la Figura 4.8 se muestran las distintas etapas del proceso experimental: inicio del calentamiento, incremento sostenido de temperatura, estabilización térmica y fase de enfriamiento controlado. Durante la prueba, el microcontrolador mantuvo el registro de tiempo y temperatura en formato CSV para su posterior análisis.



Figura 4.4. Inicio del proceso de calentamiento; activación de la resistencia de cuarzo.



Figura 4.5. Evolución de la temperatura durante la prueba.



Figura 4.6. Fin del proceso.



Figura 4.7. Aproximación al punto de equilibrio térmico.

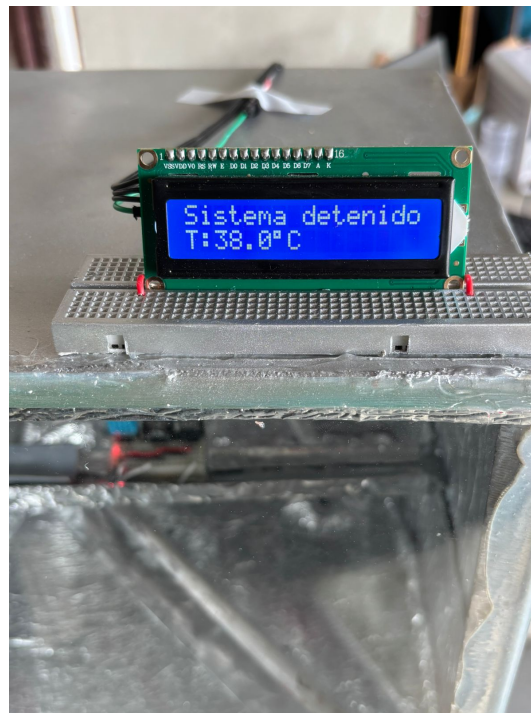


Figura 4.8. Etapa final de estabilización térmica del sistema.

Los valores obtenidos fueron exportados a *Microsoft Excel* para su análisis y graficación. En la Figura [4.9](#) se observa la evolución de la temperatura en función del tiempo, mostrando una

tendencia ascendente hasta alcanzar el punto máximo, seguido de una estabilización gradual.

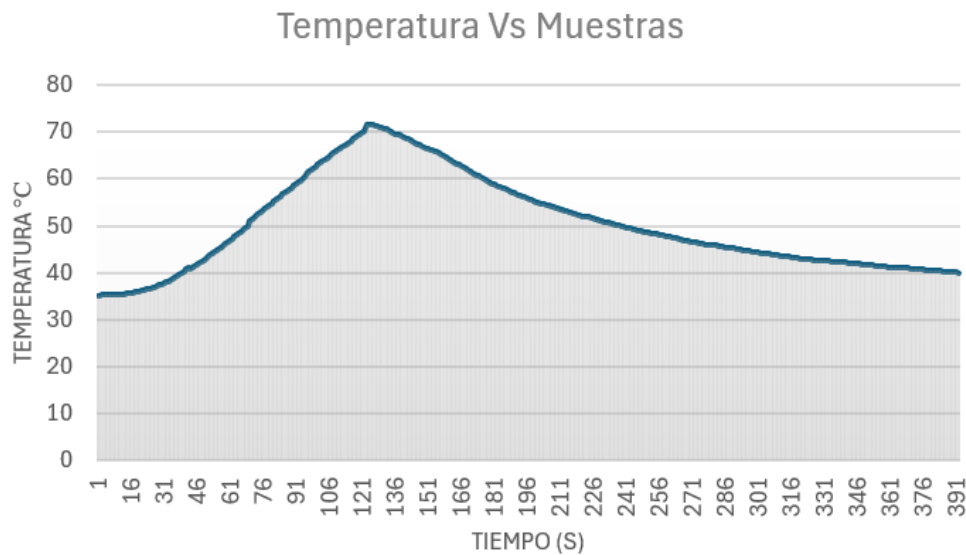


Figura 4.9. Gráfica en Excel: comportamiento térmico del sensor KY-001 durante el proceso de calentamiento y estabilización.

4.2.2. Datos experimentales

La Tabla 4.2 resume un conjunto de veinticuatro valores representativos obtenidos durante las distintas etapas del experimento, abarcando de forma integral las fases de calentamiento inicial, incremento sostenido y posterior estabilización térmica del sistema. Estos datos reflejan la evolución progresiva de la temperatura en la cámara de ambiente controlado, evidenciando los comportamientos característicos del proceso térmico desde el momento en que se activa la fuente de calor hasta alcanzar un estado constante. En la primera fase, se observa una rápida respuesta del sistema ante la activación de la resistencia, mientras que en la etapa intermedia se manifiesta un incremento más moderado asociado a la inercia térmica del aire confinado. Finalmente, durante la fase de estabilización, los valores tienden a converger hacia el setpoint establecido, confirmando la efectividad del control implementado y la capacidad del sistema para mantener condiciones térmicas constantes dentro de un margen de error reducido.

Tabla 4.2. Valores experimentales del sensor KY-001 durante la prueba.

