



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Desarrollo e implementación con  
tecnologías libres de un dispositivo  
portátil para evaluar el confort térmico,  
lumínico y acústico en interiores**

## TESIS

Que para obtener el título de

**Ingeniero en Energías Renovables**

## PRESENTA

José Ramón Hernández Aguilar

## TUTOR DE TESIS

Dr. Guillermo Barrios del Valle

**Temixco, Mor., 30 de septiembre de 2025**

**OF/IER/LIER/090/2025**

**ASUNTO:** Notificación de jurado y  
fecha para examen profesional.

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
**DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**  
**P r e s e n t e**

Por medio de la presente le informo que el día martes 30 de septiembre de 2025, a las 10:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, el **C. JOSÉ RAMÓN HERNÁNDEZ AGUILAR**, con número de cuenta 421005114 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación de su trabajo de titulación y examen profesional titulado:

**“Desarrollo e implementación con tecnologías libres de un dispositivo portátil para evaluar el confort térmico, lumínico y acústico en interiores”**

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

**PRESIDENTA:** **DRA. NADIA MARÍA SALGADO HERRERA.**  
**VOCAL:** **DRA. MARÍA ABDELALY RIVERA GÓMEZ.**  
**SECRETARIO:** **DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE.**  
**SUPLENTE:** **DR. GUILLERMO RAMÍREZ ZÚÑIGA.**  
**SUPLENTE:** **DR. DAVID ROBERTO DOMÍNGUEZ LOZOYA**

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e,  
**“Por mi raza hablará el espíritu”**  
Temixco, Mor., a 19 de septiembre de 2025



**Dr. Jorge Alejandro Wong Loya**  
**Coordinador de la LIER**  
**IER-UNAM**

JAWL'mfp.

Priv. Xochicalco s/n,  
Col. Centro,  
62580 Temixco, Morelos, México  
T. 01 (777) 362 00 90  
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

# AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres, Ramón y Martha, gracias por su amor incondicional y por inculcarme tantos valores, como el esfuerzo y la dedicación. Nunca me faltó nada gracias a ustedes. Gracias por apoyarme siempre en todos mis objetivos, por dejarme ser y guiarlo cuando fue necesario. Los amo y siempre estaré agradecido con ustedes.

A mis tíos Ana, Lilia y Lulú, que me han acompañado desde siempre y me han visto crecer, gracias por creer en mí y por estar presentes a lo largo de este camino. Su cariño, motivación y apoyo constante han sido fundamentales, y junto con mis padres han representado un verdadero sostén que me permitió continuar con mis estudios y perseguir mis metas. Las quiero mucho y les agradezco de todo corazón por todo lo que han hecho por mí.

A mi hermana Martha, mi mejor amiga, cómplice y consejera. Gracias por estar siempre a mi lado, en los mejores y peores momentos, por escucharme, enseñarme tanto y darme aliento cuando más lo necesitaba. Has sido un gran motor desde siempre y mi ejemplo a seguir.

A Michelle, por darme tantos momentos hermosos, por tu apoyo, aliento y compañía. Gracias por tanto amor, por dejarme amarte y por la relación tan bella que compartimos. Aprendí tanto de ti y me diste recuerdos muy valiosos. Jamás te voy a olvidar y siempre te guardaré con mucho cariño en mi corazón.

A todas las personas que conocí durante la carrera, fueron parte esencial de este camino. Toda la 10G dejó huella en mí y marcó esta etapa de mi vida, convirtiéndola en una de las mejores que he tenido. Gracias a cada uno de ustedes soy quién soy hoy. Mención especial para Arge, Fer, Pili y Pau, quienes me brindaron su amistad, su apoyo y su compañía en distintos momentos de esta etapa, motivándome siempre a ser mejor persona.

A Pedro, quien además de ser un gran amigo, fue un excelente mentor en el ámbito de la instrumentación. Sin su aportación, este proyecto no se habría concretado de forma tan satisfactoria. Extrañaré las tardes en el laboratorio con pizza y Star Wars.

Y especialmente a Memo, quien más allá de ser mi tutor se ha convertido en un gran amigo. Gracias por impulsarme a seguir aprendiendo, por enseñarme a analizar, buscar y atender los problemas tal como lo haría un ingeniero. Gracias por enseñarme tanto en tan poco tiempo, por motivarme en cada paso que doy y por inspirarme siempre a aspirar a más.

# ABSTRACT

---

This work presents the development of the Temperature, Humidity, Illumination, and Sound Device for Field Campaigns (DTHIS-C), designed to assess thermal, acoustic, and luminous comfort, as well as indoor air quality. The device was built using low-cost components and open-source software platforms, which enables its reproduction and adaptation in comparison with commercial or industrial equipment.

The DTHIS-C integrates sensors to measure key environmental variables: air temperature, radiant temperature, relative humidity, air velocity,  $CO_2$  concentration, illuminance, and sound levels. These sensors were selected and characterized against professional reference instruments, significantly reducing systematic measurement errors. For instance, in air temperature, the initial mean errors of the four thermocouples were reduced by more than 95 % after calibration; in radiant temperature, the mean error was completely eliminated, and in air velocity, the correction exceeded 99 %.

Furthermore, the device connects to an Internet of Things (IoT) platform through ThingsBoard, facilitating real-time visualization and analysis of environmental conditions during measurement campaigns.

When compared with instruments such as the Fluke 975 Airmeter, QUESTemp 36 and Gill Instruments' WindMaster, the DTHIS-C emerges as an accessible and versatile alternative for indoor comfort evaluation, achieving satisfactory performance and demonstrating its utility as a practical tool for environmental monitoring.

# RESUMEN

---

En este trabajo se presenta el desarrollo de un Dispositivo de Temperatura, Humedad, Iluminación y Sonido de Campaña (DTHIS-C), diseñado para evaluar el confort térmico, acústico y lumínico, así como la calidad del aire en espacios interiores. El dispositivo fue construido con componentes de bajo costo y utilizando plataformas de software de código abierto, lo que favorece su reproducción y adaptación frente a equipos comerciales o industriales.

El DTHIS-C integra sensores para medir variables ambientales clave: temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del viento, concentración de  $CO_2$ , iluminancia y niveles de sonido. Estos sensores fueron seleccionados y caracterizados frente a equipos de referencia profesionales, lo que permitió reducir de manera significativa los errores sistemáticos de medición. Por ejemplo, en la temperatura del aire, los errores medios iniciales de los cuatro termopares se redujeron en más de un 95 % después de la calibración; en la temperatura radiante, el error medio se eliminó por completo, y en la velocidad del viento la corrección superó el 99 %.

Además, el dispositivo se conecta a una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) mediante ThingsBoard, lo que facilita la visualización y el análisis en tiempo real de las condiciones ambientales durante las campañas de medición.

En comparación con equipos como el Fluke 975 Airmeter, QUESTemp 36 y WindMaster de Gill Instruments, el DTHIS-C constituye una alternativa accesible para la evaluación de confort en entornos interiores, alcanzando un desempeño satisfactorio y validando su utilidad como herramienta práctica de monitoreo ambiental.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción al confort en espacios interiores</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Justificación . . . . .	2
1.3. Estado del arte . . . . .	2
1.4. Alcances . . . . .	4
1.5. Objetivos . . . . .	5
<b>2. Confort térmico, acústico, lumínico, calidad del aire e implementación del DTHIS-C</b>	<b>6</b>
2.1. Confort térmico . . . . .	6
2.1.1. Variables físicas del confort térmico . . . . .	7
2.2. Confort acústico . . . . .	7
2.2.1. Variables físicas del confort acústico . . . . .	8
2.3. Confort lumínico . . . . .	10
2.3.1. Variables físicas del confort lumínico . . . . .	10
2.4. Calidad del aire . . . . .	11
2.4.1. Variables físicas de la calidad del aire . . . . .	11

2.5. DTHIS-C . . . . .	11
2.5.1. Modelo de confort PMV . . . . .	13
2.5.2. Relevancia del modelo PMV en el DTHIS-C . . . . .	14
<b>3. Diseño y construcción del DTHIS-C</b>	<b>15</b>
3.1. Descripción del dispositivo . . . . .	15
3.1.1. Diseño . . . . .	16
3.1.2. Carcasa . . . . .	18
3.1.3. Ensamblaje . . . . .	20
3.1.4. Lógica de programación . . . . .	21
3.1.5. Tablero interactivo . . . . .	22
3.2. Componentes . . . . .	23
3.2.1. Arduino UNO WiFi Rev2 . . . . .	23
3.2.2. Raspberry Pi 4 Model B . . . . .	24
3.2.3. Temperatura del aire . . . . .	25
3.2.4. Temperatura radiante . . . . .	26
3.2.5. Velocidad del viento . . . . .	28
3.2.6. Humedad relativa y CO <sub>2</sub> . . . . .	29
3.2.7. Sonido . . . . .	30
3.2.8. Iluminancia . . . . .	30
3.3. Repositorio de GitHub . . . . .	31
3.4. Lista de materiales . . . . .	32
<b>4. Calibración y referenciación del DTHIS-C</b>	<b>34</b>
4.1. Metodología experimental . . . . .	34
4.2. Obtención de los datos . . . . .	36
4.3. Temperatura del aire . . . . .	37
4.4. Temperatura radiante . . . . .	43
4.5. Velocidad del viento . . . . .	45
4.6. Humedad relativa y CO <sub>2</sub> . . . . .	49

4.7. Sonido . . . . .	51
4.8. Iluminancia . . . . .	53
<b>5. Conclusiones</b>	<b>55</b>
5.1. Discusión . . . . .	55
5.2. Trabajo a futuro . . . . .	56
5.3. Conclusión general . . . . .	56

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN AL CONFORT EN ESPACIOS INTERIORES

---

El confort en espacios interiores es esencial para garantizar el bienestar, la salud y el desempeño de los ocupantes. Entre los factores que lo determinan se encuentran el confort térmico, acústico, lumínico y la calidad del aire, los cuales influyen directamente en la percepción del entorno y en la calidad de vida. Condiciones inadecuadas, como temperaturas extremas, ruidos excesivos, iluminación deficiente o mala ventilación, pueden generar incomodidad, distracción e incluso afectar la salud a largo plazo.

Estos conceptos se definen con mayor detalle en la Sección 2.1, Sección 2.2, Sección 2.3 y Sección 2.4, que constituyen la base teórica para comprender la importancia de optimizar las condiciones de habitabilidad en los espacios interiores.

### 1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, gran parte de las actividades de la sociedad se desarrollan en espacios interiores como aulas, oficinas y recintos de trabajo. Sin embargo, el diseño y acondicionamiento de estos espacios no siempre consideran de manera adecuada las necesidades de confort de los ocupantes, lo que puede tener repercusiones tanto en su bienestar como en su salud.

Por ejemplo, una iluminación deficiente puede afectar la concentración de los estudiantes en el aula e incrementar el riesgo de problemas visuales. De manera similar, una ventilación inadecuada compromete la calidad del aire interior y puede favorecer la propagación de enfermedades, tal como se evidenció durante la pandemia de COVID-19, donde la ventilación se convirtió en un factor importante de prevención.

A estas condiciones se suman otros factores como temperaturas extremas, humedad inadecuada o niveles elevados de ruido, que no solo generan incomodidad, sino que también disminuyen el desempeño y productividad de las personas. En consecuencia, surge la necesidad de contar con herramientas

accesibles que permitan medir y evaluar las variables ambientales relacionadas con el confort en espacios interiores, de modo que se puedan identificar y corregir deficiencias en el diseño y operación de los espacios.

## 1.2 Justificación

La evaluación del confort en espacios interiores requiere instrumentos capaces de medir de forma precisa variables como temperatura del aire, humedad relativa, calidad del aire, niveles de ruido e iluminación. Sin embargo, los dispositivos disponibles en el mercado suelen tener costos elevados, lo que restringe su acceso para algunas personas, instituciones, e incluso proyectos de pequeña escala. Esta situación genera una limitante para el análisis detallado de las condiciones de habitabilidad en entornos cotidianos como aulas, oficinas y recintos de trabajo.

Frente a esta necesidad, el desarrollo del Dispositivo de Temperatura, Humedad, Iluminación y Sonido de Campaña (DTHIS-C) representa una alternativa viable. Su construcción con componentes de precio accesible y el uso de plataformas de software de código abierto permiten no solo reducir los costos, sino también garantizar su documentación, reproducción y adaptación en diferentes contextos.

El DTHIS-C integra sensores caracterizados frente a dispositivos de referencia profesionales, como el Fluke 975 Airmeter, QUESTemp 36 y WindMaster. Además, su conexión a una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) mediante ThingsBoard posibilita la visualización y análisis de datos en tiempo real, lo que facilita la identificación y corrección de condiciones inadecuadas de confort.

De esta manera, el DTHIS-C aporta una solución accesible para la evaluación de entornos interiores, contribuyendo al diseño de espacios más saludables, confortables y adecuados para el desarrollo de actividades académicas, laborales y sociales.

## 1.3 Estado del arte

El análisis del estado del arte permite identificar los desarrollos académicos más relevantes en torno a dispositivos de monitoreo ambiental y de confort interior. En la Tabla 1.1 se comparan distintos proyectos nacionales e internacionales, en su mayoría tesis, artículos y prototipos a pequeña escala, que han abordado la medición de variables como temperatura, humedad relativa y concentración de  $CO_2$ . Esta comparación pone en evidencia tanto los alcances como las limitaciones de cada iniciativa, y permite destacar el valor agregado que aporta el DTHIS-C frente a estas propuestas.

Tabla 1.1: Comparativa de proyectos de monitoreo ambiental a nivel nacional e internacional.

Proyecto	Institución / Año	Autor(es)	Variables medidas	Tecnologías empleadas	Limitaciones	Comparación con el DTHIS-C
Sistema de monitoreo higrotérmico de espacios arquitectónicos	ITQ, México (2020)	M. P. Bocanegra	T, HR, T superficial	Arduino + microSD	Solo térmico/higro, sin IoT	DTHIS-C añade iluminancia, sonido, $CO_2$ , IoT
Monitores de $CO_2$ para ventilación (COVID-19)	UNAM, México (2022)	G. Barrios et al.	$CO_2$	Sensores NDIR, registro simple	Una sola variable	DTHIS-C amplía confort térmico, lumínico y acústico
Metodología de confort en aulas	PU Javeriana, Colombia (2021)	G. D. Laguarda et al.	T, HR, $CO_2$ , CO, PM	Arduino + sensores MQ y PM	Sin acústica ni iluminación	DTHIS-C incluye confort lumínico y acústico
Monitor flexible de $CO_2$	UTN-CNEA, Argentina (2023)	J. Vorobioff et al.	$CO_2$	Sensores NDIR + software	Focalizado en ventilación	DTHIS-C evalúa múltiples parámetros
AQuality32	UNAL Medellín, Colombia (2024)	D. Pineda-Tobón et al.	$CO_2$ , T, HR, PM	ESP32 + Sensirion + IoT	Solo IAQ, sin acústica ni iluminación	DTHIS-C suma ruido e iluminación
Multisensor IoT de IEQ	Polonia (2024)	A. Szczurek et al.	T, HR, luz, presión, $CO_2$ , VOCs, PM	IoT, microSD, WiFi	Sin ruido ni T radiante	DTHIS-C mide acústica y T radiante
PROMET&O	Politecnico di Torino, Italia (2023)	G. Arcamone et al.	T, HR, $CO_2$ , luz, ruido, PM, formaldehído	Multisensor + tablero IoT	No mide viento ni T radiante	DTHIS-C sí incluye viento y T radiante

Los proyectos revisados reflejan un esfuerzo académico constante por diseñar dispositivos de bajo costo que permitan evaluar distintas dimensiones del confort interior o de la calidad ambiental en espacios cerrados.

Algunos trabajos se enfocan en variables térmicas e higrométricas, como el sistema de monitoreo higrotérmico del ITQ, mientras que otros se limitan a calidad del aire, como los monitores de  $CO_2$  desarrollados en la UNAM y la UTN-CNEA. Existen proyectos más completos, como la propuesta de la Javeriana en Colombia, que incluyen contaminantes adicionales como PM y CO, aunque todavía sin abordar acústica ni luminancia.

Por otra parte, desarrollos más recientes como AQuality32 en Colombia, el multisensor IoT polaco y el sistema PROMET&O en Italia demuestran la tendencia a integrar plataformas IoT, con mediciones múltiples en tiempo real. Sin embargo, incluso estos trabajos presentan limitaciones: no consideran variables como la temperatura radiante ni la velocidad del aire, que son fundamentales para índices de confort como el PMV.

El DTHIS-C se distingue de los proyectos revisados porque:

- Integra en un único dispositivo portátil las cuatro dimensiones del confort interior: térmico, acústico, lumínico y calidad del aire.
- Mide variables que otros no incluyen simultáneamente: temperatura radiante y velocidad del aire, claves para un análisis más robusto del confort térmico.
- Incluye ruido e iluminación, parámetros generalmente omitidos en proyectos académicos de bajo costo.
- Fue calibrado y referenciado rigurosamente con instrumentos profesionales (Fluke 975 Airmeter, QUESTemp 36 y WindMaster), garantizando precisión y confiabilidad.
- Se conecta a una plataforma IoT (ThingsBoard) que permite la visualización y análisis en tiempo real de todas las variables.
- Está documentado en un repositorio abierto, lo que facilita su reproducción.

En conclusión, el DTHIS-C logra un nivel de integración, exactitud y accesibilidad en comparación con los proyectos académicos de pequeña escala que han sido presentados.

## 1.4 Alcances

El desarrollo del DTHIS-C se centra en la construcción, calibración y validación de un prototipo funcional capaz de medir las principales variables ambientales relacionadas con el confort en espacios interiores: temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del viento, concentración de  $CO_2$ , iluminancia y niveles de sonido.

El alcance del proyecto incluye:

- Selección y caracterización de sensores adecuados para cada variable de confort.
- Calibración y referenciación de los sensores frente a dispositivos de referencia profesionales.
- Integración de los sensores en un dispositivo portátil de bajo costo.
- Desarrollo de la conexión del dispositivo a una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) mediante ThingsBoard para la visualización y análisis de datos en tiempo real.
- Documentación del proceso de desarrollo en un repositorio.

Por otro lado, el proyecto no contempla:

- El diseño de una versión comercial o industrial del dispositivo.

- La validación en diferentes climas o contextos geográficos más allá de las pruebas realizadas.
- La certificación del dispositivo ante normas nacionales o internacionales.
- El análisis económico a gran escala para su producción masiva.

