

Reloj inteligente IoT basado en tecnologías abiertas para la recopilación de datos de confort térmico

Julio César Landa López

2024-12-06

Tabla de contenidos

Resumen	6
Abstract	7
Agradecimientos	8
1 Introducción	9
1.1 Problema específico y relevancia del proyecto	10
1.2 Objetivos del proyecto	12
1.3 Metodología	12
1.4 Estructura de la tesis	13
2 Antecedentes y marco teórico	14
2.1 Confort térmico	14
2.2 Evaluación de confort térmico a través de encuestas	16
2.2.1 Escalas para el estado personal	17
2.2.2 Escalas para describir el entorno físico	18
2.3 Modelos de confort térmico	18
2.3.1 Modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado	18
2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado	21
2.4 Variables fisiológicas como indicadores de confort térmico	23
2.5 Modelos de confort térmico en México	24
2.6 Dispositivos portátiles y tecnologías abiertas en el confort térmico	25
3 Diseño, desarrollo y validación	29
3.1 Metodología	29
3.2 Construcción del dispositivo	40
3.3 Encuestas e interfaz	40
3.4 Calibración	44
3.5 Lógica de programación	49
3.6 Instrucciones de uso	52
3.7 Validación del funcionamiento del reloj inteligente	58

4 Conclusiones	63
4.1 Contribuciones del proyecto	63
4.2 Limitantes del proyecto	64
4.3 Trabajo futuro	65
4.4 Conclusión general	66
Referencias	68

Listado de Figuras

2.1 Relación PMV-PPD y los límites para edificaciones nuevas y existentes.	20
3.1 Circuito de control del motor vibrador.	35
3.2 Partes de la carcasa del dispositivo.	37
3.3 Diagrama de circuitos: a) circuito vibrador de alarma, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, y c) circuito de la batería.	38
3.4 Diagrama funcional de bloques del reloj inteligente.	39
3.5 Reloj inteligente en funcionamiento, mostrando la interfaz principal.	41
3.6 Análisis de mediciones del sensor GY-906 y el termómetro AET-R1B1: a) identificación de valores atípicos y regresiones lineales con datos originales y sin valores atípicos, b) datos calibrados utilizando la regresión lineal del conjunto de datos original.	47
3.7 Diagrama de flujo de la función actualizar hora.	51
3.8 Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.	53
3.9 Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.	54
3.10 Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.	55
3.11 Interfaz del reloj inteligente: (a) pantalla principal, (b) activación de la encuesta, (c) pregunta sobre la vestimenta actual, (d) pregunta sobre la actividad realizada, (e) pregunta sobre la ubicación, (f) pregunta sobre la sensación térmica, (h) pregunta sobre la aceptación de la sensación térmica, (i) ventana emergente indicando el inicio de las mediciones y (j) ventana emergente con los resultados de las mediciones.	59

Listado de Tablas

2.1 Escala unipolar	17
2.2 Escala bipolar	17
2.3 Valores de e según la duración del período cálido y el acceso a edificios con aire acondicionado.	21
3.1 Comparación de características de conectividad y hardware en placas de desarrollo.	30
3.2 Especificaciones técnicas detalladas de la placa XIAO ESP32C3.	31
3.3 Características de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3.	32
3.4 Características de sensores de temperatura compatibles con la placa XIAO ESP32C3.	33
3.5 Características de sensores ópticos de frecuencia cardíaca.	34
3.6 Tabla de componentes seleccionados.	35
3.7 Tabla de valores de aislamiento térmico (clo) para diferentes prendas de vestir.	42
3.8 Tabla de valores de la tasa metabólica (met) para diferentes actividades físicas.	42
3.9 Escala del voto de sensación térmica con su descripción.	43
3.10 Estadísticas de las mediciones del sensor GY-906 y el termómetro infrarrojo AET-R1B1.	45
3.11 Error Absoluto Medio (EAM) para diferentes valores de RATE_SIZE en el MAX30102.	49
3.12 Librerías utilizadas y sus versiones recomendadas para el funcionamiento del reloj inteligente.	56
3.13 Conjunto de datos de cinco encuestas térmicas y mediciones, que incluye el nivel de aislamiento de la ropa (I_{cl}), la tasa metabólica (M_r), la ubicación, el voto de sensación térmica (TSV), la aceptación térmica (TA), la temperatura de la piel de la muñeca (T_w), la frecuencia cardíaca (H_r), la edad, el peso (W), la altura (H), el sexo, la frecuencia de uso de espacios con aire acondicionado (F) y el identificador del individuo que está usando el reloj inteligente (I).	61

Resumen

El confort térmico es un aspecto crucial para la calidad de vida de las personas, ya que afecta directamente su bienestar físico y mental. Además, desempeña un papel fundamental en el consumo energético de las edificaciones, donde una gran parte de la energía se destina a sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés). Estos sistemas nos ayudan a mantener condiciones adecuadas de confort, sino que también contribuyen de manera indirecta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y al cambio climático. Para mitigar este impacto climático, es fundamental integrar tecnologías accesibles y eficientes que permitan propiciar el confort térmico sin incrementar el consumo energético. Estrategias como el diseño bioclimático destacan por su capacidad para adaptarse y responder a las condiciones climáticas locales, reduciendo la dependencia de sistemas HVAC y contribuyendo a la sostenibilidad.

Este trabajo presenta el desarrollo de un reloj inteligente basado en tecnologías abiertas, diseñando para la recopilación de datos relacionados con el confort térmico. El reloj permite recopilar datos subjetivos a través de encuestas simplificadas de confort térmico, y registrar la medición de variables fisiológicas, tales como la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca. Los datos recopilados son enviados y almacenados en la plataforma ThingsBoard, lo que permite generar una base de datos contextualizada adaptable a diferentes contextos climáticos.

El reloj inteligente integra componentes de bajo costo, como la placa de desarrollo XIAO ESP32C3, los sensores GY-906 y MAX30102, una pantalla táctil XIAO Round Display, y un circuito vibrador, todo encapsulado en una carcasa diseñada e impresa en 3D.

El desarrollo de este proyecto incluye el diseño, construcción, calibración y validación del dispositivo. Este trabajo destaca y demuestra el potencial de las tecnologías abiertas y los dispositivos portátiles en el estudio del confort térmico, así como en la generación de bases de datos que pueden facilitar la creación de modelos de confort adaptativos. De esta manera, se contribuye al uso sostenible de los recursos para lograr condiciones de confort térmico.

Abstract

Abstract

Thermal comfort is a crucial aspect of people's quality of life, as it directly impacts their physical and mental well-being. Additionally, it plays a fundamental role in the energy consumption of buildings, where a significant portion of energy is allocated to heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. While these systems help maintain suitable comfort conditions, they also indirectly contribute to greenhouse gas (GHG) emissions and climate change. To mitigate this climate impact, it is essential to integrate accessible and efficient technologies that promote thermal comfort without increasing energy consumption. Strategies such as bioclimatic design stand out for their ability to adapt and respond to local climatic conditions, reducing reliance on HVAC systems and contributing to sustainability.

This work presents the development of a smartwatch based on open-source technologies, designed to collect data related to thermal comfort. The smartwatch allows for the collection of subjective data through simplified thermal comfort surveys and records the measurement of physiological variables, such as skin temperature and heart rate. The collected data is sent and stored on the ThingsBoard platform, enabling the creation of a contextualized database adaptable to different climatic contexts.

The smartwatch integrates low-cost components, including the XIAO ESP32C3 development board, GY-906 and MAX30102 sensors, a XIAO Round Display touchscreen, and a vibrating circuit, all encapsulated in a 3D-printed case designed for this purpose.

The development of this project encompasses the design, construction, calibration, and validation of the device. This work highlights and demonstrates the potential of open-source technologies and wearable devices in the study of thermal comfort, as well as in the generation of databases that can facilitate the creation of adaptive comfort models. In doing so, it contributes to the sustainable use of resources to achieve thermal comfort conditions.

Agradecimientos

Quiero agradecer a:

Mi tutor, Guillermo Barrios, por todo su apoyo durante esta etapa. No solo me brindó respaldo académico, sino también personal.

Mi familia, por estar siempre a mi lado y por ser mi fuente de fortaleza.

Mis amigos, ahora convertidos en familia, que hice en el Instituto de Energías Renovables. Cada uno de ellos contribuyó a hacer de esta experiencia una etapa inolvidable

1 Introducción

El cambio climático es una de las principales amenazas a nivel global y ha tomado gran relevancia en años recientes. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), para limitar el calentamiento global a 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, es imprescindible una reducción drástica de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones deben alcanzar su máximo antes del año 2025 y disminuir en un 43% para el año 2030, llegando a cero neto para el año 2050. Esto es esencial para reducir las emisiones de GEI, evitar el cambio climático y, con ello, contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la Organización de las Naciones Unidas (2015).

El Synthesis Report (2023) señala que durante el período que abarca de 2011 a 2020, las actividades humanas causaron un calentamiento de aproximadamente 1.1°C por encima de los niveles preindustriales. Este incremento ha resultado en cambios importantes a nivel climático, generando olas de calor, precipitaciones y sequías más intensas. Estos efectos no solo amenazan la biodiversidad y la salud humana, sino que también afectan directamente la eficiencia energética de las edificaciones, ya que exigen un mayor consumo de energía de los sistemas de climatización para mantener condiciones de confort térmico adecuadas, incrementando las emisiones de GEI.

El 80% de las emisiones globales de GEI provienen de la generación de energía, las edificaciones, la industria y el transporte, mientras que el 20% restante proviene de actividades como la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra. Tan solo el uso de energía representa el 73.2% de generación de emisiones GEI a nivel global, y el uso de energía en edificaciones constituye el 17.5%, siendo el 6.6% correspondiente a edificaciones no residenciales y el 10.9% a edificaciones residenciales (Ritchie 2020). En México, el sector residencial, comercial y público representa el 17.16% del consumo final de energía, de los cuales el 34.29% corresponden a consumo eléctrico (Secretaría de Energía 2023). En materia de eficiencia energética, el principal desafío que enfrentan los edificios no residenciales en México es su uso intensivo de electricidad (Lorentzen y McNeil 2020).

Para mejorar la eficiencia energética en las edificaciones en México, se proponen varias estrategias, como el uso de sistemas de aire acondicionados eficientes, la optimización de la iluminación, la automatización en la gestión energética, las auditorias energéticas y generar estándares de eficiencia. Estas medidas pueden reducir el consumo de energía, disminuir costos y contribuir a un entorno más sostenible (Lorentzen y McNeil 2020).

