

### DESARROLLO DE SENSORES DE TEMPERATURA DE TIPO BULBO SECO, HUMEDAD RELATIVA Y GLOBO PARA LA INSPECCIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO USANDO TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE BAJO COSTO

*Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título de Ingeniero  
en Mantenimiento Industrial, Grado Licenciatura*

Autor:

Helen Andreana Murillo Bermúdez

Cartago, Octubre 2024

Carrera Acreditada por:



Desarrollo de sensores de temperatura de tipo bulbo seco, humedad relativa y globo para la inspección del estrés térmico usando técnicas de fabricación de bajo costo © 2024 by

Helen Murillo Bermúdez is licensed under CC BY 4.0



# Resumen

El proyecto consta del desarrollo de un dispositivo para la medición de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y temperatura de globo mediante un diseño de bajo costo. Dicho dispositivo fue elaborado en forma de prototipo en el Laboratorio Delta de la Escuela de Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica. Su construcción se basó en dos sensores digitales con carcasas distintas, el diseño de dichas carcasas permitió la medición de las variables antes mencionadas mediante el aprovechamiento de la emisividad de los colores y el estudio del funcionamiento de sensores certificados ya existentes en el mercado.

Al rededor del país, personas trabajan bajo la radiación solar por largas jornadas, afectando su salud incluso de forma crónica, sin tener acceso a un equipo que mida las condiciones ambientales. Los equipos existentes en el mercado capaces de medir variables como la temperatura de globo, humedad relativa y temperatura de bulbo seco, son de un costo elevado, lo que vuelve su adquisición difícil para las empresas. Tener acceso a mediciones de estrés térmico, permite a las personas conocer las condiciones ambientales y, con esto, la elaboración de rutinas como lo son la aplicación de bloqueador solar constante o descansos adecuados a la exposición de radiación solar. Debido a lo anterior, el diseño elaborado en el proyecto, es una construcción de bajo costo y replicable, lo cual permita una fácil adquisición del dispositivo.

El proyecto incluye una comparación del prototipo desarrollado en el laboratorio con un equipo de medición certificado y calibrado para validar su efectividad. Este esfuerzo busca proporcionar una herramienta accesible y eficaz para mejorar la seguridad y la salud en el lugar de trabajo, especialmente para aquellos expuestos a condiciones de calor extremo durante períodos prolongados.

**Palabras Claves:** estrés térmico, humedad relativa, temperatura de globo, radiación

# Abstract

The project involves the development of a device for measuring dry bulb temperature, relative humidity, and globe temperature using a low-cost design. The device was developed as a prototype at the Delta Laboratory of the Electromechanical School of the Technological Institute of Costa Rica. Its construction is based on two digital sensors with different housings. The design of these housings allows for the measurement of the aforementioned variables by taking advantage of color emissivity and studying the operation of certified sensors already available on the market.

Across the country, many people work under solar radiation for long hours, which affects their health, sometimes chronically, without access to equipment that measures environmental conditions. The equipment currently on the market that can measure variables such as globe temperature, relative humidity, and dry bulb temperature is expensive, making it difficult for companies to acquire. Access to thermal stress measurements allows individuals to understand environmental conditions and develop routines, such as regularly applying sunscreen or taking appropriate breaks from solar exposure. For this reason, the design developed in this project offers a low-cost, replicable construction that makes the device more accessible.

The project includes a comparison between the prototype developed in the laboratory and certified, calibrated measurement equipment to validate its effectiveness. This effort aims to provide an accessible and effective tool to improve workplace safety and health, especially for those exposed to extreme heat for prolonged periods.

**Key Words:** thermal stress, relative humidity, globe temperature, radiation

# Agradecimientos

Primero quiero dar gracias a Dios, sus bendiciones y amor me han rodeado todos los días de mi vida.

Agradezco a mis padres, Geyner Murillo y Grace Bermúdez. Su amor y apoyo me han acompañado durante todo mi proceso de universidad. Gracias a mi papá por siempre asegurarse de que no me faltara nada durante mi estadía en Cartago y a mi mamá por ser mi lugar seguro, por siempre creer en mi y recordarme que soy capaz de lograr lo que me proponga. Por enseñarme la importancia de la perseverancia y el esfuerzo.

A mis hermanos, Geyner Murillo y Fiorella Murillo, por ser una motivación más en este proceso, por siempre creer en mis capacidades y recordármelo en los momentos que lo he necesitado. Tenerlos en mi vida siempre será de mis mayores bendiciones.

A mi novio Jesús Alpízar, por siempre motivarme con amor. Su compañía a lo largo de todos los años de universidad me hizo muy feliz.

A mi profesor tutor, Dr. Juan José Rojas, quien con su paciencia, dedicación y conocimiento me ha guiado a lo largo de este proceso. Su sabiduría y orientación fueron fundamentales para la realización de este proyecto. Gracias por cada consejo y por siempre estar dispuesto a brindarme su apoyo.

Finalmente, al Laboratorio Delta de la Escuela de Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica y a todos sus asistentes, por proporcionarme los recursos y el espacio necesarios para llevar a cabo mi proyecto. El compañerismo en este laboratorio fue una experiencia que amé, gracias por los buenos momentos y por todas las amistades que me dejó esta experiencia.

# Dedicatoria

*A mis padres, Grace Bermúdez y Geyner Murillo,  
por su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en cada uno de mis pasos. Gracias por ser  
la fuerza que me impulsa, los pilares en los que siempre encuentro refugio y el ejemplo que me inspira a  
seguir adelante.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Reseña del laboratorio	2
1.1.1. Misión	2
1.1.2. Visión	2
1.1.3. Carta del laboratorio	3
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.2.1. Contexto y orígenes del problema	4
1.3. Objetivo General	5
1.4. Objetivos Específicos	5
1.5. Justificación	5
1.6. Viabilidad	6
1.7. Antecedentes del Proyecto	7
1.7.1. Estudio del Problema por Resolver	7
1.8. Metodología	9
1.8.1. Alcance de la investigación	10
1.8.2. Limitaciones de la investigación	10
1.8.3. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto	11
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>12</b>
2.1. Estrés Térmico	12
2.1.1. Manifestaciones clínicas del golpe de calor	14
2.2. Medición de Estrés Térmico en el ámbito de la agricultura	14
2.2.1. Consumo metabólico	16
2.2.2. Adecuación de regímenes de trabajo/descanso	16
2.3. Microcontrolador XIAO ESP32C3	16
2.4. Sensor BME280	17
2.5. Módulo Bluetooth HC05	20
<b>3. Principios de funcionamiento</b>	<b>21</b>
3.1. Temperatura de globo	21

3.1.1. Esfera negra . . . . .	21
3.2. Temperatura de bulbo húmedo . . . . .	22
3.2.1. Bulbo húmedo sin utilizar agua, lectura indirecta . . . . .	22
3.2.2. Humedad relativa . . . . .	22
3.3. Temperatura de bulbo seco . . . . .	22
<b>4. Diseño y desarrollo del dispositivo</b>	<b>23</b>
4.1. Selección de Sensores . . . . .	23
4.1.1. Tipos de sensores a analizar . . . . .	24
4.1.2. Identificación de necesidades . . . . .	25
4.1.3. Jerarquización de necesidades . . . . .	26
4.1.4. Clasificación de importancia de las necesidades primarias . . . . .	26
4.1.5. Selección final del sensor . . . . .	27
4.2. Diseño de carcasas para los sensores . . . . .	27
4.2.1. Esfera de 38mm de diámetro . . . . .	28
4.2.2. Carcasa para el sensor de humedad relativa y temperatura de bulbo seco . . . . .	28
4.3. XIAO ESP32C3 como microcontrolador del dispositivo . . . . .	29
4.4. Conexión inalámbrica mediante sistema Bluetooth . . . . .	29
4.5. Arquitectura final del equipo . . . . .	30
4.6. Códigos de programación . . . . .	30
4.6.1. main.ino . . . . .	30
4.6.2. logger.py . . . . .	30
4.6.3. questtemp.reader.py . . . . .	30
4.6.4. analysis.py . . . . .	30
4.7. Presupuesto para conjunto de sensores: costos totales . . . . .	31
<b>5. Validación del equipo diseñado</b>	<b>33</b>
5.1. Prueba en horno al vacío . . . . .	33
5.1.1. Equipo utilizado para pruebas . . . . .	33
5.1.2. Especificaciones de la prueba realizada . . . . .	34
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>42</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	42
6.2. Recomendaciones . . . . .	43
<b>A. Ensamble de los sensores en gabinete</b>	<b>44</b>
<b>A. Guías de pasos para pruebas realizadas en el horno a vacío</b>	<b>45</b>
<b>B. Bitácoras de pruebas del prototipo diseñado en horno de vacío</b>	<b>51</b>

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
<b>C. Códigos de programación utilizados</b>	<b>62</b>
C.1. Código main . . . . .	62
C.2. Código Logger . . . . .	64
C.3. Código questemp reader . . . . .	66
C.4. Código analysis . . . . .	67
<b>D. Planos de diseño para carcasas de los sensores</b>	<b>69</b>

# Índice de tablas

2.1. Valores límites de referencia para el índice "WBGT".[1]	16
2.2. Especificaciones de parámetros de humedad.[2]	18
2.3. Especificaciones de parámetros de presión.[2]	19
2.4. Especificaciones de parámetros de temperatura.[2]	20
4.1. Necesidades determinadas para los sensores a utilizar.	25
4.2. Jerarquización de necesidades.	26
4.3. Escala de importancia de las necesidades	26
4.4. Clasificación de importancia de las necesidades primarias	27
4.5. Presupuesto de componentes del prototipo	31
4.6. Presupuesto de Sistema de batería	31
4.7. Presupuesto de componentes adicionales	31
4.8. Comparación de costos de insumos	31
4.9. Costos de mano de obra	32
4.10. Costos totales considerando insumos, procesos de manufactura y mano de obra	32
5.1. Especificaciones de la bomba R-300.[3]	34
5.2. Distintas carcasas utilizadas para medir radiación.	35
5.3. Prueba 1.0: Porcentajes de error según RMSE.	40
5.4. Prueba 2.0: Porcentajes de error según RMSE.	40
5.5. Prueba 3.0: Porcentajes de error según RMSE.	40
5.6. Prueba 4.0: Porcentajes de error según RMSE.	40
5.7. Prueba 3.1: Porcentajes de error según RMSE.	40

# Índice de figuras

1.1. Objetivos de desarrollo sostenible. [4]	6
1.2. Monitor de estrés térmico.	8
1.3. Cronograma proyectado para el desarrollo del proyecto.	11
2.1. Progresión de estrés por calor a golpe de calor. [5]	13
2.2. Índices de valoración de ambiente térmico.[1]	15
2.3. Diagrama de conexiones para XIAO ESP32-C3.[6]	17
4.1. Sensor BME280.[7]	27
4.2. Base y carcasa de globo con sensor	28
4.3. Carcasa de bulbo con sensor	28
4.4. XIAO ESP32C3 de Speed Studio.[8]	29
4.5. Módulo Bluetooth HC-05.[9]	29
4.6. Arquitectura del sistema de sensores.	30
5.1. Horno de vacío.	34
5.2. Bomba de vacío R-300.	35
5.3. Prueba 1.0 Temperatura de globo	37
5.4. Prueba 2.0 Temperatura de globo	37
5.5. Prueba 3.0 Temperatura de globo	37
5.6. Prueba 4.0 Temperatura de globo	37
5.7. Prueba 3.1 Temperatura de globo	37
5.8. Prueba 1.0 Humedad relativa	38
5.9. Prueba 2.0 Humedad relativa	38
5.10. Prueba 3.0 Humedad relativa	38
5.11. Prueba 4.0 Humedad relativa	38
5.12. Prueba 3.1 Humedad relativa	38
5.13. Prueba 1.0 Temperatura de bulbo seco	39
5.14. Prueba 2.0 Temperatura de bulbo seco	39
5.15. Prueba 3.0 Temperatura de bulbo seco	39

*ÍNDICE DE FIGURAS*

x

5.16. Prueba 4.0 Temperatura de bulbo seco . . . . .	39
5.17. Prueba 3.1 Temperatura de bulbo seco . . . . .	39
A.1. Ensamble de los sensores en gabinete. . . . .	44

# Nomenclatura

<i>EIE</i>	Escuela de Ingeniería Electromecánica
<i>PLA</i>	Ácido Poliláctico
<i>RCM</i>	Raíz Cuadrada Media
<i>RCME</i>	Raíz Cuadrada del Error Medio
<i>RMSE</i>	Error Cuadrático Medio de la Raíz
<i>TEC</i>	Instituto Tecnológico de Costa Rica
<i>TGBH</i>	Temperatura de Globo de Bulbo Húmedo

# Capítulo 1

## Introducción

Alrededor del mundo, múltiples tipos de trabajo se realizan bajo el sol, con exposiciones prolongadas a la radiación. A través del tiempo, estas exposiciones al sol han perjudicado en la salud de los trabajadores a raíz de falta de herramientas que les permita conocer la severidad del ambiente, y así, tomar medidas protectoras necesarias, como lo pueden ser los descansos de la exposición al sol programados, ropa protectora, o instrumentos como lentes o sombreros.

Como lo menciona [10], trabajar bajo el sol es causante de 1 de cada 3 muertes por cáncer de piel en el mundo, de acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud. En Costa Rica, muchas empresas muestran un rechazo a la ley 23.587: Ley de promoción del uso de filtro solar y prevención del cáncer de piel.

Los equipos utilizados actualmente para conocer el estrés térmico, son equipos calibrados y certificados, que resultan muy costosos para la adquisición de muchos empresarios del país y fuera del país. Dicho equipo consiste en sensores, los cuales miden temperatura seca, de globo y humedad relativa.

Con este proyecto, se busca adquirir una alternativa que permita conocer el estrés térmico con sensores que midan temperatura de globo, temperatura de bulbo seco y humedad relativa, pero a un costo menor, que vuelva posible su adquisición para más empresas y permita tener una correcta programación para resguardar su salud, en la que se implementen horarios de descanso y protecciones extra según la condición ambiental que se tenga en el lugar de trabajo.

En este proyecto se diseña un prototipo alternativa que mide las variables antes mencionadas, y las pruebas de dicho prototipo se realizarán utilizando un dispositivo ya en el mercado como patrón. De esta forma, relacionar un equipo ya calibrado y certificado con el prototipo diseñado en el Laboratorio Delta de la Escuela de Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica y así, obtener porcentajes de error y gráficas que muestren la comparación de los equipos.

## 1.1. Reseña del laboratorio

El Laboratorio Delta es un laboratorio de investigación de la Escuela de Ingeniería Electromecánica que inició en el 2017. Su finalidad es proporcionar un espacio donde los investigadores del Tecnológico de Costa Rica, tanto profesores como estudiantes, puedan desarrollar proyectos de investigación en un ambiente controlado.

El Laboratorio Delta es un espacio para la integración de conocimientos de diversas áreas de la ingeniería en el cual estudiantes, profesores e investigadores del Tecnológico de Costa Rica, pueden generar y desarrollar sus propuestas de investigación e innovación.

Objetivos: Integrar conocimientos de las ingenierías mecánica, eléctrica y electrónica a través de proyectos de investigación de vanguardia con el fin de crear productos y servicios que respondan a las necesidades del país según las áreas de interés definidas por el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PNCTI).

### 1.1.1. Misión

Fomentar un entorno colaborativo y multidisciplinario donde estudiantes, profesores e investigadores del Tecnológico de Costa Rica pueden desarrollar proyectos innovadores en ingeniería. Comprometidos a integrar conocimientos de diversas disciplinas para crear soluciones tecnológicas que respondan a los desafíos y necesidades del país, promoviendo así el avance científico.

### 1.1.2. Visión

Ser un referente en investigación e innovación en ingeniería, reconocidos por la capacidad para transformar ideas en realidades tecnológicas que contribuyan al desarrollo social y económico de Costa Rica.

### 1.1.3. Carta del laboratorio



Laboratorio Delta  
Escuela de Ingeniería Electromecánica  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

3 de mayo del 2024

Ing. Sebastián Mata Ortega  
Coordinador de Trabajo Final de Graduación  
Escuela de Ingeniería Electromecánica  
Tecnológico de Costa Rica

Estimado Ingeniero Mata,

Respetuosamente le saludo y a la vez le comunico la aceptación de parte de **Laboratorio Delta** para que la estudiante **Helen Andreana Murillo Bermúdez**, número de cédula **702820267** y carné **2019056129**, realice su proyecto de graduación para optar por el grado de **Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial** y que lleva como nombre **Desarrollo de sensores de temperatura de tipo bulbo seco, humedad relativa y globo para la inspección del estrés térmico usando técnicas de fabricación de bajo costo**.

La propuesta del proyecto de la estudiante Helen Andreana Murillo Bermúdez busca una alternativa capaz de conocer el estrés térmico con sensores de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y globo a un bajo costo. Así, que se vuelva posible para los empresarios proveer a los trabajadores que pasan tiempos prolongados recibiendo radiación solar, una correcta protección basándose en la severidad térmica del ambiente.

Es por eso que Laboratorio Delta y mi persona Juan José Rojas Hernández, otorga la aprobación para que la estudiante Helen Andreana Murillo Bermúdez realice su proyecto de graduación en el laboratorio. Este puede realizarse sin necesidad de confidencialidad; se solicita y agradece una vez finalizado, remitir una copia del documento final a esta dirección.

Cordialmente,

Ing. Juan José Rojas Hernández, D.Eng.  
Coordinador Laboratorio Delta  
Tecnológico de Costa Rica

## 1.2. Planteamiento del Problema

Como lo mencionan [11], el estrés térmico es la carga total de calor a la que está comprometido un trabajador producto de tres tipos de factores que pueden darse un ambiente de trabajo, por situaciones ambientales de temperaturas elevadas, humedad alta o calor radiante. Dicha carga térmica en la persona trabajadora obstaculiza la posibilidad de mantener la temperatura corporal, provocándose que aumente su temperatura, se vea comprometido su comodidad y se tengan repercusiones en su salud.

En el protocolo de vigilancia de la enfermedad renal crónica no tradicional [12], se menciona que la OPS calcula que entre 1997 y 2013, la enfermedad renal causó en Centroamérica más de 60000 muertes. Dándose las tasas más elevadas de mortalidad por enfermedad renal crónica en comunidades y regiones situadas próximas a la costa del Pacífico, zona geográfica de altas temperaturas en la cual se contiene la mayor porción de tierra cultivable, en la que la agricultura se ha intensificado en los últimos decenios.

Lo mencionado anteriormente, permite identificar uno de los efectos de la radiación ultravioleta en la salud. Tiempos prolongados a la exposición del sol, atrae problemas a la salud de las personas, entre ellos, cáncer en la piel, envejecimiento prematuro, quemaduras solares y hasta la supresión del sistema inmunológico. Los sistemas utilizados actualmente para la conocer la condición del ambiente a la que se exponen las personas, son sistemas calibrados y certificados que resultan ser muy costosos, lo que vuelve imposible para algunas empresas su adquisición. Como consecuencia, se tienen trabajadores en ambientes no aptos para exposiciones prolongadas al sol y sin las protecciones o los descansos necesarios para que dicha exposición no repercuta en su salud a corto y largo plazo.

Debido a esto, se necesita construir un instrumento capaz de realizar las mediciones de temperatura seca, de globo y de bulbo húmedo, que permita obtener la severidad del ambiente, a un menor costo. El uso pretendido para los sensores a realizar, permitirá obtener mediciones funcionales para conocer el estado del ambiente y que sea posible realizar horarios de descanso o mayor protección contra el sol, conforme la necesidad. Para lo anterior, la precisión del equipo no deberá de cumplir con los mismos estándares del equipo ya existente con certificación.

### 1.2.1. Contexto y orígenes del problema

Los trabajadores expuestos al sol por tiempos prolongados, deberían tener acceso a un monitoreo del estrés térmico para conocer las condiciones ambientales y así, resguardar su salud. Este equipo debería poder obtenerse sin necesidad de una grande inversión para los patronos. Sin embargo, según [13] una de cada tres muertes por cáncer de piel son causadas por el trabajo bajo el sol, según estudio de la Organización Mundial de la Salud y la Organización Mundial del Trabajo.