En este sentido, los alcances de la tesis se limitan al diseño, implementación y validación del prototipo DTHIS-C, dejando abiertas futuras oportunidades de mejora y adaptación en investigaciones posteriores.

## 1.5 Objetivos

### Objetivo general

- Desarrollar un dispositivo de confort móvil usando software y hardware libre.

### Objetivos específicos

- Selección de variables a medir.
- Identificación y selección de sensores apropiados.
- Calibración y referenciaciación de los sensores seleccionados.
- Propuesta de un diseño de dispositivo con la integración de los sensores.
- Integración del dispositivo a un sistema de Internet de las Cosas (IoT).
- Documentación del proyecto en un repositorio.

## CAPÍTULO 2

# CONFORT TÉRMICO, ACÚSTICO, LUMÍNICO, CALIDAD DEL AIRE E IMPLEMENTACIÓN DEL DTHIS-C

---

El confort en espacios interiores depende de distintos tipos de confort: térmico, acústico, lumínico y de calidad del aire, cada uno definido por variables físicas específicas y regulado por normas internacionales. En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de estos tipos de confort, junto con los conceptos básicos de instrumentación necesarios para su medición, lo que permite establecer la relación entre la teoría del confort y las tecnologías empleadas para evaluarlo.

Sobre esta base se introduce el Dispositivo de Temperatura, Humedad, Iluminación y Sonido de Campaña (DTHIS-C), desarrollado para integrar en un solo sistema la captura y transmisión en tiempo real de las principales variables ambientales. Finalmente, se aborda el modelo Predicted Mean Vote (PMV), que constituye un referente conceptual para comprender cómo las condiciones físicas del entorno influyen en la percepción térmica de los ocupantes y que ha servido como marco para la selección de los parámetros que mide el DTHIS-C.

La siguiente etapa corresponde al diseño y construcción del DTHIS-C, donde se detallan los criterios técnicos, la integración de los componentes y el desarrollo físico del dispositivo que hacen posible su implementación práctica.

### 2.1 Confort térmico

De acuerdo con la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus iniciales en inglés *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) en el estándar ASHRAE-55, el confort térmico se define como una condición mental que refleja la satisfacción con el entorno térmico [1]. A partir de esta definición, se deduce

que el juicio del confort es un proceso cognitivo influido tanto por factores ambientales como por aspectos personales y comportamentales [2].

En efecto, la percepción del confort no depende únicamente de la temperatura, la humedad, la velocidad del aire y otros parámetros físicos, sino también de variables como el tipo de vestimenta, la intensidad y duración de la actividad física, y la variación en la postura o ubicación del individuo. Por ejemplo, en condiciones de frío, abrir una ventana puede resultar contraproducente, mientras que en ambientes cálidos, una ventilación adecuada puede mejorar significativamente la sensación térmica. Cada uno de estos factores influye en la percepción individual del confort y debe considerarse para lograr un entorno interior confortable [1].

### 2.1.1 Variables físicas del confort térmico

Macpherson identificó seis factores determinantes que afectan la sensación térmica en los espacios cerrados. Entre ellos, cuatro son variables físicas: temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura media radiante; y dos son variables personales: el aislamiento térmico de la ropa y el nivel de actividad física, también conocido como tasa metabólica. Estos factores constituyen la base para el análisis y predicción del confort térmico [3].

Acorde a ASHRAE-55 [1], dichas variables se definen de la siguiente manera:

1. **Temperatura del aire:** La temperatura de bulbo seco medida en un punto específico del aire.
2. **Temperatura media radiante:** Es la temperatura uniforme de un entorno hipotético en el que el intercambio de calor por radiación entre una persona y las superficies circundantes sería igual al intercambio real de calor por radiación en el entorno actual.
3. **Velocidad del aire:** La magnitud del movimiento del aire en un punto determinado, sin considerar su dirección.
4. **Humedad relativa del aire:** Es la proporción entre la cantidad actual de vapor de agua en el aire y la cantidad máxima que éste puede contener a una temperatura determinada, expresada en porcentaje. Un 100 % indica que el aire está saturado de vapor de agua [4].
5. **Aislamiento térmico de la ropa:** Es la resistencia al intercambio de calor sensible proporcionada por un conjunto de ropa, expresada en unidades de "clo". El valor de 1 clo es equivalente al aislamiento proporcionado por un traje típico de negocios,  $\approx 0.155 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$
6. **Tasa metabólica:** La tasa a la que se transforma la energía química en calor y trabajo mecánico debido a las actividades metabólicas de un individuo. Se mide por unidad de área de superficie de la piel y se expresa en "met". El valor de 1 met es equivalente a 58.2 W/m<sup>2</sup>, que corresponde a la potencia generada por unidad de superficie de piel de una persona promedio en reposo.

## 2.2 Confort acústico

El confort acústico se define como un estado de satisfacción con las condiciones acústicas, representa el bienestar y la percepción positiva de un entorno en términos sonoros. Sin embargo, este confort es altamente subjetivo, ya que fuentes de ruido con características físicas similares pueden percibirse de manera distinta dependiendo de la persona [5, 6].

## 2.2.1 Variables físicas del confort acústico

La principal variable utilizada para evaluar el confort acústico es el nivel de presión sonora, ya que permite cuantificar la intensidad del sonido percibido y relacionarla con los efectos que este puede generar en las personas. Esta medida permite distinguir componentes clave como el sonido y el ruido, cuya comprensión es esencial para interpretar el fenómeno acústico. A partir de ello, se consideran otros factores que también afectan la percepción del confort, como la frecuencia, duración, variación temporal y fuente del sonido.

- **Sonido:** Se define como una perturbación en la presión atmosférica generada por la oscilación de partículas, a través de las cuales se propaga una onda mecánica de forma longitudinal en un medio elástico y denso. Esta onda sonora constituye el fenómeno físico, mientras que la percepción que produce en el sistema auditivo se conoce como fenómeno psicoacústico. En otras palabras, el sonido engloba tanto el evento físico, así como la experiencia auditiva que dicha vibración genera en el oyente [7].
- **Ruido:** Definido como un sonido no deseado, es decir, una perturbación auditiva que resulta molesta o desagradable para el oyente. Mientras que físicamente se puede describir de manera similar al sonido, su evaluación se basa en el impacto negativo que genera en la percepción auditiva [7].

Azar et al. [6] nombran dos tipos principales de ruido en los edificios:

- **Ruido estructural (por impacto):** Generado por impactos físicos o vibraciones sobre un elemento de la construcción.
- **Ruido aéreo:** Transmitido a través del aire.

El nivel de presión sonora (SPL, por sus siglas en inglés *Sound Pressure Level*) cuantifica la intensidad de un sonido midiendo las variaciones de presión del aire en decibeles (dB). Esta escala logarítmica se basa en un valor de referencia de  $2 \times 10^{-5} Pa$ , lo que delimita el rango audible aproximado entre 0 dB (prácticamente inaudible) y 140 dB (extremadamente fuerte) [7]. Este parámetro es uno de los principales factores que influyen en el confort acústico, ya que permite evaluar cómo diferentes niveles de presión sonora afectan la percepción del ruido. Para predecir el confort frente al ruido de impacto se utiliza típicamente el nivel máximo de presión sonora, mientras que para el ruido aéreo se emplea el nivel de presión sonora equivalente medido durante un periodo determinado [6,8].

En el eje de la frecuencia el oído humano reconoce sonidos aproximadamente entre 20 y 20,000 Hz, y en el eje de la amplitud aproximadamente entre 0 y 140 dB. Sin embargo, la percepción del oído humano no es lineal a todas las frecuencias. El oído humano responde al sonido en forma logarítmica, existiendo así diferencias en escala de 1: 5,000,000 dentro del rango audible. Por ello se ha recurrido al uso de una unidad logarítmica: el decibel (dB) [7].

Para relacionar los niveles de presión sonora medidos con la percepción auditiva humana, se emplean curvas de ponderación. Estas curvas asignan un valor al SPL de cada frecuencia de acuerdo con la sonoridad que ésta produce en el oído. En particular, la red A (Tabla 2.1) pondera los sonidos de forma similar a la respuesta auditiva, siendo especialmente útil para sonidos de bajo SPL al aplicar una fuerte ponderación a las frecuencias bajas. A medida que aumenta el nivel de presión sonora, la percepción de sonoridad se iguala en las distintas frecuencias; tras aplicar la ponderación, los niveles medidos se expresan en dBA [7].

Tabla 2.1: Red de ponderación A.

Octava de frecuencias (Hz)	Ponderación (dB)
63	-26
125	-16
250	-9
500	-3
1 000	0
2 000	+1
4 000	+1

Así:

- 90  $dB$  a 500  $Hz$  equivalen a 87  $dBA$ .
- 57  $dB$  a 63  $Hz$ , 31  $dBA$ .
- 68  $dB$  a 4,000  $Hz$ , 69  $dBA$ .

Cabe señalar que los valores de la Tabla son ajustes en decibelios ( $dB$ ) aplicados a cada banda de frecuencia; una vez combinados estos desplazamientos, el nivel resultante se expresa en  $dBA$ , reflejando así la sensibilidad del oído humano.

De esta manera, la red de ponderación A acerca más los valores medidos físicamente a los estímulos auditivos que estos producen. Los  $dBA$  son ampliamente utilizados para estudios de ruido y salud auditiva [7]. La Tabla 2.2 y la Tabla 2.3 proporcionan una referencia clara sobre la escala de niveles sonoros y la duración de la exposición en la que estos niveles pueden resultar molestos e incluso perjudiciales para la salud.

Tabla 2.2: Efectos de los niveles sonoros en  $dBA$ .

Nivel ( $dBA$ )	Efecto
150 $dBA$	Causa pérdida inmediata de la audición
120 $dBA$	Extremadamente doloroso
100 $dBA$	Cortos períodos de exposición causan pérdida temporal de la agudeza auditiva; exposición prolongada causa daño irreparable
90 $dBA$	Muchos años de exposición causan pérdidas auditivas permanentes
65 $dBA$	Largos períodos de exposición causan fatiga mental y física

Tabla 2.3: Niveles máximos de exposición recomendados en dBA.

Duración de la exposición (horas)	Nivel sonoro máximo recomendado (dBA)
8	90
6	92
4	95
2	97
1.5	100
1	102
0.5	105
0.25	110
Menos de 0.25	115

Asimismo Berglund [8], enumera ciertos factores acústicos que impactan el confort acústico:

1. **Frecuencia del ruido:** Su unidad de medida son los hertz ( $Hz$ ) y se refiere al número de periodos o vibraciones de una onda sonora que se producen por segundo. El rango de frecuencia audible normalmente se encuentra en un rango de 20-20,000  $Hz$ , las frecuencias bajas se perciben como graves y las altas como agudas.
2. **Fuente del ruido:** Existen diferentes fuentes, las cuales pueden ser industrial, de transporte, construcción y doméstico.
3. **Duración del ruido:** Se refiere al periodo de tiempo durante el cual un sonido o fuente sonora está presente en el ambiente.
4. **Variación en el tiempo:** Existen variaciones de la presión sonora que suelen causar mayor desconfort auditivo. Por ejemplo, los ruidos que varían periódicamente para crear una sensación de pulsación pueden ser más molestos que el ruido continuo, las variaciones de aproximadamente 4 por segundo podrían ser más perturbadoras.

## 2.3 Confort lumínico

El confort lumínico se refiere a la percepción de bienestar visual en un espacio, permitiendo que las personas realicen sus actividades cotidianas de manera efectiva y cómoda bajo condiciones de iluminación adecuadas [9].

### 2.3.1 Variables físicas del confort lumínico

La luz es una radiación electromagnética que el ojo humano puede percibir en longitudes de onda que van desde los 380 nm hasta los 760 nm. Estas longitudes de onda, o frecuencias, corresponden a los diferentes colores del espectro visible [10].

Según se describe en la norma ISO EN 12464-1 British Standard [11], la evaluación del confort lumínico puede lograrse mediante la determinación de: la luminancia y la iluminancia.

- Luminancia:** Se define como la cantidad de luz emitida o reflejada por una superficie en una dirección específica, en relación con el área sobre la que se proyecta dicha luz. En otras palabras, es una medida que indica el nivel de brillo percibido en un punto determinado, su unidad de medida es la candela por metro cuadrado ( $cd/m^2$ ) [12].
- Iluminancia:** Se define como la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie con relación al área sobre la que se distribuye. Esta medida cuantifica la luz recibida en un punto de una superficie, y es fundamental para evaluar el nivel de iluminación de un espacio, su unidad de medida es el lux ( $lx$ ) [12].

La Secretaría del Trabajo y Previsión Social [13] recomienda una iluminancia mínima de 300 lux en aulas y 500 lux para áreas de dibujo, laboratorios de cómputo y laboratorios.

## 2.4 Calidad del aire

De acuerdo con el estándar ASHRAE-62 [14], se considera que el aire interior tiene una calidad aceptable cuando "no contiene contaminantes conocidos en concentraciones nocivas según lo establecido por las autoridades competentes y la mayoría sustancial de las personas expuestas (80 % o más) no expresa insatisfacción".

### 2.4.1 Variables físicas de la calidad del aire

La calidad del aire interior se evalúa monitoreando la concentración de  $CO_2$ , comparándola con los niveles exteriores (300-500 ppm). ASHRAE-62 [14] recomienda mantener concentraciones interiores entre 1000 y 1200 ppm para garantizar un ambiente adecuado y regular los sistemas de ventilación. Sin embargo, concentraciones superiores a 5000 ppm son peligrosas, ya que indican una ausencia total de aire fresco.

Durante la pandemia de COVID-19 se evidenció que la concentración de  $CO_2$  puede servir como un indicador indirecto del riesgo de transmisión aérea del virus. En espacios cerrados, niveles elevados de  $CO_2$  señalan una ventilación insuficiente, lo que implica que una mayor proporción del aire inhalado ha sido exhalada por otros, y por lo tanto, puede contener aerosoles potencialmente virales. Modelos basados en la ecuación de Wells-Riley han demostrado que, a medida que aumenta la concentración de  $CO_2$ , también se incrementa el riesgo de contagio, especialmente en ambientes mal ventilados y sin el uso adecuado de mascarillas. Por ello, se ha recomendado mantener los niveles de  $CO_2$  por debajo de 700-800 ppm en espacios para minimizar este riesgo y asegurar una adecuada calidad del aire interior [15].

## 2.5 DTHIS-C

El Dispositivo de Temperatura, Humedad, Iluminación y Sonido de Campaña (DTHIS-C) es un dispositivo portátil desarrollado para medir, de forma simultánea y en tiempo real, diversas variables físicas que inciden directamente en el confort de los espacios interiores. Las variables evaluadas son:

- Temperatura del aire

- Temperatura radiante
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Concentración de  $CO_2$
- Luminancia
- Niveles de sonido

El DTHIS-C está conformado por seis sensores, dos microcontroladores y dos acondicionadores de señal. Para comprender su funcionamiento, es necesario introducir algunos conceptos básicos de instrumentación electrónica, tales como sensores, microcontroladores y acondicionadores de señal, los cuales constituyen la base tecnológica de su diseño.

- **Sensor:** Un sensor es un dispositivo que detecta una señal o estímulo del entorno y responde generando una señal eléctrica proporcional, generalmente en forma de corriente o voltaje. Su función principal es convertir señales físicas, químicas o biológicas en señales eléctricas que puedan ser interpretadas por sistemas electrónicos [16].

En el DTHIS-C, los sensores permiten medir variables físicas específicas del ambiente, cuyas señales son posteriormente acondicionadas y digitalizadas para su procesamiento y transmisión.

- **Microcontrolador:** Un microcontrolador es una pequeña computadora integrada en un solo chip, se usa en sistemas integrados como sensores de temperatura. Incluye una CPU, memoria RAM, memorias de solo lectura, múltiples puertos de entrada/salida y periféricos como convertidores analógico-digital (ADC), convertidores digital-analógico (DAC), temporizadores e interfaces seriales (USB, Ethernet, etc.). Su bajo consumo energético lo hace ideal para dispositivos alimentados por batería y aplicaciones específicas [17].

En el DTHIS-C, los microcontroladores gestionan y procesan las señales de los sensores, convirtiendo las salidas analógicas en datos digitales precisos mediante los ADC. Estos datos son empleados para evaluar las condiciones ambientales y transmitidos a una plataforma IoT para su visualización en tiempo real.

- **Acondicionador de señal:** Un acondicionador de señal es un dispositivo diseñado para transformar una señal electrónica de un formato a otro, facilitando su lectura y procesamiento mediante instrumentación convencional. Entre sus funciones se destacan la amplificación (aumentar la magnitud de señales débiles), la linealización (corregir respuestas no lineales, como ocurre comúnmente en señales de termopar), la compensación de unión fría (ajustar la señal de un termopar para corregir variaciones de temperatura ambiente), la excitación (proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento de ciertos sensores, por ejemplo los RTD). Estas funciones combinadas permiten que la señal analógica, que puede ser difícil de interpretar directamente, se convierta en una forma adecuada para su procesamiento [18].

En el DTHIS-C, los acondicionadores de señal se emplean para preparar la salida analógica de sensores como los termopares y el sensor de temperatura radiante, asegurando que la señal se encuentre dentro de un rango adecuado y libre de interferencias antes de ser digitalizada por el microcontrolador.

La versatilidad del DTHIS-C radica en su capacidad para integrar múltiples sensores en un solo dispositivo, lo que facilita el análisis y monitoreo continuo de las variables físicas involucradas. Su desarrollo se basa en tecnologías libres y de bajo costo, lo que lo posiciona como una alternativa viable frente a dispositivos de medición tradicionales, generalmente mucho más costosos.

### 2.5.1 Modelo de confort PMV

El modelo de confort térmico PMV (Predicted Mean Vote) es una herramienta predictiva ampliamente reconocida para evaluar la sensación térmica promedio de un grupo de personas en un ambiente interior. Este modelo estima la percepción térmica en una escala que va desde -3 (frío) hasta +3 (caliente), donde 0 representa una sensación térmica neutral, considerada ideal para el confort [19]. El PMV se fundamenta en el balance de calor del cuerpo humano y toma en cuenta seis variables principales:

- Temperatura del aire: Temperatura ambiente del entorno.
- Temperatura radiante media: Influencia de las superficies radiantes circundantes.
- Velocidad del aire: Movimiento del aire en el espacio.
- Humedad relativa: Nivel de humedad en el ambiente.
- Tasa metabólica: Nivel de actividad física de los ocupantes.
- Aislamiento de la ropa: Capacidad térmica de la vestimenta.