Ante este panorama, la digitalización se presenta como una herramienta con el potencial de mejorar la eficiencia energética, favorecer la descarbonización y ayudar a mitigar el cambio climático. La digitalización permite una gestión más eficiente de los sistemas de edificios mediante el monitoreo en tiempo real, el mantenimiento predictivo y la optimización del uso energético. Tecnologías como los medidores inteligentes, sensores con internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y sistemas de automatización de edificios ayudan a reducir el consumo de energía al gestionar de manera eficiente servicios como sistemas de aire acondicionado, calefacción e iluminación (Olabi, Abdelkarem, y Jouhara 2023). Sin embargo, la digitalización también implica un aumento en la demanda de energía. Para enfrentar este desafío, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2022) destaca la necesidad de políticas proactivas y regulación del desecho electrónico, así como la transición hacia fuentes de energía sostenibles, prácticas alimenticias más sostenibles y la reconfiguración urbana.

El confort térmico está fuertemente relacionado con el consumo de energía en edificaciones y es un factor crucial en la calidad de vida de los ocupantes. Una gran parte del consumo de energía en estas se ocupa en mantener condiciones adecuadas de iluminación, temperatura y humedad del aire, buscando obtener espacios con condiciones adecuadas para que los ocupantes se encuentren en confort térmico, lumínico y acústico. La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE, 2017) es una organización que desarrolla estándares y guías para sistemas de construcción, eficiencia energética, calidad del aire al interior y sostenibilidad. Define al confort térmico como la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente, y es un juicio personal cognitivo que es influenciado por procesos físicos, fisiológicos y otros factores.

En el contexto actual del cambio climático, el diseño de edificaciones que favorezcan el confort térmico de manera eficiente y sustentable se vuelve prioritario. Enescu (2017) destaca como se puede contribuir a reducir el consumo energético de los sistemas de climatización teniendo una adecuada gestión del confort térmico en las edificaciones, un diseño eficiente reduce la dependencia de sistemas de calefacción y refrigeración. En este sentido cobra importancia el diseño bioclimático. Olgay et al. (1963) introdujo este concepto, el diseño bioclimático consiste en diseñar las edificaciones acorde al clima del lugar, es decir que se busca aprovechar las condiciones climáticas necesarias para minimizar el uso de energía y, con ello, las emisiones de GEI.

1.1 Problema específico y relevancia del proyecto

El confort térmico es un aspecto complejo de evaluar dada su naturaleza subjetiva, ya que depende de la percepción individual de cada individuo, por lo que tratar de evaluarlo de manera colectiva se convierte en un desafío. La forma tradicional de evaluar el confort térmico es a través de encuestas y sensores estacionarios que miden la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento. Sin embargo, estas herramientas presentan retos, tales como

la falta de accesibilidad o altos costos en equipamiento, dificultando la recolección continua de datos para la evaluación del confort térmico. Aunado a esto, estas herramientas carecen de flexibilidad para ajustarse a las necesidades individuales de los ocupantes.

Recientemente han surgido nuevas herramientas tecnológicas como el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), la inteligencia artificial (IA) o los dispositivos portátiles que funcionan como una alternativa en la búsqueda de una solución a esta problemática. Distintos autores destacan como estas tecnologías permiten una mejor recopilación y análisis de datos para la evaluación y predicción del confort térmico (Tartarini et al. 2022; Feng et al. 2023; Malakhatkha et al. 2021; Garces et al. 2021; He et al. 2025; Nazarian et al. 2021). Estas tecnologías favorecen el estudio del confort térmico al permitir un monitoreo continuo y en tiempo real del confort térmico, así como la generación de bases de datos para su posterior estudio y generación de modelos de confort.

Existen relojes inteligentes comerciales que integran sensores avanzados los cuales podrían ser útiles en este contexto, sin embargo, su implementación enfrenta distintos desafíos. El acceso a los datos recopilados por estos dispositivos está generalmente limitado o son de difícil acceso. Una alternativa ante esta problemática es el desarrollo de aplicaciones propias y específicas, pero esto implica programar la aplicación para diferentes sistemas operativos, como Android y watchOS, además de adaptarlas a modelos específicos de relojes inteligentes. Asimismo, el desarrollo de dichas aplicaciones requiere mantenimiento continuo para garantizar su funcionalidad.

Mishra y Ramgopal (2013) y Chaudhuri et al. (2020), menciona también las limitaciones de estas tecnologías, pues aunque son prometedoras, su costo elevado y complejidad de implementación en muchos casos las vuelve inaccesibles. Estos estudios resaltan la necesidad de desarrollar herramientas más prácticas y económicamente viables, que permitan una evaluación más inclusiva y personalizada del confort térmico.

Surge entonces la necesidad de la inclusión de tecnologías abiertas para el desarrollo de estas herramientas. El término tecnologías abiertas se refiere a sistemas y herramientas cuyo diseño, código fuente o especificaciones están disponibles públicamente, permitiendo que cualquier persona los utilice, modifique y distribuya libremente (Departamento de Defensa de EE.UU. 2009). El uso de tecnologías abiertas permite mayor accesibilidad en la implementación de sistemas de monitoreo de confort térmico, lo cual puede resultar en soluciones más prácticas y económicas para la evaluación del confort térmico en diferentes contextos.

Con las tecnologías abiertas también se pueden generar bases de datos útiles para el estudio de confort térmico y la generación de modelos de confort personalizados. Gnecco, Pigliautile, y Pisello (2023) presenta una metodología para investigar la correlación entre el voto de sensación térmica (TSV, por sus siglas en inglés) diario de los individuos con variables ambientales y fisiológicas con el objetivo de desarrollar modelos de confort personalizados que permitan maximizar el bienestar de los ocupantes, a la vez que se minimiza el consumo energético.

1.2 Objetivos del proyecto

Desarrollar un reloj inteligente basado en tecnologías abiertas capaz de recolectar y enviar datos relacionados con el confort térmico a una plataforma IoT, incluyendo variables fisiológicas y encuestas simplificadas de confort térmico para la generación de una base de datos contextualizada en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en Temixco, Morelos.

Objetivos Específicos:

- Diseñar y construir un dispositivo que integre componentes de hardware, incluyendo la placa de desarrollo XIAO ESP32C3, un sensor de temperatura de la piel (GY-906), un sensor de frecuencia cardíaca (MAX30102), una pantalla táctil (XIAO Round Display), un circuito vibrador para alarma, una batería y un interruptor de encendido/apagado, en un diseño compacto y ergonómico para el usuario.
- Desarrollar e implementar encuestas de confort térmico simplificadas que se realicen de manera periódica a través de una interfaz gráfica intuitiva y de fácil uso para el usuario.
- Calibrar y validar el funcionamiento de los sensores utilizando equipos de referencia, como cámaras termográficas y oxímetros, para asegurar un bajo margen de error en los datos fisiológicos recuperados.
- Implementar un sistema de envío y almacenamiento de datos en una plataforma IoT para generar una base de datos con toda la información obtenida para su posterior análisis.

1.3 Metodología

La metodología del proyecto se centra en el desarrollo y la validación de un reloj inteligente basado en tecnologías abiertas para la recolección de datos relacionados con el confort térmico. El enfoque metodológico incluye varias etapas clave:

- **Prototipado y diseño de hardware:** Se realiza el diseño y construcción de un prototipo funcional del dispositivo, utilizando la placa XIAO ESP32C3 y sensores como el GY-906 y el MAX30102, integrados con una pantalla táctil para facilitar la interacción del usuario.
- **Implementación de encuestas simplificadas:** Se diseñan encuestas de confort térmico simplificadas que se ejecutan automáticamente a intervalos programados, permitiendo a los usuarios responder directamente desde el dispositivo. Estas encuestas recopilan datos subjetivos relacionados con el confort térmico.

- **Calibración y pruebas de campo:** Los sensores del dispositivo se calibran utilizando equipos de referencia como la cámara termográfica Fluke Ti9 y el oxímetro Yonker YK-81C para asegurar la precisión de las mediciones fisiológicas. El dispositivo se somete a campañas de medición para evaluar la correcta calibración de los sensores.
- **Conexión IoT y almacenamiento de datos:** Se utiliza la plataforma ThingsBoard para el almacenamiento de los datos recopilados, permitiendo la visualización en tiempo real y la descarga de los datos en cualquier momento para su análisis.

Como parte del compromiso con las tecnologías abiertas en este proyecto, todos los archivos de diseño del reloj inteligente, incluidos los archivos FCStd de la carcasa, los diagramas de conexión y el código fuente están disponibles en el repositorio público bajo la licencia GNU GPL-3.0, disponible en el siguiente enlace:

https://github.com/JulioLanda4/IoT_Reloj_Confort

1.4 Estructura de la tesis

A continuación se presenta la estructura de esta tesis y que se aborda en cada capítulo de la misma:

- **Antecedentes y Marco Teórico:** En el capítulo 2 se revisan estudios previos y conceptos claves relacionados con el proyecto. Se brinda un marco conceptual que fundamenta la investigación.
- **Metodología:** En el capítulo 3 se describe todo el proceso de desarrollo del reloj inteligente, desde la selección y justificación de los componentes, hasta la construcción del dispositivo, la calibración de los sensores, la implementación de encuestas de confort térmico y la validación de funcionamiento del reloj inteligente.
- **Conclusiones:** En el capítulo 4 se abordan las conclusiones generales del proyecto, así como las contribuciones, limitantes y trabajo futuro del mismo.

2 Antecedentes y marco teórico

2.1 Confort térmico

El confort térmico es un concepto subjetivo, ya que depende de las percepciones individuales y está influenciado por factores ambientales y personales. La sociedad estadounidense de ingenieros de calefacción, refrigeración y aire acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) lo define como *la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico* (ASHRAE 55, 2017), mientras que la organización internacional de normalización (ISO, por sus siglas en inglés) en su norma 7730 lo describe como *la sensación de bienestar térmico que experimenta una persona en un entorno dado, considerando aspectos físicos, fisiológicos y psicológicos* (2005). Podemos decir entonces que el confort térmico es la sensación de satisfacción o insatisfacción con el ambiente térmico y está influenciado por percepciones individuales y como los individuos reaccionan ante las condiciones térmicas de su entorno.

El confort térmico es más complejo que un simple estado de satisfacción o insatisfacción, se puede considerar un rango de sensaciones que van desde una percepción extrema de frío hasta una sensación de extremo calor. Por otro lado, el equilibrio térmico hace referencia al estado en el que el cuerpo humano mantiene su temperatura interna estable a través de procesos fisiológicos incluyendo la sudoración, la vasoconstricción y la vasodilatación, así como procesos físicos de transferencia de calor, incluyendo la conducción, la convección y la radiación, que le permitan adaptarse a los cambios en el entorno (Sakoi et al. 2023). El equilibrio térmico es fundamental para el bienestar fisiológico, pero también es un factor que influye en la sensación de confort térmico de cada individuo. El confort térmico depende de factores ambientales que incluyen la temperatura radiante media, la velocidad del aire, la humedad relativa y la presión atmosférica, así como de factores personales como la actividad física y el nivel de aislamiento térmico de la ropa. Sin embargo, la percepción del confort térmico también puede verse influenciada en función de las experiencias, expectativas y contexto personal de cada individuo (ASHRAE 55, 2017).