Tiempo (s)	Temperatura (C)
4.2	35.19
10.0	35.25
18.0	35.50
25.0	36.06
33.0	37.19
41.0	38.94
49.8	41.44
55.8	43.38
61.8	45.44
67.8	47.69
73.8	50.00
80.6	52.56
87.6	55.19
94.6	57.81
101.6	60.31
110.3	63.38
119.3	66.50
128.3	69.44
136.2	71.75
145.2	70.37
154.2	68.19
165.2	65.94
175.2	63.25
185.2	60.63

4.2.3. Análisis y caracterización del sensor KY-001

El sensor KY-001 mostró un comportamiento térmico altamente estable y una respuesta progresiva ante los cambios de temperatura inducidos por la resistencia de cuarzo. La curva experimental evidencia tres zonas características:

- **Zona de respuesta inicial (35–45 C):** el sensor presenta una pendiente casi lineal, con una ganancia promedio de 0.17 C/s. En este rango, la respuesta es rápida y precisa, sin retardos apreciables entre el aumento de la temperatura real y la lectura registrada.
- **Zona de aumento sostenido (45–70 C):** la pendiente se mantiene constante, mostrando buena linealidad en todo el rango operativo del DS18B20. La precisión reportada por el sensor (± 0.5 C) se mantiene dentro de los límites especificados por el fabricante, confirmando la fiabilidad del control.

- **Zona de saturación térmica (70–72 C):** se alcanza el equilibrio térmico y la temperatura se estabiliza; a partir de este punto se inicia la fase de descenso por acción del ventilador. La estabilidad en la lectura evidencia la baja deriva del sensor frente a variaciones térmicas prolongadas.

Durante el ciclo completo, el sensor midió un rango total de 36.5 C, desde 35.19 C hasta 71.75 C, con una variación suave y continua, sin fluctuaciones ni saltos erráticos.

4.2.4. Análisis de resultados del lazo térmico por setpoints

La respuesta del lazo por bandas mostró el comportamiento esperado: ascenso con el calentador activo, entrada a *banda fina* ($\pm 2^\circ\text{C}$) y permanencia estable durante $\sim 30\text{ s}$ sin actuadores, seguida de sobrepasos acotados que disparan la extracción cuando se supera el margen de enfriamiento (1.5 C por encima del setpoint). En el setpoint de 40 C se observa una meseta limpia (Heater=0, Fan=0) próxima a $40,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$ y, cuando la temperatura sobrepasa $\sim 41,5^\circ\text{C}$, entra la ventilación (Fan=1), evitando oscilaciones. Patrones equivalentes se aprecian en los setpoints de 50, 60 y 70 C.

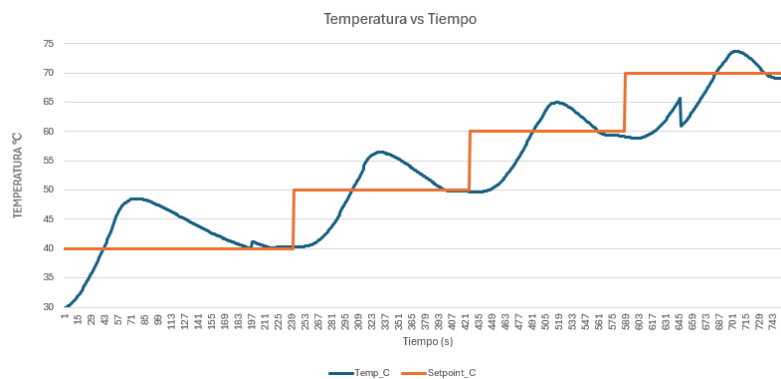


Figura 4.10. Ciclo térmico completo: ascensos por etapas.

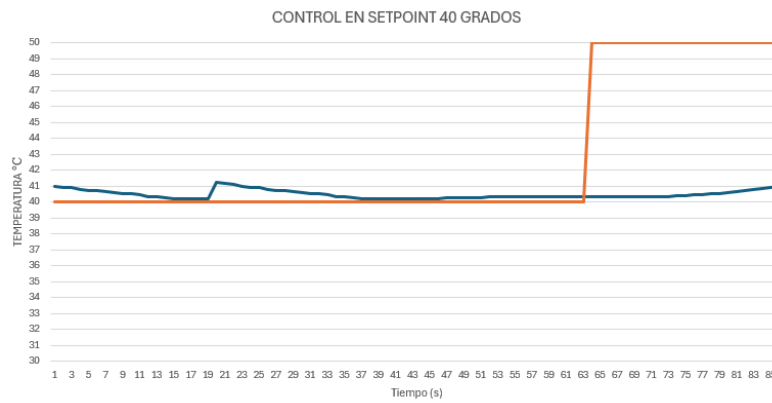


Figura 4.11. Detalle del setpoint de 40 C: tramo estable (Heater=0, Fan=0) y posterior entrada de ventilación.

```

316.5,40.25,0,0,40.00,1,4
317.5,40.21,0,0,40.00,1,5
318.5,40.20,0,0,40.00,1,6
319.5,40.19,0,0,40.00,1,7
320.5,40.19,0,0,40.00,1,8
321.5,40.19,0,0,40.00,1,9
322.5,40.19,0,0,40.00,1,10
323.5,40.20,0,0,40.00,1,11
324.5,40.21,0,0,40.00,1,12
325.5,40.22,0,0,40.00,1,13
326.5,40.24,0,0,40.00,1,14
327.5,40.25,0,0,40.00,1,15
328.5,40.26,0,0,40.00,1,16
329.5,40.28,0,0,40.00,1,17
330.5,40.29,0,0,40.00,1,18
331.5,40.30,0,0,40.00,1,19
332.5,40.31,0,0,40.00,1,20
333.5,40.31,0,0,40.00,1,21
334.5,40.31,0,0,40.00,1,22
335.5,40.31,0,0,40.00,1,23
336.5,40.31,0,0,40.00,1,24
337.5,40.31,0,0,40.00,1,25