Lo cuál permite obtener la desviación del problema, el equipo existente para la medición de temperatura seca, de globo y de bulbo húmedo, consta de un precio elevado que hace difícil la adquisición para cualquier empresa, por lo que, en muchas ocasiones, éstas tienen trabajadores expuestos al sol sin las protecciones debidas, repercutiendo en su salud y bienestar a corto y largo plazo.

En la realidad, se sabe que, en todo el mundo, 1600 millones de trabajadores están expuestos a la radiación solar ultravioleta, sin embargo, no en todos los lugares se cuenta con protección adecuada para resguardar su salud. Lo anterior, es debido, en muchas ocasiones, al costo que tienen los equipos de medición que permiten conocer el estado del ambiente para tener las medidas correctas para resguardar la salud de las personas.[13]

El equipo existente para el monitoreo del estrés térmico, tiene un valor aproximado de \$4600 en el Equinlab, venta de equipo de instrumentación para industrias y laboratorios.[14]

### 1.3. Objetivo General

- Desarrollar un sistema de macro mediciones y recopilación de datos que permita la inspección de temperatura bulbo seco, humedad relativa y temperatura de globo para el entorno en el que trabajan personas expuestas al sol.

### 1.4. Objetivos Específicos

1. Analizar el estado del arte y los principios de funcionamiento de los sensores de temperatura de tipo bulbo seco, bulbo húmedo y globo. Indicador de logro: estado del arte.
2. Desarrollar tres sensores de temperatura de tipo: bulbo seco, humedad relativa y globo usando técnicas de fabricación de bajo costo. Indicador de logro: sensores fabricados.
3. Validar el desempeño de los sensores fabricados mediante la comparación con sensores certificados. Indicador de logro: análisis de error.
4. Elaborar planos de manufactura y presupuesto para el conjunto de sensores. Indicador de logro: procedimiento de manufactura y presupuesto.

### 1.5. Justificación

La importancia de este proyecto radica en que es relacionado a una necesidad para conocer la severidad del ambiente térmico de una forma más económica, beneficiando a personas que trabajan jornadas bajo el sol, recibiendo radiación solar por tiempos prolongados. Lo identifica[4] con los objetivos de desarrollo sostenible, ya que el número 3 se relaciona con la salud y bienestar. El objetivo se alcanza con todas las acciones que garantizan una vida saludable para todas las personas ya que las personas sanas son la base de unas economías sanas. El objetivo 3, “Salud y Bienestar” presta atención a los determinantes de la salud, en los que se incluyen los factores ambientales.

Además, el objetivo 8 se relaciona con “trabajo decente y crecimiento económico” en donde se define el trabajo decente como oportunidades para todas las personas que sea productivo y seguridad en el lugar de trabajo, entre otras.

El trabajo decente se obtiene con condiciones óptimas, en las que las personas no tengan un riesgo de enfermedades como las enfermedades renales que se comentaron anteriormente. Este riesgo se corre en ambientes en los que se desconoce la severidad del ambiente térmico, ya que, conociendo esta severidad, se pueden realizar métodos de protección contra largas exposiciones al sol.



Figura 1.1: Objetivos de desarrollo sostenible. [4]

Actualmente, los equipos con los que se cuenta para la medición de estrés térmico, son de un costo elevado, por lo que se vuelve difícil para muchos empresarios su adquisición. Los sensores de temperatura proporcionan información acerca del estrés térmico del ambiente, con los datos se vuelve posible realizar horarios de descanso o implementación de equipos de protección contra el sol, según la condición ambiental presente. Lo anterior, para evitar la pérdida de comodidad del trabajador y futuras enfermedades que se puedan presentar debido a las continuas exposiciones al sol.

Tomando como ejemplo el monitor de estrés térmico Questemp, ya existente, consiste en un sensor calibrado y certificado. Al ser de mucha importancia para la seguridad laboral en muchas industrias y entornos, se busca un sensor de la misma funcionalidad, pero de un costo de manufactura menor.

Este proyecto permite proveer una solución capaz de utilizar la tecnología de sensores digitales para la elaboración de un dispositivo de mediciones ambientales, lo que puede prevenir enfermedades, mejorar la productividad y garantizar condiciones laborales seguras para la salud. Además de contar con un bajo costo que puede contribuir a la sostenibilidad del mismo, impactando positivamente en la economía.

Además, se debe tomar en cuenta que, para los sensores, se cuenta con aplicaciones amplias ya que los distintos sensores de temperatura son fundamentales en una variedad de campos, incluyendo la agricultura, la industria, la meteorología y la salud. A futuro, sería una contribución al avance de múltiples áreas.

## 1.6. Viabilidad

Para este proyecto, es de vital importancia contar con la colaboración del Laboratorio Delta de la Escuela de Ingeniería en Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, además de la disponibilidad tecnológica para el prototipo a realizar basado en el monitor de estrés térmico, para que sea posible obtener las mediciones de una manera más económica a base de dispositivos electrónicos.

Se necesitarán recursos financieros para la compra de los distintos dispositivos electrónicos para la construcción del prototipo, con el cual se busca implementar herramientas para la obtención de mediciones de temperatura global, temperatura ambiente, temperatura húmeda y velocidad del viento. Con el objetivo de lograr un monitoreo que permita conocer las condiciones ambientales que enfrentan las personas y así, proveer un plan de descanso que les impida llegar a padecimientos fatales en su salud.

Los recursos financieros permiten obtener materiales de calidad y confiables para la mejor elaboración del sistema de monitoreo.

La disponibilidad de recursos humanos será necesaria ya que brindarán datos, información y conocimiento general de expertos en el tema de sensores, monitoreo y estrés térmico como lo son los recursos de profesores de la Escuela Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica.

## 1.7. Antecedentes del Proyecto

### 1.7.1. Estudio del Problema por Resolver

En la industria moderna, especialmente en sectores como la construcción, agricultura y servicios al aire libre, los trabajadores enfrentan riesgos significativos en su salud debido a la prolongada exposición al sol. La radiación solar en exceso, puede provocar desde quemaduras solares, deshidratación y hasta enfermedades graves como el golpe de calor o mejor conocido como insolación.

Como menciona [10], de los millones de trabajadores que laboran exponiéndose a altas temperaturas, más de 20,000 de Centroamérica murieron en una década por enfermedades renales. El aumento de temperaturas amenaza la vida de las personas que desempeñan su trabajo bajo el sol, con calor extremo. Personas en el mundo mueren por enfermedades como la renal crónica y otras patologías relacionadas con los calores extremos durante las últimas décadas.

La Copa Mundial de Fútbol realizada en Catar en el 2022, dio a conocer personas que trabajaban con temperaturas de hasta 50°C en verano en los países del Golfo. El gobierno de Catar, prohibió desde 2021 el trabajo en exteriores durante los picos de calor del día, dándose en la época de junio a septiembre. [15]

En el 2020, investigadores taiwaneses advirtieron que las enfermedades renales debidas al calor extremo podrían llegar a convertirse en una de las primeras epidemias debidas al calentamiento global. [15]

Como lo explican [16], en Estados Unidos 650 personas mueren anualmente debido a las olas de calor, lo que lo convierte en el fenómeno climatológico más letal y que se presenta cada vez con mayor frecuencia. Las épocas de temperaturas cálidas extremas ponen en riesgo la vida de los afectados con la hipertermia y el golpe de calor. En esta época, la sudoración junto con la falta de ingesta de agua, o bien, exceso de la misma, puede ocasionar desbalances electrolíticos, dando riesgo de mortalidad. Además, la adaptación circulatoria y la termorregulación del cuerpo humano, pueden ocasionar la disfunción renal. Durante la ola de calor dada en agosto de 2003 en Europa, murieron más de 70,000 personas en todo el continente, siendo Francia el país más afectado, con 14,729 fallecimientos.

A pesar de las regulaciones para determinar tiempos de descanso y pautas sobre la exposición al sol, la implementación de las mismas no siempre es efectiva. Los empleados enfrentan dificultades para determinar cuándo deben realizar el descanso y de cuánto tiempo debe ser el mismo para evitar los riesgos en la salud.

Actualmente, los equipos existentes de medición de estrés térmico, son equipos calibrados y certificados que resultan de muy alto costo para los empresarios que cuentan con trabajadores expuestos a la radiación solar por largos lapsos del día. Esto, repercute en la salud de dichos trabajadores al no contar con un equipo que ayude a saber los descansos y la protección necesaria para que su labor no afecte negativamente en su salud y bienestar.

Entre los sensores ya existentes en el mercado, se encuentra el monitor de estrés térmico Questemp, un dispositivo que permite medir y monitorear las condiciones ambientales que pueden afectar el bienestar y la salud de las personas expuestas a altas temperaturas. Funciona mediante la medición de distintos parámetros ambientales y fisiológicos relevantes para evaluar el riesgo térmico.

Dicho monitor utiliza tecnología de detección de bulbo húmedo para la evaluación de la exposición al estrés térmico. El instrumento obtiene la medición de temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y globo; y velocidad del viento.



Figura 1.2: Monitor de estrés térmico.

### Métodos de evaluación del ambiente térmico en exteriores

En los trabajos que se realizan al aire libre, las medidas que se toman para la protección de trabajadores son dirigidas a la protección de la radiación solar directa, especialmente la ultravioleta. Entre las distintas medidas, se da la habilitación de zonas cubiertas o sombreadas, uso de prendas de protección en todo el cuerpo, además de cremas protectoras para la piel.

En el caso de trabajos al aire libre en zonas frías se emplea el uso de ropa de protección y pautas para suministrar bebidas calientes no alcohólicas a los trabajadores.

### Métodos de evaluación del ambiente térmico en interiores

Los requisitos normativos para los locales cerrados, en España, son regidos por el R.D. 486/97: humedad: 30 % al 70 % o 50 % al 70 % (electricidad estática), temperatura: 17°C a 27°C para trabajos sedentarios y 14°C a 25°C para trabajos ligeros, velocidad del aire: +0,25 m/s en ambientes no calurosos, +0,5 m/s en ambientes calurosos y +0,75 m/s en ambientes calurosos y trabajos no sedentarios; renovación del aire: +30 m<sup>3</sup> aire limpio/ hora.trabajador y +50 m<sup>3</sup> aire limpio/ hora.trabajador, si el ambiente es nocivo, mal olor, olor desagradable. Considerándose la temperatura óptima como: invierno de 20°C a 24°C y verano de 23°C a 26°C.

El equipo anteriormente descrito, tiene un valor aproximado de \$4600 en el Equinlab, venta de equipamiento de instrumentación para industrias y laboratorios. Es un costo elevado para la mayoría de empresarios que contratan personal para labores en exposición solar. Logrando realizar un equipo de un bajo costo de manufactura que permita conocer el estrés térmico del ambiente, sería posible para más población incorporar en sus ambientes laborales los sensores y así, realizar descansos y tener una mayor protección según lo inspeccionado por los sensores. Esto, disminuye los riesgos de futuras enfermedades por afecto de la exposición a radiaciones solares de los trabajadores.

## 1.8. Metodología

A continuación, se presenta la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos planteados.

### Objetivo específico 1:

- **Actividad por realizar:** Revisión bibliográfica y documental de los sensores ya existentes en el mercado. Consultas de especificaciones técnicas y manuales de fabricante, para entender los principios de funcionamiento de los equipos. Revisión de literatura científica y técnica, que permita indagar e ingeniar posibles soluciones.
- **Fuente de información:** Documentación técnica de fabricantes, manuales.
- **Análisis de datos con criterios estadísticos:** Definir principios de funcionamiento y especificaciones técnicas de los sensores ya existentes.
- **Resultados esperados:** Estado del arte.

### Objetivo específico 2:

- **Actividad por realizar:** Planificación y diseño, selección de materiales, construcción y ensamblaje. Documentación y presentación.
- **Fuente de información:** Sitios web de fabricantes de componentes electrónicos y manuales técnicos.
- **Análisis de datos con criterios estadísticos:** Análisis descriptivo y exploratorio.
- **Resultados esperados:** Prototipo fabricado.

### Objetivo específico 3:

- **Actividad por realizar:** Planificación y preparación para la recolección de datos, registros de mediciones y evaluación del desempeño.
- **Fuente de información:** Bases de datos bibliográficos: validaciones realizadas previamente.
- **Análisis de datos con criterios estadísticos:** Análisis de los datos con visualización de resultados y cálculo de error.
- **Resultados esperados:** Análisis de error de los sensores.

### Objetivo específico 4:

- **Actividad por realizar:** Documentar costos de los materiales, herramientas, equipo y ensamblaje y consolidar costos estimados de fabricación.
- **Fuente de información:** Herramientas de gestión de proyectos y estimación de costos.
- **Análisis de datos con criterios estadísticos:** Análisis exploratorio de datos.
- **Resultados esperados:** Planos, ensamble y presupuesto.

### 1.8.1. Alcance de la investigación

Mediante este proyecto, se plantea un alcance de tipo exploratorio, que ayude a resolver de manera ingenieril el problema que se tiene actualmente, desconocimiento del estrés térmico en la que labora gran parte de la población. Proyecto para realizar mediciones de temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo, de globo y la velocidad del aire, mediante la construcción de sensores.

En la actualidad, no existe mucha información acerca de equipos económicos capaces de realizar mediciones de estrés térmico, por lo que este proyecto busca implementar nuevas alternativas y de esta manera, ampliar los conocimientos en el tema, para una mejor calidad de vida y comodidad de todos los trabajadores.

Se busca realizar el proyecto con una manufactura de bajo costo, con el fin de que más personas tengan acceso a estas mediciones y sea capaz realizar medidas de protección contra la radiación ultravioleta más precisas, según la condición ambiental de cada lugar.

En términos generales se enfocará en la incorporación de dispositivos de monitoreo digital que informen el estado de la temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y globo; y velocidad del viento.

### 1.8.2. Limitaciones de la investigación

Al tratarse de un proyecto con métodos ingenieriles, hay una falta de información acerca de cómo crear de cero los sensores. Lo anterior, debido a la falta existente de experiencia en el tema y falta de conocimiento especializado, lo que vuelve más complejo la creación de los sensores.

Lo anterior, despliega una curva importante de aprendizaje, en la cual se deben realizar investigaciones profundas para la comprensión de funcionamiento y que vuelva posible el cumplimiento de los objetivos.

Además, una limitación importante a tomar en cuenta es el tiempo, ya que el tiempo es establecido de 12 semanas para concluir el proyecto, por lo que se necesitará un trabajo constante en el proyecto que permita su conclusión óptima.

En el proyecto, al tratarse de sensores, se debe contar con limitantes como las de rangos de temperatura, condiciones ambientales, durabilidad y mantenimiento, entre sus limitaciones técnicas debido a tratarse de aparatos electrónicos.

Debido a que el proyecto se realiza en un laboratorio de la universidad, en este caso, el Laboratorio Delta, se cuenta con instrumentación necesaria, sin embargo, una limitación más a tomar en cuenta, será el gasto a realizar para la construcción de los sensores, ya que se tendrán que comprar materiales y servicios, por ejemplo, el de la impresión 3D de ser necesario [17].

1.8.3. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto

Nº	Actividades a realizar	Semana - Fecha																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Elaboración anteproyecto	22/7/2024	29/7/2024	5/8/2024	12/8/2024	19/8/2024	26/8/2024	2/9/2024	9/9/2024	16/9/2024	23/9/2024	30/9/2024	7/10/2024	14/10/2024	21/10/2024	28/10/2024	4/11/2024	11/11/2024	18/11/2024	25/11/2024	2/12/2024
	Entrega anteproyecto																				
	Aprobación de anteproyecto																				
	Periodo de vacaciones																				
0	Objetivo General																				
0.1	Desarrollar un sistema de macro mediciones y recopilación de datos que permita la inspección de temperatura bulbo seco, de bulbo húmedo y de globo para el entorno en el que trabajan personas expuestas al sol.																				
1	Objetivo específico 1																				
1.1	Analizar el estado del arte																				
1.2	Analizar principios de funcionamiento																				
1.3	Estudiar los diferentes funcionamientos de los sensores																				
2	Objetivo específico 2																				
2.1	Desarrollar sensor de temperatura tipo bulbo seco																				
2.2	Desarrollar sensor de temperatura tipo bulbo húmedo																				
2.3	Desarrollar sensor de tipo globo																				
3	Objetivo específico 3																				
3.1	Validar desempeño de sensor tipo bulbo seco																				
3.2	Validar desempeño de sensor tipo bulbo húmedo																				
3.3	Validar desempeño de sensor tipo globo																				
4	Objetivo específico 4																				
4.1	Elaborar procedimiento de manufactura para cada sensor																				
4.2	Elaborar presupuesto para cada sensor																				
4.3	Definir detalles																				
5	Entrega de borrador final a lectores																				
6	Revisiones de observaciones																				
7	Envío de carta de folioleto de proyecto final																				
8	Entrega de proyecto final a coordinador de carrera																				
9	Defensa de trabajo final de graduación																				

Figura 1.3: Cronograma proyectado para el desarrollo del proyecto.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

### 2.1. Estrés Térmico

Según [17] el estrés térmico por calor es el disconfort y tensión fisiológica que se ocasiona por la exposición a ambientes calurosos, esto principalmente durante el trabajo físico, siendo el disconfort térmico el estado de la mente que expresa insatisfacción con el ambiente térmico [18].

Los trabajadores al aire libre enfrentan exposiciones altas y prolongadas al calor, además, tienen poco acceso a espacios que les ayude a regular su temperatura corporal, por lo que son muy susceptibles a sufrir de estrés por calor [19].

En términos de salud ocupacional y los efectos del calentamiento global, se considera que este grupo de trabajadores ha tenido poca atención [20].

Para conocer la exposición al estrés térmico, primero es importante entender y relacionarlo con la temperatura corporal del ser humano. La temperatura corporal se define como una constante biológica que en condiciones normales oscila entre los 35 y los 37°C [17] o como lo afirma [21] es un signo vital, que es importante medir con gran precisión, y el cual debe mantenerse estable.

La regulación o estabilidad de temperatura corporal se logra gracias a la termorregulación, la cual se define como un mecanismo de control vital de gran importancia para el ser humano y se logra gracias al sistema termorregulador [22]. Este mecanismo se comporta de dos formas: central o periférica. El comportamiento central es el parámetro que refleja el contenido de calor del cuerpo humano y debe permanecer constante, y el periférico corresponde a la temperatura cutánea [23].

Cuando se tiene un aumento de temperatura corporal, el sistema termorregulador activa los diferentes mecanismos facilitadores de la pérdida de calor con los que cuenta el cuerpo humano. En la mayoría, está implicada la piel y la vasodilatación cutánea. Un mecanismo facilitador de la pérdida de calor de gran importancia consiste en la evaporación por el cual se puede llegar a perder hasta un 20% del calor corporal total, dos terceras partes a través de la superficie de la piel (sudoración) y una tercera parte por el tracto respiratorio. En términos de consumo, 1,7ml de sudor consume 1Kcal de energía en forma de calor, en condiciones ideales de humedad. La concentración de humedad en el ambiente influye en la pérdida de calor por evaporación, cuanto mayor es la humedad ambiental, menor la cantidad de calor que se elimina a través de la sudoración. [5].

Exponer el cuerpo a cargas pesadas de trabajo y/o ambientes con altas temperaturas, genera que el sistema termorregulador colapse afectando la salud, a lo que se le conoce como trastornos de salud, estos pueden ser sistémicos o locales, siendo el golpe por calor el trastorno más común. [24].