Los factores que afectan la sensación de confort térmico se pueden agrupar en dos categorías: factores ambientales y factores personales. Estos factores son fundamentales para evaluar el entorno y diseñar estrategias que mejoren el confort térmico, ya que afectan directamente la capacidad del cuerpo para mantener un equilibrio térmico adecuado.

Factores ambientales

Los factores ambientales incluyen la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire, la humedad relativa del aire, y la presión atmosférica (ASHRAE 55, 2017).

- **Temperatura del aire:** Influye no solo en la sensación de calor o frío percibida a través de la piel, sino también en los procesos de transferencia de calor entre el individuo y el entorno que lo rodea. Para S. Y. Sim et al. (2016), Choi y Yeom (2017) y Liu et al. (2019), la temperatura ambiente es uno de los principales factores que afecta al confort térmico.
- **Temperatura radiante media:** Es la temperatura uniforme de un entorno imaginario en el cual el intercambio de calor radiante entre una persona y las superficies circundantes sería igual al intercambio de calor radiante real en el entorno actual (ASHRAE 2009). Las superficies realizan un intercambio de calor con el cuerpo humano a través de radiación térmica, afectando la sensación de frío o calor dependiendo si la temperatura de los objetos cercanos es mayor o menor a la temperatura del cuerpo humano. Este factor es crucial en el diseño de edificaciones, donde la elección de materiales influye directamente en la transferencia de calor.
- **Velocidad del aire:** Juega un papel importante en la sensación de frescura o calor. El flujo de aire sobre la piel humana contribuye a la transferencia de calor entre el cuerpo y el ambiente a través de la convección y la evaporación del sudor. Según estudios, la velocidad adecuada del aire mejora significativamente los niveles de confort térmico, el rendimiento cognitivo y la satisfacción general (Cen, Cheng, y Wong 2023).
- **Humedad relativa del aire:** Afecta la capacidad del cuerpo humano para disipar el calor a través de la sudoración. En ambientes muy húmedos, la evaporación del sudor se ve disminuida, generando una mayor sensación de calor, mientras que en ambientes secos la sudoración se acelera, aumentando la sensación de frescura.
- **Presión atmosférica:** La presión atmosférica también influye en la percepción del confort térmico, especialmente en entornos de gran altitud, donde la menor densidad del aire afecta a la respiración.

Factores personales

Los factores personales más relevantes para el confort térmico son la actividad física y la vestimenta. Sin embargo, otros factores como la edad, el sexo, la complejión física, la aclimatación y los aspectos socioculturales y económicos también pueden influir, aunque en menor medida.

- **Actividad física:** Influye directamente en la producción de calor del cuerpo. Una persona que realiza una actividad física intensa produce más calor que una persona en reposo. En el contexto de confort térmico, la producción de calor se mide en unidades de “met”, donde 1 *met* equivale a la producción de energía térmica de una persona en reposo por unidad de área de la piel, aproximadamente 58.2 W/m² (ASHRAE, 2009).

- **Vestimenta:** Actúa como un aislante térmico que interfiere tanto en la ganancia como en la perdida de calor del cuerpo. Si la temperatura del aire es mayor a la temperatura de la piel, la vestimenta puede reducir la absorción de calor del ambiente al cuerpo o por el contrario propiciar la transferencia de calor y provocar una sensación térmica calurosa, esto dependiendo del tipo de vestimenta que se porte. El nivel de aislamiento térmico de la ropa se mide en unidades de “clo”. El valor de 1 clo equivale al aislamiento proporcionado por un traje típico de negocios, aproximadamente $0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (ASHRAE, 2009).
- **Edad:** La edad afecta la percepción del confort térmico debido a cambios fisiológicos asociados con el envejecimiento, como la disminución de la sensibilidad térmica, disminución en la capacidad para detectar cambios en la temperatura corporal y disminución en su capacidad de termorregulación (Larriva y García 2019).
- **Sexo:** El sexo también influye en la sensación de confort térmico. J. Lyu et al. (2023) demuestra que las mujeres tienden a soportar temperaturas más cálidas en comparación con los hombres. Mientras que Chaudhuri et al. (2018) en encontraron una mayor incomodidad por parte de las mujeres en temperaturas más frías, además de registrar temperaturas cutáneas menores respecto a los hombres bajo las mismas condiciones ambientales.
- **Complejión física:** La complejión física afecta a la sensación de confort térmico debido a su relación con la producción y disipación de calor del cuerpo humano. Según Pedro Mondelo, Santaliestra, y Sanz (2001), los individuos con mayor masa corporal tienden a retener más calor, lo que los hace más susceptibles a condiciones cálidas. Por el contrario, los individuos con menor masa corporal son más sensibles a temperaturas frías debido a que pierden calor más fácilmente.
- **Aclimatación:** La aclimatación influye en la sensación de confort térmico al modificar la tolerancia de los individuos a diferentes temperaturas según su exposición a estas, sus hábitos y sus expectativas. Los individuos que residen en climas cálidos suelen tener una mayor tolerancia a temperaturas elevadas con respecto a quienes viven en climas más fríos (Olsen 2024).
- **Factores culturales y socioeconómicos:** Las expectativas sobre un ambiente térmicamente confortable varían según la cultura. Además, el estatus socioeconómico puede afectar las preferencias térmicas debido al acceso desigual a recursos como sistemas de aire acondicionado y calefacción K. J. Lyu et al. (2023).

2.2 Evaluación de confort térmico a través de encuestas

El confort térmico es un concepto subjetivo que puede evaluarse a través de encuestas de confort térmico que permiten recopilar información acerca de la percepción de los usuarios en un espacio dado sobre su entorno físico. Para ello, la ISO en su norma 10551 (2019) establece escalas de

juicio subjetivo para evaluar el entorno físico. La norma aborda cinco tipos principales de escalas, divididos en dos categorías: escalas para el estado personal y escalas para describir el entorno físico. Las escalas para el estado personal son tres: perceptual, evaluativa y preferencia. Mientras que para el entorno físico son dos: aceptabilidad y satisfacción.

Calixto Aguirre (2021) presenta las escalas de la siguiente manera:

2.2.1 Escalas para el estado personal

1. **Escala de percepción del estado personal:** *¿Cómo te sientes ahora?*. Se utiliza para comprender la percepción subjetiva del estado personal de un individuo en un entorno específico. La escala puede ser unipolar o bipolar según lo requerido. En el caso de la escala unipolar, se utiliza una graduación de cuatro grados, que puede extenderse a cinco de ser necesario. El punto de origen se establece en 0, que representa un estado neutro, mientras que los grados de intensidad se enumeran como 1, 2, 3 y opcionalmente 4. En la Tabla 2.1 se observa la estructura para la escala unipolar.

Tabla 2.1: Escala unipolar

Punto de origen	Grados de intensidad
0	1, 2, 3, (4)

Por otra parte, si la escala es bipolar, se utiliza una graduación de siete grados, que puede ampliarse hasta nueve de ser necesario. El punto de indiferencia también es 0, pero esta escala se divide en dos polos opuestos: el polo A y el polo B. Los grados negativos de intensidad van de -1 a -3 y -4 opcionalmente, siendo -4 el más cercano al polo A y -1 el más cercano a 0. Los grados positivos de intensidad van de 1 a 3 y 4 opcionalmente, siendo 4 el más cercano al polo B y 1 el más cercano a 0. El 0 representa la ausencia de sensación en ambas escalas. En la Tabla 2.2 se observa la estructura para la escala bipolar.

Tabla 2.2: Escala bipolar

Grados de intensidad	Punto de indiferencia	Grados de intensidad	
Polo A (-4), -3, -2, -1	0	1, 2, 3, (4)	Polo B

2. **Escala evaluativa:** *¿Cómo te encuentras?*. Se utiliza para medir el nivel de comodidad en un entorno. Es una escala unipolar de cuatro grados ampliable a cinco (Tabla 2.1). El 0 representa comodidad y el polo representa la incomodidad extrema.

3. **Escala de preferencia:** *¿Cómo preferirías estar?*. Utiliza una escala bipolar simétrica con siete grados para medir la preferencia de las personas respecto a ciertos aspectos del entorno. El 0 representa “sin cambio” en la preferencia (Tabla 2.2).

2.2.2 Escalas para describir el entorno físico

1. **Aceptabilidad:** Esta escala se centra en la aceptabilidad a nivel personal del entorno. Tiene dos grados, se acepta o se rechaza.
2. **Satisfacción:** Se centra en la tolerancia al entorno. Es una escala de cinco grados. 0 es perfectamente tolerable, 1 es tolerable, 2 es ligeramente incómodo, 3 es incómodo y 4 es completamente intolerable.

2.3 Modelos de confort térmico

Además de las encuestas utilizadas para evaluar el confort térmico, se han desarrollado modelos diseñados específicamente para predecirlo. Estos modelos han sido desarrollados con base en mediciones experimentales y encuestas realizadas a ocupantes en distintos entornos. Se adaptan a condiciones específicas y pueden dividirse en dos categorías: los modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado y los modelos para edificaciones sin aire acondicionado.

2.3.1 Modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado

PMV-PPD

El voto medio previsto (PMV, por sus siglas en inglés) está en función de las siete variables físicas que afectan al confort térmico: temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa del aire, velocidad del aire, presión atmosférica, nivel metabólico del ocupante y nivel de aislamiento térmico de la ropa. Dispone de una escala bipolar de sensación térmica de siete puntos, donde -3 indica una sensación de mucho frío, 0 representa una sensación neutra y +3 representa una sensación de mucho calor. Este es un modelo desarrollado para edificaciones que cuenten con sistemas de aire acondicionado y fue desarrollado por Fanger (1970).

Las ecuaciones para calcular el PMV son:

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

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

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

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

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

donde:

M : Tasa metabólica (W/m^2)

W : Trabajo mecánico externo (W/m^2)

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

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

t_a : Temperatura del aire (${}^\circ C$)

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

p_a : Presión parcial del vapor de agua (Pa)

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

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

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

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

El Porcentaje Previsto de Insatisfacción (PPD , por sus siglas en inglés) es un modelo que predice el porcentaje de personas que se sentirán insatisfechas con las condiciones térmicas

en un ambiente determinado. Este modelo está relacionado con el PMV y fue propuesto por Fanger (1970). La ecuación que lo define se expresa de la siguiente manera:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (2.6)$$

ASHRAE 55 (2017) indica que el *PPD* no debe ser mayor al 10% en todos los edificios, mientras que la ISO 7730 (2005) indica un valor menor al 10% para edificios nuevos y 15% para edificios ya existentes. En la Figura 2.1 observamos la relación entre el PMV y el PPD.