Estas variables se integran en una ecuación compleja (Ecuación 2.1) que calcula el índice PMV, permitiendo predecir si un entorno es térmicamente confortable según las normas internacionales como ANSI/ASHRAE Standard 55 e ISO 7730 [1, 20].

$$\text{PMV} = [0.303 e^{-0.036 M} + 0.028] \times \left\{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99 (M - W) - P_a] - 0.42 [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0.0014 M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}. \quad (2.1)$$

La determinación de las variables intermedias que describen el intercambio de calor entre el cuerpo y su entorno se realiza mediante las ecuaciones Ecuación 2.2, Ecuación 2.3, Ecuación 2.4 y Ecuación 2.5, las cuales proporcionan los parámetros necesarios para evaluar el balance térmico y, en consecuencia, calcular el índice PMV.

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 (M - W) - I_{cl} \left\{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}. \quad (2.2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{si } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{si } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{si } I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.00 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{si } I_{cl} > 0.078 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$v_{ar} = v_{air} + 0.3 \cdot (M - 1) \quad (2.5)$$

donde:

$M$  Tasa metabólica ( $W/m^2$ )

$W$  Trabajo mecánico externo ( $W/m^2$ )

$I_{cl}$  Aislamiento térmico de la ropa ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

$f_{cl}$  Factor de cobertura de la ropa (sin unidad)

$t_a$  Temperatura del aire ( $^\circ C$ )

$\bar{t}_r$  Temperatura media radiante ( $^\circ C$ )

$p_a$  Presión parcial del vapor de agua (Pa)

$v_{ar}$  Velocidad relativa del aire (m/s)

$v_{air}$  Velocidad del aire (m/s)

$h_c$  Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$t_{cl}$  Temperatura de la superficie de la ropa ( $^\circ C$ )

## 2.5.2 Relevancia del modelo PMV en el DTHIS-C

El modelo PMV es fundamental en el diseño de espacios interiores confortables y eficientes, ya que proporciona un marco cuantitativo para evaluar cómo las condiciones ambientales y personales afectan la percepción térmica de los ocupantes. Su adopción en estándares como ASHRAE 55 lo posiciona como una referencia clave para el diseño de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés *Heating, ventilation, and air conditioning*). En el contexto de esta tesis, el PMV sirve como base teórica para comprender cómo optimizar las condiciones térmicas en entornos habitables, alineándose con el objetivo de garantizar el bienestar y la calidad de vida de los usuarios.

# CAPÍTULO 3

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DTHIS-C

---

El desarrollo de un dispositivo de monitoreo ambiental requiere no solo la selección de sensores adecuados, sino también un proceso de diseño que garantice la integración de todos los componentes electrónicos, mecánicos y de software. En este capítulo se presenta la etapa de diseño y construcción del DTHIS-C, donde se abordan los criterios técnicos que guiaron la elección de los sensores y microcontroladores, así como el acondicionamiento de señal necesario para obtener mediciones confiables.

Asimismo, se describe la arquitectura general del sistema, representada mediante diagramas de conexión y de bloques que ilustran la interacción entre los diferentes módulos. Se detallan los procesos de configuración y programación, orientados a lograr la adquisición y transmisión de datos hacia la plataforma IoT.

Finalmente, se expone el diseño físico del dispositivo, incluyendo la elaboración de modelos CAD, la impresión 3D de la carcasa y la organización interna de los componentes. De esta manera, el capítulo proporciona el marco completo que permite comprender cómo las decisiones de diseño se tradujeron en la construcción de un dispositivo funcional, portátil y accesible para la evaluación del confort en espacios interiores.

El capítulo siguiente aborda la calibración y validación de los sensores que conforman el DTHIS-C, con el fin de garantizar la exactitud y confiabilidad de las mediciones obtenidas en condiciones reales de operación.

### 3.1 Descripción del dispositivo

La arquitectura del DTHIS-C se ha fundamentado en el uso combinado de la Raspberry Pi 4 y el Arduino Uno WiFi Rev2, microcontroladores seleccionados por las siguientes características y ventajas:

### 1. Versatilidad y capacidad de procesamiento:

La Raspberry Pi 4, proporciona una plataforma robusta para el procesamiento avanzado de datos y la ejecución de algoritmos complejos. Su flexibilidad, junto con la facilidad de integración de diversas funcionalidades, permite adaptar el sistema a requerimientos específicos y configurar el rendimiento según las demandas del entorno.

### 2. Conectividad:

Ambos dispositivos cuentan con conectividad a Internet, lo que posibilita la transmisión en tiempo real de datos hacia una base de datos remota alojada en el servidor ThingsBoard.

### 3. Compatibilidad y ecosistema abierto:

La adopción de tecnologías abiertas facilita la integración y reproducibilidad del sistema. La amplia comunidad de desarrolladores que respalda tanto la Raspberry Pi como el Arduino asegura soporte continuo, actualizaciones regulares y una extensa variedad de recursos y librerías, lo que se traduce en mayor flexibilidad para adaptar el sistema a diversas necesidades y entornos.

### 4. Accesibilidad:

Frente a equipos especializados, la utilización de estos microcontroladores constituye una solución rentable sin comprometer el rendimiento ni la fiabilidad del sistema. Además, el Arduino UNO WiFi Rev2 y el Raspberry Pi 4 Model B son fáciles de conseguir en México, disponibles en tiendas como AG Electrónica y 330ohms, con precios aproximados de \$1,300.00 MXN y \$2,000.00 MXN, respectivamente. Esto facilita la replicación del proyecto.

En la Tabla 3.1 se presentan los sensores y componentes electrónicos que conforman el DTHIS-C, detallándose la variable que mide cada sensor, el modo de comunicación, la conexión al microcontrolador correspondiente y si requieren acondicionadores de señal.

Tabla 3.1: Sensores y componentes electrónicos que constituyen al DTHIS-C.

Sensor	Variable	Comunicación	Microcontrolador	Acondicionador de señal
Termopar tipo T	Temperatura del aire	SPI	Arduino UNO WiFi Rev2	PWFusion MAX31856 SEN-30007
TPF1/E-20 PT1000	Temperatura radiante	SPI	Arduino UNO WiFi Rev2	Adafruit PT1000 RTD-MAX31865
Wind Sensor Rev P6	Velocidad del viento	ADC	Arduino UNO WiFi Rev2	–
SCD30 Sensirion	CO <sub>2</sub> y humedad relativa	I2C	Raspberry Pi 4 Model B	–
Micrófono ambiental USB	Sonido	USB	Raspberry Pi 4 Model B	–
5 MP OV5647 wide angle fisheye camera	Iluminancia	CSI	Raspberry Pi 4 Model B	–

### 3.1.1 Diseño

En la Figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques del DTHIS-C, el cual integra los diferentes sensores, microcontroladores y acondicionadores de señal que permiten la adquisición de las variables

ambientales.

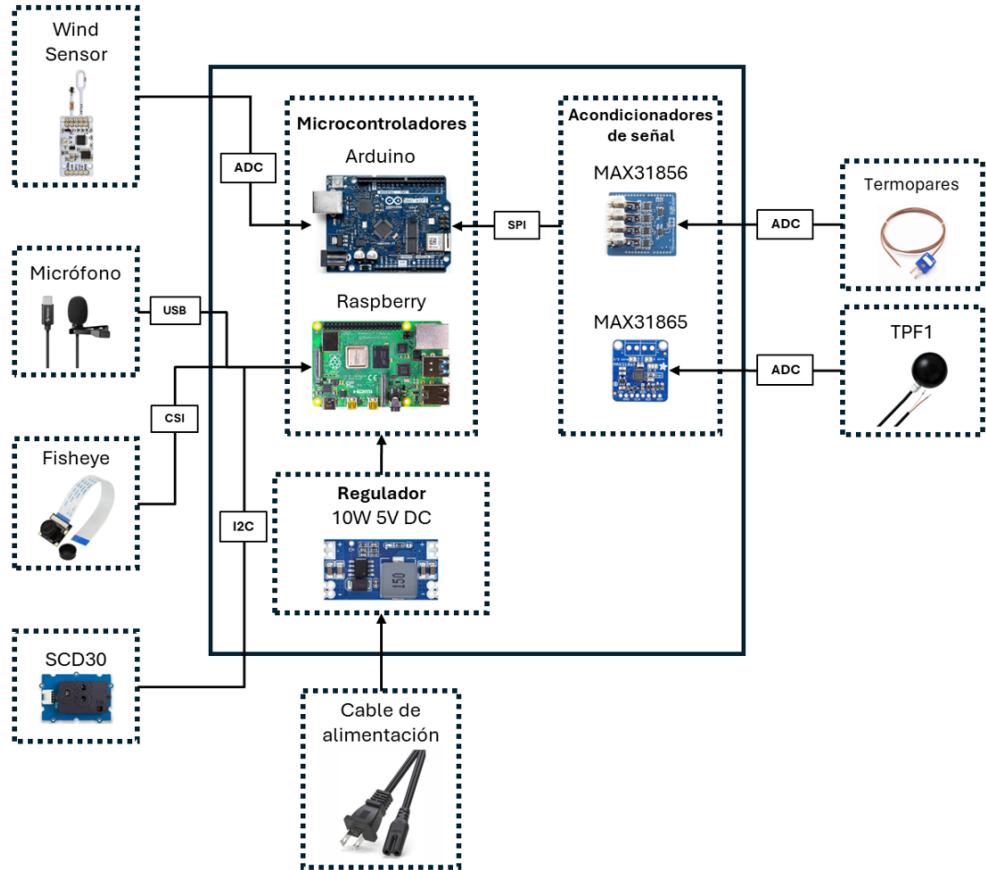


Figura 3.1: Diagrama de bloques del DTHIS-C.

El sistema se organiza en torno a dos microcontroladores: Arduino UNO WiFi Rev2 y Raspberry Pi 4 Model B. El primero se encarga de la adquisición de las señales analógicas y digitales provenientes de los termopares tipo T (para temperatura del aire), el TPF1/E-20 PT1000 (para temperatura radiante) y el Wind Sensor Rev. P6 (para velocidad del viento). En el caso de los termopares y del PT1000, las señales requieren acondicionamiento, por lo que se emplean los módulos MAX31856 y MAX31865, respectivamente, que realizan funciones de linealización, compensación y conversión de las señales.

La Raspberry Pi 4 se destina a la gestión de sensores que utilizan protocolos de comunicación digitales. A través de I2C se conecta el sensor SCD30, encargado de medir la concentración de CO<sub>2</sub> y humedad relativa. Por medio del puerto USB se incorpora el micrófono ambiental, que registra los niveles de sonido. Asimismo, mediante la interfaz CSI se integra la cámara Arducam 5MP OV5647 Fisheye, utilizada para estimar la iluminancia.

Ambos microcontroladores reciben energía mediante un regulador DC-DC de 10 W, que convierte la entrada de 5 V de corriente directa desde el cable de alimentación en la tensión necesaria para el funcionamiento de cada microcontrolador y de igual manera otro con entrada a 5 V y salida a 12 V, instalado específicamente para el Wind Sensor Rev. P6, que requiere dicho voltaje para su correcto funcionamiento.

### 3.1.2 Carcasa

Para el diseño del DTHIS-C se optó por una carcasa que alberga de forma ordenada y protegida todos los componentes electrónicos, sensores y microcontroladores. Al tratarse de un dispositivo de campaña, resultaba imprescindible un diseño ligero y robusto que permitiera un transporte sencillo y un montaje rápido sobre un trípode.

La carcasa (Figura 3.2) presenta unas dimensiones aproximadas de  $160 \times 180 \times 65$  mm, lo que proporciona el espacio suficiente para integrar la Raspberry Pi 4, el Arduino UNO WiFi Rev2, los módulos de acondicionamiento de señal y la fuente de alimentación, además de los sensores internos como el SCD30 y el TPF1/E-20 PT1000. Su tamaño compacto permite mantener un peso reducido, facilitando la portabilidad, mientras que el material de fabricación asegura la resistencia mecánica necesaria para proteger los componentes durante el transporte y el uso en campaña.

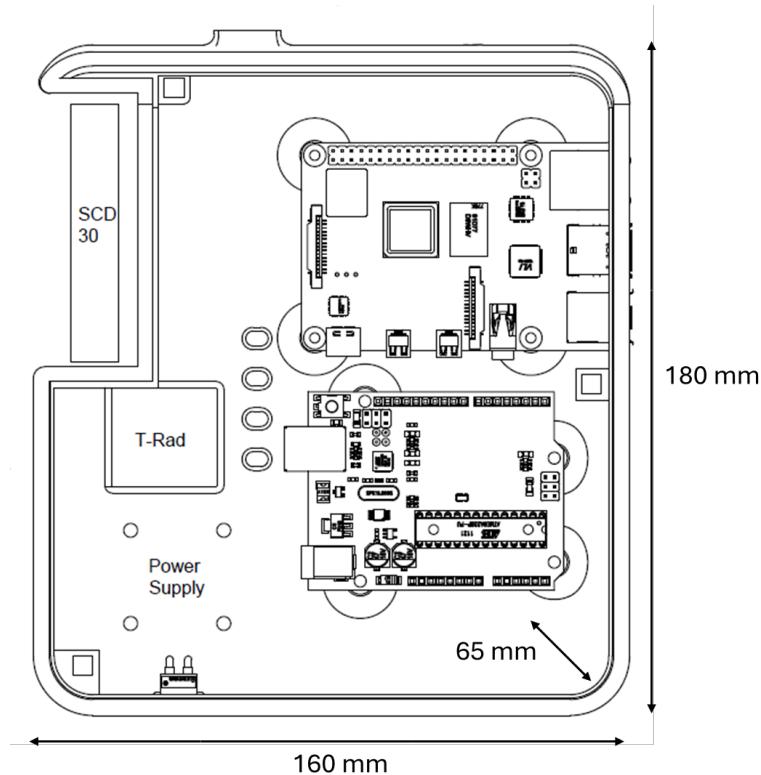


Figura 3.2: Dimensiones de la carcasa del DTHIS-C.

El modelado de la carcasa se llevó a cabo en Autodesk Fusion, atendiendo a tres objetivos principales:

- Protección: Cada componente (sensores, electrónica y microcontroladores) se ubica en su propio compartimento para evitar impactos y vibraciones.
- Montaje: La pieza principal incorpora un anclaje rápido al trípode, así como acoples para el tubo de PVC que sostiene los termopares a alturas de 1.7 m, 1.1 m, 0.6 m y 0.1 m, y los aros de sujeción para el Wind Sensor Rev P6 y el TPF1/E-20.

- Mantenimiento: La geometría de la tapa y los soportes permite un acceso ágil para reemplazar o ajustar cualquier sensor sin desmontar todo el conjunto.

Además de la carcasa principal, se diseñaron fundas individuales para:

- Cámara fisheye
- Regulador de voltaje
- Wind Sensor Rev P6 (aros de sujeción al tubo)
- TPF1/E-20 (aros de sujeción al tubo)

La Figura 3.3 muestra la carcasa principal y las piezas complementarias que protegen cada módulo y simplifican su fijación al soporte de PVC.

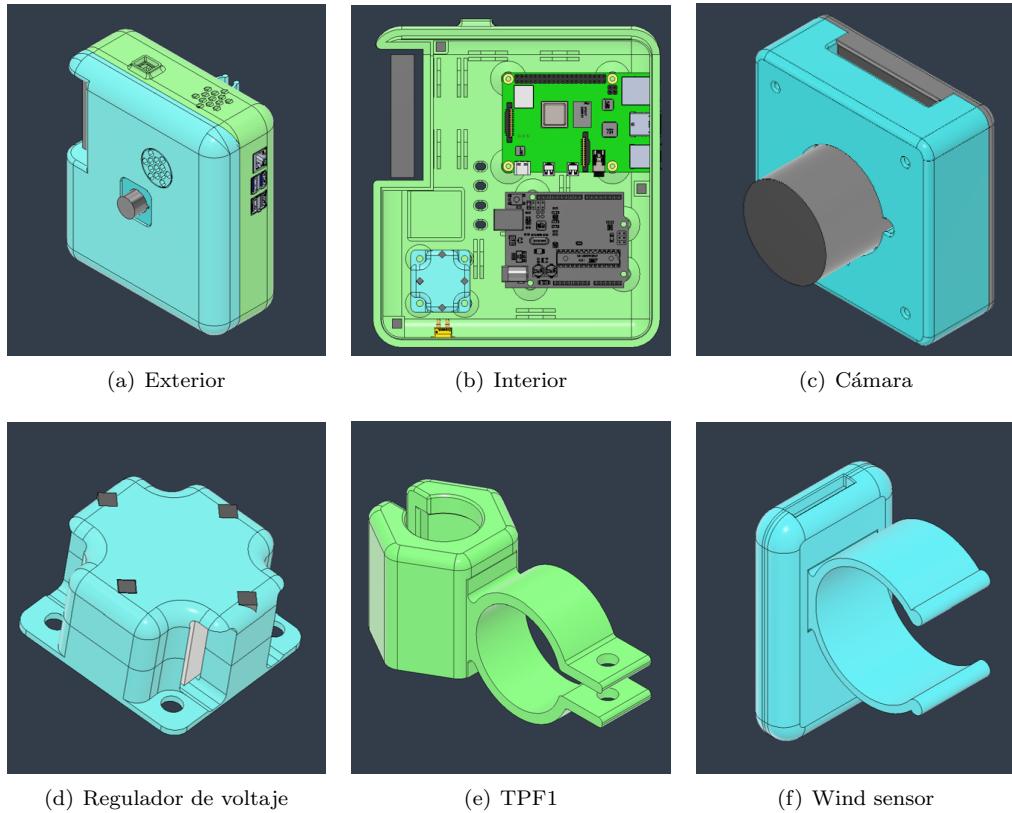


Figura 3.3: Diseño 3D de la carcasa y componentes asociados.

Para su impresión se empleó el filamento ASA por su alta resistencia a los rayos UV, garantizando durabilidad. Para la impresión se utilizó un infill del 10 %, patrón cúbico y giroide (acorde a la pieza) y 4 perímetros.