[5] definen el golpe de calor como una emergencia médica que se caracteriza por un incremento de la temperatura corporal a nivel central que supera los 42°C, dando alteraciones del sistema nervioso central,

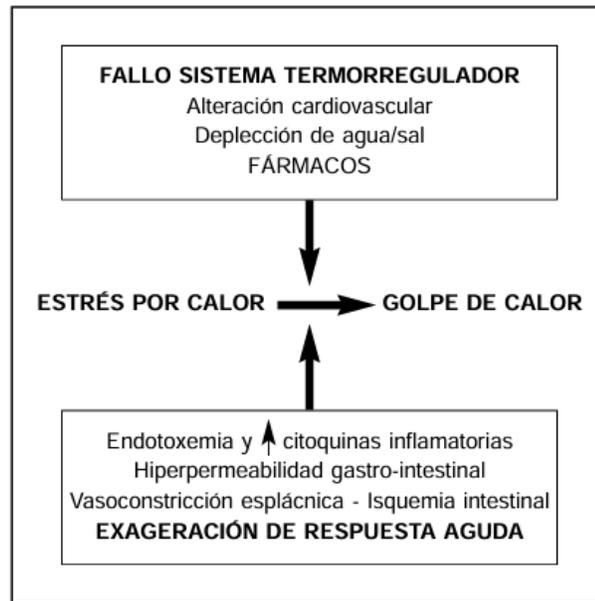


Figura 2.1: Progresión de estrés por calor a golpe de calor. [5]

todo a causa de un fallo agudo del sistema termorregulador producto de la interacción entre el entorno de la persona, su ropa y la actividad física. Los mecanismos productores de calor son las formas en que puede aumentar la temperatura corporal y están conformados por el metabolismo (ligado a la actividad física, a mayor actividad, mayor temperatura), la temperatura ambiente (entre más alta, mayor es su aporte) y la radiación (las radiaciones ultravioletas e infrarrojas contribuyen como fuentes de calor [5].

Es de importancia conocer que el estrés térmico, puede tener una progresión a golpe de calor. Para que la progresión se cumpla, interviene el fallo del sistema termorregulador, una exageración de la fase de respuesta aguda y la alteración en la alteración en la expresión de proteínas de choque térmico.[5]

Primero, el fallo del sistema termorregulador, se da cuando el sistema cardiovascular es incapaz de mantener un adecuado gasto cardíaco que permita incrementar el flujo sanguíneo periférico (en la piel) según los gastos del central que corresponde al, fundamentalmente dado en vísceras, y al renal. Segundo, la exageración de la fase de respuesta aguda, cuando el cuerpo se calienta, necesita regular su temperatura. Para hacer esto, aumenta el flujo sanguíneo hacia la piel y disminuye el flujo hacia los órganos internos, lo que puede causar que estos órganos, como el intestino, no reciban suficiente sangre. Esto puede dañar la mucosa intestinal, que es una barrera importante para nuestro sistema inmunológico. Cuando esta barrera se ve afectada, pueden aumentar los niveles de toxinas en la sangre, lo que a su vez provoca una respuesta inflamatoria del cuerpo, que son las desencadenantes en la progresión de estrés por calor a golpe de calor.[5]

Por último, la alteración de proteínas de choque térmico que ayudan a proteger las células del daño causado por el calor. Si hay menos de estas proteínas, las células son más vulnerables a sufrir daños, lo que puede agravar los problemas causados por el calor extremo. En resumen, el calor excesivo puede afectar tanto el flujo sanguíneo como la defensa del cuerpo, aumentando el riesgo de golpe de calor.[5]

### 2.1.1. Manifestaciones clínicas del golpe de calor

El golpe de calor ocurre cuando la temperatura del cuerpo supera los 42 °C, ya que, a esta temperatura, las células comienzan a sufrir un daño debido a que, las funciones normales, como la producción de energía, se detienen. Si el cuerpo se calienta demasiado, pueden suceder varios problemas graves en diferentes órganos.

Principales efectos del golpe de calor[5]:

1. Sistema Nervioso Central: El cerebro puede sufrir mucho daño. Esto puede llevar a confusión, coma y hasta convulsiones. Los síntomas pueden ser sutiles al principio, como cambios en el comportamiento.
2. Músculos: El calor extremo puede dañar los músculos, causando necrosis (muerte celular). Esto es especialmente común en quienes hacen ejercicio, porque el calor y la falta de oxígeno empeoran el daño.
3. Corazón: El corazón trabaja más y puede tener problemas como taquicardia (latidos rápidos) y baja presión arterial debido a daños o deshidratación.
4. Riñones: Los riñones pueden dañarse temprano, especialmente por deshidratación y daño muscular. Esto puede llevar a insuficiencia renal aguda, especialmente en casos relacionados con el ejercicio.
5. Sangre: Puede haber un aumento en el recuento de glóbulos blancos y problemas de coagulación. Esto se debe a la deshidratación y el daño a las plaquetas.
6. Pulmones: El calor puede dañar los pulmones, causando dificultad para respirar y edema pulmonar (acumulación de líquido).
7. Sistema Digestivo: El intestino puede sufrir isquemia (falta de sangre), lo que puede llevar a sangrados. El hígado también es vulnerable y puede dañarse gravemente.
8. Endocrino: Puede haber cambios en las hormonas, como hipoglucemia en casos severos, especialmente por ejercicio.
9. Desequilibrio de electrolitos: Problemas como niveles altos de potasio y fósforo son comunes, especialmente en casos de ejercicio.

## 2.2. Medición de Estrés Térmico en el ámbito de la agricultura

La existencia de calor en el ambiente laboral, frecuentemente es fuente de problemas por falta de confort por parte de los trabajadores, bajo rendimiento en el trabajo y riesgos en la salud. El estudio del ambiente térmico depende de variantes en el ambiente y del tipo de trabajo de las personas. El riesgo de estrés térmico, para una persona expuesta al sol, depende de la producción de calor de su organismo como resultado de su actividad física y de las variables del ambiente que lo rodean, las cuales condicionan el intercambio de calor entre el ambiente y el cuerpo de los trabajadores. Cuando el calor generado por el organismo no puede ser emitido al ambiente, se acumula en el interior del cuerpo y la temperatura del mismo, empieza a aumentar, con posibles daños irreversibles.[1]

Para ambientes térmicos moderados es útil conocer el PMV, por sus siglas en inglés, este índice predice la valoración promedio de un grupo de personas sobre su nivel de confort térmico. Por otra parte, cuando lo que se quiere es conocer el riesgo de estrés térmico, se utiliza el índice de sudoración requerida, que provee el tiempo máximo para permanecer en dicha situación.[1]

El índice de temperatura de globo y bulbo húmedo, por sus siglas en inglés "WBGT" se calcula a partir de la combinación de dos parámetros ambientales: temperatura de globo, temperatura húmeda natural y temperatura seca del aire[1].

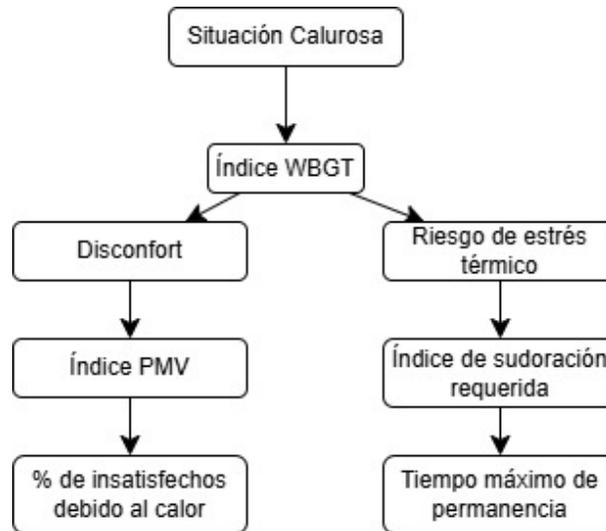


Figura 2.2: Índices de valoración de ambiente térmico.[1]

$$\text{WBGT} = 0,7 T_{HN} + 0,3 T_G \quad (2.1)$$

Donde "WBGT.es el índice de temperatura de globo y bulbo húmedo, THN es la temperatura húmeda natural y TG temperatura de globo. Esta ecuación es utilizada en el interior de edificaciones o en el exterior, sin radiación solar[1].

$$\text{WBGT} = 0,7 T_{HN} + 0,2 T_G + 0,1 T_A \quad (2.2)$$

Donde "WBGT.es el índice de temperatura de globo y bulbo húmedo, THN es la temperatura húmeda natural, TG temperatura de globo y TA es la temperatura seca del aire. Esta ecuación es utilizada en el exterior, con radiación solar[1].

En caso de que la temperatura no sea constante en los alrededores del puesto de trabajo, debe realizarse el índice "WBGTrealizando 3 mediciones, a nivel de tobillos, abdomen y cabeza, con la siguiente expresión[1].

$$\text{WBGT} = [\text{WBGT}(\text{cabeza}) + 2x\text{WBGT}(\text{abdomen}) + \text{WBGT}(\text{tobillos})]/4 \quad (2.3)$$

Las mediciones deben realizarse a 0.1 m, 1.1 m, y 1.7 m del suelo si la posición en el puesto de trabajo es de pie, y a 0.1 m, 0.6 m, y 1.1 m, si es sentado. Si el ambiente es homogéneo, basta con una medición a la altura del abdomen[1].

La temperatura de globo es la temperatura indicada por un sensor en el centro de una esfera con coeficiente de emisión medio: 90 (negro y mate) y un grosor tan delgado como sea posible. La temperatura húmeda natural consta del valor indicado por un sensor de temperatura recubierto de un tejido humedecido que es ventilado de forma natural (sin ventilación forzada), así se diferencia de la temperatura húmeda psicrométrica, que requiere una corriente de aire alrededor del sensor. Por último, la temperatura seca del aire es la temperatura del aire medida, por ejemplo con un termómetro convencional de mercurio.[1]

Consumo metabólico kcal/h	WBGT límite °C			
	Persona aclimatada		Persona no aclimatada	
	v=0	v>0	v=0	v>0
≤ 100	33	33	32	32
100/200	30	30	29	29
200/310	28	28	26	26
310/400	25	26	22	23
>400	23	25	18	20

Tabla 2.1: Valores límites de referencia para el índice "WBGT".[1]

### 2.2.1. Consumo metabólico

Consiste en la cantidad de calor producido por el organismo por unidad de tiempo, es una variable necesaria para la valoración del estrés térmico. Para estimarla, se utiliza el dato del consumo metabólico, que es la energía total generada por el organismo por unidad de tiempo (potencia), como consecuencia del trabajo de la persona, considerando que toda la energía consumida se transforma en calorífica.[1] Puede medirse a través del consumo de oxígeno de la persona, o mediante tablas.

El consumo metabólico se expresa en unidades de potencia o potencia por unidad de superficie corporal. Con una relación de 1kcal/hora es igual a 1,16 W, que es igual a, 0,64 W/m<sup>2</sup>, para una superficie corporal media de 1,8 m<sup>2</sup> [1].

### 2.2.2. Adecuación de regímenes de trabajo/descanso

Cuando hay riesgo de estrés térmico, lo correcto es establecer un régimen de trabajo-descanso que permita a los trabajadores tener un balance térmico en su organismo. Se puede hallar en este caso la fracción de tiempo (trabajo-descanso) necesaria, de la siguiente forma:

$$ft = [(A - B)/((C - D) + (4 - B))]x[60] \quad (2.4)$$

Siendo:

ft: Fracción de tiempo de trabajo respecto al total (indica los minutos a trabajar por cada hora).

A: "WBGT"límite de descanso.

B: "WBGT".<sup>en</sup> la zona de descanso.

C: "WBGT".<sup>en</sup> la zona de trabajo.

D: "WBGT"límite en el trabajo.

Cuando  $B \geq A$ , la ecuación 2.4 no aplica.

## 2.3. Microcontrolador XIAO ESP32C3

El XIAO ESP32C3 es un microcontrolador compacto de la familia XIAO diseñado por Seeed Studio, basado en el popular chip ESP32-C3. Este microcontrolador, tiene como una de sus mejores características, su bajo consumo energético, su pequeño tamaño y su conectividad Wi-Fi integrada, lo que lo hace ideal para aplicaciones en dispositivos portátiles y proyectos que requieren conectividad inalámbrica.

Su chip ESP32-C3, incluye un núcleo RISC-V de 32 bits con un conjunto de instrucciones abiertas. Esto permite un alto rendimiento y eficiencia energética. Es compatible con Arduino y programable mediante IDE, volviendo muy flexible este microcontrolador.[6]

Es una opción versátil para proyectos que requieren conectividad inalámbrica.

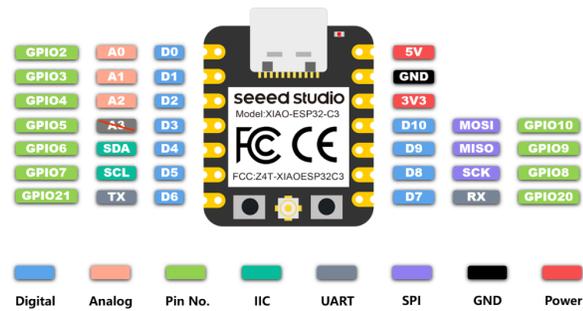


Figura 2.3: Diagrama de conexiones para XIAO ESP32-C3.[6])

## 2.4. Sensor BME280

El BME280 es un sensor ambiental de alta precisión fabricado por Bosch Sensortec. Está diseñado para medir las siguientes variables climáticas como la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. Su interfaz de comunicación es I2C o SPI, lo que lo vuelve compatible con múltiples microcontroladores.[25] Utilizado para múltiples aplicaciones como estaciones meteorológicas, drones y altímetros, entre otros.

1. Interfaz de comunicación: I2C o SPI
2. Frecuencia de muestreo: 157 Hz (máximo).
3. Dimensiones: 9x11x2mm. [25]

Parámetro	Símbolo	Condición	Mín	Típico	Máx	Unidad
Rango de operación	$R_H$	Para temperaturas < 0 °C y > 60 °C	-40	25	85	°C
			0		100	%HR
Corriente de suministro	$I_{DD,H}$	Modo forzado de 1 Hz, humedad y temperatura		1.8	2.8	$\mu$ A
Tolerancia de precisión absoluta	$A_H$	20...80 %HR, 25 °C, incluyendo histéresis		$\pm 3$		%HR
Histéresis	$H_H$	10 $\rightarrow$ 90 $\rightarrow$ 10 %HR, 25 °C		$\pm 1$		%HR
No linealidad	$NL_H$	10 $\rightarrow$ 90 %HR, 25 °C		1		%HR
Tiempo de respuesta para completar el 63 % del paso	$\tau_{63\%}$	90 $\rightarrow$ 0 o 0 $\rightarrow$ 90 %HR, 25 °C		1		s
Resolución	$R_H$			0.008		%HR
Ruido en humedad (RMS)	$N_H$	Mayor sobremuestreo		0.02		%HR
Estabilidad a largo plazo	$\Delta H_{stab}$	10...90 %HR, 25 °C		0.5		%HR/año

Tabla 2.2: Especificaciones de parámetros de humedad.[2]

Parámetro	Símbolo	Condición	Mín	Típico	Máx	Unidad
Rango de temperatura de operación	$T_A$	Operacional	-40	25	+85	°C
		Precisión completa	0		+65	°C
Rango de presión de operación	$P$	Precisión completa	300		1100	hPa
Corriente de suministro	$I_{DD,LP}$	Modo de 1 Hz forzado, presión y temperatura, mínima potencia		2.8	4.2	$\mu A$
Coeficiente de temperatura del offset	$TCO_p$	25...65 °C, 900 hPa		$\pm 1,5$		Pa/K
				$\pm 12,6$		cm/K
Precisión absoluta de presión	$A_{P,full}$	300...1100 hPa, 0...65 °C		$\pm 1,0$		hPa
Precisión relativa de presión	$A_{rel}$	700...900 hPa, 25...40 °C, $V_{DD} = 3,3 V$		$\pm 0,12$		hPa
Resolución de salida de presión	$R_P$	Mayor sobremuestreo		0.18		Pa
Ruido en presión	$N_{P,fullbw}$	Ancho de banda completo, mayor sobremuestreo		1.3		Pa
				11		cm
Ruido en presión (filtrado)	$N_{P,filtered}$	Ancho de banda reducido, mayor sobremuestreo		0.2		Pa
				1.7		cm
Desviación por soldadura		Altura de soldadura mínima 50 $\mu m$	-0.5		+2.0	hPa
Estabilidad a largo plazo	$\Delta P_{stab}$	por año		$\pm 1,0$		hPa
Tasa de muestreo posible	$f_{sample, P}$	Menor sobremuestreo	157	182		Hz

Tabla 2.3: Especificaciones de parámetros de presión. [2]

Parámetro	Símbolo	Condición	Mín	Típico	Máx	Unidad
Rango de operación	T	Operacional Precisión total	-40	25	85	°C
			0		65	°C
Corriente de suministro	$I_{DD,T}$	Modo forzado de 1 Hz, temperatura		1.0	2.8	$\mu A$
Tolerancia de temperatura absoluta	$A_T, full$	0...65 °C		$\pm 1$		°C
Resolución	$R_T$			0.01		°C
Ruido en temperatura (RMS)	$N_T$	Menor sobremuestreo		0.005		°C

Tabla 2.4: Especificaciones de parámetros de temperatura.[2]

## 2.5. Módulo Bluetooth HC05

El HC-05 es un módulo Bluetooth ampliamente utilizado para agregar capacidad de comunicación inalámbrica en proyectos de microcontroladores. Está diseñado para proporcionar conectividad Bluetooth clásica y permite la transmisión de datos serial de forma sencilla entre dispositivos.

Entre sus características principales, puede configurarse tanto como maestro o esclavo, lo que le otorga gran flexibilidad en su uso. En modo maestro, puede iniciar la conexión con otros dispositivos; en modo esclavo, espera a que otro dispositivo inicie la conexión. El HC-05 se comunica con microcontroladores y otros dispositivos mediante una interfaz UART (Tx, Rx), facilitando su integración con plataformas como Arduino, ESP32, y Raspberry Pi.

Su velocidad de transmisión es desde 1200 bps hasta 1382400 bps. Su alcance es de aproximadamente 10 metros, pero esto dependerá del entorno y obstáculos presentes.[26]

1. Voltaje de operación: 3.6 V - 6V DC
2. Consumo de corriente: 50mA
3. Bluetooth: V2.0+EDR
4. Frecuencia: Banda ISM 2.4GHz
5. Potencia de transmisión: 4dBm
6. Interface de comunicación: Serial TTL
7. Temperatura de trabajo -20°C a 75°C
8. Compatible con Android
9. Dimensiones 37x16mm
10. Peso: 3.6g [26]

## Capítulo 3

# Principios de funcionamiento

En este capítulo se abordarán los principios fundamentales detrás de tres parámetros clave utilizados en la evaluación y control de las condiciones térmicas en distintos entornos: la temperatura de globo, la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo. Estas mediciones son cruciales para comprender el confort térmico y la gestión de la climatización, tanto en espacios industriales como en el diseño de sistemas de control ambiental.

A lo largo del capítulo, se profundizará en cómo estos tres conceptos interrelacionados permiten una evaluación completa de las condiciones térmicas y sus aplicaciones en sectores como la construcción, la agricultura y la gestión del confort humano en ambientes laborales extremos.

### 3.1. Temperatura de globo

Los principios de funcionamiento de la temperatura de globo de basan en la capacidad del sensor para medir la radiación solar, haciendo uso de características como la emisividad de los colores. Dicha medición es fundamental para evaluar el impacto de la radiación térmica sobre los seres humanos en un entorno.

#### 3.1.1. Esfera negra

Según la norma ISO 7273, la temperatura de globo se obtiene colocando un sensor en el centro de una esfera con las siguientes características:

1. Diámetro de 150mm
2. Coeficiente de emisión de 0.95 (globo color negro mate)
3. Lo más delgado posible
4. Rango de medición de 20°C a 120°C
5. Exactitudes de medición: para un rango de 20°C a 50°C  $\pm$  0.5°C y para un rango de medición de 50°C a 120°C  $\pm$  1°C

Además, para la temperatura de globo, el tipo de material afectará la constante del tiempo. Esto debido a que los materiales con alta conductividad térmica, por ejemplo el cobre, proporcionarán los datos de forma más rápida, con una constante de tiempo más baja que en globos fabricados de materiales con menor conductividad térmica.[27]

Lo anterior, se debe a que los materiales conductores permiten una rápida transferencia de calor alrededor de todo el globo, consiguiendo uniformidad en toda la esfera.