```

Figura 4.12. Captura de setpoint estable

Tabla 4.3. Muestras en régimen *estable* (Heater=0, Fan=0) por setpoint.

Temp_C	Heater	Fan	Setpoint_C
39.76	0	0	40
40.13	0	0	40
40.50	0	0	40
40.86	0	0	40
41.21	0	0	40
40.25	0	0	40
40.21	0	0	40
40.20	0	0	40
40.19	0	0	40
40.31	0	0	40
49.51	0	0	50
49.84	0	0	50
50.16	0	0	50
50.49	0	0	50
50.81	0	0	50
51.11	0	0	50
49.99	0	0	50
49.94	0	0	50
49.90	0	0	50
49.86	0	0	50
60.39	0	0	60
60.24	0	0	60
60.09	0	0	60
59.95	0	0	60
59.83	0	0	60
69.96	0	0	70
70.21	0	0	70
70.46	0	0	70
70.70	0	0	70
70.93	0	0	70

El sensor KY-001 se caracteriza por su precisión, estabilidad y linealidad en el rango operativo de la cámara (25–80 C). Su comportamiento reproducible lo hace idóneo para la caracterización de sistemas térmicos y para el control en tiempo real de la temperatura dentro de entornos ambientales cerrados. El conjunto sensor–resistencia–ventilador implementado mostró un desempeño coherente con los modelos térmicos teóricos y validó la funcionalidad del lazo de control propuesto en este proyecto.

4.3. Resultados del Módulo de Control de Humedad

4.3.1. Pruebas y caracterización del sensor KY-015

El módulo de control de humedad fue sometido a una prueba completa para evaluar la capacidad del sistema de disminuir y posteriormente aumentar la humedad relativa dentro de la cámara. El sensor KY-015 (basado en el DHT11/DHT22) se utilizó para registrar los cambios en la humedad conforme se activaron la resistencia de cuarzo, los ventiladores y los humidificadores ultrasónicos.

Las Figuras siguientes presentan las etapas principales del proceso experimental: deshumidificación inicial, punto mínimo de 30 % de humedad relativa y recuperación hasta saturación (100 %). En cada caso, se observa la correcta interacción entre los actuadores y la estabilidad de las lecturas obtenidas.

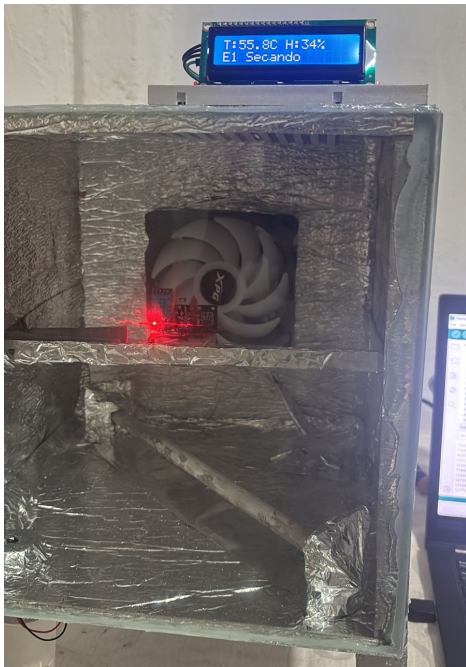


Figura 4.13. Inicio de la prueba: activación de la resistencia y descenso progresivo de la humedad.



Figura 4.14. Etapa de secado, hasta estabilidad de humedad

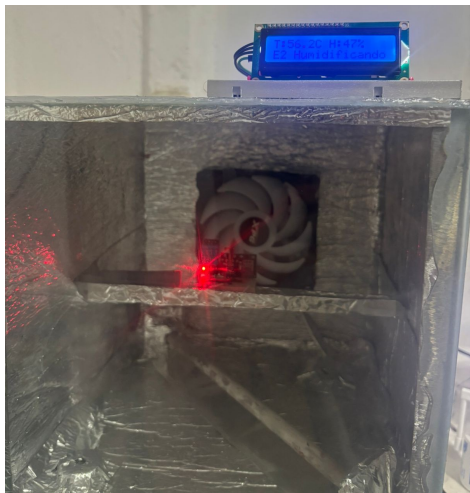


Figura 4.15. Inicio de etapa humificado



Figura 4.16. Etapa por terminar, humedad relativa al 80 %

La Figura 4.17 muestra la curva completa obtenida en *Microsoft Excel*, donde se aprecia el comportamiento dinámico de la humedad a lo largo del prueba. La Figura 4.18 presenta una ampliación de la fase de incremento, correspondiente a la acción de los humidificadores hasta alcanzar la saturación ambiental.