### 3.1.3 Ensamblaje

Para garantizar un sistema modular, fácil de transportar y sencillo de mantener, se integró la electrónica complementaria (Tabla 3.2) dentro de la carcasa principal de la siguiente manera:

- Reguladores de voltaje: Se instalaron dos convertidores buck. Uno con entrada y salida a 5 V para alimentar la Raspberry y el Arduino; y otro con entrada a 5 V y salida a 12 V específicamente para el Wind Sensor, que requiere 12 V para un funcionamiento correcto.
- Conectores banana hembra: Se emplearon dos conectores banana hembra para la conexión desmontable del TPF1 al amplificador PT1000, facilitando el montaje y desmontaje rápido del sensor.
- Perfboard y pines macho: El Wind Sensor se conecta a un perfboard de 4 canales al que se soldaron cuatro pines macho de  $5 \times 2.54$  mm. Desde allí, un cable con pines hembra permite enchufar directamente el sensor al regulador de 12 V.
- Conexiones directas: El resto de los sensores y módulos se conectan mediante cables al propio puerto USB (micrófono), al bus I2C (SCD30) o al conector CSI (cámara), según corresponda.

Tabla 3.2: Componentes utilizados para la electrónica complementaria del DTHIS-C.

Cantidad	Componente
1	Convertidor buck 10 W, 5 V DC
1	Convertidor buck 5 V → 12 V DC
2	Conectores banana hembra
1	Conecotor XT30 hembra
1	Perfboard de 4 canales (5 pines)
4	Pines macho $5 \times 2.54$ mm
1	Ventilador de 5 V

La Figura 3.4 ilustra el montaje completo del DTHIS-C: la carcasa principal fijada al trípode, la extensión de altura realizada con un tubo de PVC y los termopares distribuidos a sus respectivas alturas. En la Figura 3.4(d) se aprecia, en la parte superior del tubo, el Wind Sensor a la izquierda y el TPF1 a la derecha, ambos asegurados mediante sus aros de sujeción.

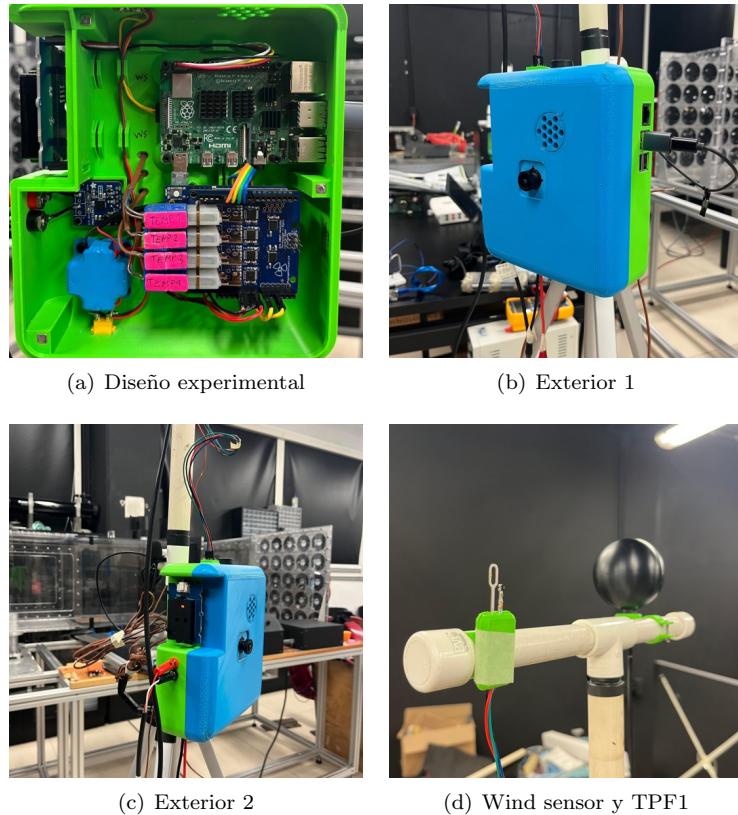


Figura 3.4: Diseño final del DTHIS-C tras haber impreso y ensamblado todos los componentes.

### 3.1.4 Lógica de programación

En la Figura 3.5 se muestra la lógica de programación implementada en el DTHIS-C. El flujo comienza con la acción del usuario, quien inicia la campaña de medición a través del dispositivo. Una vez activado, el DTHIS-C ejecuta de manera continua la medición de variables ambientales (temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del viento, concentración de CO<sub>2</sub>, iluminancia y niveles de sonido) a partir de los sensores integrados.

Posteriormente, el dispositivo procede al envío de los datos obtenidos hacia la plataforma IoT ThingsBoard, donde estos son almacenados en una base de datos para su gestión y análisis posterior. Una vez registrados, la plataforma actualiza el tablero de visualización, mostrando en tiempo real las condiciones del entorno monitoreado.

Finalmente, el usuario tiene la posibilidad de finalizar la campaña, con lo cual el dispositivo detiene el envío de información y concluye el proceso. Esta lógica asegura un ciclo de medición y transmisión continua durante todo el tiempo en que la campaña permanezca activa.

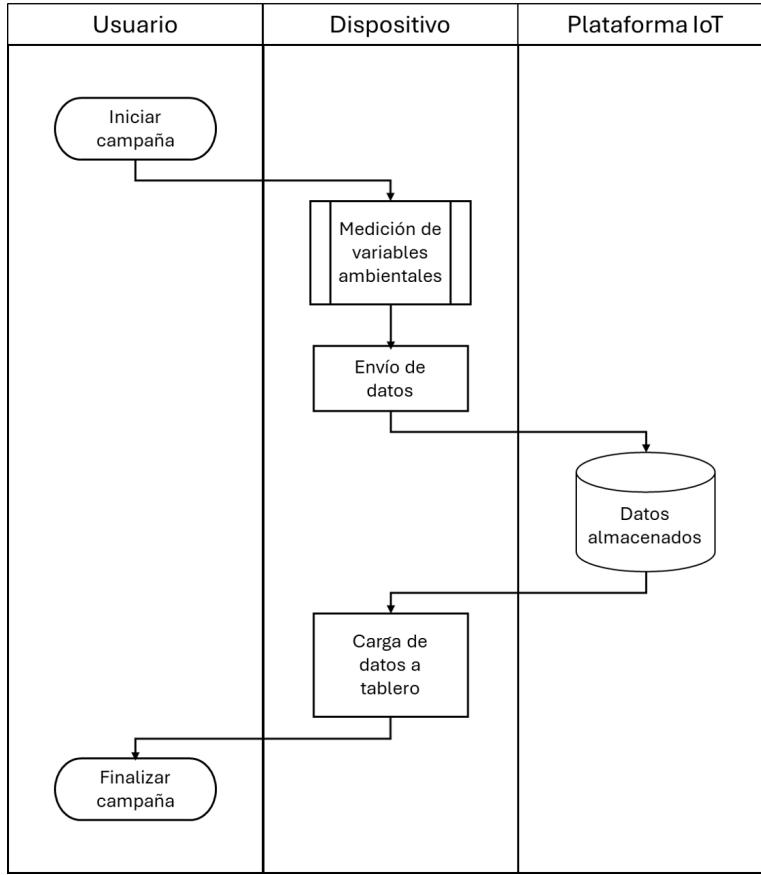


Figura 3.5: Diagrama de flujo del funcionamiento del DTHIS-C.

### 3.1.5 Tablero interactivo

Para facilitar el seguimiento y análisis de las campañas de medición, el DTHIS-C se integra con la plataforma IoT, **ThingsBoard**, que actúa como repositorio central de todos los datos ambientales capturados. Cada lectura (temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>, luminancia, velocidad del viento o nivel de sonido) se publica en tiempo real, donde puede filtrarse y descargarse según el intervalo temporal, la variable o el volumen de datos requerido.

Con el fin de ofrecer una supervisión inmediata en campo, se ha diseñado un tablero interactivo (fig. Figura 3.6) que combina:

- Tarjetas de valores instantáneos, que muestran al momento la última lectura de cada variable.
- Gráficos de series temporales, que permiten visualizar la evolución histórica de las mediciones y detectar tendencias o anomalías.

Este entorno visual garantiza una rápida interpretación de la información y podría apoyar a la toma de decisiones durante las campañas de confort interior.

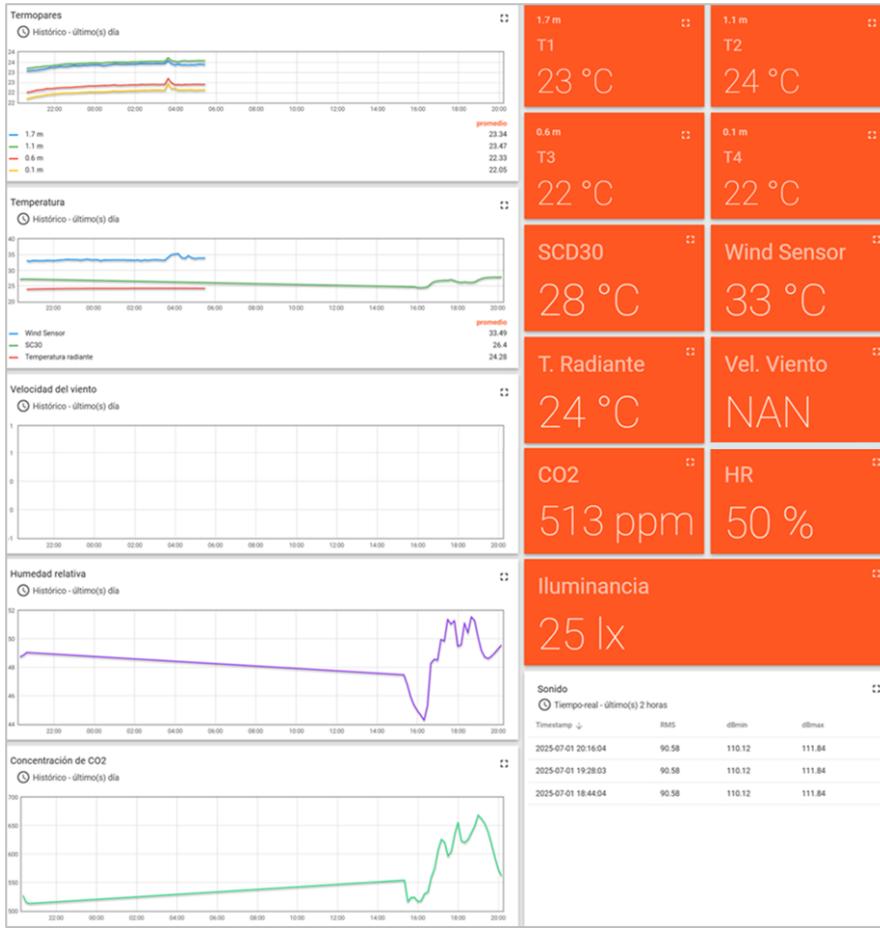


Figura 3.6: Tablero en ThingsBoard.

## 3.2 Componentes

### 3.2.1 Arduino UNO WiFi Rev2

El Arduino UNO WiFi Rev2 es una placa de microcontrolador diseñada para proyectos de Internet de las Cosas (IoT), integrando conectividad WiFi y Bluetooth mediante el módulo u-blox NINA-W102 y un sensor IMU de 6 ejes (LSM6DS3TR) para detección de movimientos. Equipada con el microcontrolador ATmega4809, mantiene compatibilidad con el formato estándar UNO, facilitando su uso con shields existentes [21].

En la Tabla 3.3 se muestran las especificaciones del Arduino UNO WiFi Rev2.

Tabla 3.3: Especificaciones del Arduino UNO WiFi Rev2.

Parámetro	Detalle
Microcontrolador	ATmega4809
Memoria flash	48 KB
SRAM	6144 bytes
EEPROM	256 bytes
Conectividad Wi-Fi	Sí, u-blox NINA-W102 (2.4 GHz)
Bluetooth	Sí, Bluetooth low energy
Sensor imu	Sí, LSM6DS3TR (6 ejes)
Pines digitales i/o	14 (5 PWM)
Pines analógicos	6
Voltaje de operación	5 V
Consumo máximo total	200 mA
Dimensiones	68.6 mm × 53.4 mm

### 3.2.2 Raspberry Pi 4 Model B

La Raspberry Pi 4 Model B es una computadora de placa única de alto rendimiento, diseñada para tareas de procesamiento avanzado y conectividad eficiente en un formato compacto. Equipada con un procesador de 64 bits de cuatro núcleos y opciones de RAM de hasta 8 GB, ofrece soporte para salida de video dual 4K y conectividad avanzada mediante Wi-Fi de doble banda, Bluetooth 5.0, Ethernet Gigabit y puertos USB 3.0, con capacidad para Power over Ethernet (PoE) mediante un accesorio adicional. Su diseño versátil y eficiente la hace ideal para la integración y gestión de datos en el sistema DTHIS-C [22].

En la Tabla 3.4 se muestran las especificaciones de la Raspberry Pi 4 Model B.

Tabla 3.4: Especificaciones del Raspberry Pi 4 Model B.

Parámetro	Detalle
Procesador	Broadcom BCM2711, 4 núcleos Cortex-A72, 1.5 GHz
Memoria RAM	8GB (LPDDR4-3200)
Conectividad Wi-Fi	Sí, dual-band 2.4 GHz y 5 GHz, 802.11 ac
Bluetooth	Sí, Bluetooth 5.0
Puertos USB	2 USB 3.0, 2 USB 2.0
Salida de video	2 micro HDMI, soporte dual 4K 60fps
Ethernet	Gigabit
Almacenamiento	Tarjeta microSD
Voltaje de operación	5V
Consumo energético	Eficiente, sin ventilador (~3 A recomendado)
Dimensiones	85.6 mm × 56.5 mm × 17 mm

### 3.2.3 Temperatura del aire

#### Termopar Tipo T

En la construcción del DTHIS-C se emplean cuatro termopares tipo T, los cuales son sensores de temperatura compuestos por la unión de cobre y cobre-níquel (constantán). Su uso es ideal para entornos con humedad.

De acuerdo con la norma ASHRAE-55, la medición de la temperatura del aire en espacios interiores debe realizarse a diferentes alturas dependiendo de la postura del ocupante: 0.1 m, 0.6 m y 1.1 m para ocupantes sentados, y 0.1 m, 1.1 m y 1.7 m para ocupantes de pie. Estas alturas representan, respectivamente, los niveles aproximados de tobillos, cintura y cabeza, y permiten evaluar la temperatura media del aire, limitando la diferencia de temperatura entre cabeza y tobillos a un máximo recomendado para garantizar condiciones de confort [1].

En la Tabla 3.5 se muestran las especificaciones principales del termopar tipo T acorde a OMEGA [23].

Tabla 3.5: Especificaciones del Termopar Tipo T.

Parámetro	Detalle
Rango de temperatura (grado de termopar)	-200 a 350 °C (-328 a 662 °F)
Límite de error por encima de 0 °C	±1.0 °C o ±0.75 % del valor medido
Límite de error por debajo de 0 °C	±1.0 °C o ±1.5 % del valor medido

#### PWFusion MAX31856 SEN-30007

El PWFusion MAX31856 SEN-30007 (Figura 3.7) es un shield de termopares de cuatro canales diseñado para integrarse con la plataforma Arduino. Este dispositivo se conecta directamente a la placa de desarrollo. El módulo acondiciona la señal proveniente de termopares, realizando el procesamiento necesario para adaptar y amplificar la señal eléctrica, la cual se caracteriza por su bajo voltaje.

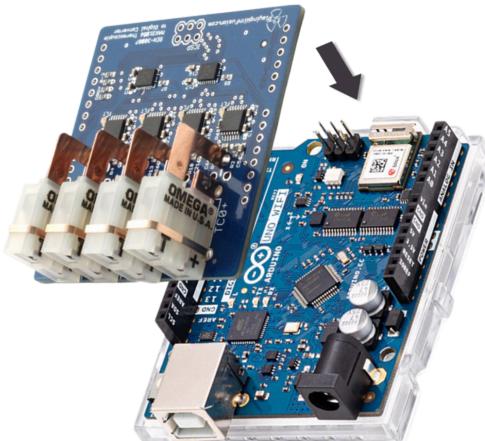


Figura 3.7: Imagen demostrativa de conexión para el shield MAX31856 SEN-30007.

Acorde a PWFusion [24] sus especificaciones son las siguientes:

- Conversión de señal analógica a digital con resolución de 19 bits.
- Interfaz SPI de 4 hilos.
- Rango de voltaje de alimentación: 3.3 V a 5.0 V.

### 3.2.4 Temperatura radiante

#### Fuehler Systeme TPF1/E-20 PT1000

Se empleó el TPF1/E-20 PT1000, diseñado para medir la temperatura radiante en un rango de temperaturas de -30°C a +75°C. Su sonda de temperatura, basada en la tecnología PT1000, se puede montar como un péndulo libremente suspendido, lo que permite obtener mediciones exactas de la temperatura de sensación térmica en entornos donde la convección natural y la estratificación del aire pueden influir en los resultados [25].

En la Tabla 3.6 se muestran las especificaciones del sensor TPF1/E-20 PT1000.

Tabla 3.6: Especificaciones del TPF1/E-20 PT1000.

Parámetro	Detalle
Rango de temperatura	-30 °C a +75 °C
Tipo de circuito	Conexión de 2 hilos
Corriente de medición	~1 mA
Conexión eléctrica	Extremos pelados con terminales
Cable	PVC ( $2 \times 0.25 \text{ mm}^2$ , T máx. +105 °C), longitudes variables
Resistencia de fuga	>100 MΩ a +20 °C (500 V DC)
Material del globo	Aluminio pintado en negro
Dimensiones del globo	Diámetro 70 mm

#### Adafruit PT1000 RTD-MAX31865

El PT1000 RTD-MAX31865 es un convertidor de resistencia a digital. La Figura 3.8 muestra el diagrama de conexión.

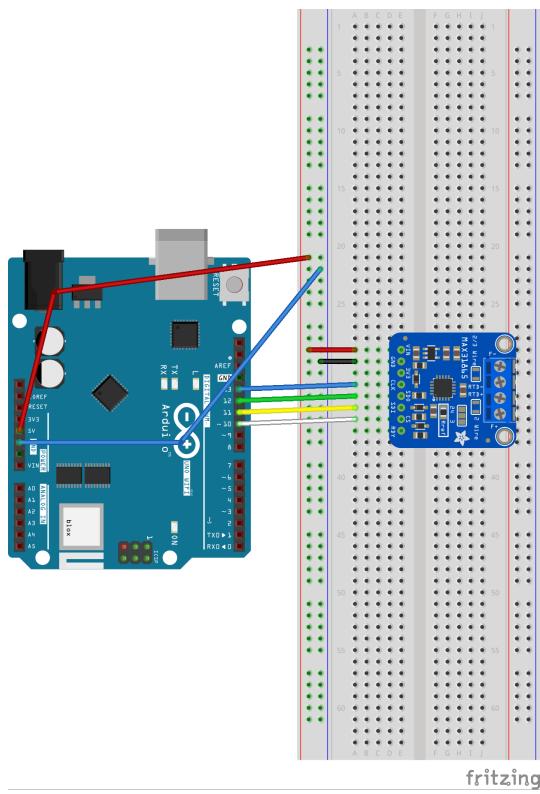


Figura 3.8: Diagrama de conexión para el PT1000 RTD-MAX31865.