La emisividad se define como la relación entre la emisión de la superficie y la emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura termodinámica. La emisividad depende fundamentalmente de la composición, la rugosidad y el contenido de humedad de la superficie.[28] Es por esto, que la esfera aprovecha la emisividad del color negro para una mejor captación de la radiación. Además, la forma esférica de la carcasa del sensor permite tener más puntos de contacto con el ambiente y proveer un dato de temperatura de globo más preciso.

## 3.2. Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo corresponde a la temperatura hasta la cual el aire puede enfriarse a presión constante por la evaporación del agua hasta alcanzar la saturación.[29]

El termómetro de bulbo húmedo natural es un termómetro de alcohol con un bulbo, de 6 milímetros de diámetro exterior, que está recubierto por una muselina empapada en agua destilada cuyo extremo inferior debe estar inmerso en un recipiente de agua destilada, del que debe sobresalir entre 2 y 3 centímetros.[30]

El recipiente que contiene el agua destilada estará diseñado de tal forma que la temperatura del agua en su interior no pueda elevarse como resultado de la radiación del ambiente. La muselina o camiseta de algodón estará siempre empapada, y para iniciar las mediciones tendrá que haber sido mojada al menos 15 minutos antes.[30]

### 3.2.1. Bulbo húmedo sin utilizar agua, lectura indirecta

Se han hecho estimaciones para obtener mediciones de bulbo húmedo sin necesidad de contar con un sensor mojado constantemente.

El bulbo húmedo sin agua es una medición estimada que utiliza el % de humedad relativa y la temperatura del bulbo seco para determinar el bulbo húmedo psicrométrico. El valor de bulbo psicrométrico se ajusta según el flujo de aire para proporcionar una estimación de bulbo húmedo sin agua.[31]

Se suele calcular a partir de temperaturas y humedades medidas en abrigo meteorológico, con lo que no se consigue tener en cuenta el impacto del viento y de la radiación en la sensación térmica real. [29] Para su cálculo se hace uso de la siguiente ecuación.[29]

$$T_w = 0,2831h_r^{0,2735}T_s + 0,0003018h_r^2 + 0,01289h_r - 4,0962 \quad (3.1)$$

### 3.2.2. Humedad relativa

La humedad relativa es la humedad presente relativa (con respecto) a la máxima humedad posible a la misma temperatura ambiente (bulbo seco). Se define como la razón de: la presión de vapor de agua, presente en ese momento con respecto a la presión de vapor en saturación (de agua) a la misma temperatura. Se expresa como porcentaje.[32]

## 3.3. Temperatura de bulbo seco

El termómetro de bulbo seco se usa únicamente cuando existe radiación solar; consiste en un termómetro cuyo sensor debe estar protegido de la radiación mediante un dispositivo que no impida la libre circulación del aire a su alrededor. [30]//

## Capítulo 4

# Diseño y desarrollo del dispositivo

En este capítulo, se explicará todo lo relacionado al desarrollo del equipo realizado, el cual permite medir con precisión variables como la temperatura, la humedad y la radiación. Es fundamental para diversas aplicaciones, desde la agricultura hasta la investigación climática. Este capítulo se centra en el diseño y desarrollo de un sistema integral capaz de capturar estos datos de manera eficiente y fiable.

Se analizarán los requisitos técnicos y funcionales necesarios para la creación de un equipo que no solo sea preciso, sino también de bajo costo de construcción y fácil de utilizar para distintos usuarios finales. Se explorarán las tecnologías disponibles en el mercado, que pueden incorporarse para mejorar la adquisición de datos del dispositivo.

Además, se discutirá la selección de sensores adecuados y la integración de software para el procesamiento de datos, asegurando que el sistema no solo funcione bien, sino que también proporcione información valiosa y utilizable. Este capítulo servirá como una guía para entender los principios detrás del diseño de equipos de medición ambiental.

### 4.1. Selección de Sensores

La selección del sensor adecuado es de vital importancia en el diseño del equipo. Los sensores son dispositivos que convierten magnitudes físicas, químicas o biológicas en señales eléctricas, permitiendo la recopilación de datos del entorno. La variedad de sensores disponibles en el mercado, permiten hacer una comparación de características e identificar cuál es la mejor opción a utilizar según las necesidades. La elección correcta depende de múltiples factores, incluyendo el tipo de variable a medir, el rango de operación, la precisión requerida, y las condiciones ambientales en las que se utilizará.

Además, la compatibilidad con otros componentes del sistema, como microcontroladores o plataformas de comunicación. En esta sección, se analizarán los criterios esenciales que se tomaron en cuenta para la selección del sensor, con el fin de seleccionar la mejor opción para la aplicación requerida.

### 4.1.1. Tipos de sensores a analizar

#### Sensores de Temperatura

1. Termocuplas

Consiste en un dispositivo para la medición de la temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales distintos o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz.[33]

De esta forma, mediante la aparición de una diferencia de potencial entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentran de manera simultánea a diferentes temperaturas. Se manifiesta la aparición de una corriente eléctrica que depende de la diferencia de temperaturas entre las uniones.[33]

2. Sensores de resistencia (RTD)

Consisten en sensores detectores de temperatura mediante resistencias, por eso sus siglas en inglés (RTD). Construidos con una resistencia de platino (Pt). Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia que puede ser positivo o negativo, si su coeficiente es negativo se denominan NTC, mientras que si es positivo se denomina PTC. El fundamento de los termistores está en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con ésta del número de portadores. Al aumentar la temperatura, lo hace también el número de portadores reduciéndose la resistencia, y de ahí que presente coeficiente de temperatura negativo.[33]

3. Sensores de temperatura digitales

Los sensores de temperatura digitales convierten los valores de temperatura y de humedad en una señal digital a través de un circuito integrado. Los sensores de temperatura del sistema (TSYS) están disponibles en miniatura, diseñados específicamente para espacios reducidos y responden rápidamente a los cambios en la temperatura del proceso. El diseño optimizado de microcircuitos facilita tiempos de conversión rápidos y un consumo de energía muy bajo.[34]

#### Sensores de Humedad

1. Higrómetros capacitivos

Capaz de medir la cantidad de agua presente en una sustancia. Quizá los más difundidos en la industria y meteorología, debido a que son de fácil producción, bajos costos, y alta fidelidad. El principio en el cual se basa este tipo de sensores, es el cambio que sufre la capacitancia ( $C$  en [Farad]) de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo.[35]

2. Higrómetros resistivos

Su principio de operación se basa en que la madera seca es pobre conductora de electricidad. El agua, al absorberse en la madera y combinarse con las resinas propias de la madera, mejora su conductividad eléctrica, debido al flujo iónico al aplicar tensión en corriente continua a través de los electrodos, así la resistencia medida (o conductancia) a un flujo de la corriente a través de la madera es una medida de la cantidad de humedad en esa madera [36]

3. Sensores digitales de humedad

Al igual que los de temperatura, los sensores digitales de humedad, convierten los valores de humedad en una señal digital a través de un circuito integrado.[34]

### Sensores de Presión

#### 1. Piezoresistivos

Los sensores de presión piezorresistivos se basan en que la presión que actúa sobre una membrana delgada provoca la aparición de tensiones mecánicas, que a su vez propician que haya un cambio en el valor de los piezorresistores implantados en la membrana. Con la conexión adecuada de estos piezorresistores puede obtenerse una señal de tensión.[37]

#### 2. De presión capacitiva

Construidos con electrodos conductores sensitivos que convierten la variación de capacitancia en voltaje, frecuencia o variación de ancho de pulso de acuerdo a como estén implementados. Midiendo de forma indirecta variables como la presión[38].

#### 3. Transductores de presión

Son sensores que transforman la presión de un medio en señal eléctrica para su posterior análisis[39].

#### 4. Sensores de presión digitales

Al igual que los mencionados anteriormente, los sensores digitales de presión, convierten los valores de presión en una señal digital a través de un circuito integrado.

### Metodología de Ulrich Eppinger para el diseño y desarrollo de productos

Parte de la metodología de diseño, consiste en el desarrollo del concepto, en el cual se identifican las necesidades del cliente, se establecen especificaciones objetivo, se generan conceptos de producto, se seleccionan los conceptos del producto, se prueban los conceptos del producto, se establecen especificaciones finales, y por último, se elabora el plan de desarrollo. [40]

Este proceso, especifica en el paso de diseño la selección de materiales. Es por esto, que haciendo uso de la metodología de identificación de necesidades y jerarquización, se han elegido los sensores para el diseño del equipo.

#### 4.1.2. Identificación de necesidades

La identificación de necesidades para la elección de sensores destinados a utilizarse en campo, bajo condiciones ambientales implica considerar varios factores clave, en esta sección se hará la comparación de características y se seleccionará el conjunto de sensores que mejor se adapten a las necesidades del diseño.

Número de necesidad	Necesidad
1	El costo del sensor es menor a \$30
2	Las dimensiones laterales del sensor no superan los 30mm
3	El sensor es un dispositivo de ingeniería propia y estándar.
4	El sensor es de fácil adquisición en Costa Rica.
5	El sensor es apto para trabajar en un ambiente de laboratorio.
6	El sensor permite extracción de datos tipo Serial.
7	Los rangos de medición del sensor permiten su uso bajo condiciones ambientales.

Tabla 4.1: Necesidades determinadas para los sensores a utilizar.

### 4.1.3. Jerarquización de necesidades

Para un correcto análisis de las necesidades a suplir con el sensor seleccionado, se procede a la jerarquización de las necesidades. Así, se ordenan las necesidades según su prioridad, siendo la necesidad número 1 la más importante por cumplir y la necesidad número 7 la menos importante por cumplir.

Número de necesidad	Necesidad
1	Los rangos de medición del sensor permiten su uso bajo condiciones ambientales.
2	El costo del sensor es menor a \$30
3	Las dimensiones laterales del sensor no superan los 30mm
4	El sensor es de fácil adquisición en Costa Rica.
5	El sensor es apto para trabajar en un ambiente de laboratorio.
6	El sensor es un dispositivo de ingeniería propia y estándar.
7	El sensor permite extracción de datos tipo Serial.

Tabla 4.2: Jerarquización de necesidades.

Como necesidad número 1 se seleccionó que los rangos de medición del sensor permiten su uso bajo condiciones ambientales. Esto, debido a que el dispositivo se construye con el fin de ser utilizado en condiciones ambientales, por ejemplo un campo de trabajo o bien, en el exterior para realizar análisis continuos de las variables a medir.

En la necesidad número 2 se colocó que el sensor tenga un costo menor a \$30, esto debido a que el dispositivo a obtener debe ser de bajo costo para suplir la problemática actual, la cual consiste en la difíciles adquisición de los equipos existentes.

De igual forma, se jerarquizó como necesidad número 3 las dimensiones del sensor, debido a que, como se estudió en el capítulo anterior, la dimensión de la carcasa que cubre el sensor de temperatura no deberá superar los 38mm de diámetro de la esfera para una correcta obtención de medición de radiación.

Como necesidades número 4, 5, 6 y 7 se seleccionó que el sensor sea de fácil adquisición en Costa Rica debido a que es importante la recreación de dicho dispositivo, y que la misma sea de construcción y adquisición sencilla. Que el sensor sea apto para mediciones en laboratorio permite la investigación y continua mejora del dispositivo; que el sensor tenga una ingeniería propia y estándar permite una sencilla adquisición de los conocimientos de funcionamiento del sensor y, por último, que el sensor permita extrae datos en serial, hace que la toma de datos se de de una forma sencilla.

### 4.1.4. Clasificación de importancia de las necesidades primarias

Dicha clasificación se realiza para determinar la importancia y la validez de las necesidades planteadas. De esta forma, se evalúa cada necesidad propuesta para el sistema a diseñar, indicando su importancia en una escala del 1 al 5. La escala detallada está a continuación.

Escala	Necesidad
1	La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2	La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3	Sería bueno tener esta función, pero no es necesaria.
4	La función es altamente deseable, pero consideraría una solución sin ella.
5	La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función

Tabla 4.3: Escala de importancia de las necesidades

En la tabla 4.4, se identifica para cada necesidad, una importancia según el rango anteriormente considerado.

Número de necesidad	Necesidad	Importancia
1	Los rangos de medición del sensor permiten su uso bajo condiciones ambientales.	5
2	El costo del sensor es menor a \$30	4
3	Las dimensiones laterales del sensor no superan los 30mm	3
4	El sensor es de fácil adquisición en Costa Rica.	2
5	El sensor es apto para trabajar en un ambiente de laboratorio.	4
6	El sensor es un dispositivo de ingeniería propia y estándar.	2
7	El sensor permite extracción de datos tipo Serial.	2

Tabla 4.4: Clasificación de importancia de las necesidades primarias

#### 4.1.5. Selección final del sensor

Según la clasificación de importancia de las necesidades primarias identificadas, se eligió el sensor BME280, debido a sus características presentadas en el marco teórico, se considera como la mejor opción ya que permite obtener las mediciones de Temperatura, presión y humedad en un mismo sensor digital, lo que vuelve posible en una misma carcasa añadir un sensor capaz de medir 3 distintas variables. Además, de sus interfaces de comunicación atractivas para un diseño de prototipo que se utilizará en el ambiente. Por último, su bajo costo vuelve posible el diseño del prototipo con un presupuesto menor y sus precisiones permiten obtener mediciones confiables para la aplicación. El sensor BME280 cumple con las 7 necesidades primarias establecidas en la sección anterior.

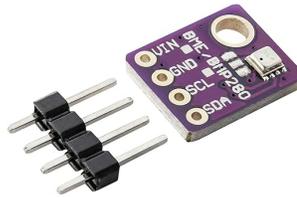


Figura 4.1: Sensor BME280.[7]

## 4.2. Diseño de carcasas para los sensores

Para el proyecto, se llevó a cabo el diseño de 2 carcasas para proteger los sensores utilizados en el dispositivo. Dichas carcasas son vitales en la medición de datos debido a que sus características de color y tamaño hacen posible la medición de variables distintas de un sensor a otro. De manera que un sensor mide temperatura de globo y el otro sensor mide humedad relativa y temperatura de bulbo seco.

#### 4.2.1. Esfera de 38mm de diámetro

Para el diseño de la esfera, se utilizó el material de ácido poliláctico. El cual corresponde a un biopolímero termoplástico utilizado para la impresión 3D, entre muchos otros usos a nivel de producción industrial y mecánica. Sus propiedades físicas y mecánicas dependen de la composición del polímero. Entre sus limitaciones, comparado con otros empaques plásticos, es la baja temperatura de distorsión (HDT); esto puede ser un problema en aplicaciones donde el material de empaque es expuesto a picos de calentamiento durante el llenado, transporte o almacenamiento y puede finalmente deformarse.[41]

El diámetro de 38mm es basado en la investigación realizada en[42], que muestra cómo usando diámetros menores, se logran valores de temperatura de globo confiables. En la investigación hacen uso de la impresión 3D y realizan una esfera de 38mm de diámetro.

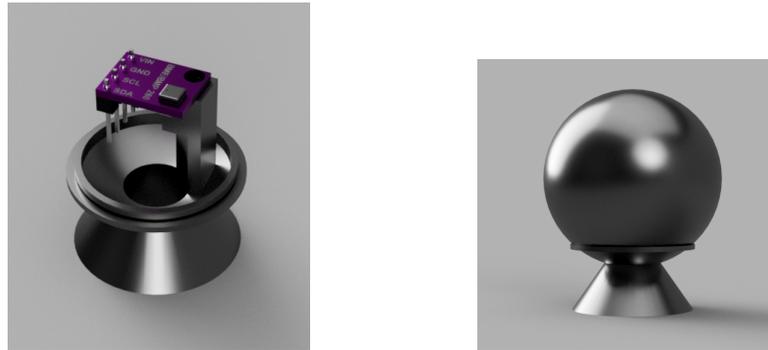


Figura 4.2: Base y carcasa de globo con sensor

#### 4.2.2. Carcasa para el sensor de humedad relativa y temperatura de bulbo seco

Esta carcasa fue impresa en 3D con el mismo material, ácido poliláctico, o mejor conocido como PLA. Su forma se debe a la función que realiza, la cual es proteger el sensor que se encuentra dentro, sin interferir con su contacto con el ambiente exterior.



Figura 4.3: Carcasa de bulbo con sensor

### 4.3. XIAO ESP32C3 como microcontrolador del dispositivo

Como microcontrolador para el prototipo se utilizó un XIAO ESP32C3, debido a sus especificaciones anteriormente descritas. Su capacidad de conexión mediante WiFi, fue la principal razón de su elección, ya que al tratarse de un prototipo que necesita recopilar datos en tiempo real, la conexión a WiFi permite desplegar la fecha con hora, minutos y segundos exactos en el momento que las mediciones se están dando.



Figura 4.4: XIAO ESP32C3 de Speed Studio.[8]

### 4.4. Conexión inalámbrica mediante sistema Bluetooth

La conexión inalámbrica para la realización de pruebas, fue posible gracias al módulo de Bluetooth HC-05 utilizado, dicho módulo permitió la conexión entre el prototipo y la computadora, por lo que se extrajeron en tiempo real los datos obtenidos por el sensor de forma inalámbrica, permitiendo ingresar el prototipo a una cámara de vacío y recopilando los datos en la computadora que se encontraba fuera de la cámara de vacío.



Figura 4.5: Módulo Bluetooth HC-05.[9]

## 4.5. Arquitectura final del equipo

La arquitectura de los componentes muestra la conexión realizada para alimentar los sensores BME280. Como se muestra en la figura 4.6.

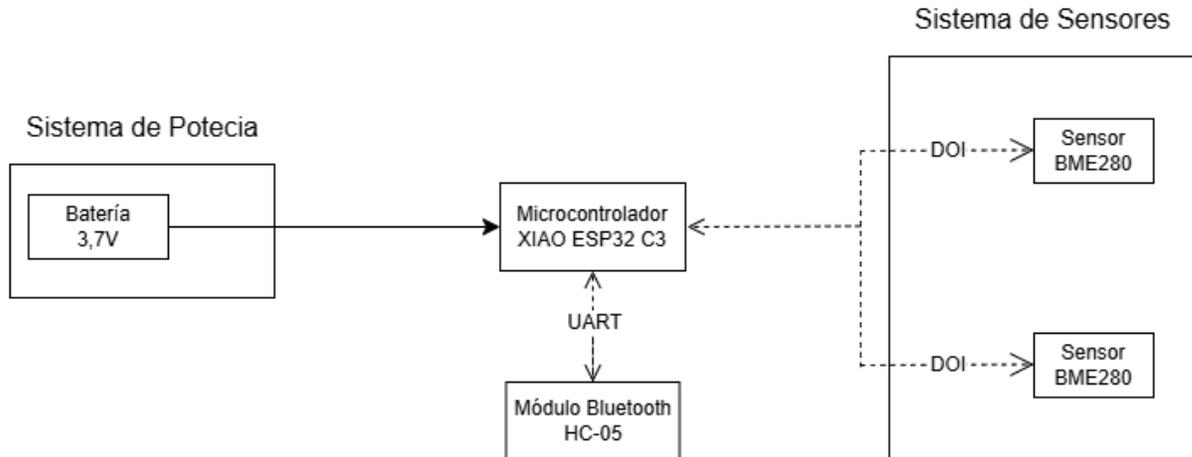


Figura 4.6: Arquitectura del sistema de sensores.

## 4.6. Códigos de programación

### 4.6.1. main.ino

El código main.ino, fue elaborado en arduino para la programación de los dos sensores. Inicializa los sensores, se conecta a la red Wi-Fi, sincroniza el tiempo, se define la frecuencia de toma de datos y almacena el muestreo de ambos sensores.

### 4.6.2. logger.py

Este código es elaborado en python y se encarga de elaborar los csv con las mediciones tomadas por los sensores, además de graficar los datos en tiempo real.

### 4.6.3. questtemp.reader.py

Elaborado en python, para la recolección de datos del equipo QUESTemp 44 de la marca 3M, utilizado como patrón en las pruebas realizadas en el horno al vacío. Dicho código, recopila los datos del equipo patrón y los convierte en un csv para su análisis.

### 4.6.4. analysis.py

Por último, el código de análisis se elaboró en python, para la graficación de los datos recopilados y para los cálculos de RSME y sus respectivos porcentajes de error. El código despliega las gráficas de las pruebas realizadas, mostradas en el capítulo 5.