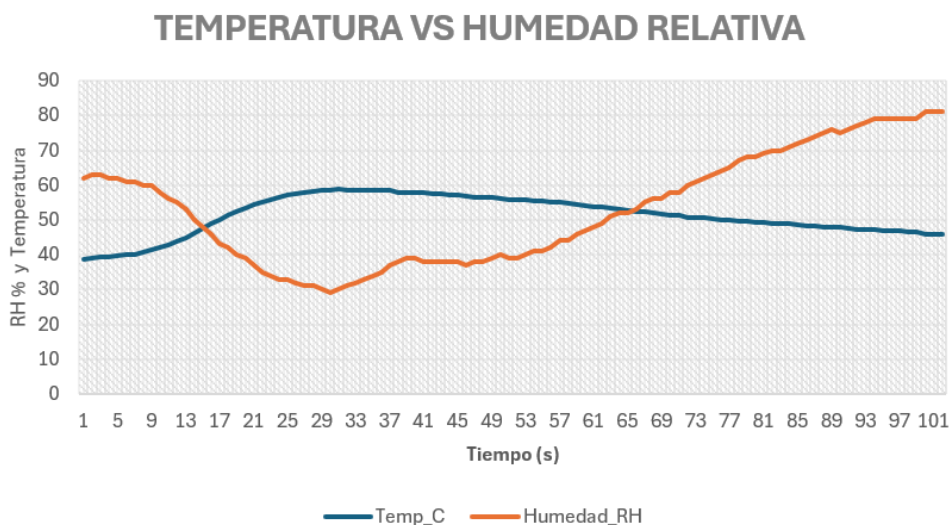


Figura 4.17. Gráfica completa del ciclo de control de humedad relativa dentro de la cámara.

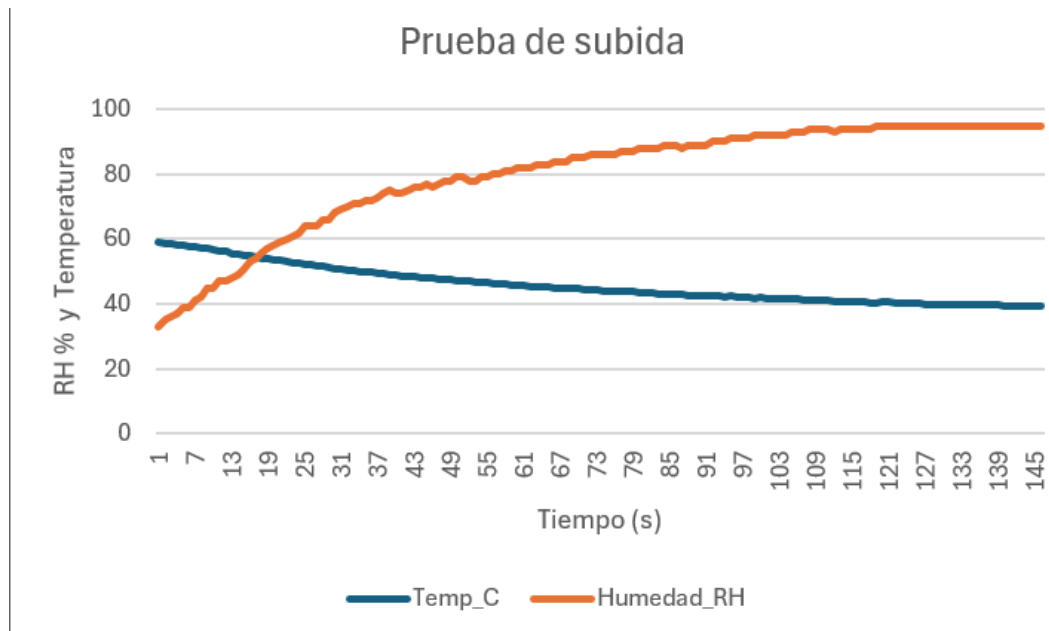


Figura 4.18. Detalle del incremento de humedad durante la fase de humidificación en segunda prueba.

4.3.2. Datos experimentales

La Tabla 4.4 resume 24 valores experimentales, abarcando la etapa de deshumidificación, el punto mínimo y el aumento progresivo de la humedad relativa.

Tabla 4.4. Datos experimentales de temperatura y humedad.

Temperatura (C)	Humedad relativa (%)
38.8	62
41.4	60
43.9	55
46.3	50
48.9	46
51.3	42
53.4	39
55.2	35
57.0	33
58.7	29
58.5	35
56.8	38
55.7	40
54.8	44
53.7	49
52.5	55
51.2	58
50.5	62
49.7	67
48.9	70
48.2	74
47.4	77
46.9	79
45.9	81

4.3.3. Análisis y caracterización del sensor KY-015

Los resultados experimentales evidencian una relación inversa inicial entre la temperatura y la humedad relativa, seguida por un aumento controlado al activar los humidificadores. Durante la primera etapa (38–59 C), la humedad descendió desde 62 % hasta aproximadamente 30 %, producto del incremento térmico y la reducción del punto de rocío. Posteriormente, al iniciar la humidificación, se observó un aumento sostenido hasta alcanzar un máximo de 81 %, completando el ciclo (30 → 40 → 50 → 60 → 70 → 80 %).