Adafruit [26] describe las siguientes características:

- Realiza la conversión de la resistencia de sensores RTD de platino a un valor digital de forma sencilla.
- Soporte con RTD de platino con valores de  $100\Omega$  a  $1\text{k}\Omega$  (a  $0^\circ\text{C}$ ), abarcando desde PT100 hasta PT1000.
- Compatible con configuraciones de 2, 3 y 4 hilos para la conexión de sensores.
- Incorpora una interfaz SPI, facilitando su integración en sistemas basados en microcontroladores.
- Cuenta con un ADC de 15 bits que proporciona una resolución nominal de temperatura de  $0.03125^\circ\text{C}$  (valor variable debido a la no linealidad del RTD) y una exactitud total de hasta  $0.5^\circ\text{C}$  (0.05 % de la escala completa) en todas las condiciones operativas.
- Tiempo máximo de conversión es de 21 ms.

### 3.2.5 Velocidad del viento

#### Modern Device Wind Sensor Rev. P6

El Wind Sensor Rev. P6 (Figura 3.9) es un anemómetro de hilo caliente. Incorpora un potenciómetro de alta precisión para facilitar la calibración (realizada en fábrica) y utilizar termistores de coeficiente de temperatura positivo, que aseguran mediciones más estables incluso ante variaciones de temperatura ambiente. Requiere una fuente de alimentación de 9 a 12 V (idealmente 12 V) para garantizar el adecuado calentamiento de los termistores y evitar la saturación en condiciones de viento intenso. Integra un sensor de temperatura ambiental con salida escalada a 3.3 V y una señal de viento ajustada a un máximo de 3.3 V mediante resistencias de alta precisión [27].

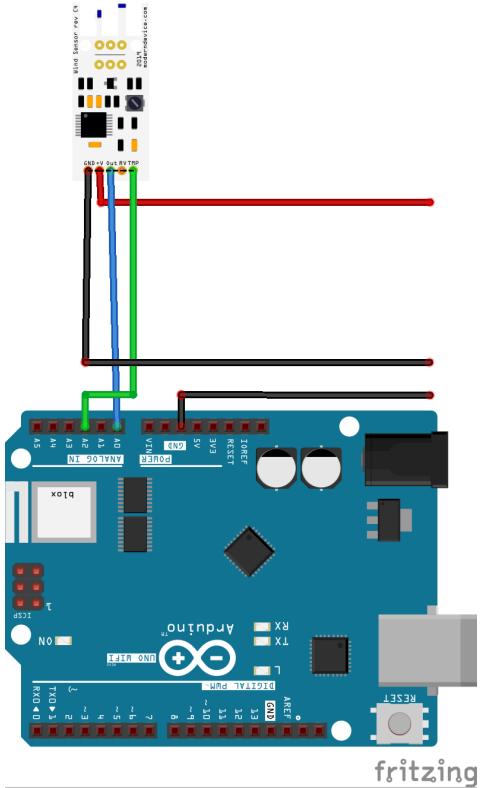


Figura 3.9: Diagrama de conexión para el Wind Sensor Rev. P6.

En la Tabla 3.7 se muestran las especificaciones del sensor Modern Device Wind Sensor Rev. P6.

Tabla 3.7: Especificaciones del Wind Sensor Rev. P6.

Parámetro	Detalle
Tipo de sensor	Anemómetro de hilo caliente
Voltaje de alimentación	9–12 V (idealmente 12 V)
Corriente de operación	~40 mA
Rango de velocidad de viento	0–150 mph

### 3.2.6 Humedad relativa y CO<sub>2</sub>

#### Sensirion SCD30

El SCD30 (Figura 3.10) es un sensor de *CO<sub>2</sub>* basado en tecnología de detección por infrarrojos. Incorpora un sensor de humedad y temperatura. Cuenta con un diseño de doble canal [28].

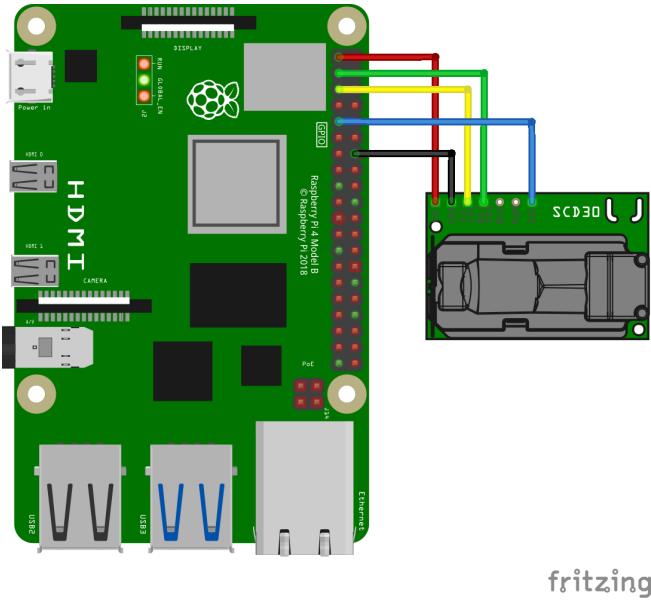


Figura 3.10: Diagrama de conexión para el SCD30.

En la Tabla 3.8 se muestran las especificaciones del sensor SCD30.

Tabla 3.8: Especificaciones del sensor SCD30.

Parámetro	Detalle
Humedad relativa	Precisión típica: $\pm 3\%$ RH; Rango: 0–95 % RH; Tiempo de respuesta ( $\tau_{63\%}$ ): 8 s; Calibrado de fábrica
<i>CO<sub>2</sub></i>	Rango: 400–10,000 ppm; Precisión: $\pm 30$ ppm $\pm 3\%$ del valor medido; Tiempo de respuesta ( $\tau_{63\%}$ ): 20 s; Estabilidad térmica: 2.5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ Error: $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Tiempo de respuesta ( $\tau_{63\%}$ ): 10 s 3.3–5.5 V
Temperatura	Promedio: 19 mA; Máxima: 75 mA Temperatura: 0–50 $^{\circ}\text{C}$
Voltaje de alimentación	
Corriente de operación	
Rango de operación	
Interfaces	I2C, ModBus, PWM
Dimensiones	35 × 23 × 7 mm

### 3.2.7 Sonido

#### Micrófono ambiental USB

El micrófono (Figura 3.11) incorpora un filtro que atenúa eficazmente los ruidos producidos por el viento o la respiración. Su patrón de captación direccional optimiza la focalización de la fuente sonora [29].



Figura 3.11: Diagrama de conexión para el micrófono.

En la Tabla 3.9 se muestran las especificaciones.

Tabla 3.9: Especificaciones del micrófono ambiental USB.

Parámetro	Detalle
Respuesta en frecuencia	50–10,000 Hz
Impedancia	2,200 Ω
Sensibilidad	-32 dB ±3 dB

### 3.2.8 Iluminancia

#### Arducam 5MP OV5647 Ultra Wide Angle

La cámara Arducam Ultra Wide Angle (Figura 3.12) cuenta con un objetivo ojo de pez M12 que ofrece un campo de visión horizontal de 220° [30].

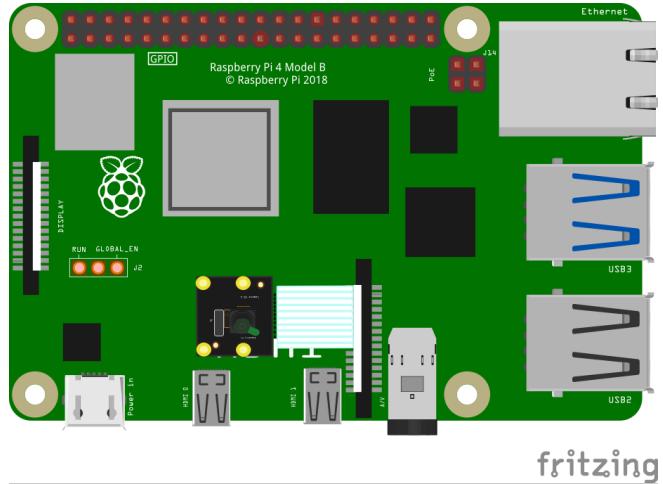


Figura 3.12: Diagrama de conexión para la cámara OV5647.

En la Tabla 3.10 se muestran las especificaciones de la cámara

Tabla 3.10: Especificaciones de la cámara Arducam 5MP OV5647 Ultra Wide Angle.

Parámetro	Detalle
Sensor	Omnivision OV5647
Tamaño del sensor	1/4"
Resolución	5 MP (2592 × 1944)
Video	1080p @ 30 fps; 720p @ 60 fps; 480p @ 90 fps
Sensibilidad IR	Filtro IR-cut integrado (solo luz visible)
Campo de visión horizontal	220°
Distancia focal efectiva	0.76 mm
Distancia focal equivalente	8.2 mm (formato 35 mm)
Tipo de enfoque	Manual
Montura del objetivo	M12
Dimensiones	36 mm × 36 mm
Corriente pico	300 mA

### 3.3 Repositorio de GitHub

Toda la configuración para los sensores en Arduino y Raspberry Pi, así como los archivos de diseño CAD, modelos STL para impresión 3D y la documentación técnica del DTHIS-C, se encuentran disponibles en un repositorio público de GitHub: [https://github.com/lata-mas/DTHIS-C\\_JoseRra](https://github.com/lata-mas/DTHIS-C_JoseRra)

Este repositorio está liberado para el uso del público en general bajo la licencia MIT, lo que significa que cualquiera puede acceder, utilizar y modificar su contenido respetando dicha licencia (es decir, dando crédito a los autores y manteniendo la misma licencia en distribuciones del trabajo derivado). Esto garantiza que tanto el DTHIS-C como su documentación y software estén disponibles abiertamente para su uso y réplica por parte de la comunidad.

El contenido del repositorio se organiza en varios directorios principales, cada uno enfocado en un tipo de archivo o información específica:

- CAD: Contiene los planos de diseño asistido por computadora (CAD) del dispositivo, junto con los archivos STL para la impresión 3D de sus piezas. En este apartado se encuentran todos los modelos necesarios para reproducir la estructura física del DTHIS-C.
- Diagramas: Incluye el pictograma de conexión y el diagrama esquemático del sistema. Estos diagramas muestran cómo deben conectarse los sensores y componentes electrónicos entre sí y con los controladores (Arduino y Raspberry Pi).
- Manuales: Alberga el manual de operación del DTHIS-C, así como las fichas técnicas (datasheets) de los sensores y componentes utilizados. Esta documentación proporciona instrucciones de uso del dispositivo y detalles técnicos importantes de cada sensor (rangos de medición, protocolos de comunicación, calibración, etc.).
- Materiales: Provee la lista completa de materiales necesarios para construir el dispositivo, junto con un desglose de sus costos estimados.
- Scripts: Contiene el código fuente completo y debidamente documentado para la configuración y operación de los sensores, abarcando tanto los programas de Arduino como los scripts de la Raspberry Pi. Además, en este directorio se incluyen las bibliotecas de software utilizadas, de forma que el entorno de desarrollo pueda replicarse fácilmente. En conjunto, estos scripts permiten la adquisición de datos de temperatura, humedad, iluminación, sonido, etc., y la transmisión de dichos datos a la plataforma IoT correspondiente.

El repositorio contiene todos los recursos necesarios para construir y utilizar el DTHIS-C. Gracias a su carácter abierto y a la estructura organizada de sus archivos, es posible reproducir el dispositivo, adaptar sus diseños e incluso contribuir a mejoras, asegurando la transparencia y reutilización del desarrollo realizado.

### 3.4 Lista de materiales

La Tabla 3.11 muestra la lista de materiales necesarios para la construcción del DTHIS-C, detallando la cantidad de cada componente, los costos y la fuente de venta.

Tabla 3.11: Lista de materiales para la construcción del DTHIS-C.

Designación	Componente	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Costo total (MXN)	Fuente de compra
Adaptador USB	UGREEN USB-C hembra a USB macho 3	1	\$199.00	\$199.00	<a href="#">Amazon</a>
Arduino	Arduino UNO WiFi Rev2	1	\$1,268.10	\$1,268.10	<a href="#">AG Electrónica</a>
Cable cámara RPi	OKY9053	1	\$27.59	\$27.59	<a href="#">AG Electrónica</a>
Carcasa RPi	Carcasa ABS para Raspberry Pi 4 con ventilador	1	\$188.00	\$188.00	<a href="#">330ohms</a>
Fisheye	5 MP OV5647 wide angle fisheye camera	1	\$502.59	\$502.59	<a href="#">AG Electrónica</a>
Fuente alim. 360W	DC 12V 30A, 360W	1	\$382.00	\$382.00	<a href="#">Amazon</a>
Fuente Arduino	Aclorol 9V 1A DC	2	\$269.00	\$538.00	<a href="#">Amazon</a>
Fuente RPi	Oficial Raspberry Pi 27W USB-C	1	\$370.00	\$370.00	<a href="#">330ohms</a>
MAX31856	PWFusion SEN-30007 MAX31856	1	≈\$1,493.10	≈\$1,493.10	<a href="#">Playing With Fusion</a>
MAX31865	Adafruit PT1000 RTD-MAX31865	1	≈\$269.10	≈\$269.10	<a href="#">Adafruit</a>
Micro SD	Kingston Canvas Go Plus 64GB	1	\$194.00	\$194.00	<a href="#">Mercado Libre</a>
Micrófono Raspberry Pi 4	Micrófono ambiental USB Raspberry Pi 4 Model B 8GB	1	\$99.00	\$99.00	<a href="#">Steren</a>
SCD30	SCD30 Sensirion	1	≈\$563.94	≈\$563.94	<a href="#">DigiKey</a>
Termopar TPF1	Termopar tipo T (30 m) TPF1/E-20 PT1000	30 m	\$3,735.00	\$3,735.00	<a href="#">Omega</a>
Tripié	XXZU 210 cm soporte de luz	1	≈\$1,576.60	≈\$1,576.60	<a href="#">FuehlerSysteme</a>
Wind Sensor	Wind Sensor Rev P6	1	≈\$539.10	≈\$539.10	<a href="#">Amazon</a>
					<a href="#">Modern Device</a>

*Nota: Los precios no incluyen envío y pueden estar sujetos a cambios según el destino del producto.*

## CAPÍTULO 4

# CALIBRACIÓN Y REFERENCIACIÓN DEL DTHIS-C

---

La confiabilidad de un dispositivo de medición depende en gran medida de la exactitud de los sensores que lo conforman. Para garantizar esta precisión, es necesario someterlos a procesos de calibración y referenciación, de acuerdo con las características de cada uno y con las condiciones en las que serán utilizados. La calibración permite ajustar y verificar los sensores frente a estándares en condiciones controladas de laboratorio, mientras que la referenciación se centra en contrastar sus lecturas con instrumentos de referencia en escenarios reales de operación, especialmente cuando los sensores ya vienen calibrados de fábrica.

En este capítulo se describen los procedimientos empleados para asegurar la exactitud del DTHIS-C, incluyendo las metodologías experimentales, las herramientas utilizadas para la adquisición y recuperación de datos, y las pruebas realizadas en distintos contextos de medición. Asimismo, se presentan los resultados del proceso de caracterización de cada sensor, con el fin de identificar sus errores sistemáticos y validar su desempeño dentro del dispositivo.

Los resultados obtenidos en este capítulo sirven de fundamento para las conclusiones del trabajo, donde se discuten los principales hallazgos y el valor agregado del DTHIS-C, y se reconocen tanto sus limitaciones como las oportunidades de mejora.

### 4.1 Metodología experimental

La calibración consiste en verificar y ajustar la exactitud de un sensor comparándolo con un estándar de referencia bajo condiciones controladas de laboratorio. Este procedimiento se utiliza principalmente cuando el fabricante no proporciona una calibración previa o cuando se requiere garantizar que las mediciones cumplan con un nivel de exactitud determinado. Su propósito es corregir errores sistemáticos de los sensores, asegurando que las lecturas reflejen de manera confiable el valor real de la magnitud medida.

Por otro lado, la referenciación implica comparar directamente las lecturas del sensor con las de un instrumento de referencia en condiciones reales de operación. A diferencia de la calibración, no busca ajustar el sensor en sí, sino evaluar su desempeño en el entorno de uso y determinar la validez práctica de sus mediciones. Este procedimiento resulta útil para identificar desviaciones que pueden surgir por factores como la instalación, la ventilación o la interacción con otras variables ambientales.

En el caso de sensores que ya vienen calibrados de fábrica, como el SCD30, no es necesario realizar un proceso de calibración formal. Estos sensores incluyen ajustes internos que garantizan su exactitud dentro del rango especificado por el fabricante. Para ellos, basta con llevar a cabo una referenciación, es decir, comparar sus lecturas con las de un equipo de referencia para confirmar su confiabilidad en condiciones reales de uso.

Cada sensor empleado en este estudio mide variables físicas distintas utilizando métodos de medición específicos. Por ello, se diseñaron campañas de calibración y referenciación adaptadas a las características únicas de cada instrumento, procesos fundamentales para asegurar tanto la exactitud como la confiabilidad de los datos recopilados, para detectar y corregir posibles desviaciones.

En la Tabla 4.1 se presenta la lista de los sensores y sus respectivos instrumentos de referencia utilizados en los procesos de calibración y referenciación.

Tabla 4.1: Procedimientos de calibración y referenciación para cada variable y sensor.