## 4.7. Presupuesto para conjunto de sensores: costos totales

Para el presupuesto, se realizaron tablas que especifican los costos de los componentes del prototipo, del sistema de batería y componentes adicionales. Además, se realizó la tabla 4.9, para los costos de mano de obra que consisten en el ensamblaje del equipo y la puesta en marcha del dispositivo, la cual corresponde a los gastos de instalación, configuración, verificación e inicio de operación. El costo de puesta en marcha se estipuló de \$10 para una instalación en el Laboratorio Delta, ubicado en Cartago, Costa Rica. Este costo puede ser mayor en caso de que el dispositivo necesite un traslado a otro lugar del país.

Componente	Cantidad por paquete	Precio por paquete (\$)	Costo (\$)
XIAO ESP32C3	1	9.90	9.90
Módulo Bluetooth HC-05	1	9.99	9.99
Sensor BME280	4	21.59	10.80
Filamento PLA para impresión 3D	1	14.99	3.75
Placa perforada para soldar componentes	20	8.99	0.45
Caja de cables para soldar componentes	5	13.99	0.70
Envío USA a Costa Rica	1	10.00	10.00
<b>Total</b>			<b>45.58</b>

Tabla 4.5: Presupuesto de componentes del prototipo

Componente	Cantidad por paquete	Precio por paquete (\$)	Costo (\$)
Batería recargable 3.7V	5	22.99	4.60
Envío USA a Costa Rica	1	10.00	10.00
<b>Total</b>			<b>14.60</b>

Tabla 4.6: Presupuesto de Sistema de batería

Componente	Cantidad por paquete	Precio por paquete (\$)	Costo (\$)
Gabinete	1	57.80	57.80
Impresión 3D	1	30.00	30.00
<b>Total</b>			<b>87.80</b>

Tabla 4.7: Presupuesto de componentes adicionales

Insumos	Costo (\$)
Sin batería	133.38
Con batería	147.98

Tabla 4.8: Comparación de costos de insumos

<b>Concepto</b>	<b>Costo (\$)</b>
Ensamblaje	10.00
Puesta en marcha	10.00
<b>Total</b>	<b>20.00</b>

Tabla 4.9: Costos de mano de obra

<b>Subtotal</b>	<b>Costo (\$)</b>
Sin batería	153.38
Con batería	167.98

Tabla 4.10: Costos totales considerando insumos, procesos de manufactura y mano de obra

El costo del sensor de 3M QUESTemp 44 es de \$4600 [14]. Por otro lado, el costo total del prototipo realizado es de \$167.98, por lo que el costo se disminuyó en un 96 %, mediante la elaboración de los sensores a bajo costo.

## Capítulo 5

# Validación del equipo diseñado

En este capítulo, se explicará los métodos de validación llevados a cabo para conocer el comportamiento de los sensores. La validación de equipos es un aspecto crucial en el desarrollo de sistemas de medición, especialmente en contextos donde las condiciones ambientales pueden afectar la salud y el bienestar de las personas, como se considera en este proyecto. Este capítulo se centrará en la validación del sistema de mediciones diseñado para la inspección de temperaturas de bulbo seco, humedad y radiación.

La medición precisa de la temperatura es fundamental para evaluar el riesgo de estrés térmico y garantizar la seguridad de los trabajadores. La implementación de un sistema confiable no solo mejora la calidad de los datos recopilados, sino que también contribuye a la toma de decisiones informadas en el ámbito de la salud ocupacional.

### 5.1. Prueba en horno al vacío

Para la correcta validación de los sensores, se realizaron las pruebas en un horno al vacío en el Laboratorio Delta de la Escuela de Electromecánica. Las pruebas al vacío son un procedimiento utilizado para evaluar la integridad de un sistema, componente o material ya que dicha prueba permite eliminar el aire y otros gases del entorno. Dicha prueba es de importancia al tratarse de la fabricación de un sistema de sensores.

Entre los objetivos que se cumplen con dicha prueba está la evaluación a la resistencia, ya que el dispositivo se expuso a diferentes temperaturas. Además, los sensores experimentan diferentes presiones al tratarse de una cámara de vacío, y con esto, se verifica el comportamiento del dispositivo a diferentes presiones.

La frecuencia de mediciones realizadas por el equipo QUESTemp 44 de la marca 3M fue de una medición por minuto, mientras el prototipo realizó un muestreo con frecuencia de una medición por segundo.

#### 5.1.1. Equipo utilizado para pruebas

##### **Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A**

El equipo utilizado para la prueba del sistema de sensores, consiste en un horno de vacío de la marca Fisherbrand, modelo 281A. Es un equipo diseñado para proveer un entorno controlado, libre de oxígeno. [43] Permite eliminar el aire y minimizar la oxidación durante el calentamiento y controlar la temperatura, lo que facilita los experimentos reproducibles.



Figura 5.1: Horno de vacío.

### Bomba de vacío BOECO R-300

Dicho horno de calor, se conectó a una bomba, la cuál permitía la extracción de aire. La bomba de vacío BOECO R-300 es utilizada, principalmente, para necesidades de laboratorio. Su diseño es sin aceite, impulsada por un pistón, lo que reduce la contaminación y minimiza el mantenimiento.

Su operación es silenciosa, aproximada de 50dB, lo que hace ideal su uso en laboratorio. Además de que su composición es compacta y ligera con un peso aproximado de 4 kg.[3]

Vacío máximo	670mm Hg, 50*60 Hz
Flujo máximo	17 l/min - 20 l/min
Potencia	1/8 HP
Polos	4
Peso neto	4,1 kg
Rosca de puerto	8mm

Tabla 5.1: Especificaciones de la bomba R-300.[3]

#### 5.1.2. Especificaciones de la prueba realizada

Para la prueba realizada en el horno de vacío, se elaboraron guías de pasos a realizar, las cuales se encuentran en la sección de apéndices. Las guías de pasos, explican con detalle los pasos a seguir en cada prueba, con el fin de que dichas pruebas se elaboren de la misma forma y esto permita una comparación de una prueba a otra.



Figura 5.2: Bomba de vacío R-300.

Se utilizó el prototipo con las carcasas diseñadas para los sensores. En las 5 pruebas realizadas se utilizó la misma carcasa para el sensor de temperatura y humedad. Sin embargo, el sensor de temperatura de bulbo, tuvo cambio de carcasa en cada prueba. Se hicieron cambios en su tamaño y cubrimientos internos y externos, la siguiente tabla especifica las carcasas utilizadas en cada prueba para la medición de temperatura de bulbo.

Prueba	Carcasa utilizada
1.0	Esfera de 38mm de diámetro, impresa en negro, con cubrimiento externo negro mate
2.0	Esfera de 38mm de diámetro, impresa en negro, con cubrimiento externo negro mate y cubrimiento interno de aluminio.
3.0	Esfera de 38mm de diámetro, impresa en blanco, con cubrimiento externo negro mate
4.0	Esfera de 50mm de diámetro, impresa en blanco, con cubrimiento externo negro mate
3.1	Esfera de 38mm de diámetro, impresa en blanco, con cubrimiento externo negro mate

Tabla 5.2: Distintas carcasas utilizadas para medir radiación.

Las carcasas de temperatura de globo fueron modificadas con el fin de obtener, experimentalmente, la opción de carcasa que brinde los datos más precisos. Estas modificaciones se hicieron cambiando colores y tamaños, de forma que se aprovechara la emisividad de los colores para obtener un prototipo que se asemejara lo máximo posible al sensor patrón que se utilizó en las pruebas.

Como sensor patrón para la validación del prototipo se utilizó el equipo QUESTemp 44 de la marca 3M facilitado por la Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental del Tecnológico de Costa Rica. El QUESTemp 44 ofrece un monitoreo tradicional de estrés térmico sin la agravación de utilizar un bulbo continuamente húmedo. Modelos matemáticos fueron implementados en este modelo para que no fuera necesario mantener húmedo el bulbo, de forma que se crea un bulbo húmedo sin agua. Es utilizado para condiciones ambientales.[31]

En la investigación realizada [42], se concluye que el uso de globos "pequeños", específicamente de 38mm de diámetro, y plásticos, no da lugar a errores significativos en la evaluación de las condiciones de estrés por calor. Incluso, en el rango de condiciones experimentales investigadas y que cubren una amplia serie de actividades laborales caracterizadas por altas cargas radiactivas que a menudo resultan en valores de temperatura radiante superiores a los (50-60)°C, el error medio en las mediciones de "WBGT" mediante globos pequeños realizadas, no son excesivas si se comparan con los requisitos de precisión prescritos por la norma ISO 7243.

La alternativa utilizada de un globo de 38mm de diámetro, es una solución buena para reducir el tiempo de respuesta que afecta en la recolección de datos. Además, permite elaborar un prototipo de bajo costo con precisión aceptable. Es por esto, que se realizaron pruebas con una carcasa de 38mm de diámetro.

La tabla 5.2 muestra las 5 carcasas utilizadas para las 5 distintas pruebas que se hicieron en el horno a vacío. Empezando con la prueba 1.0, al cual consistía en una esfera de 38mm de diámetro, impresa en 3D color negro, con cubrimiento negro mate. Esta prueba, aprovecha la emisividad del color negro mate de la cuál se habla en el capítulo 2.

La prueba 2.0 fue con una carcasa de 38mm de diámetro, impresa en 3D color negro con cubrimiento negro mate, además de cubrirse en su interior con aluminio, esto debido a que experimentalmente había posibilidad de aprovechar la conductividad del aluminio, para aumentar la velocidad de respuesta que afecta en ocasiones la recolección de datos. El equipo utilizado de patrón, QUESTemp34, es elaborado con un globo de cobre, material altamente conductor que permite reducir el tiempo de respuesta para la recolección de datos.

La prueba 3.0 fue utilizada una carcasa de 38mm de diámetro, impresa en 3D color blanco, con cubrimiento externo negro mate. Lo que permite utilizar la emisividad de los colores para reducir el tiempo de respuesta que afecta en la recolección de datos. La prueba 3.1 es una repetición de la prueba 3.0, con igual de condiciones de globo.

Para la prueba 4.0, el diámetro fue aumentado a 50mm de diámetro, impresa en 3D color blanco, con cubrimiento externo color negro mate. Permitted realizar de forma experimental una comparación entre distintos diámetros para identificar el prototipo más preciso.

En el caso de la carcasa para temperatura de bulbo seco, se utilizó la misma carcasa en las 5 pruebas, debido a que esta carcasa era un sistema de protección, para futuras exposiciones a eventos como la lluvia. Su diseño protege el sensor de condiciones ambientales, sin afectar el contacto directo con el ambiente. Además, su color blanco es elegido debido a la emisividad del color blanco, que permite la medición de temperatura de bulbo seco, evitando la influencia de fuentes directas de radiación.

Fue así, como se utilizaron los prototipos anteriormente descritos, para las 5 pruebas realizadas de 2 horas. En donde la cámara a vacío permitió evaluar la humedad relativa, la temperatura de globo y de bulbo seco.

En las gráficas a continuación, se muestran dos curvas. La de color azul representa el prototipo realizado en el Laboratorio Delta y la curva color naranja representa el dispositivo patrón QUESTemp44 de la marca 3M.