El sensor KY-015 mostró un comportamiento estable, con buena sensibilidad ante cambios de humedad. Se identifican tres zonas características:

- **Zona de secado (62–30 % RH):** el sensor presentó una respuesta lineal decreciente con una tasa media de 1.1 % RH/C, reflejando su adecuada correlación con el aumento de temperatura.

- **Zona de transición (30–50 % RH):** se evidenció una respuesta casi instantánea a los primeros pulsos de humedad generados por los humidificadores ultrasónicos.
- **Zona de saturación (50–80 % RH):** la variación se vuelve más lenta, debido a la reducción del gradiente higrométrico; el sensor mantiene estabilidad con oscilaciones menores a ± 2 %.

El comportamiento del sensor KY-015 fue coherente con sus especificaciones técnicas (rango 20–90 % RH, precisión ± 5 %), y su lectura se mantuvo libre de saltos espurios o ruido eléctrico. La comparación con la temperatura simultánea mostró que el sensor responde de forma consistente al fenómeno de condensación y evaporación dentro del sistema.

El módulo de control de humedad demostró un desempeño funcional completo, logrando reducir la humedad relativa hasta 30 % y aumentarla controladamente hasta 81 %. El sensor KY-015 evidenció buena sensibilidad y estabilidad, confirmando su idoneidad para aplicaciones de monitoreo ambiental en sistemas cerrados y su adecuada integración con el control.

4.3.4. Tercera prueba con humedades de setpoint de 40 %, 67 % y 100 %

La prueba comprendió tres etapas claramente diferenciadas: i) reducción inicial de la humedad hasta un primer setpoint bajo, ii) estabilización alrededor de un nivel intermedio del 67 %, y iii) elevación final hasta un ambiente saturado cercano al 100 % de humedad relativa. Los datos fueron obtenidos mediante el sensor digital KY-015 y registrados cada segundo en el monitor serial del microcontrolador.

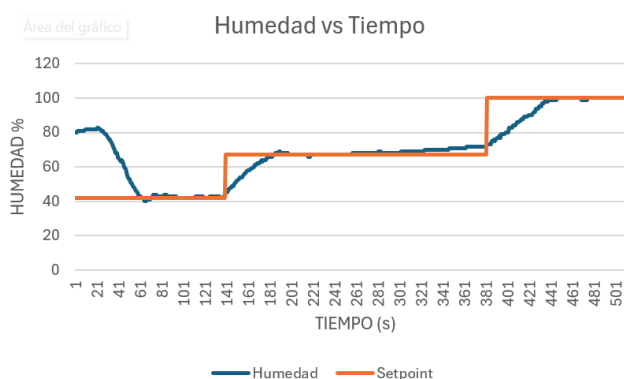


Figura 4.19. Respuesta completa de la humedad relativa respecto al tiempo, mostrando los tres setpoints programados.

La Figura [4.19](#) evidencia la evolución integral de la humedad relativa durante la prueba. En la primera sección del proceso (0–140 s), la humedad desciende desde valores iniciales cercanos al 80 % hasta alcanzar el setpoint bajo de 42 %. Este descenso ocurre de manera progresiva y sin oscilaciones abruptas, comportamiento atribuible al incremento controlado de la temperatura interna mediante la resistencia de cuarzo, la cual favorece la disminución de humedad por reducción de la humedad relativa del aire caliente.

Posteriormente, a partir del segundo 140, el sistema inicia el ascenso hacia un setpoint intermedio de 67 %. El aumento es suave y continuo, activando los humidificadores únicamente cuando la señal se encuentra por debajo de la banda de histéresis definida. Esta transición se realiza sin sobrepasos significativos, lo que confirma la estabilidad del control ON/OFF y la adecuada respuesta dinámica de los humidificadores ultrasónicos.

Finalmente, en torno al segundo 382, se activa el último setpoint fijado en 100 %. La cámara incrementa la humedad de forma estable hasta alcanzar valores de saturación, manteniendo una progresión controlada y sin variaciones bruscas. El comportamiento observado demuestra que el sistema es capaz de recorrer todo el rango operativo del sensor (40–100 %RH) de forma continua y repetible.

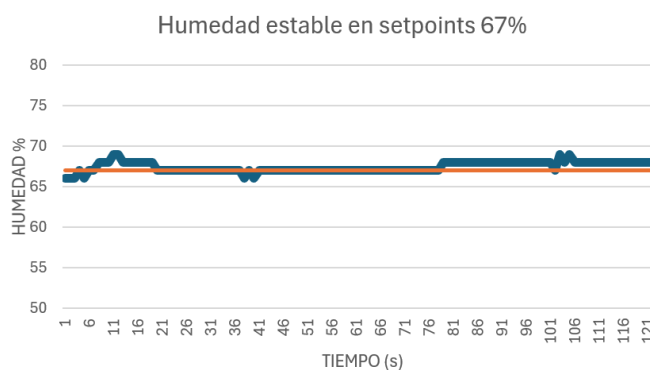


Figura 4.20. Detalle del comportamiento de la humedad alrededor del setpoint de 67 %, mostrando un error menor o igual a 1 %.