Variable	Sensor	Instrumento	Procedimiento
Temperatura ambiente	Termopar tipo T	AMETEK Jofra PTC-155	Calibración
Temperatura radiante	TPF1/E-20 PT1000	Quest Technologies QUESTemp 36	Calibración
Velocidad del viento	Wind Sensor Rev P6	Gill Instruments WindMaster	Calibración
CO <sub>2</sub> y humedad relativa	SCD30 Sensirion	Fluke 975 AirMeter	Referenciación
Sonido	Micrófono ambiental USB	TES-1356 Sound Level Calibrator	Calibración
Luminancia	5 MP OV5647 wide angle fisheye camera	No aplica	No aplica

Para evaluar la exactitud, se emplearon dos métricas:

- Error Medio (EM): Mide la desviación promedio de las mediciones del sensor respecto al instrumento de referencia. Un valor positivo indica que el sensor tiende a sobreestimar, mientras que un valor negativo revela una subestimación. Se evalúa con:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{s,i} - X_{r,i}). \quad (4.1)$$

donde  $X_{s,i}$  y  $X_{r,i}$  son las lecturas del sensor y de la referencia para cada muestra, el índice  $i$  indica la posición de cada par de lecturas en la serie de datos, y  $n$  es el total de muestras.

- Error Absoluto Medio (EAM): Calcula el promedio de las diferencias absolutas entre las mediciones del sensor y las de la referencia, sin considerar el signo. Esta métrica proporciona una medida de la magnitud del error, independientemente de su dirección, y se define como:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{s,i} - X_{r,i}|. \quad (4.2)$$

## 4.2 Obtención de los datos

### ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma IoT de código abierto diseñada para la recopilación, procesamiento, visualización y gestión de dispositivos [31]. En el contexto de esta tesis, se utiliza para transmitir en tiempo real las mediciones obtenidas de los distintos sensores del DTHIS-C hacia un servidor central, donde se alojan y resguardan los datos en una base de datos dedicada a Internet de las Cosas.

Según la documentación oficial de ThingsBoard, la plataforma admite la conectividad mediante protocolos estándares como MQTT, CoAP y HTTP, lo que facilita la integración de diversos dispositivos y sensores [31]. En este caso, las mediciones de los sensores se envían desde el DTHIS-C a ThingsBoard, que actúa como una base de datos. La plataforma no solo almacena la información, sino que también permite la creación de tableros interactivos y personalizables que posibilitan la visualización en tiempo real de las mediciones. Esto es fundamental durante las campañas de medición, ya que permite monitorear de forma inmediata el funcionamiento de los sensores, identificar tendencias y detectar posibles anomalías en los datos.

Para facilitar la obtención de datos directamente desde la plataforma ThingsBoard, el Grupo de Energía en Edificaciones del IER-UNAM desarrolló el paquete instalable de Python `iertools`. Una vez configurado un entorno Python y Git instalado, puede integrarse a al sistema ejecutando en la terminal el siguiente comando:

```
1 pip install git+https://github.com/AltamarMx/iertools.git
```

Es importante señalar que, antes de proceder a la obtención y descarga de datos desde ThingsBoard, es necesario crear un archivo de configuración con extensión `.ini`. Un archivo `.ini` es un documento de texto plano que almacena parámetros y opciones en formato clave-valor, y se utiliza para definir la configuración necesaria (como la URL del servidor y el token de acceso) que el paquete `iertools` requiere para conectarse a ThingsBoard.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo estructurar dicho archivo:

```
1 [dthisc]
2 token      = token
3 device_id  = device_id
4 tenant     = lata_testing@ier.unam.mx
5 password   = password
6 host       = tb.iер.unam.mx
7 port       = 8080
```

Una vez instalado `iertools`, es posible recuperar datos desde un script o notebook. El siguiente fragmento de código ilustra cómo obtener los datos de medición de los termopares del DTHIS-C a partir de ThingsBoard; este ejemplo puede ser ajustado según las necesidades específicas, permitiendo extraer distintos conjuntos de datos conforme a los requerimientos del estudio:

```

1  from iertools.tb import *
2  from dateutil.parser import parse
3  import warnings
4  warnings.filterwarnings("ignore")
5
6  fecha1 = parse("2024-11-22")
7  fecha2 = fecha1 + pd.Timedelta("1D")
8
9  tmp = TB(config_file='data/config.ini', device_name='dthisc')
10 sensores = ["TEMP1", "TEMP2", "TEMP3", "TEMP4"]
11
12 data = pd.concat(
13     [tmp.get_df(key=sensor, start_datetime=fecha1, end_datetime=fecha2)
14      for sensor in sensores],
15      axis=1
16 )
17
18 hora_inicio = "2024-11-22 15:42"
19 hora_fin = "2024-11-22 17:09"
20
21 data = data[(data.index >= hora_inicio) & (data.index <= hora_fin)]
22 data.sort_index(inplace=True)
23
24 data.head(5)

```

ts	TEMP1	TEMP2	TEMP3	TEMP4
2024-11-22 15:42:00.774	12.42	12.63	13.81	13.48
2024-11-22 15:42:03.505	12.37	12.57	13.81	13.46
2024-11-22 15:42:06.235	12.44	12.61	13.75	13.48
2024-11-22 15:42:08.965	12.46	12.59	13.79	13.45
2024-11-22 15:42:11.697	12.38	12.51	13.75	13.44

Finalmente, para almacenar los datos recuperados, se puede utilizar el siguiente comando para exportarlos a un archivo CSV:

```
1  data.to_csv("ruta/de/su/preferencia.csv")
```

### 4.3 Temperatura del aire

#### Termopar

En esta campaña de calibración se utilizó el AMETEK Jofra PTC-155 (Figura 4.1), un calibrador de temperatura que permite evaluar sensores en un rango de -25°C a 155°C.



Figura 4.1: AMETEK Jofra PTC-155.

El instrumento mencionado se utilizó junto a cuatro termopares tipo T, estableciendo cinco puntos de referencia de temperatura en el intervalo de 10°C a 50°C.

Para cada punto de calibración, se esperó aproximadamente 5 minutos para que el calibrador alcanzara y estabilizara la temperatura deseada. Una vez estabilizada, se registraron los datos durante 10 minutos antes de proceder al siguiente punto. Los resultados obtenidos en esta campaña se pueden observar en la Figura 4.2.

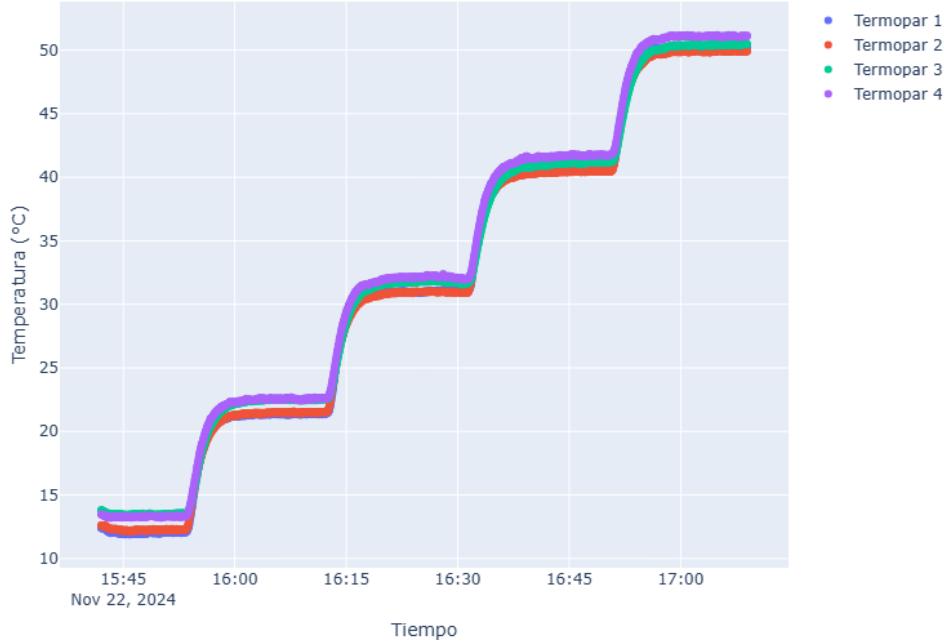


Figura 4.2: Temperaturas registradas por los termopares durante el proceso de calibración.

Para la calibración de los termopares, se utilizó Python junto con la librería `scikit-learn`, una

herramienta utilizada para el análisis y modelado de datos. En particular, se aplicó un ajuste por regresión lineal a los datos obtenidos durante la campaña, utilizando los siguientes rangos de tiempo y sus respectivas temperaturas de referencia ( $T_{ref}$ ) (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Temperaturas de referencia y rangos de tiempo.

Tref (°C)	Inicio	Final
10	15:44:01	15:52:31
20	16:02:06	16:11:52
30	16:20:44	16:28:58
40	16:39:23	16:49:57
50	16:58:24	17:08:25

El ajuste por regresión lineal es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. En este caso, la variable dependiente es la temperatura de referencia ( $T_{ref}$ ), mientras que las variables independientes corresponden a las lecturas obtenidas por cada termopar. El modelo lineal se expresa de la forma:

$$T_{ref} = m \times T_{sensor} + b \quad (4.3)$$

donde  $m$  es la pendiente y  $b$  es la ordenada al origen. La regresión lineal permite minimizar el error entre las mediciones del sensor y los valores de referencia, obteniendo las siguientes ecuaciones de calibración:

$$T_{ref} = 1.0450 \times \text{Termopar 1} - 2.4327 \quad (4.4)$$

$$T_{ref} = 1.0602 \times \text{Termopar 2} - 2.8632 \quad (4.5)$$

$$T_{ref} = 1.0814 \times \text{Termopar 3} - 4.4316 \quad (4.6)$$

$$T_{ref} = 1.0554 \times \text{Termopar 4} - 3.9348 \quad (4.7)$$

Al aplicar estas ecuaciones a los datos obtenidos en la campaña, se obtienen los valores calibrados de temperatura para cada termopar. Los ajustes lineales pueden observarse en la Figura 4.3.

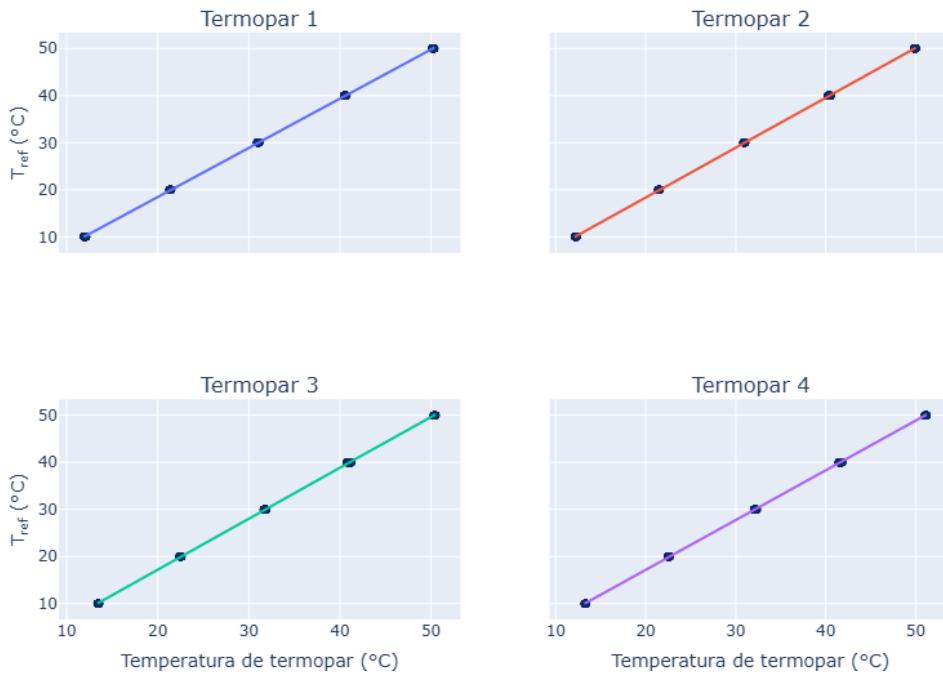


Figura 4.3: Resultados de las mediciones de temperatura después de aplicar la regresión lineal.

En la Tabla 4.3 se observa que, antes de la calibración, los cuatro termopares presentaban EM positivos significativos, con valores que oscilaban entre  $0.95^{\circ}C$  y  $2.11^{\circ}C$ . Esto indica un sesgo sistemático consistente que tendía a sobreestimar la temperatura respecto a los valores de referencia. Tras aplicar la calibración, los EM se reducen drásticamente hasta valores cercanos a cero, entre  $-0.00^{\circ}C$  y  $0.00^{\circ}C$ , lo que evidencia la eliminación del sesgo sistemático. Asimismo, el EAM disminuye considerablemente en todos los casos, pasando de un rango de  $0.99^{\circ}C$  a  $2.11^{\circ}C$  a un nuevo rango de  $0.08^{\circ}C$  a  $0.10^{\circ}C$ . Esta reducción refleja una mejora en la exactitud de las mediciones.

Tabla 4.3: EM y EAM de cada termopar antes y después de la calibración.

Termopar	EM (antes) [ $^{\circ}C$ ]	EM (después) [ $^{\circ}C$ ]	EAM (antes) [ $^{\circ}C$ ]	EAM (después) [ $^{\circ}C$ ]
Termopar 1	1.00	-0.00	1.00	0.08
Termopar 2	0.95	0.00	0.99	0.08
Termopar 3	1.77	-0.00	1.77	0.10
Termopar 4	2.11	0.00	2.11	0.08

## SCD30

Para la campaña de referenciación del SCD30, el instrumento utilizado fue el Fluke 975 AirMeter (Figura 4.4), este es un instrumento portátil de diagnóstico de la calidad del aire interior. Este dispositivo mide simultáneamente temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ).



Figura 4.4: Fluke 975 AirMeter.

La campaña consistió en realizar mediciones simultáneas del Fluke 975 AirMeter y del SCD30 durante un período total de 7 horas y 45 minutos, registrando una muestra cada minuto. Para minimizar posibles interferencias, ambos dispositivos se ubicaron lo más próximos posible y se instalaron en una zona aislada del espacio interior donde se llevo a cabo la prueba, de modo que la presencia humana no afectara los resultados. Los datos obtenidos se muestran en la Figura 4.5.

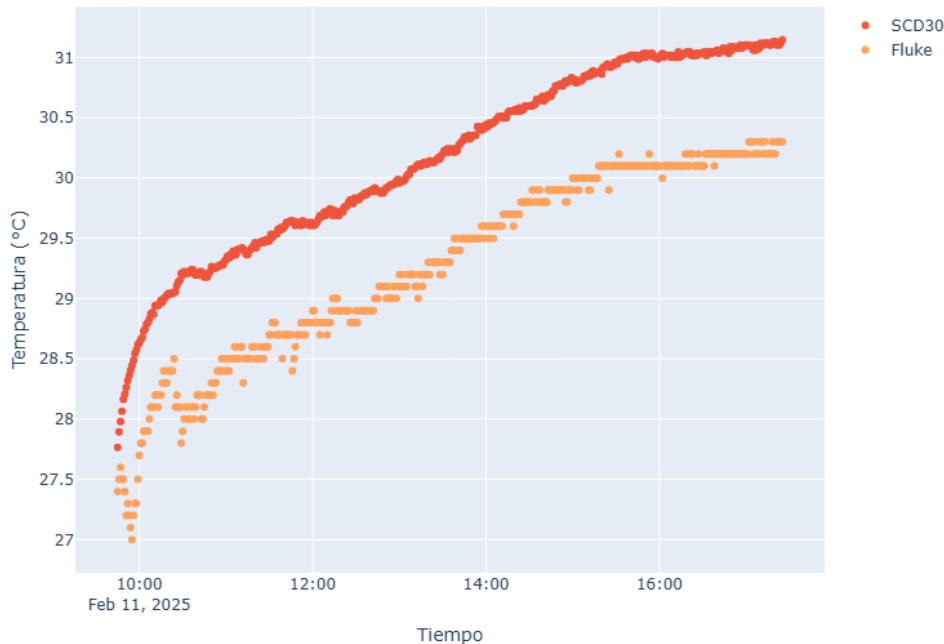


Figura 4.5: Comparación de las mediciones de temperatura del Fluke y el SCD30 durante su campaña de referenciación.

Para esta campaña de referenciación, se compararon directamente los datos de medición obtenidos por el SCD30 y el Fluke 975 AirMeter, dado que el SCD30 se adquiere ya calibrado. Se realizó el cálculo de errores, en particular el EM y el EAM, para evaluar la discrepancia entre las mediciones de

ambos instrumentos.

La Tabla 4.4 presenta los resultados de temperatura del aire obtenidos para cada instrumento:

Tabla 4.4: EM y EAM para la temperatura del SCD30 con respecto al Fluke.

Variable	EM [°C]	EAM [°C]
Temperatura	0.89	0.89

La tabla presenta el EM y el EAM en la medición de temperatura del sensor SCD30 en comparación con el Fluke. Se observa que el SCD30 tiende a sobreestimar la temperatura en un promedio de 0.89°C. La similitud entre el EM y el EAM significa que las desviaciones no presentan grandes variaciones y se distribuyen de manera uniforme..

La correlación entre las mediciones de ambos instrumentos se visualiza en la Figura 4.6, lo que respalda la evaluación de exactitud. Un coeficiente de correlación elevado indicaría que, a pesar de los errores sistemáticos, la tendencia de las mediciones del SCD30 sigue de cerca la del Fluke.

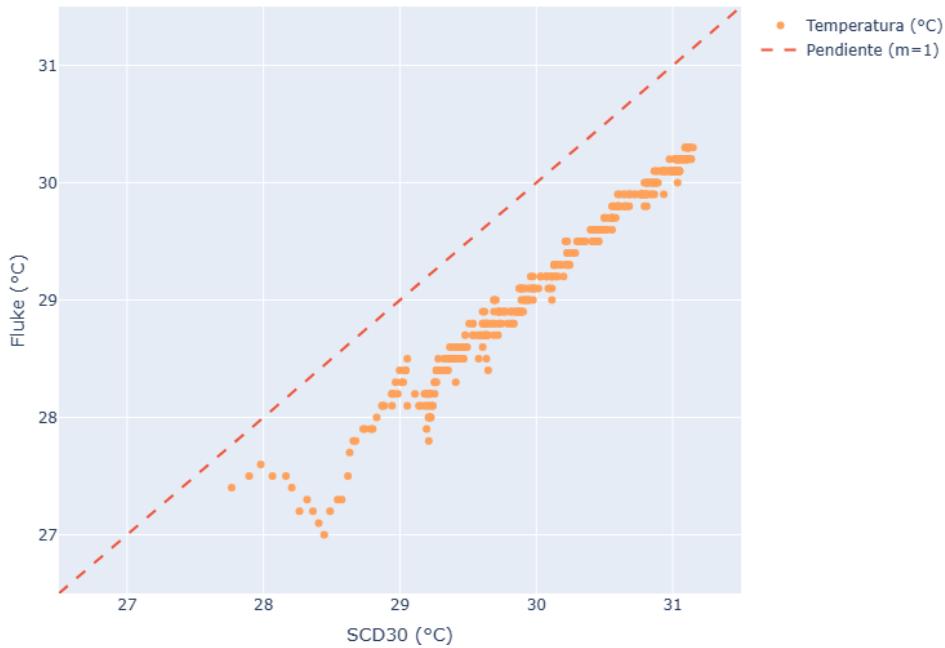


Figura 4.6: Correlación de las mediciones de temperatura entre el Fluke y el SCD30.