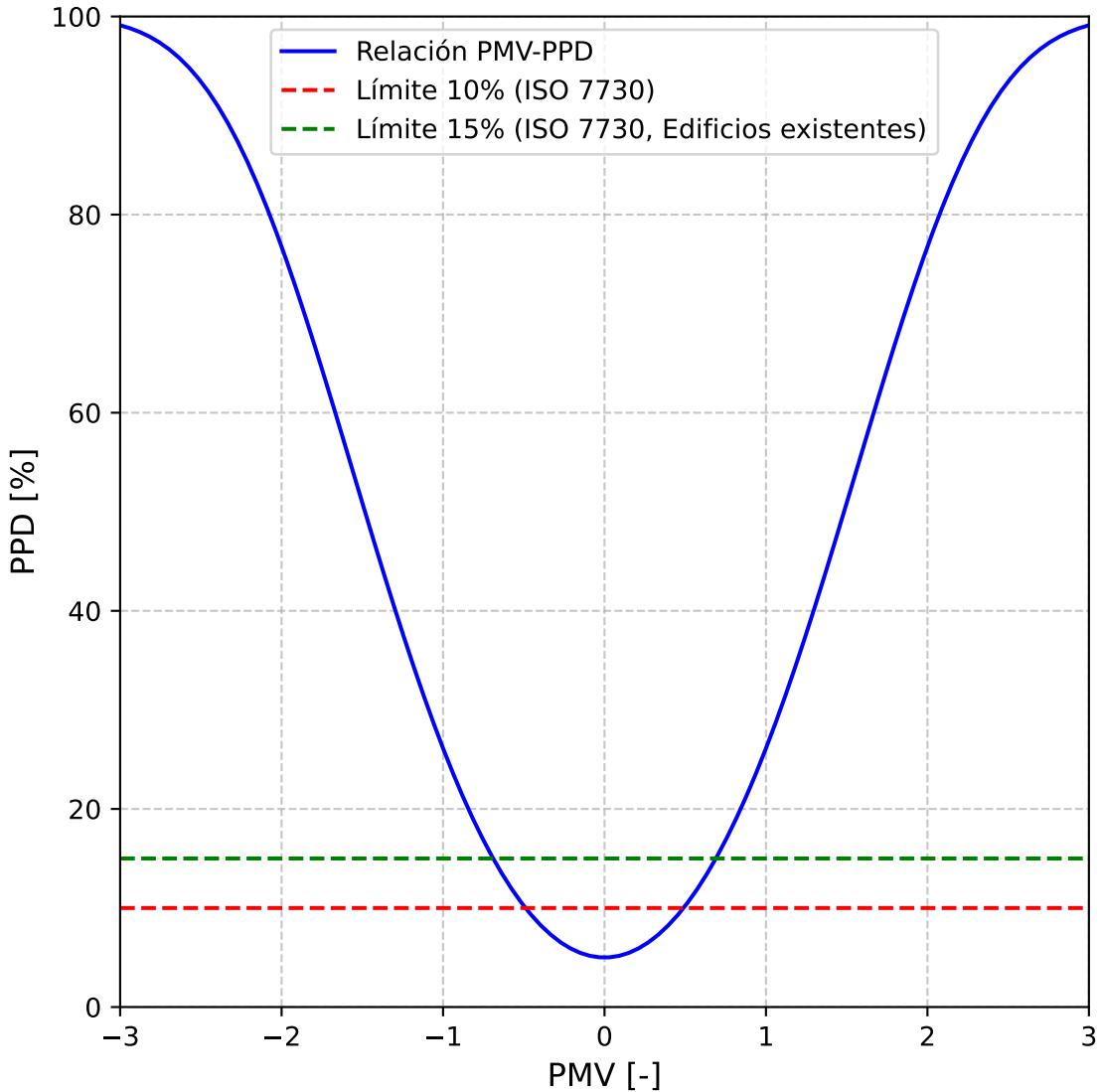


Figura 2.1: Relación PMV-PPD y los límites para edificaciones nuevas y existentes.

2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado

Existen modelos desarrollados para aplicarse en edificaciones sin sistemas de aire acondicionado. Existen dos tipos: adaptativos y no adaptativos.

Adaptativos

ePMV

El voto medio previsto extendido (ePMV, por sus siglas en inglés) es una modificación al PMV. Se observó que el PMV sobreestima el voto de sensación térmica de las personas en edificios sin aire acondicionado ubicados en climas cálidos. Para corregir esto, se introdujo un factor de expectativa (*e*), el cual ajusta los cálculos del PMV teniendo en cuenta factores como la duración del clima cálido a lo largo del año y la frecuencia con que las personas ingresan a otros edificios en la región que cuentan con sistemas de aire acondicionado (Fanger y Toftum 2002).

En la Tabla 2.3 se presentan los valores del factor *e* para diferentes escenarios.

Tabla 2.3: Valores de *e* según la duración del período cálido y el acceso a edificios con aire acondicionado.

Período cálido	Edificios cercanos con aire acondicionado	Valor (<i>e</i>)
Todo el año	No	0.5
Todo el año	Sí	0.7
Verano	No	0.7-0.8
Verano	Sí	0.8-0.9
Período corto en verano	-	0.9-1

Para el cálculo del ePMV además del valor de *e*, se debe considerar el valor del estado metabólico del ocupante (MET). usualmente el MET se determina mediante tablas estandarizadas que asignan valores a diferentes actividades. Sin embargo, esto no considera el comportamiento natural de las personas que al sentir calor tienden a reducir su actividad de manera inconsciente para adaptarse al clima, disminuyendo así su tasa metabólica. La solución propuesta para el ePMV es considerar esta reducción en la tasa metabólica en ambientes cálidos. Se considera una disminución del 6.7%.

De esta manera, para calcular el ePMV se deben seguir los siguientes pasos:

1. Calcular el PMV
2. Se calcula la nueva tasa metabólica de la siguiente manera:

$$M_{mod} = M \cdot (1 - 0.067 \cdot PMV) \quad (2.7)$$

Donde M_{mod} es la tasa metabólica modificada y M es la tasa metabólica estimada para el PMV.

3. Se vuelve a obtener el valor del PMV utilizando M_{mod}
4. Se multiplica el nuevo valor del PMV por el factor e

aPMV

El voto medio previsto adaptativo (aPMV, por sus siglas en inglés), es una adaptación del PMV y fue propuesta por Yao, Li, y Liu (2009). Es un modelo que toma en cuenta la sobreestimación del PMV de los ocupantes en edificios sin aire acondicionado. Se propone un coeficiente adaptativo λ , el cual se obtiene realizando encuestas de sensación térmica a los ocupantes del edificio, y en caso de que el edificio aún se encuentre en construcción, se busca un edificio con características similares. El aPMV se calcula de la siguiente manera:

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda PMV} \quad (2.8)$$

No adaptativos

Índice Humidex Ontario

Propuesto por Masterton, Richardson, y atmosphérique (1979). Representa en un solo valor cómo la temperatura y la humedad del aire afectan la sensación térmica. Utiliza datos recopilados en una encuesta a una muestra representativa de personas. Es un modelo exclusivo para climas cálidos. Se calcula de la siguiente manera:

$$Humidex = T + h \quad (2.9)$$

$$h = \frac{5}{9}(p_v - 10) \quad (2.10)$$

donde:

T : Temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)

h : Factor de humedad ($^{\circ}\text{C}$)

p_v : Presión de vapor (mbar)

Índice Humidex Colima

El Índice Humidex Colima adapta la fórmula original del Índice Humidex Ontario Ecuación 2.9 para responder a las condiciones climáticas de la región de Colima, México. A diferencia del índice original, que está diseñado exclusivamente para climas cálidos, este nuevo índice considera la época de frío. Este índice se basa en encuestas de confort realizadas en la ciudad de Colima. Estas encuestas se llevaron a cabo en diferentes estaciones del año (Gómez-Azpetia,

Gómez, y Peña 2006).

2.4 Variables fisiológicas como indicadores de confort térmico

Si bien existen distintos modelos que permiten predecir el confort térmico, estos no son 100% precisos, por ello se han buscado otras formas de poder medir y predecir el confort térmico. Se ha visto que existen variables fisiológicas que pueden estar fuertemente relacionadas a la sensación de confort térmico del ser humano.

Las variables fisiológicas que están asociadas con la respuesta del cuerpo humano a las condiciones ambientales incluyen la tasa de sudoración, la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca (Bogatu et al. 2023). La medición de estas variables puede proporcionar información acerca de la respuesta fisiológica del cuerpo humano ante su entorno térmico, aunque su relación con el confort térmico no siempre sea directa. J. K. Sim, Yoon, y Cho (2018) midieron la tasa de sudoración mediante una cámara de humedad y demostraron que el estado térmico de una persona puede deducirse a partir de la cantidad de sudor producido. Sin embargo, Bogatu et al. (2023) señalan que la sudoración no siempre es un indicador fiable del confort térmico, ya que puede estar influenciada por factores emocionales como el estrés. Además de que en entornos fríos la baja producción del cuerpo humano dificulta su medición, sirviendo únicamente como referencia en entornos altos con una mayor producción de calor por parte del cuerpo humano. S. Y. Sim et al. (2016) llevaron a cabo un estudio donde midieron la temperatura de la piel en cuatro puntos distintos: parte superior de la muñeca, arteria radial, arteria ulnar y la punta del dedo índice. Los resultados mostraron que combinar las tres mediciones de la muñeca proporciona los mejores resultados, con una correlación de Pearson de 0.81 respecto al voto de sensación térmica (TSV, por sus siglas en inglés). Sin embargo, las mediciones individuales de la parte superior de la muñeca y de la arteria radial también ofrecieron resultados satisfactorios, con una correlación de Pearson de 0.76. De manera similar, Choi y Yeom (2017) realizaron un estudio en donde a través de un algoritmo de árbol de decisiones crearon modelos para predecir el TSV midiendo la temperatura en diferentes puntos del cuerpo: frente, cuello, espalda, brazo, muñeca (interior), muñeca (posterior), pecho, cintura, vientre. En donde el mejor resultado lo obtuvieron al hacer un modelo combinando las mediciones de la cintura, brazo y la parte interior de la muñeca, con un 95.87% de exactitud.

Bogatu et al. (2023) recopilaron evidencia sobre el uso de la temperatura de la piel como indicador de confort térmico debido a su facilidad de medición. La piel representa el medio de interacción entre el cuerpo humano y su entorno, regulando el intercambio de calor mediante procesos como la vasodilatación y la vasoconstricción. La revisión sugiere que a temperaturas más altas en la piel se registra una mayor tendencia a una sensación de calor, mientras que temperaturas más bajas de la piel se relacionan con una sensación de frío. Además, revisaron estudios sobre el uso de la frecuencia cardíaca y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) como indicadores del confort térmico. La VFC está relacionada con la respuesta del

cuerpo a diferentes entornos térmicos y puede reflejar su estado de homeostasis. Diversos estudios han empleado algoritmos de aprendizaje automático para analizar las variaciones de la VFC y han logrado predecir el estado térmico de los individuos con una precisión del 93.7%. El estudio de Nkurikiyeyezu, Suzuki, y Lopez (2017) demuestra que la VFC puede predecir la sensación de confort térmico en diferentes condiciones ambientales. En su estudio, se analizaron índices de la VFC de individuos realizando tareas en ambientes fríos, neutros y cálidos, logrando predecir la sensación térmica con una exactitud de hasta el 93.7%.