La Figura 4.20 muestra un recorte de los datos correspondiente a la estabilización en torno al setpoint de 67 %. Este tramo es crítico para evaluar el desempeño del sistema, pues representa una condición de equilibrio térmico e higrométrico. Los resultados muestran que la humedad permanece dentro de la banda de 66–68 %, lo que corresponde a un error máximo de ± 1 %. Además, esta condición de estabilidad se mantiene durante más de 120 s continuos, superando ampliamente el criterio de 60 s establecido en la metodología.

Este comportamiento indica que la banda de control seleccionada y el mecanismo de histéresis logran evitar oscilaciones indeseadas, permitiendo que la señal converja y permanezca en el rango objetivo sin activaciones excesivas de los humidificadores. En consecuencia, se confirma que el sistema es capaz de garantizar un ambiente estable, requisito esencial para caracterizar sensores sensibles a la humedad.

```
45.00,67.00  
45.00,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.80,67.00  
44.90,67.00  
44.90,67.00  
44.80,67.00  
44.80,67.00  
44.80,67.00  
44.80,67.00  
44.70,67.00  
44.70,67.00  
44.70,67.00  
44.60,67.00  
44.60,67.00  
44.60,67.00  
44.60,67.00  
44.60,67.00  
44.60,67.00  
44.50,67.00
```

Figura 4.21. Fragmento del registro generado por el monitor serial de Arduino durante la prueba.

La Figura [4.21](#) muestra un fragmento del registro de datos enviado por el microcontrolador. Cada línea contiene la temperatura y la humedad en formato *CSV*, lo que facilita el análisis posterior en plataformas como Excel, MATLAB o Python. El registro evidencia la consistencia del muestreo, la ausencia de lecturas inválidas y la correcta transición entre los distintos setpoints.

En conjunto, los resultados obtenidos validan experimentalmente el funcionamiento del algoritmo de control implementado. Se observa una adecuada capacidad de seguimiento de setpoints, transiciones suaves entre niveles y una estabilidad sobresaliente en el rango intermedio. Esto confirma que el sistema es apto para generar condiciones ambientales controladas y reproducibles, esenciales para procesos de caracterización de sensores y estudios experimentales en ambientes de humedad regulada.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Conclusiones

El desarrollo de la cámara de ambiente controlado permitió consolidar un sistema experimental, capaz de regular y monitorear las principales variables ambientales requeridas para la caracterización de sensores. El prototipo final integra regulación térmica, ajuste de humedad, iluminación programable y registro automático de datos, logrando un desempeño estable y completamente reproducible.

Los resultados experimentales confirmaron un regulación preciso de cada variable. En particular, la humedad relativa pudo regularse con éxito en los setpoints de 40 %, 67 % y 100 %, manteniendo un máximo del 1 %, incluso durante intervalos prolongados de estabilización. De igual forma, la temperatura se controló adecuadamente en los setpoints de 40, 50, 60 y 70 C, alcanzando condiciones dentro de los márgenes requeridos para pruebas de laboratorio. En cuanto a iluminación, el sistema permitió modular la intensidad luminosa en distintos rangos según la necesidad del experimento, demostrando versatilidad en la generación de estímulos ópticos.

El diseño estructural de la cámara, construido en acero inoxidable y con un panel frontal de vidrio templado, proporcionó durabilidad, resistencia mecánica y adecuado aislamiento térmico, incluso en condiciones de alta humedad. Asimismo, la integración de un control mediante un microcontrolador Arduino y la visualización de variables en una pantalla LCD facilitaron una operación intuitiva, segura y de alta confiabilidad.

El prototipo tiene potencial para evolucionar hacia un instrumento de investigación más avanzado. Su capacidad de mantener condiciones ambientales controladas con alta estabilidad lo convierte en una herramienta valiosa para estudios de calibración, pruebas de durabilidad y validación de sensores bajo condiciones reproducibles.

5.2. Recomendaciones

El prototipo de cámara de ambiente controlado desarrollado en este trabajo Final de Graduación constituye una base sólida para futuras mejoras técnicas y funcionales. A continuación, se presentan siete recomendaciones orientadas a incrementar la precisión, ampliar las capacidades de medición, optimizar la gestión de datos y fortalecer la autonomía del sistema.