## 4.4 Temperatura radiante

### TPF1

Para la medición de la temperatura radiante se empleó el QUESTemp 36 (Figura 4.7), un confortímetro diseñado para evaluar el estrés térmico en el ambiente, ya que permite medir la temperatura radiante, la temperatura del aire y la humedad relativa.



Figura 4.7: Quest Technologies QUESTemp 36.

El experimento consistió en ubicar el QUESTemp 36 dentro de una caja diseñada para limitar la incidencia directa de la radiación solar, lo que minimizó la influencia de la radiación externa y redujo el efecto de la convección forzada del viento, permitiendo así que la medición se centrara en la radiación térmica del entorno inmediato. Paralelamente, se colocó el sensor TPF1 en condiciones similares para garantizar que ambos dispositivos registraran la temperatura con la menor perturbación posible. Se tomaron datos cada minuto durante 23 horas. Los datos obtenidos se pueden observar en la Figura 4.8.

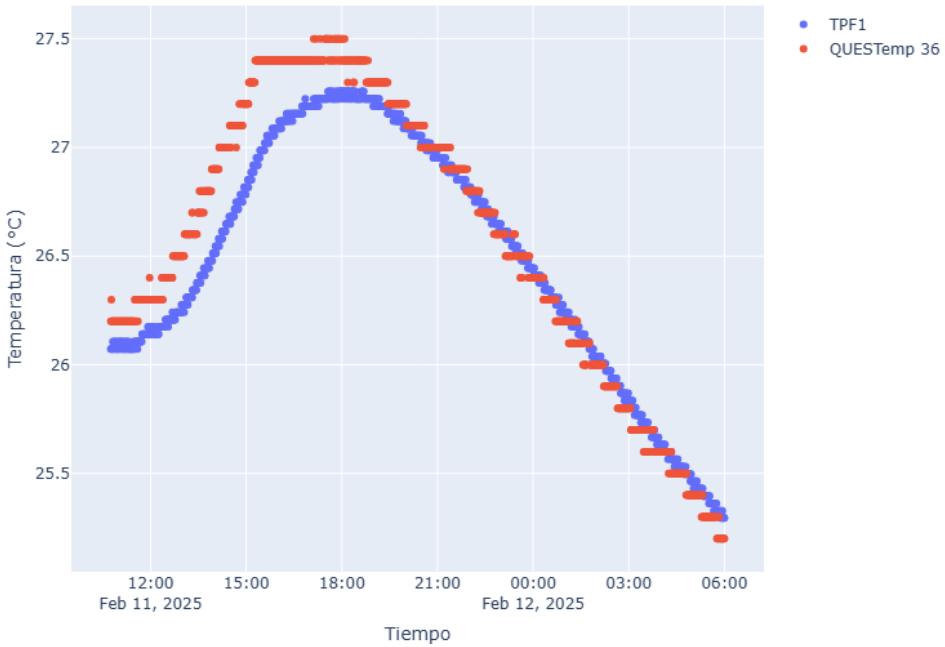


Figura 4.8: Intervalo de medición del QUESTemp 36 y el TPF1 para su calibración.

Para la calibración del TPF1/E-20, se aplicó un ajuste por regresión lineal utilizando la librería `scikit-learn` de Python, a partir de los datos de temperatura registrados simultáneamente por el QUESTemp 36 y el sensor TPF1/E-20. Empleando el mismo modelo lineal descrito en la Ecuación 4.3, se derivó la siguiente ecuación de calibración:

$$T_{ref} = 1.0582 \times Temperatura - 1.5553 \quad (4.8)$$

Al aplicar esta ecuación a los datos obtenidos durante la campaña, se calcularon los valores corregidos para el TPF1/E-20. Los ajustes lineales se pueden observar en la Figura 4.9.

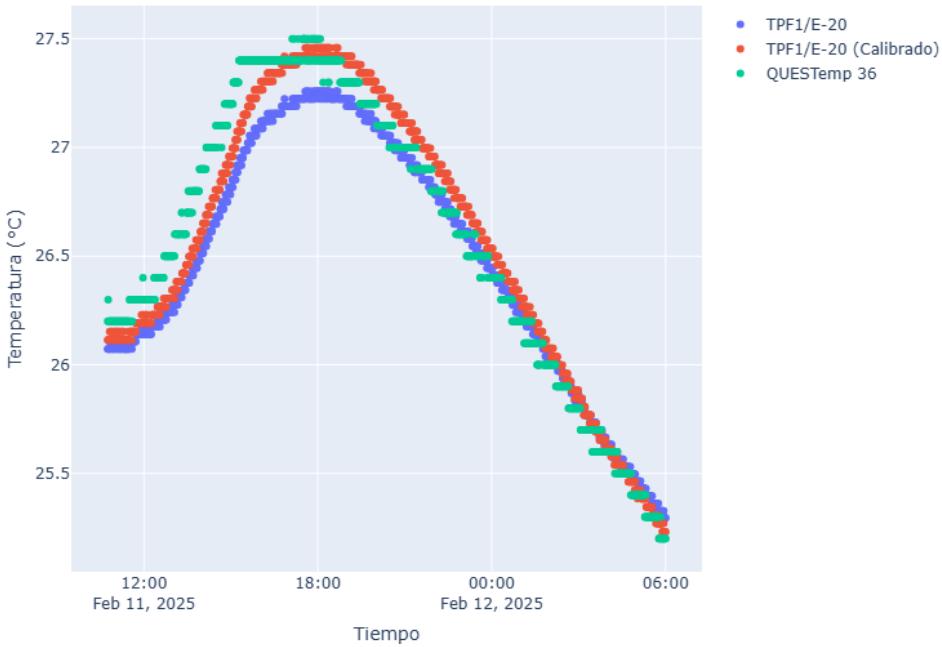


Figura 4.9: Comparación de las mediciones del QUESTemp 36, el TPF1/E-20 y sus datos tras la calibración.

En la Tabla 4.5 se observa que, antes de calibrar, el sensor TPF1/E-20 presentaba un EM de -0.10°C, lo que indica un sesgo sistemático que tendía a subestimar la temperatura en comparación con el QUESTemp 36. Tras la aplicación de la ecuación de calibración, el EM se reduce a -0.00°C, un valor prácticamente nulo que evidencia la eliminación casi total del sesgo sistemático. Paralelamente, el EAM disminuye de 0.14°C a 0.11°C, lo que implica una mejora significativa en la exactitud de las mediciones. Estos resultados confirman que el proceso de calibración ha corregido adecuadamente el sesgo de los datos, permitiendo obtener mediciones de temperatura estrechamente alineadas con los valores de referencia del QUESTemp 36.

Tabla 4.5: EM y EAM del TPF1 antes y después de la calibración.

Fase	EM [°C]	EAM [°C]
Antes de calibrar	-0.10	0.14
Después de calibrar	-0.00	0.11

## 4.5 Velocidad del viento

### Wind Sensor

El WindMaster de Gill Instruments (Figura 4.10) es un anemómetro ultrasónico de alta precisión diseñado para medir la velocidad y dirección del viento en tres direcciones (u, v, w). En esta campaña se utilizó como instrumento de referencia para la calibración del Wind Sensor.



Figura 4.10: Gill Instruments WindMaster.

La campaña de calibración tuvo una duración de 1 hora, durante la cual se registraron datos a una frecuencia de 1 Hz. Como se muestra en la Figura 4.11, el Wind Sensor fue colocado estratégicamente en la parte superior central del WindMaster, asegurándose previamente de que su ubicación no afectara las mediciones del anemómetro.

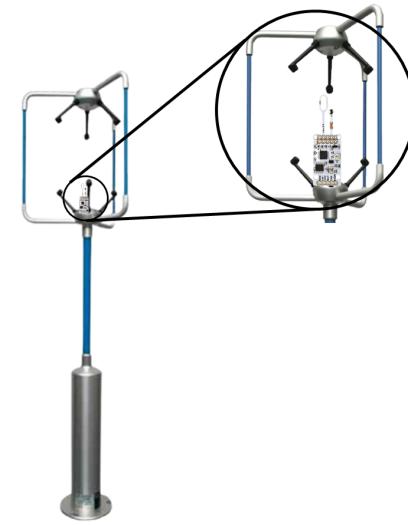


Figura 4.11: Posición del Wind Sensor sobre el WindMaster durante su calibración.

En un entorno abierto, el WindSensor registró datos de voltaje, los cuales se utilizaron junto con los datos de velocidad del viento obtenidos del WindMaster para desarrollar una ecuación de calibración que permitiera convertir el voltaje medido a m/s. Los resultados de la campaña se pueden visualizar en la Figura 4.12.

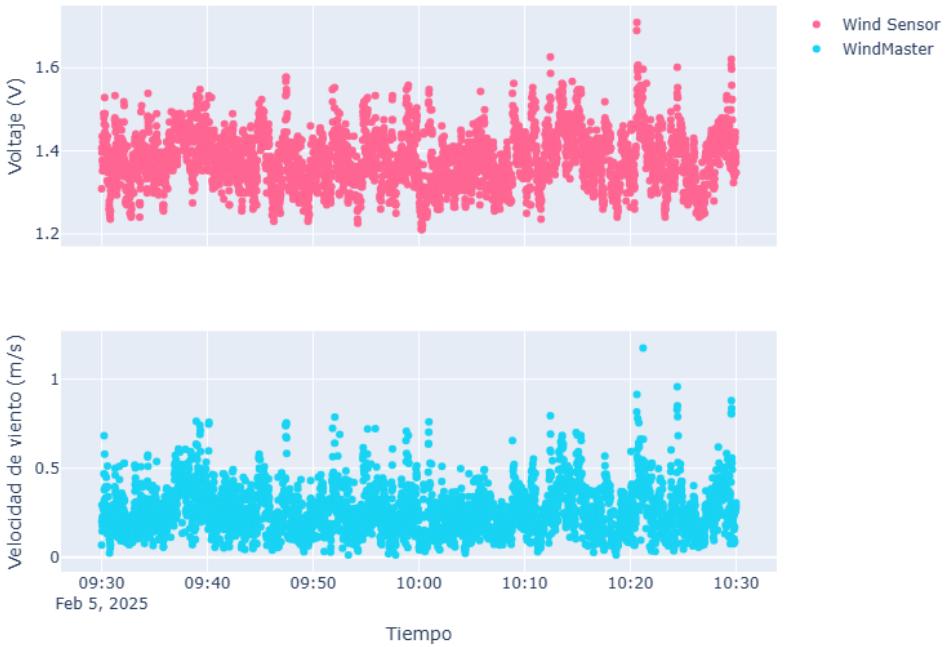


Figura 4.12: Comparación de la velocidad del viento registrada por el WindMaster y el voltaje del Wind Sensor durante la campaña de calibración.

Cabe mencionar que el Wind Sensor emplea la técnica de anemometría por filamento caliente, en la que un pequeño elemento resistivo se mantiene a una temperatura superior a la del aire circundante. La velocidad del viento se determina a partir de la cantidad de voltaje necesaria para compensar la pérdida de calor del filamento.

Por lo tanto se llevó a cabo otra campaña donde se detectó un desfase sistemático de 1.1621 V en condiciones de viento nulo (0 m/s). Este valor base se genera por varios factores inherentes al sistema de medida, por ejemplo:

- Calentamiento de mantenimiento del filamento: Aún sin flujo de aire, el filamento caliente requiere un voltaje mínimo para mantener su temperatura de operación.
- Variaciones en la temperatura ambiente: Los cambios de la temperatura del aire modifican la resistencia del filamento y de otros componentes, desplazando el punto cero del sensor.

Para aislar la respuesta al viento y eliminar dichas contribuciones, se restaron 1.1621 V de cada lectura de voltaje antes de ajustar el modelo de calibración. De este modo, la señal procesada refleja únicamente la influencia de la velocidad del viento sobre el filamento caliente.

Durante la calibración del Wind Sensor se siguió la metodología proporcionada por el fabricante en su blog oficial [32]. Según esta fuente, la relación entre la velocidad del viento (WS), el voltaje corregido y la temperatura sigue una ley de potencia descrita por la siguiente ecuación:

$$WS = a \times (\text{Voltaje})^b \times (\text{Temperatura})^c \quad (4.9)$$

Para facilitar el ajuste mediante técnicas de regresión, se aplicó una transformación logarítmica a ambos lados de la ecuación, lo que permitió convertir el modelo en una forma lineal:

$$\ln(WS) = \ln(a) + b \times \ln(\text{Voltaje}) + c \times \ln(\text{Temperatura}) \quad (4.10)$$

Esta transformación permitió emplear técnicas de regresión lineal para estimar los parámetros  $\ln(a)$ ,  $b$  y  $c$  a partir de los datos experimentales. Una vez obtenidos, se recuperó el parámetro  $a$  mediante la función exponencial ( $a = \exp(\ln(a))$ ) y se formuló la ecuación de calibración en su forma original. En este dominio lineal, se utilizó la librería `scikit-learn` de Python para estimar los parámetros del modelo.

Se probaron tres opciones de remuestreo, 3, 5 y 10 segundos, y se calculó para cada una el coeficiente de correlación ( $r$ ) entre el voltaje corregido del Wind Sensor y la velocidad del viento del WindMaster. En la Tabla 4.6 se muestran los coeficientes de correlación para los diferentes remuestreos.

Tabla 4.6: Coeficientes de correlación para los distintos remuestreos.

Remuestreo	Coeficiente de correlación
3 segundos	0.7622
5 segundos	0.8079
10 segundos	0.8637

Los coeficientes de correlación más cercanos a 1 indican una mayor concordancia entre las lecturas del Wind Sensor y las del WindMaster, por lo que se optó por el remuestreo a 10 segundos. Este intervalo más amplio reduce las fluctuaciones repentinas (el ruido") en el voltaje del sensor, sin comprometer la capacidad de capturar las variaciones reales de velocidad de viento necesarias para la calibración. En consecuencia, la relación señal-ruido mejora, es decir, aumenta la proporción de información útil frente a las perturbaciones indeseadas. Con estos datos remuestreados a 10 segundos se aplicó la regresión lineal en el dominio logarítmico, obteniéndose la siguiente ecuación de calibración:

$$WS = 26.3431 \times (\text{Voltaje})^{1.4273} \times (\text{Temperatura})^{-0.7631} \quad (4.11)$$

Esta ecuación se empleó para convertir las mediciones de voltaje (tras aplicar la corrección) y de temperatura en valores precisos de velocidad del viento (m/s) con respecto al WindMaster y pueden observarse en la Figura 4.13.



Figura 4.13: Comparación de las mediciones de velocidad del viento registradas por el WindMaster y el Wind Sensor tras su calibración.

En la Tabla 4.7 se observa que, antes de calibrar, el Wind Sensor Rev. P6 presentaba un EM de -0.01 m/s, indicando un sesgo sistemático que subestimaba la velocidad del viento frente al WindMaster. Tras aplicar la ecuación de calibración, el error se reduce a -0.00 m/s, eliminando prácticamente el sesgo. Además, el EAM baja de 0.06 m/s a 0.05 m/s, mejorando la exactitud de las mediciones. Estos resultados demuestran que la calibración ha corregido tanto el sesgo de los datos, asegurando mediciones con mayor exactitud respecto al WindMaster.

Tabla 4.7: EM y EAM del Wind Sensor antes y después de la calibración.

Fase	EM [m/s]	EAM [m/s]
Antes de calibrar	-0.01	0.06
Después de calibrar	-0.00	0.05

## 4.6 Humedad relativa y CO<sub>2</sub>

### SCD30

Al igual que en el caso de la temperatura del aire, el SCD30 se utilizó para obtener mediciones de humedad relativa y concentraciones de CO<sub>2</sub>, empleándose nuevamente el Fluke 975 AirMeter (Figura 4.4) como instrumento de referencia. La recolección de datos se realizó durante la misma campaña, por lo que las condiciones ambientales y los procedimientos fueron idénticos a las descritas en la Sección 4.3. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.14.

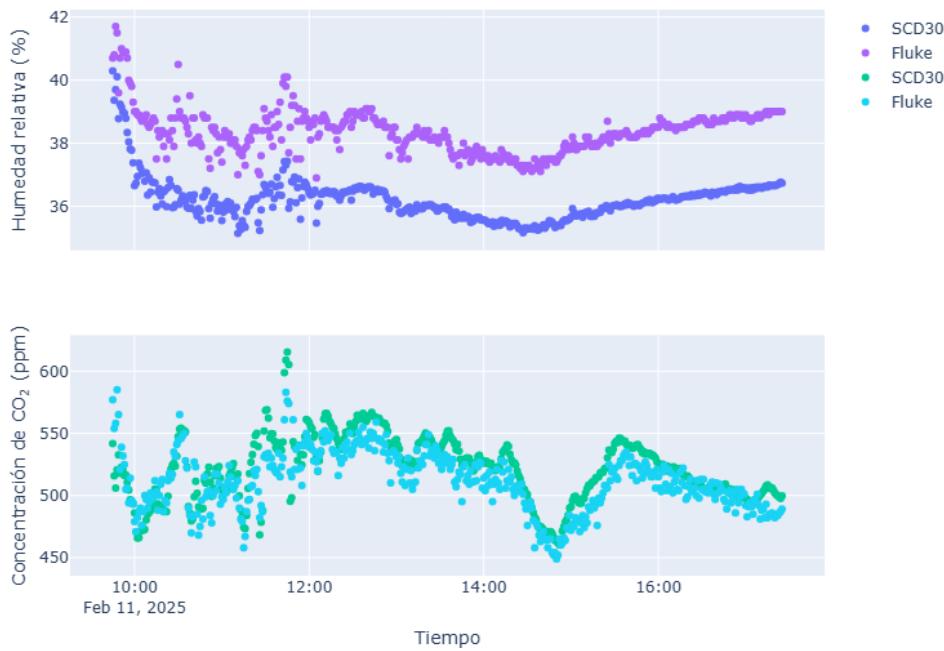


Figura 4.14: Comparación de las mediciones de humedad relativa y  $CO_2$  del Fluke y el SCD30 durante su campaña de referenciación.