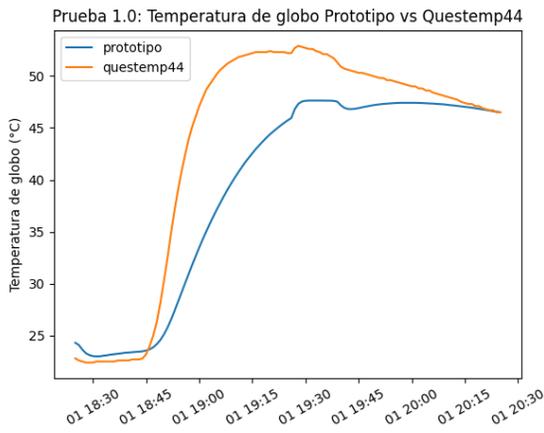


Figura 5.3: Prueba 1.0 Temperatura de globo

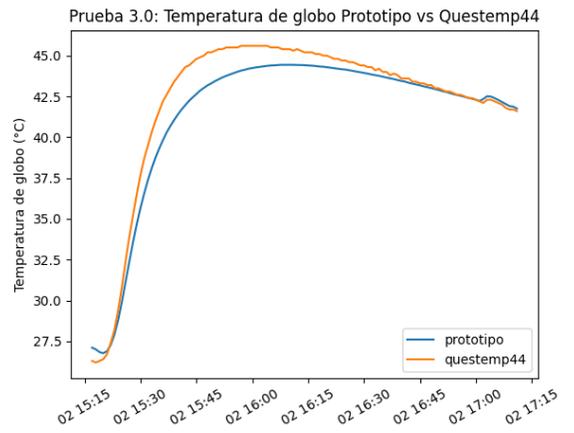


Figura 5.5: Prueba 3.0 Temperatura de globo

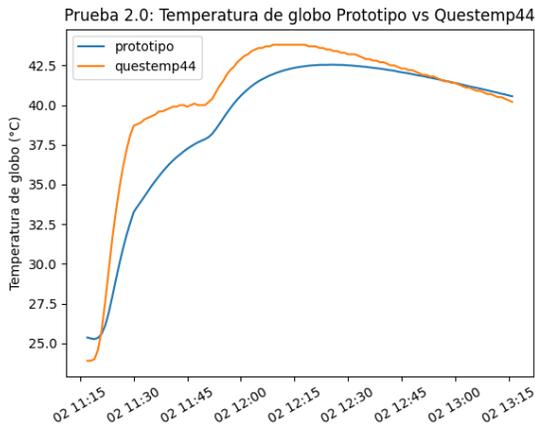


Figura 5.4: Prueba 2.0 Temperatura de globo

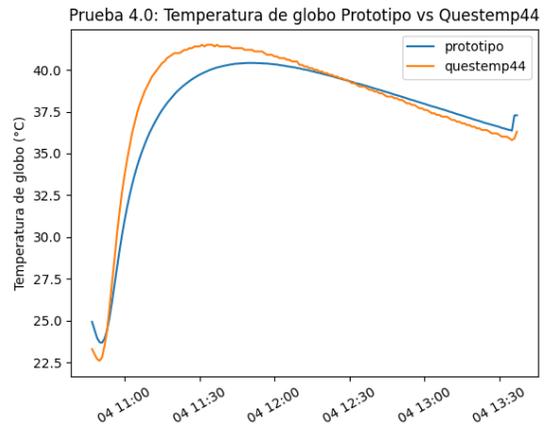


Figura 5.6: Prueba 4.0 Temperatura de globo

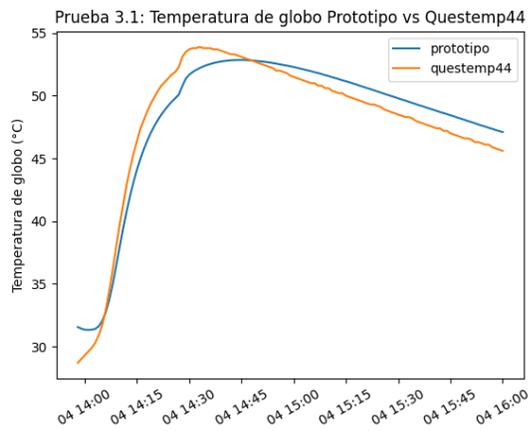


Figura 5.7: Prueba 3.1 Temperatura de globo

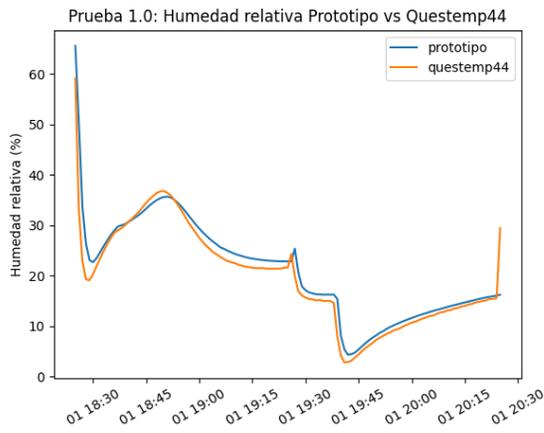


Figura 5.8: Prueba 1.0 Humedad relativa

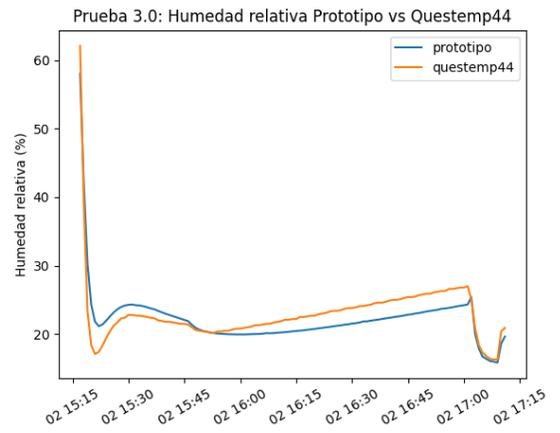


Figura 5.10: Prueba 3.0 Humedad relativa

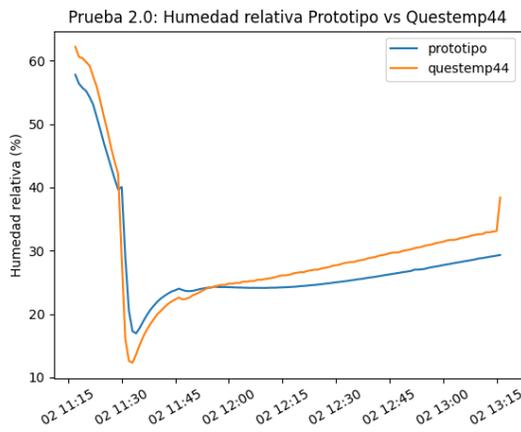


Figura 5.9: Prueba 2.0 Humedad relativa

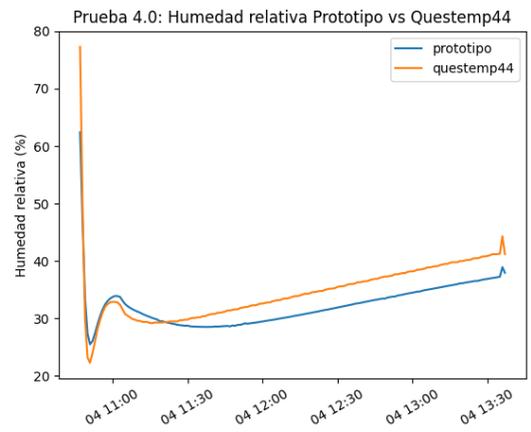


Figura 5.11: Prueba 4.0 Humedad relativa

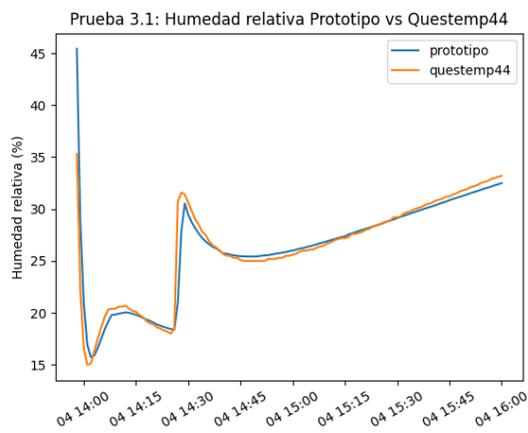


Figura 5.12: Prueba 3.1 Humedad relativa

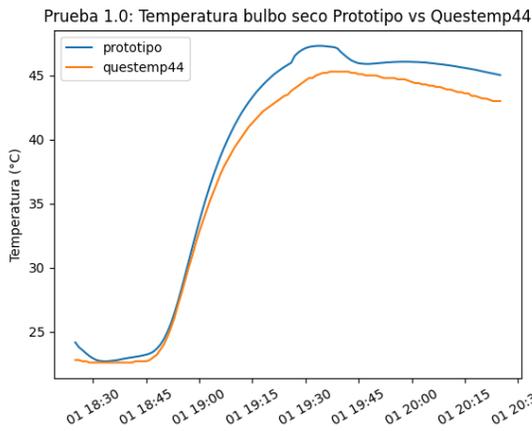


Figura 5.13: Prueba 1.0 Temperatura de bulbo seco

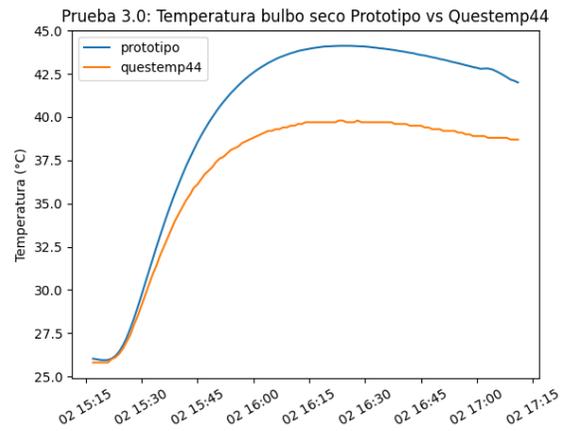


Figura 5.15: Prueba 3.0 Temperatura de bulbo seco

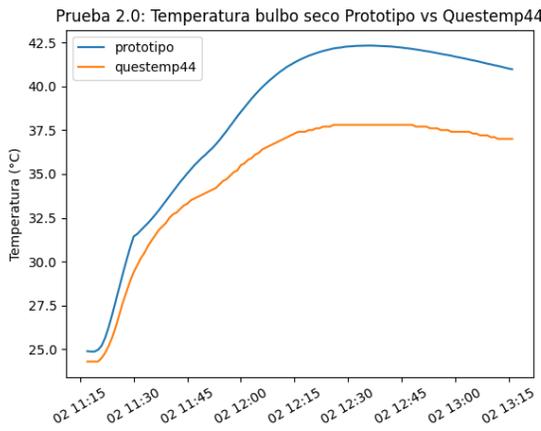


Figura 5.14: Prueba 2.0 Temperatura de bulbo seco

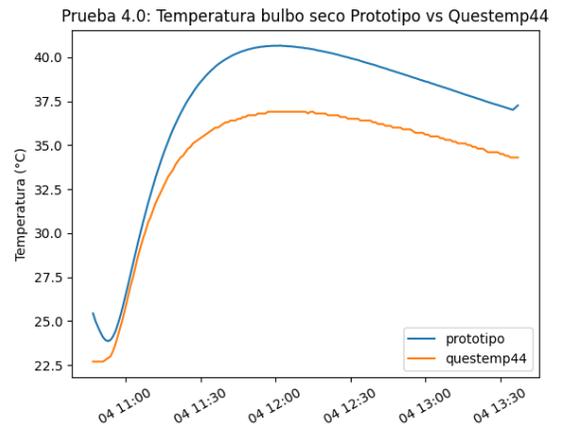


Figura 5.16: Prueba 4.0 Temperatura de bulbo seco

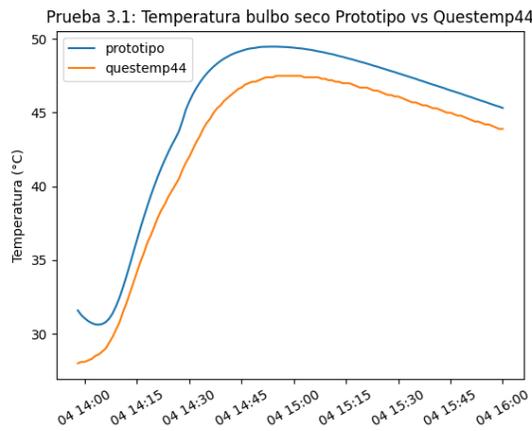


Figura 5.17: Prueba 3.1 Temperatura de bulbo seco

Prueba 1.0	RMSE	Porcentaje de error (%)
Temperatura de globo	6,65 °C	15,25
Temperatura bulbo seco	2,28°C	14,42
Humedad relativa	2,85 %	14,41

Tabla 5.3: Prueba 1.0: Porcentajes de error según RMSE.

Prueba 2.0	RMSE	Porcentaje de error (%)
Temperatura de globo	2,56°C	6,31
Temperatura bulbo seco	3,44°C	8,48
Humedad relativa	3,42 %	11,55

Tabla 5.4: Prueba 2.0: Porcentajes de error según RMSE.

Prueba 3.0	RMSE	Porcentaje de error (%)
Temperatura de globo	1,71°C	4,04
Temperatura bulbo seco	3,67°C	8,69
Humedad relativa	2,11 %	9,21

Tabla 5.5: Prueba 3.0: Porcentajes de error según RMSE.

Prueba 4.0	RMSE	Porcentaje de error (%)
Temperatura de globo	1,59°C	4,17
Temperatura bulbo seco	2,87°C	7,54
Humedad relativa	3,27 %	9,44

Tabla 5.6: Prueba 4.0: Porcentajes de error según RMSE.

Prueba 3.1	RMSE	Porcentaje de error (%)
Temperatura de globo	1,58°C	9,63
Temperatura bulbo seco	4,54°C	13,00
Humedad relativa	1,57 %	5,99

Tabla 5.7: Prueba 3.1: Porcentajes de error según RMSE.

Los gráficos muestran un similar comportamiento entre el prototipo y el dispositivo utilizado como patrón, el QUESTemp 44. La comparación de las mediciones obtenidas entre el sensor patrón y el prototipo desarrollado revela diferencias que pueden estar influenciadas por los tiempos de lectura utilizados en las pruebas, el cual fue de dos horas cada prueba. Lo anterior se debe a que, en pruebas de mayor lapso, permite a los sensores a tendencia a un valor constante y, como consecuencia, la convergencia.

Sin embargo, la carcasa para la temperatura de globo que mejor se adapta, corresponde a la esfera de 38mm de diámetro, impresa en 3D color blanco con cubrimiento externo negro mate. Es la carcasa utilizada en la prueba 3.0 y tiene el menor porcentaje de error respecto a la temperatura de globo.

En el caso de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa, estos valores fueron obtenidos del mismo sensor, cubiertos por una carcasa protectora impresa en 3D color blanco. Dicha carcasa fue la misma utilizada en las 5 pruebas realizadas.

La exactitud del patrón utilizado, correspondiente al QUESTemp 44, es la siguiente[31]:

- **En mediciones de bulbo seco y temperatura de globo:**  $\pm 0,5$  C° en rango de 0 a 120 °C.
- **Temperatura de bulbo húmedo sin agua:** incertidumbre de medición ampliada a 1.1 °C en

rango de 0 a 80 °C.

- **Humedad relativa:**  $\pm 5\%$  en rangos de 20 a 95 % (no condensando).

## Capítulo 6

# Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

1. El análisis del estado del arte y principios de funcionamiento de los sensores de temperatura bulbo seco, bulbo húmedo y de globo, permitió identificar tecnologías relevantes, principios de funcionamiento y las metodologías adecuadas para la aplicación en ambientes con exposición solar. Este análisis volvió posible establecer los lineamientos para la selección y diseño de los sensores en este proyecto.
2. Se fabricó con éxito, un prototipo que consta de 2 sensores capaces de medir la temperatura de globo, de bulbo seco y la humedad relativa. Diseñados haciendo uso de técnicas de bajo costo. Los dispositivos demostraron ser funcionales y replicables, contribuyendo al desarrollo de soluciones accesibles para la medición en condiciones ambientales adversas.
3. Los sensores desarrollados fueron validados mediante pruebas comparativas con equipos certificados y calibrados. Los resultados mostraron porcentajes de error que identificaron como mejor opción la carcasa de globo de tipo esfera de 38mm de diámetro, impresa en 3D en color blanco, con cubrimiento externo color negro mate. Lo que confirma la viabilidad de los sensores para su uso en aplicaciones prácticas y su potencial para ser utilizados en proyectos de monitoreo ambiental. Además, se logró un costo comparativamente menor respecto al equipo utilizado como patrón, al utilizarse métodos de fabricación de bajo costo.
4. Se elaboraron de manera detallada los planos de manufactura de las carcasas y ensamble del dispositivo final propuesto, así como un presupuesto estimado para su elaboración. Esto proporciona una guía clara para la reproducción y escalabilidad del proyecto, facilitando su implementación en otros entornos similares y garantizando su viabilidad económica.

## 6.2. Recomendaciones

1. Se recomienda la calibración periódica, para asegurar que los sensores continúen proporcionando datos fiables a largo plazo, es fundamental establecer un protocolo de calibración periódica. Se sugiere realizarla comparando los sensores desarrollados con equipos certificados para mantener un control de calidad constante.
2. Emplear servicios de metrología para mejorar la precisión, trazabilidad y la mejora de la calidad del dispositivo.
3. Evaluar el impacto en diferentes entornos laborales, ya que el dispositivo desarrollado es con propósito de ayudar a personas que trabajan largas jornadas expuestas al sol, es útil realizar pruebas en distintos entornos y condiciones climáticas. Esto ayudaría a mejorar la versatilidad del sistema, permitiendo su adaptación a una mayor variedad de industrias o zonas geográficas.
4. Desarrollo de una interfaz de usuario amigable para facilitar el uso del sistema a operarios o técnicos en campo. Esto podría incluir una app o un software que presente los datos recolectados de manera clara y sencilla para facilitar la toma de mediciones.
5. Determinar condiciones de riesgo térmico con base en los datos recopilados por el dispositivo que permita crear planes de protección según la necesidad. Por ejemplo, establecer intervalos de descanso en función de los niveles de temperatura y humedad registrados, hidratación constante, rotación de tareas, uso de bloqueador solar y vestimenta adecuada.

## Anexo A

### Ensamble de los sensores en gabinete



Figura A.1: Ensamble de los sensores en gabinete.

## Apéndice A

# Guías de pasos para pruebas realizadas en el horno a vacío

1. Encender el equipo QUESTemp44 de 3M.
2. Conectar el equipo a un puerto de la computadora.
3. Reestablecer la memoria del equipo.
  - 3.1 Del menú principal se selecciona reestablecer.
  - 3.2 Presionar botón Enter por 3 segundos.
  - 3.3 Volver al menú principal presionando RUN/STOP.
4. Revisar hora y fecha
  - 4.1 Del menú principal seleccionar SETUP.
  - 4.2 Configurar en Celsius.
  - 4.3 Establecer hora y día con botones: Enter y flechas arriba y abajo.
  - 4.4 Volver al menú principal presionando RUN/STOP.
5. Volver al menú principal.
6. Ingresar a “Vista”.
7. Dejar calibrar el equipo por 10 minutos.
8. Anotar condiciones del experimento: Fecha, hora, localización, temperatura y humedad.
9. Presionar RUN/STOP para iniciar las mediciones: se muestra un “\*” asterisco como indicador de que el equipo está realizando mediciones.
10. Una vez que se termina el periodo de mediciones, presionan el botón de STOP.
11. Vuelva al menú presionando el botón de ENTER por 3 segundos.

ANTES DE IMPRIMIR SERIAL EN EL SENSOR 3M, realice el paso 12, 13 y 14.

12. Abra el código “questtemp\_reader”.
13. En la línea 10 del código, deben modificar el puerto, dependiendo de cuál se utilizó en la computadora. Se modifica específicamente la palabra “COM2, COM3, COM4...” dependiendo de cuál se haya utilizado.
14. Corra el código “questtemp\_reader”.
15. Tome el equipo QUESTemp44 de 3M, y seleccione en el menú principal IMPRIMIR.
16. Proceda a imprimir serial.
17. Automaticamente, el equipo QUESTemp44 imprimirá los valores obtenidos en el tiempo de medición y el código “questtemp\_reader” se encargará de realizar un csv con los mismos.

Bibliotecas necesarias para correr el código “questtemp\_reader”

Para ejecutar el código, necesita asegurarse de que tiene instaladas todas las bibliotecas necesarias. Aquí están las dependencias que debe instalar usando pip:

1. pyserial: Para manejar la comunicación serial.
2. pandas: Para el manejo y análisis de datos. Puede instalar estas bibliotecas usando los siguientes comandos: “pip install pyserial” y “pip install pandas”, de esta forma, se descargarán las bibliotecas en Python y el código podrá correr.

1. Descargue en Arduino todas las bibliotecas necesarias para correr el código llamado MAIN de la carpeta “repositories” en GitHub, específicamente la carpeta del proyecto HEMS.
  - 1.1 Bibliotecas necesarias:
    - Wire: Esta biblioteca se incluye de forma predeterminada en el IDE de Arduino, por lo que no es necesario descargarla por separado.
    - Adafruit\_Sensor: Esta biblioteca proporciona una interfaz estándar para los sensores de Adafruit. Se puede encontrar y descargarla desde el Gestor de Bibliotecas del IDE de Arduino.
    - Adafruit\_BME280: Esta biblioteca es específica para el sensor BME280 de Adafruit. Se puede instalar desde el Gestor de Bibliotecas del IDE de Arduino.
    - ESP32Time: Esta biblioteca proporciona funcionalidad de tiempo para el ESP32. Se puede encontrar en el Gestor de Bibliotecas del IDE de Arduino.
    - WiFi: La biblioteca WiFi es específica para placas basadas en ESP32 y se incluye con el soporte para ESP32 en el IDE de Arduino. No es necesario descargarla por separado si ya tiene instalado el soporte para ESP32.
  - 1.2 Para instalar estas bibliotecas desde el IDE de Arduino, sigue estos pasos:
    - 1.2.1 Abra el IDE de Arduino.
    - 1.2.2 Vaya a Sketch -> Include Library -> Manage Libraries....
    - 1.2.3 Busque el nombre de la biblioteca en el campo de búsqueda.
    - 1.2.4 Haga clic en Install para cada biblioteca que necesita.
    - 1.2.5 Asegúrese de tener instalado el soporte para ESP32 en tu IDE de Arduino, ya que esto incluye la biblioteca WiFi y proporciona el soporte necesario para la placa ESP32. Puede instalar el soporte para ESP32 a través del Gestor de Placas del IDE de Arduino si aún no lo ha hecho.
2. Se conecta el equipo HEMS a un puerto USB de la computadora.
3. En ARDUINO se configura el puerto serial: “XIAO ESP32C3”.
  - 3.1 Asegúrese de que su placa esté conectada a la computadora.
  - 3.2 En Arduino vaya a Herramientas > Puerto y seleccione el puerto COM o el puerto serial correspondiente al XIAO ESP32-C3.
4. Verifique el puerto COM que está utilizando en Arduino.
  - 4.1 Para verificar el puerto COM en Windows, vaya al "Administrador de dispositivos" y buscar en la sección "Puertos (COM y LPT)".
5. En el IDE de Arduino, debe seleccionar el puerto COM correcto desde el menú.
  - 5.1 Para seleccionar el puerto COM vaya a "Herramientas" > "Puerto" para asegurarse de que el software puede comunicarse con la placa Arduino (en este caso con el ESP).
6. Modifique en la línea 9 del código “Definición de la red wifi” Escribiendo el nombre de la red Wifi y la contraseña.

7. Una vez que el código corra sin problema en Arduino, se dirige al código llamado “logger” de la carpeta “repositories” en GitHub, específicamente la carpeta del proyecto HEMS.

7.1 Se recomienda el uso de la aplicación Visual Studio Code.

8. Para ejecutar el código “logger” proporcionado en Visual Studio Code (VS Code), necesita instalar Python en su computadora. **IMPORTANTE:** Asegúrate de marcar la opción "Add Python to PATH" en la primera pantalla del instalador. Esto agrega Python al PATH del sistema, facilitando su uso desde la línea de comandos.

8.1 Agregar Python al Path del sistema permite utilizar Python en Visual Studio Code (VS Code).

8.2 En caso de que al momento de instalar Python no haya añadido al Path, lo puede hacer manualmente.

8.3 Configurar el PATH Manualmente (si es necesario)

Si no marcó la opción "Add Python to PATH" durante la instalación, o si necesita configurar el PATH manualmente, siga estos pasos:

**Para Windows:**

1. Abrir Configuración del Sistema:

- Haga clic con el botón derecho en "Este PC" o "Mi PC" en el escritorio o en el explorador de archivos, y seleccione "Propiedades".
- Vaya a "Configuración avanzada del sistema".
- En la pestaña "Opciones avanzadas", haga clic en "Variables de entorno".

2. Modificar la Variable PATH:

- En la sección "Variables del sistema", busque la variable llamada Path, selecciónela y haga clic en "Editar".
- En la ventana de edición, haga clic en "Nuevo" e ingrese la ruta a la carpeta donde está instalado Python. Esta ruta generalmente es algo como `C:\Python39\` o `C:\Users\\AppData\Local\Programs\Python\Python39\` (reemplaza "Python39" con la versión específica que instalaste).
- También agregue la ruta a la carpeta de scripts, que debería ser algo como `C:\Users\\AppData\Local\Programs\Python\Python39\Scripts\`.
- Haga clic en "Aceptar" en todas las ventanas para aplicar los cambios.

3. Verificar la Configuración:

Abra una nueva ventana de terminal o símbolo del sistema y escriba:

```
Python -- version
```

Deberá ver la versión de Python, indicando que el PATH está configurado correctamente.

9. Abra la aplicación de Visual Studio Code en la computadora.

Guía para realizar pruebas con prototipo diseñado: Sistema de sensores de temperatura, humedad, presión y globo

Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Electromecánica – Laboratorio Delta

Objetivo: Evaluar el comportamiento del sistema de sensores y su funcionalidad.

Versión 1

Para ejecutar el código proporcionado en Visual Studio Code (VS Code), necesita instalar varias bibliotecas de Python. Aquí están las bibliotecas necesarias y cómo instalarlas:

a. Pyserial

Propósito: Permite la comunicación a través del puerto serial (COM).

Instalación: `pip install pyserial`

b. Matplotlib

Propósito: Es una biblioteca para crear gráficos y visualizaciones.

Instalación: `pip install matplotlib`

c. Drawnow

Propósito: Permite la actualización en tiempo real de gráficos.

Instalación: `pip install drawnow`

d. datetime (ya está incluido en la biblioteca estándar de Python)

Propósito: Proporciona clases para manipular fechas y horas

e. csv (también está incluido en la biblioteca estándar de Python)

Propósito: Permite leer y escribir archivos CSV.

### 9.1 Pasos para instalar las bibliotecas en VS Code:

Abrir la terminal: En VS Code, abra la terminal presionando `Ctrl+`` (la tecla grave), o navega a Terminal > New Terminal en el menú superior.

Instalar las bibliotecas: Escriba los siguientes comandos en la terminal y presiona Enter después de cada uno:

```
pip install pyseria
```

```
pip install matplotlib
```

```
pip install drawnow
```

Esto descargará e instalará las bibliotecas necesarias en tu entorno Python.

Verificar la instalación: Puede verificar que las bibliotecas se han instalado correctamente intentando importar las bibliotecas en un script de prueba o directamente en la terminal de Python:

```
import serial
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from drawnow import drawnow
```

### 9.2 Si no recibes errores al intentar importar las bibliotecas, significa que se han instalado correctamente.

Guía para realizar pruebas con prototipo diseñado: Sistema de sensores de temperatura, humedad, presión y globo

Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Electromecánica – Laboratorio Delta

Objetivo: Evaluar el comportamiento del sistema de sensores y su funcionalidad.

Versión 1

Configurar el entorno (opcional): Asegúrese de que VS Code esté utilizando el intérprete de Python correcto. Puede seleccionar el intérprete de Python en VS Code desde View > Command Palette (o presionando Ctrl+Shift+P), luego escribe y selecciona Python: Select Interpreter. Escoge el entorno en el que ha instalado las bibliotecas.

10. Antes de correr el código “logger” en Visual Code, debe cerrar la aplicación de Arduino.
11. Corra el código “logger”, el cual se encargará de extrae los datos, obtenidos por ambos sensores, en un csv.
12. Guarde en una carpeta los documentos .csv obtenidos de las pruebas.

## Apéndice B

### Bitácoras de pruebas del prototipo diseñado en horno de vacío

## Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 1.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en negro, con cubrimiento mate de 38mm de diámetro.