2.5 Modelos de confort térmico en México

La mayoría de los modelos de confort térmico que se han desarrollado son para países europeos o Estados Unidos, en donde sus condiciones climáticas difieren de las condiciones climáticas de México (en donde se desarrolla este proyecto). Estos modelos y las investigaciones en confort térmico han servido como base para definir parámetros de confort térmico, sin embargo no siempre se adaptan a las diferentes condiciones climáticas. México es un país con una gran variedad de regiones bioclimáticas, desde regiones áridas, hasta regiones tropicales húmedas (Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit) 2020), lo cual requiere estudios específicos de confort térmico para cada una de estas regiones. Al día de hoy se han hecho diversos estudios en las diferentes regiones bioclimáticas del país. A continuación se presentan algunos de esos estudios llevados a cabo en México.

Rincón-Martínez y Int (2019) llevaron a cabo experimentos para evaluar el confort térmico en una cámara de ambiente controlado y estudios de campo en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) ubicada en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México, la cual cuenta con un clima templado húmedo, con la finalidad de comparar los resultados entre las condiciones del laboratorio con los estudios de campo. Los resultados mostraron una alta concordancia entre ambos escenarios, lo que sugiere que las condiciones de laboratorio pueden simular adecuadamente las condiciones de confort térmico bajo escenarios reales. Martínez et al. (2020), por su parte, desarrolló un modelo matemático adaptativo para estimar el confort térmico en edificios educativos naturalmente ventilados de Ensenada, Baja California, una región con un bioclima templado seco. Desarrollaron un modelo matemático en función de la temperatura operativa: $y = 0.2159x - 1.1115$, donde y representa la sensación térmica y x la temperatura operativa. Oropeza-Perez, Petzold-Rodriguez, y Bonilla-Lopez (2017) desarrollaron un modelo adaptativo de confort térmico para cuatro principales regiones climáticas de México (clima árido, clima tropical seco, clima templado y clima tropical húmedo), analizaron edificios con y sin sistemas de aire acondicionado. Demostraron que el uso de estrategias pasivas, como la ventilación natural y el control solar, pueden mejorar el confort térmico en una edificación y reducir con ello la dependencia de sistemas mecánicos de climatización. López-Pérez, Flores-Prieto, y Ríos-Rojas (2019) hicieron algo similar al llevar a cabo un estudio en veinticinete edificaciones educativas en dos modos de operación, con aire acondicionado y con ventilación natural. El Estudio fue realizado durante la temporada cálida en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas,

en donde hay un bioclima tropical cálido húmedo. Concluyeron que los ocupantes pueden adaptarse a temperaturas interiores más altas que las recomendadas por estándares internacionales, especialmente cuando se implementan estrategias de ventilación natural. Destacando en estos dos estudios la importancia de las estrategias de diseño bioclimático. Finalmente, Zepeda-Gil y Natarajan (2022) investigó el confort térmico en viviendas con ventilación natural en la Meseta Central Mexicana (Ciudad de México y alrededores), con un bioclima templado subhúmedo. El estudio mostró que solo el 42% de las horas de ocupación cumplían con los rangos de confort térmico aceptable, y este porcentaje disminuía significativamente durante el invierno. Los habitantes recurrían a estrategias como el uso de prendas adicionales para mantener el confort. El estudio subraya la importancia de implementar medidas de aislamiento térmico y el diseño de viviendas energéticamente eficientes para garantizar entornos interiores más saludables y reducir la dependencia de estrategias compensatorias ineficientes.

A pesar de los avances logrados en diversos estudios de confort térmico realizados en México, es importante continuar investigando en las distintas regiones bioclimáticas del país. La gran diversidad climática de México requiere soluciones adaptadas a las características específicas de cada región, con el objetivo de garantizar tanto el confort térmico como la eficiencia energética.

2.6 Dispositivos portátiles y tecnologías abiertas en el confort térmico

El uso de dispositivos portátiles ha surgido en años recientes como una valiosa herramienta en la investigación del confort térmico. Dispositivos con la capacidad de recopilar continuamente datos ambientales y fisiológicos han impulsado el desarrollo de modelos de confort adaptativos, así como un mayor entendimiento general del confort térmico. El avance de la tecnología y el acceso a tecnologías abiertas y de bajo costo ha favorecido la integración de estos dispositivos a los estudios de confort térmico. En este contexto, varios estudios han explorado diversas estrategias para el estudio y modelado del confort térmico con la integración de dispositivos portátiles en el proceso.

Garcés et al. (2021) se apoyaron en la tecnología portátil para la estimación del confort térmico a través del modelo PMV-PPD. Crearon un nodo sensor con un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad del aire y sensores de temperatura del aire y humedad relativa (DHT22), variables que son clave para la estimación del modelo. Para calcular el PMV, asumieron valores estándar para la temperatura media radiante, considerándola igual a la temperatura del aire, mientras que la actividad metabólica y el aislamiento térmico de la ropa fueron asignados con valores típicos según las condiciones del entorno. Para validar la precisión de su sistema, compararon las mediciones del nodo sensor con sensores de referencia. El trabajo hecho demostró la viabilidad de la integración de sistemas de bajo costo con tecnologías libres para la estimación del confort térmico.

En el estudio de J. K. Sim, Yoon, y Cho (2018), se desarrolló un dispositivo portátil diseñado para ser colocado en la muñeca. Este dispositivo tiene un sensor de humedad capacitivo (SY-HC-1) dentro de una cámara de humedad, permitiendo medir de manera continua la tasa de sudoración del usuario. La cámara de humedad tiene la función de controlar la ventilación natural en el área de la muñeca a través de un actuador termo-neumático que controla la apertura y el cierre de la cámara. El estudio encontró una correlación directa entre el aumento de la tasa de sudoración y el estado de estrés térmico, definido como la condición en la que el cuerpo experimenta una carga térmica excesiva o insuficiente, evidenciando que una mayor tasa de sudoración está asociada con niveles más altos de estrés térmico.

Por otro lado, Cho et al. (2023) desarrollaron un brazalete con tres termistores ubicados en la arteria radial, la arteria cubital y la parte superior de la muñeca, complementado con sensores externos para medir la temperatura y la humedad relativa del aire. Un algoritmo de inteligencia artificial integró estas mediciones con encuestas subjetivas de confort térmico, utilizando escalas como el TSV, para personalizar un modelo predictivo de confort térmico. El estudio se llevó a cabo en varios participantes, lo que permitió evaluar la efectividad del modelo en distintas personas y condiciones térmicas. Este sistema permitió controlar un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

El proyecto Coolbit, desarrollado por Nazarian et al. (2021), utilizó relojes inteligentes Fitbit equipados con sensores iButton para medir la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca, la humedad de la piel y la temperatura central del cuerpo. Para la medición de la temperatura central del cuerpo, se les pidió a los participantes que ingirieran cápsulas telemétricas VitalSense aproximadamente 8 a 10 horas antes del experimento, estas cápsulas permiten realizar mediciones de temperatura por tiempos prolongados y enviar los datos a través de radiofrecuencias a dispositivos cercanos. Además, implementaron encuestas para evaluar la sensación de confort térmico. A través de métodos de regresión, se estableció una correlación entre estas variables y la sensación térmica de los usuarios, permitiendo predecir la temperatura central del cuerpo con un margen de error de ± 0.27 °C.

Feng et al. (2023) desarrollaron un sistema portátil capaz de predecir sensaciones térmicas individuales. Utilizaron el brazalete Empatica E4, que mide la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca, la conductancia eléctrica de la piel (EDA, por sus siglas en inglés) y la actividad física mediante un acelerómetro de tres ejes. También utilizaron el sensor ambiental Ubibot WS1 que mide la temperatura del aire, la humedad relativa del aire y los niveles de iluminación. Diseñaron una aplicación móvil para llevar a cabo una encuesta de confort térmico que se activaba con una alerta en momentos específicos determinados por cambios detectados en los sensores. Estas encuestas incluían escalas de preferencia térmica, sensación térmica y nivel de aislamiento de la ropa. El estudio se llevó a cabo con dos participantes. Los datos recopilados se integraron en un modelo de regresión logística multinomial, alcanzando una exactitud promedio del 80.3% en la predicción de sensaciones térmicas individuales.

Un enfoque diferente fue explorado en el estudio de He et al. (2025), en el cual utilizaron sensores inerciales (IMU, por sus siglas en inglés) para correlacionar actividades humanas

con estados de confort térmico. Los sensores IMU, que combinan acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, permiten medir movimientos y orientaciones en tres ejes. En este estudio, se colocaron sensores IMU en las manos de los participantes durante actividades predefinidas a través de encuestas diseñadas para identificar actividades asociadas con estados térmicos de frío, neutro y calor. Estas actividades incluyen frotarse las manos, abanicarse con las manos, usar el teléfono o abrocharse botones, entre otras. Los sensores IMU registraron variables como aceleración, velocidad angular y ángulos de Euler, cuyos datos se utilizaron para entrenar modelos de aprendizaje automático. Estos modelos lograron identificar las actividades específicas asociadas con distintas sensaciones térmicas. Los autores destacan la viabilidad de estos sensores para aplicaciones en el control de sistemas HVAC.

En el estudio de Tartarini et al. (2022), se utilizó un reloj inteligente Fitbit, dos sensores iButton y la aplicación Cozie para evaluar el confort térmico humano. Cozie, una aplicación diseñada para relojes inteligentes, permitió la recopilación de datos subjetivos mediante encuestas rápidas, además de integrar mediciones de la frecuencia cardíaca y la ubicación de los sensores del reloj, aunque actualmente únicamente se encuentra disponible para Apple Watch y algunos modelos de Fitbit. En este estudio se midieron la temperatura de la piel en la muñeca, registrada con un sensor iButton colocado en la parte interna de la correa del reloj; la frecuencia cardíaca, obtenida directamente del Fitbit; la temperatura del aire exterior, obtenida de datos climáticos del gobierno de Singapur (lugar donde fue llevado a cabo el estudio); la temperatura del aire cercano al cuerpo, medida por un iButton colocado en la parte externa de la correa; y la temperatura y la humedad relativa del aire al interior, registradas mediante sensores adicionales instalados en los espacios ocupados por los participantes. A través de Cozie, se realizaron encuestas subjetivas en momentos aleatorios, las cuales incluían preguntas sobre la sensación térmica, la preferencia térmica, el nivel de actividad física y el aislamiento de la ropa. Los datos recopilados sirvieron para desarrollar modelos de regresión multinomial que correlacionaron las variables medidas con las respuestas subjetivas, mientras que algoritmos de aprendizaje automático ayudaron a identificar patrones complejos en los datos, mejorando la precisión de las predicciones. Para evaluar el rendimiento de los modelos, se utilizó el F1-score, una métrica que combina la precisión y la exhaustividad (recall) en de un modelo en un solo valor. El F1-score se define como la media armónica entre la precisión (la relación de predicciones correctas respecto al total de predicciones positivas realizadas) y el recall (la relación de casos positivos correctamente identificados sobre el total de casos positivos reales). Su valor oscila entre 0 y 1, donde 1 indica un modelo con un rendimiento perfecto y 0 un modelo sin capacidad predictiva. En este estudio, el modelo obtuvo un F1-score promedio de 0.78, lo que indica un buen desempeño en la predicción del confort térmico.