1. **Mejora de la precisión de medición:** Se recomienda sustituir sensores básicos como el KY-015 por modelos de mayor exactitud (SHT31, BME280 o DHT22), además de implementar rutinas de calibración cruzada y filtros digitales para reducir el ruido de las lecturas.
2. **Integración de más variables ambientales:** Incorporar sensores adicionales, tales como presión barométrica, concentración de CO₂ y compuestos volátiles (TVOC), permitiría caracterizar sensores bajo condiciones ambientales más completas.
3. **Gestión avanzada de datos:** Se sugiere el uso de una tarjeta SD para almacenamiento local y la estructuración de los registros en formatos CSV o JSON, facilitando el análisis en Excel, MATLAB o Python. Una interfaz gráfica en PC o web mejoraría la visualización en tiempo real.
4. **Escalabilidad física:** Diseñar versiones alternativas del prototipo, una compacta y otra ampliada, posibilitaría su adaptación a distintos tipos de sensores o configuraciones experimentales, manteniendo una arquitectura modular y fácilmente replicable.
5. **Conectividad e integración IoT:** La incorporación de módulos de comunicación inalámbrica (ESP32 o ESP8266) permitiría enviar datos a plataformas en la nube (Firebase, ThingSpeak), habilitando el monitoreo y control remoto de las variables internas.
6. **Modularidad y mantenimiento:** Se propone estructurar el sistema por módulos independientes (temperatura, humedad, iluminación), con conectores estandarizados y un diagnóstico automático al inicio del proceso, facilitando la actualización y reparación del equipo.

Estas recomendaciones orientan el desarrollo futuro hacia un sistema más preciso, autónomo y versátil, capaz de integrarse en aplicaciones de investigación, calibración y validación de sensores bajo condiciones ambientales controladas.

Bibliografía

- [1] Tecnológico de Costa Rica (2024). “Escuela de Ingeniería Electrónica”, tec.ac.cr, En línea: <https://www.tec.ac.cr/escuela-ingenieria-electronica>
- [2] Umaña, J (2016). “Historia, ciencia y tecnología, protagonistas en el 40 aniversario de la Escuela de Ingeniería Electrónica”, tec.ac.cr, En línea: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2016/08/09/historia-ciencia-tecnologia-protagonistas-40-aniversario-escuela-ingenieria-electronica>
- [3] Equinlab SAC (2024). “Cámara de Calibración en Temperatura y Humedad FITOCAL 1500 ECP20”, En línea: <https://www.equinlabsac.com/content/c%C3%A1mara-de-calibraci%C3%B3n-en-temperatura-y-humedad-fitocal-1500-ecp20> . Accedido: 20-jul-2025.
- [4] Murillo Bermúdez, H. A. (2024). “Desarrollo de sensores de temperatura de tipo bulbo seco, humedad relativa y globo para la inspección del estrés térmico usando técnicas de fabricación de bajo costo”. Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título de Ingeniero en Mantenimiento Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- [5] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Calor y Masa Transferir*, 5th ed. McGraw-Hill, 2015.
- [6] S. A. Carvajal, J. C. Ramos and M. V. Ruiz, “Efecto de la temperatura en la calibración de sensores de humedad capacitivos,” *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 9, no. 1, 2018.
- [7] G. F. Nellis and S. A. Klein, *Introduction to Engineering Heat Transfer*. Cambridge University Press, 2020.
- [8] E. R. Javor and T. Anderson, *Design of a Helmholtz Coil for Low Frequency Magnetic Field Susceptibility Testing*. Naval Undersea Warfare Center, Newport, RI, USA, 2014.
- [9] T. G. Blaney and P. R. Owens, *Calculation of the Magnetic Field Strength in Helmholtz Systems with Two Identical Coils of Square Shape*. National Physical Laboratory, 1995.
- [10] Boyce, P. R. (2014). “Human Factors in Lighting”, 3rd ed., CRC Press.

- [11] Boylestad, R. L. y Nashelsky, L. (2015). "Electronic Devices and Circuit Theory", 11th ed., Pearson Education.
- [12] W. G. Fano, R. Alonso and G. Quintana, "El campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz y su aplicación a la calibración de sondas," *Revista Elektron*, vol. 1, no. 2, pp. 91–96, 2017.
- [13] L. Kotsonis, "What is Sensor Calibration and Why it Matters," *Bootasys Blog*, 2024. En línea: <https://www.botasys.com/post/sensor-calibration>. Accedido: 26-oct-2025.
- [14] S. M. Sawde *et al.*, "Basic Principles of Some Sensors and their Applications," *AIP Advances*, vol. 14, no. 1, 2024. DOI: 10.1063/5.0182236.
- [15] A. B. Martins, J. T. Farinha y A. M. Cardoso, "Calibración y certificación de sensores industriales: una revisión global" en *Proc. Industrial Metrology Conference*, 2020.
- [16] S. Patel *et al.*, "Introduction to Sensors," en *Facilities Management Digital Twin System*, K. Asabere, R. Liu y C. J. Anumba, Eds. Springer, 2024, pp. 67–98.
- [17] Tansun Infrared Heating, "Quartz Heating and How it Works," 2025. En línea: https://www.tansun.com/gb_en/technical/how-quartz-heating-works.html. Accedido: 26-oct-2025.
- [18] Backer AB, "Infrared elements in quartz FQE-K full quartz element with thermocouple," *Technical Specification*, pp. 1–4, 2024. Nota: Industrial datasheet.
- [19] Global Quartz Tube, "Structure of Quartz Heater Elements," 2025. En línea: <https://globalquartztube.com/structure-of-quartz-heater-elements/>. Accedido: 26-oct-2025.
- [20] RecambiosAR, "Resistencia Cuarzo 230 V 450 W T12 L=385 mm," 2025. En línea: <https://www.recambiosar.com/es/product/11959839-resistencia-cuarzo-230v-450w-t12-l%3D385mm%09>. Accedido: 26-oct-2025.
- [21] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman y A. S. Lavine, "Fundamentos de transferencia de calor," 7ª ed., Wiley, 2017.