### Sección 1. Condiciones del experimento

Temperatura (°C)	Ubicación	Fecha	Hora de inicio
21	Cartago, Cartago Oriental	1 de octubre del 2024	6:20pm

### Sección 2. Equipo utilizado

Nombre del equipo	Control de Activos TEC
QUESTemp° 44	78904
Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A	78768
Bomba de vacío	79014
Prototipo	N/A
Computadoras portátiles	N/A



Imagen 1. Prototipo con esfera de 38mm de diámetro.

### Sección 3. Descripción del procedimiento de medición

Paso 1. Se inician los programas necesarios en las computadoras.

Paso2. Conexión a la corriente, inicialización y configuración del sensor QUESTemp 44.

Paso3. Conexión a la computadora del prototipo.

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 1.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en negro, con cubrimiento mate de 38mm de diámetro.

Paso 4. Colocar los sensores dentro del horno de vacío, en una superficie estable y uno al lado del otro.

Paso 5. Dejar los equipos calibrar por 10 minutos.

Paso 6. Comenzar la recolección de datos en ambos sensores de manera sincronizada.

Paso 7. Monitoreo de las mediciones durante dos horas.

Paso 8. Extraer los datos de ambos equipos en archivos csv.

Paso 9. Verificar los archivos obtenidos.

Sección 4. Notas

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 2.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en negro, con cubrimiento mate de 38mm de diámetro y cubrimiento interno de aluminio.

### Sección 1. Condiciones del experimento

Temperatura (°C)	Ubicación	Fecha	Hora de inicio
23	Cartago, Cartago Oriental	2 de octubre del 2024	11:10am

### Sección 2. Equipo utilizado

Nombre del equipo	Control de Activos TEC
QUESTemp° 44	78904
Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A	78768
Bomba de vacío	79014
Prototipo	N/A
Computadoras portátiles	N/A



Imagen 1. Prototipo con esfera de 38mm de diámetro.

### Sección 3. Descripción del procedimiento de medición

Paso 1. Se inician los programas necesarios en las computadoras.

Paso 2. Conexión a la corriente, inicialización y configuración del sensor QUESTemp 44.

Paso 3. Conexión a la computadora del prototipo.

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 2.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en negro, con cubrimiento mate de 38mm de diámetro y cubrimiento interno de aluminio.

Paso 4. Colocar los sensores dentro del horno de vacío, en una superficie estable y uno al lado del otro.

Paso 5. Dejar los equipos calibrar por 10 minutos.

Paso 6. Comenzar la recolección de datos en ambos sensores de manera sincronizada.

Paso 7. Monitoreo de las mediciones durante dos horas.

Paso 8. Extraer los datos de ambos equipos en archivos csv.

Paso 9. Verificar los archivos obtenidos.

Sección 4. Notas

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 3.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento negro mate de 38mm de diámetro.

### Sección 1. Condiciones del experimento

Temperatura (°C)	Ubicación	Fecha	Hora de inicio
22	Cartago, Cartago Oriental	2 de octubre del 2024	3:10pm

### Sección 2. Equipo utilizado

Nombre del equipo	Control de Activos TEC
QUESTemp° 44	78904
Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A	78768
Bomba de vacío	79014
Prototipo	N/A
Computadoras portátiles	N/A



Imagen 1. Prototipo con esfera de 38mm de diámetro.

### Sección 3. Descripción del procedimiento de medición

Paso 1. Se inician los programas necesarios en las computadoras.

Paso2. Conexión a la corriente, inicialización y configuración del sensor QUESTemp 44.

Paso3. Conexión a la computadora del prototipo.

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 3.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento negro mate de 38mm de diámetro.

Paso 4. Colocar los sensores dentro del horno de vacío, en una superficie estable y uno al lado del otro.

Paso 5. Dejar los equipos calibrar por 10 minutos.

Paso 6. Comenzar la recolección de datos en ambos sensores de manera sincronizada.

Paso 7. Monitoreo de las mediciones durante dos horas.

Paso 8. Extraer los datos de ambos equipos en archivos csv.

Paso 9. Verificar los archivos obtenidos.

Sección 4. Notas

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 4.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento negro mate de 50mm de diámetro.

### Sección 1. Condiciones del experimento

Temperatura (°C)	Ubicación	Fecha	Hora de inicio
22	Cartago, Cartago Oriental	4 de octubre del 2024	10:40am

### Sección 2. Equipo utilizado

Nombre del equipo	Control de Activos TEC
QUESTemp° 44	78904
Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A	78768
Bomba de vacío	79014
Prototipo	N/A
Computadoras portátiles	N/A



Imagen 1. Prototipo con esfera de 50mm de diámetro.

### Sección 3. Descripción del procedimiento de medición

Paso 1. Se inician los programas necesarios en las computadoras.

Paso2. Conexión a la corriente, inicialización y configuración del sensor QUESTemp 44.

Paso3. Conexión a la computadora del prototipo.

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 4.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento negro mate de 50mm de diámetro.

Paso 4. Colocar los sensores dentro del horno de vacío, en una superficie estable y uno al lado del otro.

Paso 5. Dejar los equipos calibrar por 10 minutos.

Paso 6. Comenzar la recolección de datos en ambos sensores de manera sincronizada.

Paso 7. Monitoreo de las mediciones durante dos horas.

Paso 8. Extraer los datos de ambos equipos en archivos csv.

Paso 9. Verificar los archivos obtenidos.

Sección 4. Notas

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 5.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento mate negro de 38mm de diámetro.

### Sección 1. Condiciones del experimento

Temperatura (°C)	Ubicación	Fecha	Hora de inicio
23	Cartago, Cartago Oriental	4 de octubre del 2024	1:50pm

### Sección 2. Equipo utilizado

Nombre del equipo	Control de Activos TEC
QUESTemp° 44	78904
Horno de vacío Fisherbrand modelo 281A	78768
Bomba de vacío	79014
Prototipo	N/A
Computadoras portátiles	N/A



Imagen 1. Prototipo con esfera de 38mm de diámetro.

### Sección 3. Descripción del procedimiento de medición

Paso 1. Se inician los programas necesarios en las computadoras.

Paso2. Conexión a la corriente, inicialización y configuración del sensor QUESTemp 44.

Paso3. Conexión a la computadora del prototipo.

Bitácora de Experimento en horno de vacío

Tecnológico de Costa Rica

Laboratorio Delta – Escuela de Electromecánica

Prueba 5.0: Utilizando para medición de radiación una carcasa esférica impresa en blanco, con cubrimiento mate negro de 38mm de diámetro.

Paso 4. Colocar los sensores dentro del horno de vacío, en una superficie estable y uno al lado del otro.

Paso 5. Dejar los equipos calibrar por 10 minutos.

Paso 6. Comenzar la recolección de datos en ambos sensores de manera sincronizada.

Paso 7. Monitoreo de las mediciones durante dos horas.

Paso 8. Extraer los datos de ambos equipos en archivos csv.

Paso 9. Verificar los archivos obtenidos.

Sección 4. Notas

## Apéndice C

# Códigos de programación utilizados

### C.1. Código main

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_BME280.h>
3 #include <ESP32Time.h> //Libreria para usar el timer
4 #include <WiFi.h>
5 #include <HardwareSerial.h>
6 #define DEBUG false
7
8 // Definicion de la red WiFi
9 const char* ssid = "LaboratorioDelta"; // Tu red WiFi SSID
10 const char* password = "labdelta21!"; // Tu contraseña WiFi
11
12 // NTP server
13 const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
14 const long gmtOffset_sec = 0; // GMT -6
15 const int daylightOffset_sec = 0;
16
17 ESP32Time rtc(-21600);
18
19 hw_timer_t *timer = NULL;
20
21 #define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
22
23 Adafruit_BME280 bme1; // I2C
24 Adafruit_BME280 bme2; // I2C
25
26 bool timer_flag = true;
27
28 HardwareSerial MySerial(0);
29
30 void ARDUINO_ISR_ATTR onTimer() {
31     timer_flag = true;
32 }
33
34 void setup() {
35     Serial.begin(9600);
36     MySerial.begin(9600, SERIAL_8N1, -1, -1);
```

```

37 // Inicializar sensores
38 if ( bme1.begin(0x76) & bme2.begin(0x77)) {
39     if (DEBUG) Serial.println("BME280_sensors_in_address_0x76_and_0x77_connected"
40 );
41 }
42 else{
43     Serial.println("Could_not_find_a_valid_BME280_sensor,_check_wiring!");
44     while (1);
45 }
46 // Conectar a la red WiFi
47 WiFi.begin(ssid, password);
48 while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
49     delay(500);
50     if (DEBUG) Serial.print(".");
51 }
52 if (DEBUG) Serial.println("Connected_to_WiFi");
53 // Sincronizar tiempo
54 syncTime(DEBUG);
55 // Set timer frequency to 1Mhz
56 timer = timerBegin(1000000);
57 // Attach onTimer function to our timer.
58 timerAttachInterrupt(timer, &onTimer);
59 // Set alarm to call onTimer function every second (value in microseconds).
60 // Repeat the alarm (third parameter) with unlimited count = 0 (fourth
61 parameter).
62 timerAlarm(timer, 1000000, true, 0);
63 }
64
65 void loop() {
66     // Ejecuta la funcion de impresion si la bandera esta activa
67     if (timer_flag) {
68         printValues(&Serial);
69         printValues(&MySerial);
70         timer_flag = false; // Resetea la bandera
71     }
72 }
73
74 void printValues(Print* elserial) {
75     // Imprime los datos del Sensor 1
76     String now = rtc.getTime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S,");
77     elserial->print(now);
78     elserial->print("1,"); // Identificador del sensor
79     elserial->print(bme1.readTemperature()); // Temperatura
80     elserial->print(",");
81     elserial->print(bme1.readPressure() / 100.0F); // Presion en hPa
82     elserial->print(",");
83     elserial->print(bme1.readHumidity()); // Humedad
84     elserial->println(); // Finaliza la linea
85     // Imprime los datos del Sensor 2
86     elserial->print(now);
87     elserial->print("2,"); // Identificador del sensor
88     elserial->print(bme2.readTemperature()); // Temperatura
89     elserial->print(",");
90     elserial->print(bme2.readPressure() / 100.0F); // Presion en hPa
91     elserial->print(",");
92     elserial->print(bme2.readHumidity()); // Humedad

```

```

91     elserial->println(); // Finaliza la linea
92 }
93
94 void syncTime(bool debug) {
95     configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
96     if (debug) Serial.println("Waiting_for_NTP_time_sync");
97     unsigned long startMillis = millis();
98     while (millis() - startMillis < 10000) { // Espera hasta 10 segundos para
99         sincronizar
100         if (time(nullptr) > 0) { // Verifica si se ha sincronizado el tiempo
101             rtc.setTime(time(nullptr)); // Ajusta la hora actual
102             if(debug) Serial.println("Time_synced!");
103             return;
104         }
105         delay(500);
106         if (debug) Serial.print(".");
107     }
108     if (debug) Serial.println("Failed_to_sync_time.");
109 }

```

## C.2. Código Logger

```

1  import serial
2  import datetime
3  import csv
4  from matplotlib import pyplot as plt
5  from drawnow import drawnow
6
7
8  today = datetime.date.today().strftime('%Y-%m-%d')
9
10 # Create the filename using the date
11 filename = f"hems_{today}.csv"
12
13 def csv_write(filename):
14     global lista
15     with open(filename, "w+", newline="") as file:
16         write = csv.writer(file)
17         write.writerows(lista)
18 # Inicializa el serial
19 hems = serial.Serial('COM6',
20                     baudrate=$9600,
21                     bytesize=8,
22                     parity='N',
23                     stopbits=1,
24                     timeout=1.5
25                     )
26
27 hems.close()
28 hems.open()
29 hems.flush()
30
31 time1 = []
32 time2 = []

```

```

33 temp1 = []
34 temp2 = []
35 pres1 = []
36 pres2 = []
37 humi1 = []
38 humi2 = []
39 lista = []
40
41 # plt.ion()      # tell matplotlib you want interactive mode to plot data
42 # fig = plt.figure()
43
44 def in_figure() -> None:
45
46     plt.subplot(3,1,1)
47     plt.plot(time1[-100:], temp1[-100:],label='globo')
48     plt.plot(time2[-100:], temp2[-100:],label='bulbo')
49     plt.legend()
50     plt.title("SALES")
51     plt.subplot(3,1,2)
52     plt.plot(time1[-100:], humi1[-100:])
53     plt.plot(time2[-100:], humi2[-100:])
54     plt.subplot(3,1,3)
55     plt.plot(time1[-100:], pres1[-100:])
56     plt.plot(time2[-100:], pres2[-100:])
57
58
59
60 while True:
61     line = hems.readline()
62
63     if (line[:4].decode("utf-8") == str(datetime.date.today().year)):
64         lista.append(line[:-2].decode("utf-8").split(sep=", "))
65         csv_write(filename)
66
67         #print(line[:-2].decode("utf-8"))
68         if lista[-1][1] == '1':
69             time1.append(datetime.datetime.strptime(lista[-1][0], '%Y-%m-%d_%H:%
70                 M:%S'))
71             temp1.append(float(lista[-1][2]))
72             pres1.append(float(lista[-1][3]))
73             humi1.append(float(lista[-1][4]))
74
75         if lista[-1][1] == '2':
76             time2.append(datetime.datetime.strptime(lista[-1][0], '%Y-%m-%d_%H:%
77                 M:%S'))
78             temp2.append(float(lista[-1][2]))
79             pres2.append(float(lista[-1][3]))
80             humi2.append(float(lista[-1][4]))
81
82         # print(line[:-2].decode("utf-8"))
83         # lista.append([times.text, t1.text, t2.text, t3.text, t4.text, tavg.
84             text, tref.text, draw_volt, draw_curr, capmeas, state])
85
86 drawnow(in_figure)

```

### C.3. Código questemp reader

```

1  import serial
2  import pandas as pd
3  import time
4  from datetime import datetime
5  from matplotlib import pyplot as plt
6
7  today = datetime.today().strftime('%Y-%m-%d-%H-%M')
8
9  in_filename = 'text_file.txt'
10
11 out_filename = f"quest_{today}.csv"
12
13 source = input("(a)rchivo (s)erial?")
14
15 if (source == "a"):
16     questTemp = open(in_filename, 'r')
17     end_of_line = -1
18 elif (source == 's'):
19     questTemp = serial.Serial(port='COM4', baudrate=9600, bytesize=8,
20                               parity='N', stopbits=1, timeout=1)
21     end_of_line = -2
22
23 if (source == 's'):
24     questTemp.close()
25     questTemp.open()
26     questTemp.flush()
27     while(questTemp.in_waiting == 0):
28         print('Waiting for serial...')
29         time.sleep(1)
30
31 counter = 0
32 data_list = []
33 line = ''
34 EOFf = False
35
36 while(EOFf == False):
37     if (source == 's'):
38         line = questTemp.readline().decode('ascii')
39     elif (source == 'a'):
40         line = questTemp.readline()
41
42     if counter > 0:
43         counter -= 1
44
45     if line[:end_of_line].endswith('Pagina 1'):
46         counter = 32
47
48     if line.endswith('\x1a'):
49         EOFf = True
50
51     if line.startswith('\x0cSesion:') == True:
52         sesion = int(line[10])
53         counter = 7
54

```

```

55     if counter == 0:
56         if (not line[:end_of_line].endswith('\x0c')):
57             print(line[:-2])
58             values = line[:-2].split(" ")
59             date_value = pd.to_datetime(values[0]) # Convert the first value to
60                 a date
61             int_values = [float(value) for value in values[1:]] # Convert the
62                 rest to integers
63             values = [date_value] + int_values
64             values.insert(0, sesion)
65             data_list.append(values)
66
67 data = pd.DataFrame(data_list, columns=['session', 'timestamp', 'tgbhi', 'tgbhe',
68     'bh', 'bs', 'globo', 'hr', 'hdx'])
69
70 data.to_csv(out_filename,
71     index=None)
72
73 print(data.head(50))
74
75 data = data[data['session'] == 1]
76
77 plt.figure()
78 plt.plot(data.timestamp, data.hr)
79 plt.show()

```

## C.4. Código analysis

```

1  import pandas as pd
2  from matplotlib import pyplot as plt
3  import numpy as np
4  from sklearn.metrics import mean_squared_error
5
6  hems = pd.read_csv('tests/hems_5.0.csv', names=['timestamp', 'sens', 'temp', 'pres',
7      'humi'], parse_dates=['timestamp'], infer_datetime_format=True)
8  quest = pd.read_csv('tests/quest_5.0.csv', parse_dates=['timestamp'],
9      infer_datetime_format=True)
10
11 print(hems.head())
12
13 hems1 = hems[hems['timestamp'].isin(quest['timestamp'])]\
14     [hems['sens']==1]\
15     .reset_index(drop=True).drop('sens', axis=1)
16
17 hems2 = hems[hems['timestamp'].isin(quest['timestamp'])]\
18     [hems['sens']==2]\
19     .reset_index(drop=True).drop('sens', axis=1)
20
21 quest = quest[quest['timestamp'].isin(hems1['timestamp'])]\
22     .reset_index(drop=True)
23
24 print(hems1.columns)
25 print(hems2.columns)

```

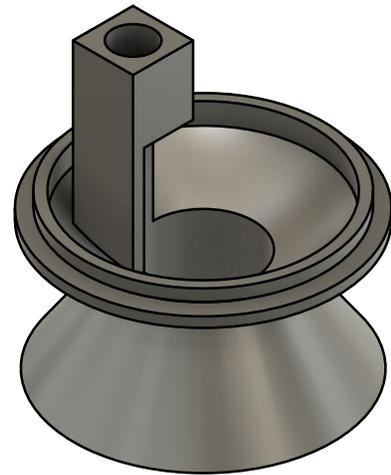
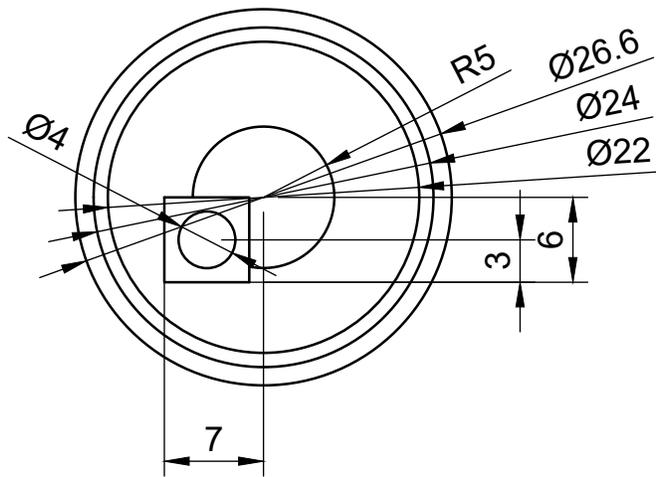
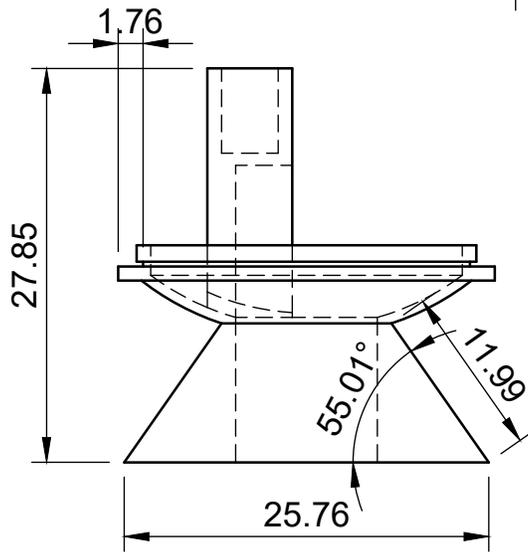
```