Estos estudios demuestran que el uso de dispositivos portátiles en el confort térmico está revolucionando la manera en que se obtienen datos fisiológicos, ambientales y datos de encuestas útiles para el estudio del confort térmico. Asimismo, el uso de tecnologías abiertas simplifica su integración al hacerlas más económicas y accesibles. Esto abre las puertas para el desarrollo

de nuevos estudios, modelos adaptativos de confort térmico y diversas aplicaciones en esta área.

3 Diseño, desarrollo y validación

En este capítulo se describe el proceso completo de desarrollo, construcción y validación del reloj inteligente para la recopilación de datos de confort térmico presentado en esta tesis. La Sección 3.1 presenta una descripción detallada del reloj inteligente, la selección de los componentes y la justificación de su elección. En la Sección 3.2 se desarrolla la etapa de diseño y construcción del dispositivo. La Sección 3.3 se centra en el diseño y la implementación de las encuestas mediante la interfaz gráfica, mientras que la Sección 3.4 detalla el proceso de calibración de los sensores. En la Sección 3.5 se presenta una descripción de la lógica de programación del reloj inteligente, y en la Sección 3.6 se proporcionan instrucciones de uso. Finalmente, en la Sección 3.7 se verifica la funcionalidad del reloj inteligente para recopilar información de las encuestas de confort térmico y las mediciones de la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca para enviar estos datos a la plataforma ThingsBoard.

3.1 Metodología

1. Descripción general del dispositivo

El dispositivo presentado en esta tesis es un prototipo de reloj inteligente diseñado específicamente para la investigación en el ámbito del confort térmico. Este dispositivo permite la recopilación de la temperatura de la piel en la parte posterior de la muñeca y la frecuencia cardíaca, variables cuya relación con el confort térmico se presentó en el capítulo anterior. Además, este dispositivo realiza encuestas periódicas simplificadas de confort térmico mediante una interfaz de usuario intuitiva, que permite responder la encuesta de forma rápida y sencilla. La recopilación de estos datos se realiza en la plataforma de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) llamada ThingsBoard, lo que permite la creación de una base de datos de confort térmico para diversos bioclimas, incluyendo el bioclima cálido semihúmedo (Infonavit 2024) en Temixco, Morelos, donde se lleva a cabo el desarrollo de este reloj inteligente. Esta base de datos facilitará estudios para el entendimiento del confort térmico y el desarrollo de modelos de confort para este tipo de bioclima, así como de modelos de confort personalizados.

Además, este dispositivo realiza encuestas periódicas simplificadas de confort térmico mediante una interfaz de usuario intuitiva, que permite responder la encuesta de forma rápida y sencilla. La recopilación de estos datos se realiza en la plataforma de Internet de las Cosas

(IoT, por sus siglas en inglés) llamada ThingsBoard, lo que permite la creación de una base de datos de confort térmico en diversas zonas bioclimáticas, incluyendo el bioclima cálido semihúmedo de Temixco, Morelos (Infonavit 2024). Esta base de datos facilitará estudios para el entendimiento del confort térmico y el desarrollo de modelos de confort aplicables a distintos bioclimas, así como de modelos de confort personalizados.

2. Selección de componentes

Para garantizar el funcionamiento del dispositivo, es fundamental seleccionar correctamente todos los componentes. A continuación se describen los principales componentes utilizados, junto con sus características y la justificación de su elección en el proyecto. Esta justificación se basa en criterios como compatibilidad, consumo energético, exactitud y capacidad de procesamiento en el caso de la placa de desarrollo.

Los componentes básicos del reloj inteligente son:

- Placa de desarrollo
- Pantalla
- Sensor de temperatura
- Sensor de frecuencia cardíaca
- Circuito vibrador
- Batería

Placa de desarrollo

La selección de la placa o tarjeta de desarrollo es una decisión crucial en el desarrollo del proyecto. Se requiere una placa de tamaño reducido que cumpla con características esenciales como conexión WiFi, velocidad de procesamiento, memoria ROM y comunicación I2C. Además, debe tener un bajo consumo energético para garantizar el uso portátil prolongado del reloj inteligente.

Durante el proceso de selección se consideraron placas de desarrollo Arduino, ESP y Raspberry. En la tabla Tabla 3.1 se presenta una comparación de diferentes placas de desarrollo con las características requeridas.

Tabla 3.1: Comparación de características de conectividad y hardware en placas de desarrollo.

Placa de desarrollo	WIFI	Bluetooth	Comunicación	Cable	Pines	Dimensiones
Arduino Nano 33 IoT	si	4.2	SPI, I2C, I2S, UART	Micro USB	30 GPIOs, 8 ADC	45.00 x 18.00 mm

Placa de desarrollo	WIFI	Bluetooth	Comunicación	Cable	Pines	Dimensiones
Arduino nano esp32	si	LE	UART, I2C, SPI, I2S, CAN(TWAI)	USB C	22 GPIOs, 8 ADC	43.18 x 17.78 mm
Arduino nano RP2040 connect	si	4.2	STI, I2C, I2S, PIO, UART	USB C	30 GPIOs, 8 ADC	43.18 x 17.77 mm
Raspberry pi pico W	si	5.2	UART, I2C, SPI	Micro USB	26 GPIOs, 3 ADC	51.30 x 21.00 mm
ESP32 pico kit	si	4.2	I2C, I2S, SPI	Micro USB	34 GPIOs	52.00 x 20.30 mm
Seeed Studio XIAO ESP32C3	si	5	1x UART, 1x IIC, 1x SPI	USB C	11 GPIOs, 4 ADC	21.00 x 17.80 mm
Seeed Studio XIAO ESP32S3	si	5	1x UART, 1x IIC, 1x SPI	USB C	11 GPIOs, 9 ADC	21.00 x 17.80 mm

Si bien todas las placas presentadas son opciones viables, Seeed Studio ha desarrollado placas orientadas a aplicaciones de dispositivos portátiles. Estas placas tienen las características deseadas y además empantan perfectamente con las necesidades del proyecto debido a su tamaño compacto, conectividad, modos de bajo consumo y la posibilidad de la integración con una pantalla táctil desarrollada por la misma marca. Para el desarrollo del proyecto, se elige la XIAO ESP32C3 sobre la XIAO ESP32S3. Aunque la primera es menos potente, cumple con todos los requerimientos a un menor costo. Además, la limitada disponibilidad de la XIAO ESP32S3 en México durante el desarrollo del proyecto también influyó en la decisión. No obstante, la XIAO ESP32S3 podría ser usada sin ningún problema, ofreciendo incluso aumentar considerablemente la capacidad de memoria para futuras modificaciones o mejoras en el código. La Tabla 3.2 muestra las características específicas de la placa seleccionada.

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas detalladas de la placa XIAO ESP32C3.

Parámetro	Seeed Studio XIAO ESP32C3
Procesador	ESP32-C3 32 bit RISC-V 160 MHz
Conectividad	2.4 GHz WiFi BLE: Bluetooth 5.0, malla Bluetooth
On-chip Memory	400 KB SRAM & 4 MB Flash
Interfaz	1x UART, 1x IIC, 1x SPI, 11x GPIO(PWM), 4x ADC, 1x botón Reset, 1x botón Boot
Dimensiones	21.00 x 17.80 mm

Parámetro	Seeed Studio XIAO ESP32C3
Características eléctricas	Voltaje de entrada (Typo-C): 5 V Voltaje de operación 3.3 V Voltaje de operación: - Type-C: 5 V@19mA - BAT: 3.8 V@22mA corriente de carga de batería: 350 mA/100 mA
Modo de bajo consumo	Modo deep-sleep: > 44 μ A
Consumo de energía con WIFI activo	Modo activo: < 75 mA
Consumo de energía con Bluetooth activo	Modo modem-sleep: < 27 mA
Temperatura de trabajo	-40°C a 85°C

Pantalla

La elección de la pantalla debe alinearse con los criterios establecidos para la placa de desarrollo. Se busca una pantalla que además de ser de tamaño reducido, sea compatible con la placa seleccionada. En la tabla Tabla 3.3, se presentan las características básicas de las pantallas compatibles con la placa de desarrollo seleccionada.

Tabla 3.3: Características de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3.

Pantalla	Pantalla táctil	Tecnología	Diametro
Seeed Studio Round Display for XIAO	si	TFT LCD	32.51 mm
Waveshare Módulo de visualización	no	OLED RGB	38.10 mm
GC9A01 Pantalla	no	TFT LCD	32.51 mm

La pantalla seleccionada es la Seeed Studio Round Display for XIAO. Este modelo es compatible con la placa XIAO ESP32C3, elegida previamente, gracias al enfoque de Seeed Studio para desarrollar un ecosistema de dispositivos orientado a aplicaciones portátiles. La compatibilidad entre los componentes, tecnología táctil y diseño de la pantalla, logran que la pantalla se ajuste a las necesidades del proyecto.

Sensor de temperatura

La Tabla 3.4 muestra una comparación entre distintos sensores de temperatura que podrían ser utilizados en el proyecto, incluyendo termistores, sensores infrarrojos y un sensor de temperatura y humedad. Estos sensores tienen un rango de operación entre los 3.3 V y 5.0 V para garantizar su compatibilidad con la placa de desarrollo seleccionada.

Tabla 3.4: Características de sensores de temperatura compatibles con la placa XIAO ESP32C3.

Nombre	Tipo	Rango	Precisión	Comunicación	Dimensión
GY-906 (MLX90614)	Sensor de temperatura infrarrojo	-70°C a 382.2°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ (0°C a 50°C)	I2C	17.00 x 11.00 mm
ZTP-115M	Sensor de temperatura infrarrojo	-20°C a 100°C	$\pm 1^\circ\text{C}$ (32°C a 42°C)	Salida analógica	33.00 x 17.00 mm
NTC MF52AT	Termistor NTC	-55°C a 125°C	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (dependiendo de la resistencia)	No aplica (sensor analógico)	6.00 x 3.00 mm
BetaTherm 10K3A1	Termistor NTC	-50°C a 150°C	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (25°C a 45°C)	No aplica (sensor analógico)	6.00 x 2.40 mm
AHT20	Sensor de temperatura y humedad	-40°C a 85°C	$\pm 0.3^\circ\text{C}$ (temperatura) / $\pm 2\%$ HR (humedad)	I2C	16.10 x 15.98 mm

Tras un análisis detallado, se selecciona el sensor GY-906 debido a su tamaño compacto, su tecnología infrarroja y comunicación digital por I2C. Aunque el termistor NTC MF52AT ofrece una alternativa viable, se descarta por ser un sensor analógico. Dado que el reloj inteligente está diseñado para operar en un espacio reducido, cualquier interferencia en las conexiones internas podría afectar la precisión de los sensores analógicos. Por esta razón, se opta por el GY-906, que garantiza transmisión de datos en entornos compactos.