Se obtuvieron el EM y el EAM para evaluar la discrepancia entre las mediciones del SCD30 y el Fluke. La Tabla 4.8 muestra que, en el caso de la humedad relativa, el SCD30 subestima en promedio 2.17 puntos porcentuales respecto al Fluke. En contraste, para la concentración de  $CO_2$  se observa una sobreestimación promedio de 9.65 ppm. Además, el hecho de que el EAM para el  $CO_2$  sea mayor que el EM indica una mayor dispersión en las mediciones de este parámetro.

Tabla 4.8: EM y EAM para la humedad relativa y el  $CO_2$  del SCD30 con respecto al Fluke.

Variable	EM	EAM
Humedad relativa	-2.17 %	2.17 %
$CO_2$	9.65 ppm	13.16 ppm

La correlación entre las mediciones de ambos instrumentos se visualiza en la Figura 4.15.

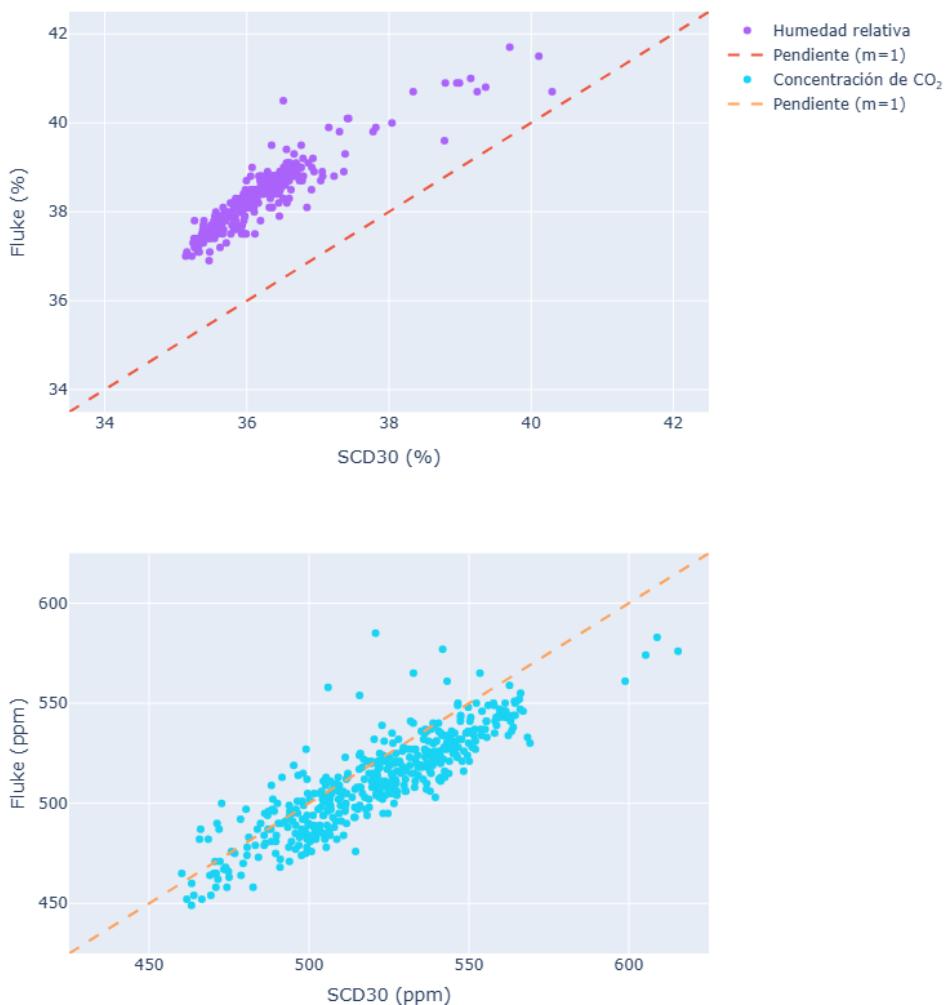


Figura 4.15: Correlación de las mediciones de humedad relativa y  $CO_2$  entre el Fluke y el SCD30.

## 4.7 Sonido

### Micrófono

El TES-1356 Sound Level Calibrator (Figura 4.16) es un calibrador de nivel de sonido capaz de generar tonos de referencia estándar de 94  $dB$  y 114  $dB$  a 1,000  $Hz$ , con un margen de error de  $\pm 0.5 dB$ .



Figura 4.16: TES-1356 Sound Level Calibrator.

En este caso, dicho instrumento sirvió para generar un entorno controlado de medición para la calibración del micrófono USB del DTHIS-C, pero el ajuste final se realizó empleando la siguiente ecuación empírica:

$$dB = 20 \log_{10}(A) + 120 \quad (4.12)$$

donde  $A$  es la amplitud RMS de la señal digitalizada.

Para obtener  $A$ , se procedió así:

1. Grabación: Se capturó un tono constante (por ejemplo, 94 dB @ 1,000 Hz) durante 15 segundos a 44.1 kHz, con el micrófono acoplado al calibrador en un entorno silencioso:

```
1 #!/bin/bash
2 arecord -D plughw:3,0 -f cd -t wav -d 15 -r 44100 audio.wav
```

2. Extracción de amplitud RMS, máxima y mínima mediante el programa sox:

```
1 #!/bin/bash
2 sox audio.wav -n stat 2>&1 \
3 | grep "RMS      amplitude:" \
4 | awk '{print $3}' > rms.txt
5
6 # (análogo para dBmax.txt y dBmin.txt)
```

3. Cálculo en Python:

```
1 import numpy as np
2
3 with open('rms.txt') as f: rms_x = float(f.read().strip())
4 with open('dBmax.txt') as f: dBmax_x = float(f.read().strip())
5 with open('dBmin.txt') as f: dBmin_x = float(f.read().strip())
```

```

6
7 rms_db = round(20 * np.log10(rms_x) + 120, 4)
8 dBmax_db = round(20 * np.log10(dBmax_x) + 120, 4)
9 dBmin_db = round(20 * np.log10(abs(dBmin_x)) + 120, 4)

```

Con este procedimiento, la constante 120 *dB* se aplicó directamente para ajustar la salida del ADC del micrófono a una escala de *dB*, garantizando que los valores calculados reflejen niveles de presión sonora coherentes con la referencia del calibrador.

## 4.8 Iluminancia

### Fisheye

En el caso de la iluminancia, no se realizó ningún proceso de calibración o referenciación. La calibración no aplica en este caso, ya que el método no depende de la respuesta espectral absoluta de la cámara, sino de un proceso computacional que transforma imágenes HDR en estimaciones de iluminancia mediante modelos de luminancia integrados en Radiance.

Se empleó la cámara Arducam 5MP OV5647 Ultra Wide Angle en conjunto con el software *Radiance* y se desarrolló un script que calcula la iluminancia total mediante la integral de los valores de luminancia que conforman el mapa generado a partir de las imágenes capturadas (Figura 4.17). El proceso inicia con la creación de una imagen HDR a partir de la fusión de fotografías tomadas a diferentes exposiciones, lo que permite capturar la mayor cantidad de información posible sobre la intensidad luminosa. Posteriormente, a esta imagen HDR se le aplica una escala de false color para identificar los valores de luminancia en cada punto de la imagen. El cálculo de la integral para el mapa generado facilita la determinación de la iluminancia total del espacio interior en el momento de la captura.

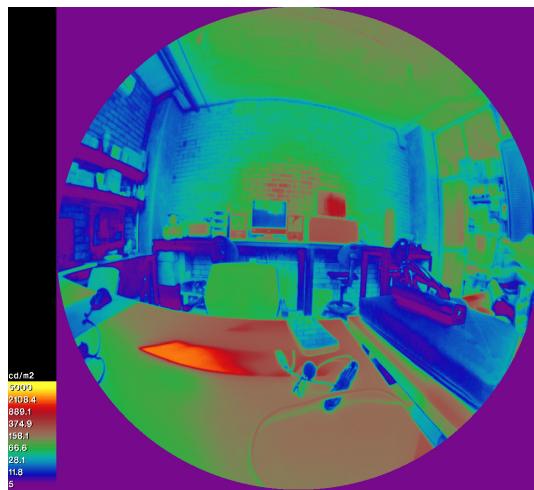


Figura 4.17: Mapa de luminancia generado con una cámara 5MP OV5647 y el software Radiance.

En este contexto, los mapas de luminancia generados son de carácter cualitativo, pues su principal objetivo es representar visualmente la distribución espacial de la intensidad luminosa más que

proporcionar valores puntuales. Estos mapas permiten identificar zonas de alta o baja iluminancia y comprender la uniformidad de la luz en el espacio, mientras que la cuantificación se deriva directamente del cálculo integral aplicado a la imagen HDR.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

---

### 5.1 Discusión

El desarrollo del DTHIS-C representó un reto de integración entre diferentes tipos de sensores y plataformas de instrumentación, con el objetivo de lograr un dispositivo portátil y accesible para la evaluación del confort en interiores. El valor agregado de este proyecto radica en haber consolidado en un solo sistema la medición de siete variables físicas ambientales (temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del viento, concentración de  $CO_2$ , iluminancia y niveles de sonido), todas ellas integradas con conectividad IoT y visualización en tiempo real. Este logro permitió contar con un dispositivo basado en tecnologías abiertas y replicable que se posiciona como alternativa frente a equipos comerciales mucho más costosos y menos accesibles.

Los resultados experimentales confirmaron la efectividad de los procesos de calibración y referenciación implementados. En el caso de los termopares tipo T, los errores medios (EM) iniciales que variaban entre  $0.95$  y  $2.11^\circ C$  fueron reducidos prácticamente a cero tras la calibración, con errores absolutos medios (EAM) finales menores a  $0.10^\circ C$ . El sensor TPF1 pasó de un EM de  $-0.11^\circ C$  a  $-0.00^\circ C$ , mientras que el Wind Sensor redujo su error de  $-0.01$  m/s a  $-0.00$  m/s, alcanzando una corrección del 99 %. En el caso del SCD30, al estar calibrado de fábrica, se realizó únicamente una referenciación, confirmando su estabilidad en las mediciones de  $CO_2$ , humedad relativa y temperatura.

Estos resultados se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: EM y EAM de cada sensor antes y después de su calibración o referenciación.

Sensor	EM (antes)	EM (después)	EAM (antes)	EAM (después)
Termopar 1	1.00�C	-0.00�C	1.00�C	0.08�C
Termopar 2	0.95�C	0.00�C	0.99�C	0.08�C
Termopar 3	1.77�C	-0.00�C	1.77�C	0.10�C
Termopar 4	2.11�C	0.00�C	2.11�C	0.08�C
TPF1/E-20	-0.11�C	-0.00�C	0.14�C	0.11�C
Wind Sensor	-0.01 m/s	-0.00 m/s	0.06 m/s	0.05 m/s
SCD30 T	0.89�C	—	0.89�C	—
SCD30 HR	-2.17 %	—	2.17 %	—
SCD30 CO <sub>2</sub>	9.65 ppm	—	13.16 ppm	—

Estos resultados demuestran que el DTHIS-C es capaz de entregar datos confiables y precisos, validados frente a instrumentos de referencia profesionales como el Fluke 975, el QUESTemp 36 y el WindMaster.

## 5.2 Trabajo a futuro

Aunque el DTHIS-C cumple con los objetivos planteados, existen áreas de mejora que pueden aumentar su autonomía y usabilidad en campo:

- **Operación headless de la Raspberry Pi:** configurar el sistema para prescindir de monitor y periféricos, facilitando campañas más portátiles.
- **Indicadores luminosos de estado:** integrar LEDs que confirmen el encendido de cada componente y la transmisión de datos hacia ThingsBoard.
- **Almacenamiento local:** incorporar una tarjeta microSD para registrar datos en paralelo a la transmisión IoT, evitando la dependencia exclusiva de la conexión Wi-Fi.
- **Sistema de alimentación autónomo:** implementar baterías recargables de alta capacidad para ampliar el rango de operación en entornos remotos.

## 5.3 Conclusión general

Tras sus pruebas, el DTHIS-C demostró ser un dispositivo eficaz y accesible para la evaluación del confort en espacios interiores. Al integrar múltiples variables ambientales en un \'nico sistema con capacidad de transmisión y visualización en tiempo real, se posiciona como una alternativa viable frente a instrumentos tradicionales de alto costo. Los resultados obtenidos validan su desempeño y sientan una base sólida para su perfeccionamiento futuro, consolidando al DTHIS-C como una contribución relevante en el \'mbito de la instrumentación y la medición ambiental.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] ASHRAE-55, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2021.
- [2] M. Castilla, J. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, F. Rodríguez, and J. Guzmán, “Técnicas de control del confort en edificios,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 7, no. 3, pp. 5–24, 2010. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791210700388>
- [3] R. K. Macpherson, “The assessment of the thermal environment: A review,” *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 19, no. 3, pp. 151–164, 1962.
- [4] J. Gómez, J. de Luna, A. Núñez, and J. Pérez, “Elementos de climatología,” 2024. [Online]. Available: <http://cucsur.udgvirtual.udg.mx/oa/2024/ElemClima/humedad.html#>
- [5] P. Antoniadou and A. M. Papadopoulos, “Occupants’ thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 136–149, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817319709>
- [6] E. Azar, W. O’Brien, S. Carlucci, T. Hong, A. Sonta, J. Kim, M. S. Andargie, T. Abuimara, M. El Asmar, R. K. Jain, M. M. Ouf, F. Tahmasebi, and J. Zhou, “Simulation-aided occupant-centric building design: A critical review of tools, methods, and applications,” *Energy and Buildings*, vol. 224, p. 110292, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820307763>
- [7] J. A. María, “Acústica: la ciencia del sonido,” 2007. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12622/1763>
- [8] B. Berglund, “Guidelines for community noise,” *World Health Organization*, 1999.
- [9] N. G. Vásquez, M. L. Felippe, F. O. Pereira, and A. Kuhnen, “Luminous and visual preferences of young children in their classrooms: Curtain use, artificial lighting and window views,” *Building and Environment*, vol. 152, pp. 59–73, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231930085X>
- [10] P. Bluyssen, *The Indoor Environment Handbook: How to Make Buildings Healthy and Comfortable*, 1st ed. London: Routledge, 2009.
- [11] British Standard, “Light and lighting: Lighting of work places: Part 1: Indoor work places,” *NS-EN 12464-1: 2011*, 2011.

- [12] Commission Internationale de l'Eclairage, *International Lighting Vocabulary*, 2nd ed. Commission Internationale de l'Eclairage, 2020, no. CIE S 017:2020. [Online]. Available: <https://cie.co.at/publications/ilv-international-lighting-vocabulary-2nd-edition-0>
- [13] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, “Norma oficial mexicana nom-025-stps-2008, condiciones de iluminación en los centros de trabajo,” Disponible en línea en <http://sidofqa.segob.gob.mx/notas/5076393>, 2008, dOF, 30 de diciembre 2008; citado el 11-04-2025.
- [14] ASHRAE-62, *ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001, vol. 62, no. 2001.
- [15] N. Luna Medina and G. Barrios del Valle, “Monitores de co<sub>2</sub> para la evaluación de espacios ventilados en el regreso a la presencialidad,” <https://acmor.org/publicaciones/monitores-de-co2-para-la-evaluaci-n-de-espacios-ventilados-en-el-regreso-a-la-presencialidad>, Academia de Ciencias de Morelos, A.C., Cuernavaca, Morelos, México, Jun. 2022.
- [16] D. B. Patel, P. G. Sinha, and N. Goel, *Introduction to sensors*. IOP Publishing, 2020.
- [17] D. Hodgson, “Chapter 20 - mechatronics and physical computing,” in *Exploring Engineering (Fifth Edition)*, 5th ed., P. Kosky, R. Balmer, W. Keat, and G. Wise, Eds. Academic Press, 2021, pp. 453–477. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012815073300020X>
- [18] OMEGA, “Introducción a los acondicionadores de señales.” [Online]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/acondicionadores-de-senales.html>
- [19] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. [Online]. Available: <https://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>
- [20] International Standardization Organization (ISO), “Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort,” International Standardization Organization (ISO), Geneva, ISO Standard 7730, 2005.
- [21] Arduino, “Arduino uno wifi rev2,” 2023. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-wifi-rev2>
- [22] Raspberry, “Raspberry pi 4 model b,” 2019. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- [23] OMEGA, “¿qué es un sensor termopar?” [Online]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html#>
- [24] PWFusion, “4-channel t-type thermocouple max31856 spi digital arduino shield.” [Online]. Available: <https://www.playingwithfusion.com/productview.php?pdid=71&catid=1008>
- [25] FuehlerSysteme, “Radiation pendulum temperature sensor.” [Online]. Available: [https://www.fuehlersysteme.de/Radiation-Pendulum-Temperature-Sensor\\_1#70bd/embedded/](https://www.fuehlersysteme.de/Radiation-Pendulum-Temperature-Sensor_1#70bd/embedded/)
- [26] Adafruit, “Adafruit pt1000 rtd temperature sensor amplifier - max31865.” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/3648#description>
- [27] Modern Device, “Wind sensor rev. p.” [Online]. Available: <https://moderndevice.com/products/wind-sensor-rev-p>
- [28] Sensirion, “Scd30.” [Online]. Available: <https://sensirion.com/products/catalog/SCD30>

- [29] Steren, “Micrófono usb c de solapa para celular.” [Online]. Available: <https://www.steren.com.mx/micrófono-usb-c-de-solapa-para-celular.html>
- [30] Arducam, “Arducam 5mp ov5647 ultra wide angle fisheye camera for raspberry pi.” [Online]. Available: <https://www.arducam.com/product/arducam-ultra-wide-angle-fisheye-5mp-ov5647-camera-for-raspberry-pi/>
- [31] ThingsBoard, “Thingsboard: Open-source iot platform for data collection, processing, visualization, and device management,” 2023. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/>
- [32] Modern Device, “Calibrating the rev. p wind sensor from a new regression,” July 2017. [Online]. Available: <https://moderndevice.com/blogs/documentation/calibrating-the-rev-p-wind-sensor-from-a-new-regression>