24 print(quest.columns)
25 def calculate_rmse(actual, predicted):
26     return np.sqrt(mean_squared_error(actual, predicted))
27
28 # Calcular el RMSE como porcentaje
29 def calculate_rmse_percentage(actual, predicted):
30     rmse = calculate_rmse(actual, predicted)
31     return (rmse / np.mean(actual)) * 100 # RMSE en porcentaje
32
33 columns_mapping = {
34     'temp': 'globo',
35     'humi': 'hr'
36 }
37 rmse_results = {}
38 for hems_column, quest_column in columns_mapping.items():
39     real_values = quest[quest_column]
40     predicted_values = hems1[hems_column]
41     rmse_percentage = calculate_rmse_percentage(real_values, predicted_values)
42     rmse_results[f'hems1_vs_quest_{hems_column}'] = rmse_percentage
43
44 for hems_column, quest_column in columns_mapping.items():
45     real_values = quest[quest_column]
46     predicted_values = hems2[hems_column]
47     rmse_percentage = calculate_rmse_percentage(real_values, predicted_values)
48     rmse_results[f'hems2_vs_quest_{hems_column}'] = rmse_percentage
49
50 # Mostrar los resultados en porcentaje
51 for comparison, rmse_percentage in rmse_results.items():
52     print(f'RMSE_Percentage_for_{comparison}:_{rmse_percentage:.2f}%')
53
54 plt.figure()
55 hems1['temp'] = 1.04*hems1['temp'] - 1
56 plt.plot(hems1.timestamp, hems1.temp, label='hems/globo')
57 #plt.plot(hems2.timestamp, hems2.temp, label='hems/bulbo')
58 plt.xticks(rotation=45)
59 plt.plot(quest.timestamp, quest.globo, label='questglobo')
60 plt.title('Prueba_al_vacio:_Prototipo_vs_Questtemp')
61 plt.xlabel('Tiempo')
62 plt.ylabel('Temperatura_de_globo(C)')
63 plt.legend()
64 plt.show()
65
66 plt.figure()
67 #plt.plot(hems1.timestamp, hems1.humi, label='hems/globo')
68 plt.plot(hems2.timestamp, hems2.humi, label='hems/bulbo')
69 plt.xticks(rotation=45)
70 plt.plot(quest.timestamp, quest.hr, label='quest')
71 plt.title('Comparacion_de_temperatura_de_bulbo')
72 plt.xlabel('Tiempo')
73 plt.ylabel('Humedad_relativa(%)')
74 plt.legend()
75 plt.show()

```

## Apéndice D

# Planos de diseño para carcasas de los sensores



**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

DIBUJA  
**H.MURILLO**

VERIFICA  
**J.ROJAS**



MATERIAL  
**PLA**

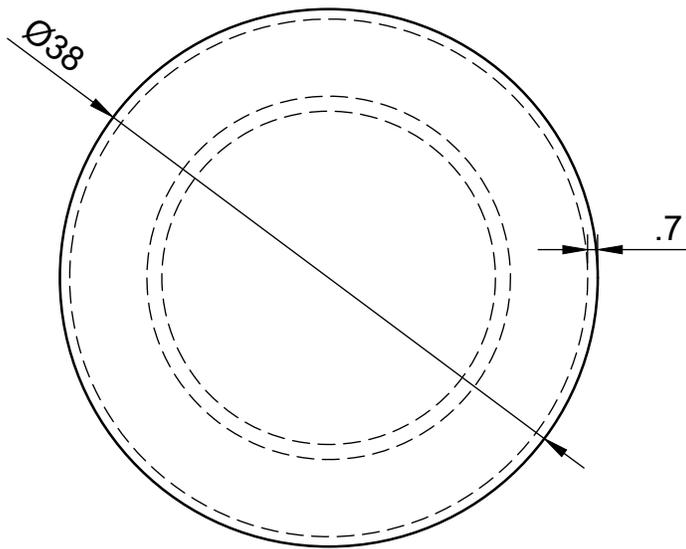
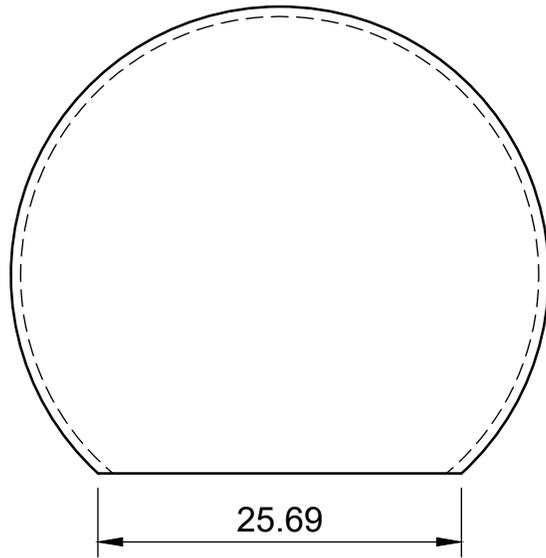
FECHA  
**17/09/2024**

PARTE  
**Base de carcasa para  
temperatura de globo**

ESCALA  
**2:1**

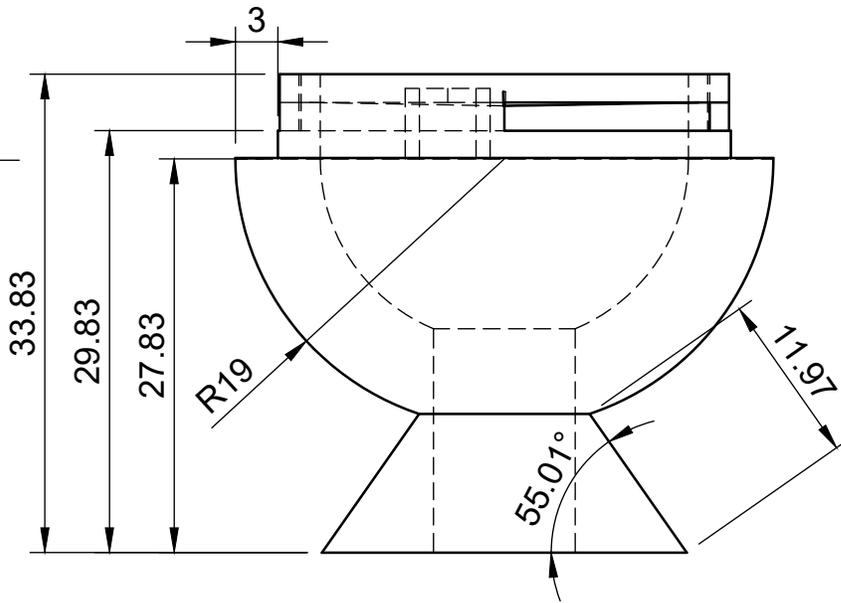
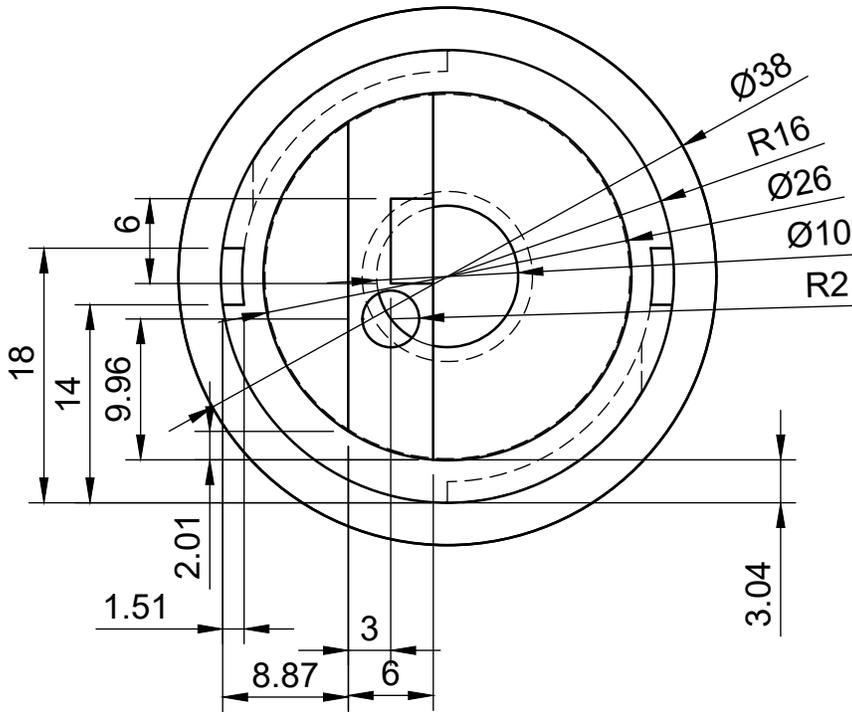
Rev.  
**A** UNIDADES  
**MM**

HOJA  
**1/4**



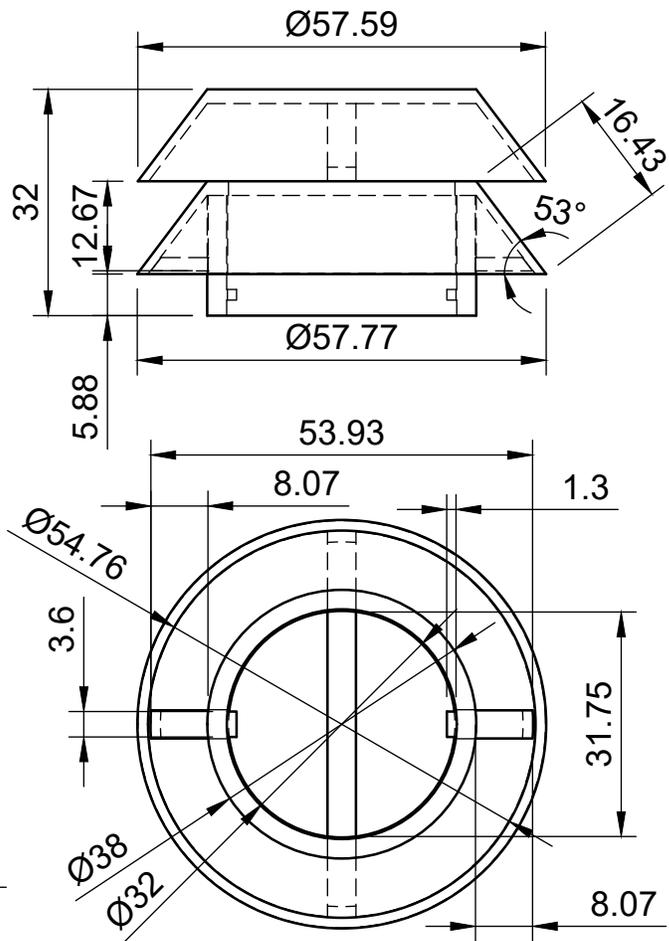
1:1

	DIBUJA <b>H.MURILLO</b>	VERIFICA <b>J.ROJAS</b>	
	MATERIAL <b>PLA</b>	FECHA <b>17/09/2024</b>	
	PARTE <b>Carcasa para temperatura de globo</b>	ESCALA <b>2:1</b>	
	Rev. <b>A</b>	UNIDADES <b>MM</b>	HOJA <b>2/4</b>



1:1

	DIBUJA <b>H.MURILLO</b>	VERIFICA <b>J.ROJAS</b>	
	MATERIAL <b>PLA</b>	FECHA <b>17/09/2024</b>	
	PARTE <b>Base de carcasa para temperatura de bulbo</b>	ESCALA <b>2:1</b>	
	Rev. <b>A</b>	UNIDADES <b>MM</b>	HOJA <b>3/4</b>



1.5:1

	<b>DIBUJA</b> <b>H.MURILLO</b>	<b>VERIFICA</b> <b>J.ROJAS</b>	
	<b>MATERIAL</b> <b>PLA</b>	<b>FECHA</b> <b>17/09/2024</b>	
	<b>PARTE</b>  <b>Carcasa para temperatura de bulbo</b>	<b>ESCALA</b>  <b>1:1</b>	
		<b>Rev.</b> <b>A</b>	<b>UNIDADES</b> <b>MM</b>

# Bibliografía

- [1] P. L. Mendaza, “Ntp 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice wbgt,” *España: Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*, vol. 1, pp. 1–6, 1993.
- [2] B. S. GmbH, mayo 2015. [Online]. Available: [https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/4/1/9/BST-BME280\\_DS001-10.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/4/1/9/BST-BME280_DS001-10.pdf)
- [3] B. Germany, “Boeco vacuum pump r-300.” [Online]. Available: <https://www.boeco.com/vacuum-pumps/boeco-vacuum-pump-r-300%26sk%3D90>
- [4] O. de desarrollo sostenible, “Desarrollo sostenible,” enero 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [5] N. P. Sande, J. M. Melgar, E. A. Pardavila, and J. R. García, “Golpe de calor,” *emergencias*, vol. 16, pp. 116–125, 2004.
- [6] seeed studio, “Getting started with seeed studio xiao esp32c3.” [Online]. Available: [https://wiki.seeedstudio.com/XIAO\\_ESP32C3\\_Getting\\_Started/](https://wiki.seeedstudio.com/XIAO_ESP32C3_Getting_Started/)
- [7] amazon. [Online]. Available: <https://www.amazon.es/AZDelivery-GY-BME280-Sensor-Parent/dp/B07D8T4HP6?th=1>
- [8] circuit python, “Seeed studio xiao esp32c3 by seeed studio.” [Online]. Available: [https://circuitpython.org/board/seeed\\_xiao\\_esp32c3/](https://circuitpython.org/board/seeed_xiao_esp32c3/)
- [9] Electrónica.cr, “Módulo bluetooth hc-05 – maestro / esclavo.” [Online]. Available: <https://electronica.cr/producto/modulo-bluetooth-hc-05/>
- [10] M. C. Parra, “Proyecto de ley 23.583:trabajar bajo el sol causa un tercio de muertes por cáncer de piel no melanoma, mientras empresarios.” in *Semanario Universidad*, marzo 2024. [Online]. Available: <https://semanariouniversidad.com/pais/trabajar-bajo-el-sol-causa-un-tercio-de-muertes-por-cancer-de-piel-no-melanoma-mientras-empresarios-rechazan-dar-bloqueado>
- [11] A. Hurtado, L. Anyelo, Y. Machaca, and R. Franco, “Análisis de los factores de riesgo a estrés térmico por calor en trabajadores que realizan la actividad de carguío de concentrado de cobre para la implementación de controles en una empresa minera,” Master’s thesis, Universidad Tecnológica del Perú, 2023.
- [12] J. R. D. Gabriel, “Enfermedades por el sol y las radiaciones solares,” in *Blog Salud MAPFRE*, 2022.
- [13] V. de América, “Trabajadores expuestos a la luz solar corren un alto riesgo de sufrir cáncer mortal de piel.” noviembre 2023. [Online]. Available: <https://www.vozdeamerica.com/a/trabajadores-expuestos--luz-solar--alto-riesgo-sufrir-cancer-piel-mortal/7347355.html>
- [14] E. S.A.C, “Medidor de estres termico 3m questemp° 44/46.” [Online]. Available: <https://www.equinlabsac.com/content/medidor-de-estres-termico-3m-questemp%C2%B0-4446>

- [15] M. Bermúdez, “Millones de trabajadores en todo el mundo exponen su vida con el aumento de temperaturas,” in *Semanario Universidad*, 2023.
- [16] A. de Lorenzo and F. Liaño, “Altas temperaturas y nefrología: a propósito del cambio climático,” *Nefrología*, vol. 37, no. 5, pp. 492–500, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0211699517300425>
- [17] R. E. Gutiérrez, K. B. Guerra, and M. D. Gutiérrez, “Evaluación de riesgo por estrés térmico en trabajadores de los procesos de incineración y secado de una empresa de tableros contrachapados,” *Información tecnológica*, vol. 29, no. 3, pp. 133–144, 2018.
- [18] C. Molina and L. Veas, “Evaluación del confort en recintos de 10 edificios de Chile en invierno,” *Revista de la construcción*, vol. 11, pp. 27 – 38, 08 2012. [Online]. Available: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2012000200004&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2012000200004&nrm=iso)
- [19] C. K. Uejio, L. H. Morano, J. Jung, K. Kintziger, M. Jagger, J. Chalmers, and T. Holmes, “Occupational heat exposure among municipal workers,” *International archives of occupational and environmental health*, vol. 91, pp. 705–715, 2018.
- [20] H. Heidari, F. Golbabaei, A. Shamsipour, A. Rahimi Forushani, and A. Gaeini, “Outdoor occupational environments and heat stress in Iran,” *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 13, pp. 1–8, 2015.
- [21] G. Rodríguez-Roldán and E. Suaste-Gómez, “Sistema de monitoreo continuo de temperatura corporal basado en una pulsera polimérica flexible, conductora y biocompatible,” in *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, vol. 3, no. 1, 2016, pp. 108–111.
- [22] C. Madrid, D. Ugarte, and S. de Pediatría, “Hipotermia y termorregulación en el niño,” *Hipotermia y Termorregulación en el niño*, 2018.
- [23] M. S. Álvarez, E. A. F. de Casa Juana, and M. De la Flor Robledo, “Termorregulación y manejo perioperatorio,” *Cirugía Mayor Ambulatoria*, vol. 16, pp. 173–190, 2011.
- [24] R. S. Cabrera, R. B. Merino, and R. S. Batista, “Evaluación del estrés térmico en una empresa de producción textil,” *Revista Cubana de Salud y Trabajo*, vol. 6, no. 1, pp. 20–25, 2024.
- [25] N. MECHATRONICS, “Sensor bme280 presión, temperatura y humedad.” [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/357-sensor-bme280-presion-temperatura-y-humedad.html>
- [26] —, “Módulo bluetooth hc05.” [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html>
- [27] I. S. ISO7243, “Ergonomics of the thermal environment — assessment of heat stress using the wbgt (wet bulb globe temperature) index.”
- [28] O. G. G. Maria Mira Sarrió, Javier Gordillo and X. Pons, “Análisis comparativo de métodos para la estimación de la emisividad en la banda térmica del sensor tm de landsat-5,” *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, no. 19, pp. 55–80, 2017.
- [29] M. Carnesoltas-Calvo, “Fórmula lineal para determinar la temperatura del bulbo húmedo,” *Revista cubana de meteorología*, vol. 23, no. 1, pp. 141–145, 2017.
- [30] F. U. P. D. CATALUNYA, “Valoración del ambiente térmico: métodos para situaciones de calor y frío.”
- [31] T. I. QUEST, *QUESTemp Heat Stress Monitors Models 44 and 46 User manual*.

- [32] S. Medrano, "Medición de humedad relativa con psicrómetro," *Boletín periódico del laboratorio de metrología. México*, 2003.
- [33] E. J. A. Rodríguez, J. W. M. Ocampo, and C. A. S. Ortega, "Medición de temperatura: sensores termoeléctricos," *Scientia et technica*, vol. 1, no. 34, 2007.
- [34] T. Connectivity, "Sensores digitales de temperatura." [Online]. Available: <https://www.te.com/es/products/sensors/temperature-sensors/digital-temperature-sensors.html?tab=pgp-story>
- [35] J. Glaría and S. Kouro, "Sensores de humedad," *Universidad técnica Federico Santa María*, 2001.
- [36] S. Medrano, V. Aranda, and N. Velasco, "Calibración de higrometros para madera, metodos y trazabilidad," *MetAs & Metrólogos Asociados*, pp. 1–9, 2004.
- [37] J. R. Beltrán, D. H. Prieto, and E. C. Rodríguez, "Compensación térmica de la sensibilidad en sensores de presión piezorresistivos," *TCS*, vol. 44, p. 44, 2002.
- [38] L. Martínez Díaz, "Sensor de presión capacitivo en silicio micromaquinado," *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, 2015.
- [39] P. Lucerna, "Transductores de presión y de flujo," *XIII Seminario de Ingeniería Biomédica*, vol. 16, 2004.
- [40] S. D. E. Karl T. Ulrich, "Diseño y desarrollo de productos," 2013.
- [41] L. Serna and F. Albán, "Ácido poliláctico (pla): Propiedades y aplicaciones," *Ingeniería y competitividad*, vol. 5, no. 1, pp. 16–26, 2003.
- [42] F. R. d. . M. D. . G. F. . B. I. Palella and G. Riccio, "Small globes and pocket heat stress meters for wbgt and phs evaluations. a critical analysis under controlled conditions," *Building and Environment*, vol. 226, p. 109781, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322010113>
- [43] F. I. M. A. V. Oven, "Ovens and furnaces, vacuum ovens." [Online]. Available: <https://www.fishersci.com/shop/products/isotemp-model-281a-vacuum-oven/1326250?searchHijack=true&searchTerm=1326250&searchType=RAPID&matchedCatNo=1326250>