Sensor de frecuencia cardíaca

Los fotopletismografía utilizada en sensores ópticos se ha consolidado como una técnica confiable para la medición de la frecuencia cardíaca (Allen 2007). Por lo que se ha convertido en una opción para los dispositivos portátiles que desean medir la frecuencia cardíaca. Maxim Integrated ofrece la línea de sensores MAX3010X para este tipo de aplicaciones. Estos sensores destacan por su bajo consumo de energía, precio accesible, tamaño compacto y protocolo de comunicación I2C. La Tabla 3.5 muestra las características de los sensores MAX20100, MAX30102 y MAX30105, incluyendo la resolución del convertidor analógico digital (ADC, por sus siglas en inglés).

Tabla 3.5: Características de sensores ópticos de frecuencia cardíaca.

Sensor	Tipo de almacenamiento	Resolución ADC	Funcionalidades	Consumo de Energía
MAX30100	16-bit FIFO	14-bit	Frecuencia cardíaca, nivel de oxigenación en la sangre	600 μ A a 1.0 mA
MAX30102	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, nivel de oxigenación en la sangre	600 μ A a 1.2 mA
MAX30105	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, nivel de oxigenación en la sangre, detección de partículas	600 μ A a 1.2 mA

El MAX30102 se elige como la mejor opción para este proyecto por su equilibrio entre funcionalidad, resolución ADC y costo. A comparación del MAX30105, este es más económico y fácil de conseguir en México, mientras que el MAX30100 se encuentra aproximadamente por el mismo precio. Además, el MAX30102 ofrece mejoras significativas respecto al MAX30100, tanto en la resolución como en el tipo de almacenamiento. Tanto la funcionalidad de detección de partículas, como la medición de oxigenación en la sangre (SpO_2) no son variables que se requieran para la investigación planteada en esta tesis, pero podrían ser variables de interés en investigaciones futuras.

Circuito vibrador

El reloj inteligente presentado en esta tesis cuenta con un sistema de alarma silenciosa compuesta por un motor vibrador circular de 8 mm de diámetro, alimentado a 3.7 V y un circuito de control. La Figura 3.1 muestra este circuito.

Batería

El uso de baterías de polímero de litio (LiPo) es ampliamente utilizado en dispositivos portátiles debido a sus características de pequeño tamaño, bajo peso y facilidad de carga. Para este proyecto, que integra una placa de desarrollo XIAO ESP32C3, una pantalla XIAO Round Display, un sensor GY-906, un sensor MAX30102 y un circuito vibrador, es crucial seleccionar una capacidad de batería que asegure un funcionamiento continuo y confiable, considerando el consumo energético de cada componente involucrado.

La XIAO ESP32C3 presenta un consumo promedio de 74.7 mA durante su operación activa (Studio 2024), mientras que la pantalla XIAO Round Display demanda aproximadamente 70.0 mA (Solution 2024). Por su parte, el sensor GY-906 tiene un consumo de corriente bajo, en el rango de 1.0 a 2.0 mA (Melexis 2009), el sensor MAX30102 consume entre 0.6 y 1.2 mA

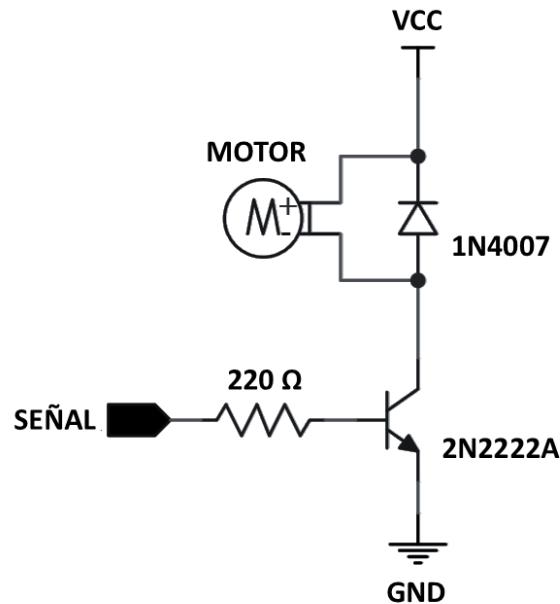


Figura 3.1: Circuito de control del motor vibrador.

durante la medición de la frecuencia cardíaca (Integrated 2015). Adicionalmente, el motor vibrador registra un consumo estimado de 84.0 mA (uElectronics 2024), dependiendo de la intensidad de la vibración y la carga aplicada.

El consumo total del dispositivo en condiciones de operación máxima puede alcanzar 232.0 mA. Sin embargo, este nivel de consumo es poco probable alcanzarse durante el uso típico del dispositivo, ya que, durante la mayor parte del tiempo los sensores y la pantalla permanecen inactivos y solo se encenderán al momento de llevar a cabo sus mediciones; el motor vibrador se enciende únicamente por breves períodos cada hora. Con el fin de asegurar autonomía del dispositivo y evitar interrupciones en su funcionamiento, se selecciona una batería de 650.0 mAh. Esta capacidad satisface los requisitos energéticos, permitiendo el uso prolongado del reloj inteligente. Además, la batería seleccionada cumple en tamaño y peso, ajustándose adecuadamente al diseño del dispositivo.

La Tabla 3.6 muestra todos los componentes seleccionados para el desarrollo del dispositivo.

Tabla 3.6: Tabla de componentes seleccionados.

Componente	Descripción
XIAO ESP32C3	Placa de desarrollo compacta con Wi-Fi y BLE

Componente	Descripción
XIAO Round Display	Pantalla circular táctil de 1.28 pulgadas
GY-906	Sensor infrarrojo de temperatura
MAX30102	Sensor óptico de frecuencia cardíaca
Circuito vibrador	Circuito vibrador para notificaciones silenciosas
Batería 3.7 V, 650 mAh	Batería LiPo recargable

3. Diseño del dispositivo

Una vez seleccionados los componentes básicos del reloj inteligente, el diseño se enfoca en crear una carcasa compacta que permita alojar los componentes sin interferencias entre ellos y en desarrollar los circuitos internos de conexión.

Carcasa

La carcasa del dispositivo está diseñada para ser impresa en 3D y consta de tres partes principales (base, parte central y parte superior) y un seguro. La primera parte es la base y esta es la que está en contacto con la muñeca del usuario, cuenta con ranuras para el acomodo y fijación de los sensores y que estos queden en contacto directo con la piel para llevar a cabo las mediciones de forma adecuada.

La parte central de la carcasa es la pieza que va arriba de la base y es donde se aloja la placa de desarrollo, el motor vibrador y el interruptor de encendido. Esta pieza está diseñada con compartimentos para fijar cada uno de estos componentes. Por la parte exterior de la carcasa, esta pieza cuenta con ranuras para colocar las correas que fijan el dispositivo a la muñeca del usuario.

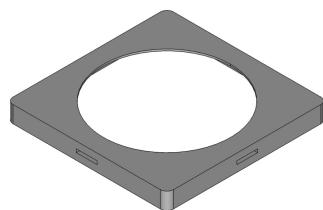
La parte superior de la carcasa está diseñada con el fin de mantener la pantalla táctil en su posición y cerrar el dispositivo. Todas las piezas se ensamblan una con otra por presión, evitando el uso de tornillos.

Adicionalmente, hay una cuarta pieza que es un seguro para fijar el interruptor de encendido. Esta se coloca por encima del interruptor una vez esté colocado en su posición en la pieza central. El seguro ensambla por presión a la parte central de la carcasa y deja fijo el interruptor.

En la Figura 3.2 se presentan las tres partes principales de la carcasa junto con el seguro. En la figura, se ha resaltado en color verde el área donde el seguro encaja con la parte central de la carcasa.

Diseño de los circuitos

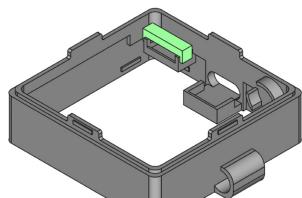
La arquitectura electrónica del reloj inteligente se divide en tres circuitos, circuito vibrador para alarma (Figura 3.3 a), circuito de sensores y tarjeta de desarrollo (Figura 3.3 b) y el circuito de la batería (Figura 3.3 c). Cada uno de estos circuitos está diseñado para mantener



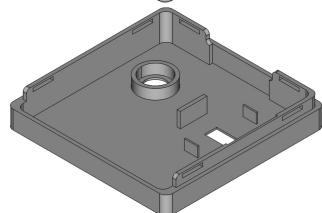
Parte superior



Seguro



Parte central



Parte inferior

Figura 3.2: Partes de la carcasa del dispositivo.

las conexiones lo más simples y cortas posibles. Dado que la placa XIAO ESP32C3 y la pantalla XIAO Round Display se ensamblan directamente, no se requiere circuito para ello.

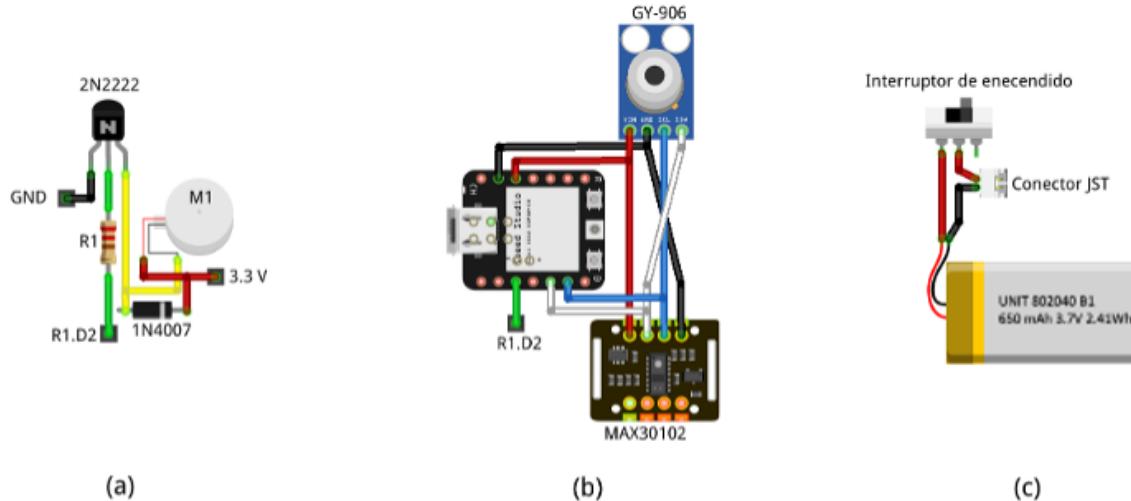


Figura 3.3: Diagrama de circuitos: a) circuito vibrador de alarma, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, y c) circuito de la batería.