- [22] Delta Electronics, “Catálogo de Ventiladores Axiales DC 12V – Serie AFB,” 2023. En línea: <https://www.delta-fan.com/Download/Spec/AFB.pdf>. Accedido: 26-oct-2025.
- [23] Honeywell Inc., “Sistemas de enfriamiento y ventilación DC: principios y aplicaciones,” 2022. En línea: <https://sps.honeywell.com>. Accedido: 26-oct-2025.
- [24] Worldsemi. “*WS2812B Intelligent control LED integrated light source — Datasheet.*” 2020. Disponible en línea: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [25] Texas Instruments. “*TLC5940 16-Channel, 12-Bit PWM, Constant-Current LED Driver — Datasheet.*” 2017. Disponible en línea: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5940.pdf> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [26] Electronica Steren de Costa Rica S.A. “*Ventilador plástico de 2, 12 Vcc.*” 2025. Disponible en línea: https://www.steren.cr/ventilador-plastico-de-2-12-vcc.html?srsltid=AfmBOop4NI5hiaC-6Zk68fUzTgu6iBulR4jTzy_B_HSO-5kg72xC3Fpq [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [27] Solectro Electronics. “*Matriz LED RGB Flexible 16x16 WS2812B direccionable.*” 2025. Disponible en línea: https://solectroshop.com/es/tira-led/36821-matriz-led-rgb-flexible-16x16-ws2812b-direccionable-5905323239135.html?srsltid=AfmBOopUKZzgLfMnfAEzGbzouSDMG_mBaBQW9sfZxa9sHpvsXzbnyszW [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [28] ACEBOTT. “*Módulo humidificador ultrasónico 5 V: Módulo de atomización para proyectos experimentales.*” 2024. Disponible en línea: <https://www.amazon.com/dp/B0DHGR1NC5> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [29] D. Marioli y E. Sardini, “*Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Transducers: Principles and Applications,*” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 100, núm. 2–3, pp. 75–92, 2002. DOI: [10.1016/S0924-4247\(02\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00123-5).
- [30] L. Martínez y P. Gómez. “*Microcontroladores: fundamentos, arquitectura y programación.*” Editorial Alfaomega, 2019.
- [31] J. Arias. “*Sistemas embebidos con microcontroladores.*” Editorial Reverté, 2020.
- [32] S. Mandado y M. Fernández. “*Sistemas electrónicos digitales: fundamentos, análisis y diseño.*” 5ª ed., McGraw-Hill Interamericana, 2018.
- [33] Arduino S.R.L. “*Arduino UNO R3 — Hoja de especificaciones técnicas.*” 2024. Disponible en línea: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> [Accedido: 27 de octubre de 2025].

- [34] W. Bolton. “*Mecatrónica: sistemas de control electrónico en ingeniería.*” 6ª ed., Pearson Educación, 2015.
- [35] J. Flores. “*Automatización industrial: principios, dispositivos y controladores.*” Editorial Marcombo, 2019.
- [36] Songle Relay Co. “*SRD-05VDC-SL-C — Hoja de datos técnica del relé electromecánico.*” 2023. Disponible en línea: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/543458/Songle/SRD-05VDC-SL-C/1> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [37] CRCibernética S.A. “*Módulo Relé 5 V — 1 Canal.*” 2025. Disponible en línea: <https://www.crcibernetica.com/5v-relay-module-1-channel/> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [38] CRCibernética S.A. “*16x2 LCD with I²C (Blue).*” 2025. Disponible en línea: <https://www.crcibernetica.com/16x2-lcd-with-i2c-blue/> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [39] NXP Semiconductors. “*PCF8574/PCF8574A — Remote 8-bit I/O expander for I²C-bus.*” 2021. Disponible en línea: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574.pdf> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [40] R. A. Serway y J. W. Jewett. “*Física para ciencias e ingeniería.*” 9ª ed., Cengage Learning, 2014.
- [41] Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional (Colombia). “*Bobinas de Helmholtz.*” 2025. Disponible en línea: <https://dfi.upn.edu.co/producto/bobinas-de-helmholtz/> [Accedido: 27 de octubre de 2025].
- [42] ArduinoModules.info, “*KY-001 Temperature Sensor Module (DS18B20).*” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://arduinomodules.info/ky-001-temperature-sensor-module/>. [Accedido: 1 de noviembre de 2025].
- [43] ArduinoModules.info. “*KY-015 Temperature and Humidity Sensor Module (DHT11).*” Disponible en línea: <https://arduinomodules.info/ky-015-temperature-and-humidity-sensor-module/> [Accedido: 1 de noviembre de 2025].
- [44] ArduinoModules.info. “*KY-018 Photoresistor Module.*” Disponible en línea: <https://arduinomodules.info/ky-018-photoresistor-module/> [Accedido: 1 de noviembre de 2025].
- [45] ArduinoModules.info. “*KY-003 Hall Magnetic Sensor Module.*” Disponible en línea: <https://arduinomodules.info/ky-003-hall-magnetic-sensor-module/> [Accedido: 1 de noviembre de 2025].