El código de colores utilizado en este proyecto, para facilitar las conexiones, es:

- **Rojo:** Vcc (3.3 V).
- **Negro:** GND.
- **Azul:** comunicación SCL.
- **Blanco:** comunicación SDA.
- **Verde:** señal de activación del motor.
- **Amarillo:** conexión entre el pin emisor del transistor y el motor vibrador.

El circuito vibrador para alarma es un circuito sencillo de control del motor, su principal objetivo es energizar el motor vibrador y proteger el microcontrolador, evitando que el motor se alimente directamente desde el pin digital del microcontrolador, si no que lo haga directamente de la fuente de alimentación general del dispositivo, mientras que el pin del microcontrolador se utiliza únicamente para enviar la señal de activación.

El circuito de sensores y placa de desarrollo tiene como propósito establecer la comunicación simultánea de ambos sensores a la placa de desarrollo mediante el protocolo I2C.

El circuito de la batería integra un interruptor de encendido y apagado, que permite al usuario controlar la alimentación del dispositivo; y un conector JST, que proporciona la conexión

directa con la pantalla táctil XIAO Round Display que a su vez alimenta a todo el reloj inteligente.

Finalmente, en la Figura 3.4 se muestra el diagrama funcional de bloques del dispositivo, destacando los componentes del dispositivo y sus conexiones, haciendo una separación entre los elementos internos y externos del reloj. Los componentes dentro del recuadro negro son aquellos que están contenidos físicamente dentro de la carcasa del reloj, como los sensores, la batería, el circuito de la pantalla, el circuito vibrador y el microcontrolador. Por otro lado, los elementos que se encuentran fuera del recuadro negro corresponden a los componentes externos con los cuales el usuario interactúa directamente, como el interruptor de encendido y apagado, la pantalla táctil y el puerto de carga USB-C. Además, el diagrama indica las interconexiones entre los diferentes componentes con líneas. Se destaca que la conexión entre los sensores y el microcontrolador es mediante el protocolo I2C.

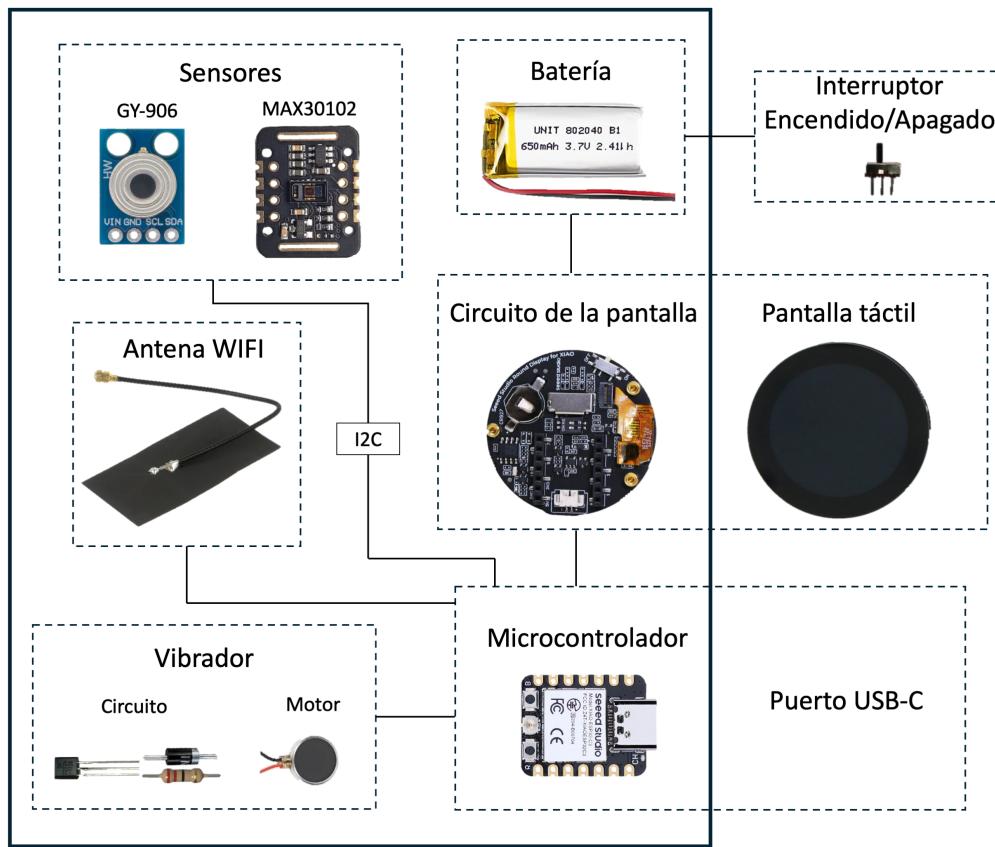


Figura 3.4: Diagrama funcional de bloques del reloj inteligente.

3.2 Construcción del dispositivo

La construcción del reloj inteligente se puede separar en tres etapas: La impresión de la carcasa, la conexión de los componentes electrónicos, junto con la integración y el montaje de todas las piezas en la carcasa.

Impresión de la carcasa: los archivos STL para la impresión de la carcasa los puedes encontrar en el repositorio del proyecto. Se recomienda usar una altura de capa de 0.1 mm para la impresión de las piezas.

Conexión de los componentes electrónicos: Las conexiones de los componentes electrónicos se llevan a cabo siguiendo los diagramas de Figura 3.3. Es importante seguir correctamente los diagramas para facilitar posteriormente su acomodo dentro de la carcasa.

Integración y montaje: Esta etapa se lleva a cabo una vez que se tengan listas las conexiones de los circuitos y las piezas de la carcasa impresas. En esta etapa se acomodan los componentes dentro la carcasa y se ensamblan las correas en la parte exterior del reloj inteligente.

En el artículo de Landa, Barrios del Valle, y Huelsz Lesbros (2024) (en revisión en la revista HardwareX), se presenta información detallada sobre el diseño y los pasos para la construcción del dispositivo.

La Figura 3.5 presenta el reloj inteligente completamente ensamblado y en funcionamiento, mostrando su ajuste en la muñeca del usuario, la interfaz gráfica del reloj y la funcionalidad práctica de su diseño.

3.3 Encuestas e interfaz

Una de las principales características del reloj inteligente desarrollado, es la capacidad de realizar encuestas de confort térmico de manera periódica y en condiciones reales con el propósito de recolectar datos que permitan estudiar la percepción de confort térmico en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. A continuación se describe la metodología de implementación de las encuestas, la lógica de la interfaz y las funcionalidades que permiten la interacción eficiente entre el usuario y el dispositivo.

1. Diseño de las encuestas

El reloj inteligente lleva a cabo encuestas simplificadas de confort térmico cada hora, en horarios específicos entre las 08:00 a.m. y las 09:00 p.m., programadas en las medias horas para alinearse con los horarios de actividades en el IER, permitiendo al usuario aclimatarse antes de responder la encuesta. Al llegar el momento de responder la encuesta, el dispositivo activa una alarma vibradora que consta de tres pulsos cortos en un lapso de un segundo, para notificar al usuario. Si el usuario ignora la alarma, el botón de ‘Encuesta’ permanece activo hasta que



Figura 3.5: Reloj inteligente en funcionamiento, mostrando la interfaz principal.

se complete la encuesta, si después de quince minutos la encuesta no ha sido respondida, la alarma se vuelve a activar una vez más. Si esta segunda notificación es ignorada, la alarma no se activa nuevamente hasta la próxima hora programada.

La encuesta consta de cinco preguntas. Las preguntas seleccionadas se basan en los lineamientos establecidos por la ISO 10551 (International Organization for Standardization 2019). Las cinco preguntas son las siguientes:

- **Vestimenta:** Presenta la pregunta: “¿Cuál es tu vestimenta actual?” donde el usuario puede seleccionar todas las prendas que esté usando de una lista predefinida. El objetivo de esta pregunta es calcular el nivel de aislamiento térmico del usuario (clo). La interfaz muestra el cálculo del valor de clo en la parte inferior de la pantalla a medida que se seleccionan o deseleccionan las prendas. La Tabla 3.7 muestra la lista de prendas disponibles para seleccionar con su respectivo valor de clo.

Tabla 3.7: Tabla de valores de aislamiento térmico (clo) para diferentes prendas de vestir.

Prenda	Valor de clo	Prenda	Valor de clo
Zapato	0.02	Shorts	0.06
Calzón	0.04	Vestido	0.15
Playera	0.09	Pantalón de mezclilla	0.23
Camisa	0.15	Abrigo	0.40
Pantalón	0.25	Gorro de lana	0.08
Calcetines	0.02	Bata de baño	0.30
Sombrero	0.05	Chaleco	0.10
Bufanda	0.10	Botas	0.10
Guantes	0.10	Impermeable	0.20
Chaqueta	0.30	Sandalias	0.02
Suéter	0.18	Brasier	0.02
Falda	0.14	Corpiño	0.03

- **Actividad:** Presenta la pregunta: “¿Qué actividad estás realizando?” donde el usuario selecciona una única opción de una lista predefinida de actividades, lo que corresponde a la tasa metabólica (met) del usuario. La Tabla 3.8 muestra la lista de actividades con su respectivo valor de met asociado.

Tabla 3.8: Tabla de valores de la tasa metabólica (met) para diferentes actividades físicas.

Actividad	Valor de met
Tomando clase sentado	1.3
Tomando clase de pie	1.8
Dando clase sentado	2.0

Actividad	Valor de met
Dando clase de pie	2.3
Caminando	2.9
Comiendo	1.5
Escribiendo	1.3
Trabajando en computadora	1.5
De pie en un laboratorio	2.0

- **Ubicación:** Presenta la pregunta: “¿Donde te encuentras?” donde el usuario selecciona una única opción de una lista predefinida de ubicaciones dentro del nuevo edificio del IER UNAM.
- **Escala de confort térmico:** Presenta la pregunta: “¿Cuál es tu sensación térmica en este momento?” donde el usuario puede elegir su sensación térmica actual en un rango de -3.0 a 3.0 en intervalos de 0.5. Cada valor tiene una descripción asociada de la sensación térmica. La Tabla 3.9 muestra la descripción asociada a cada uno de los valores del voto de sensación térmica.

Tabla 3.9: Escala del voto de sensación térmica con su descripción.

Valor de Sensación Térmica	Descripción
-3	Frío extremo
-2.5	Mucho frío
-2	Frío
-1.5	Ligeramente frío
-1	Fresco
-0.5	Ligeramente fresco
0	Neutro
0.5	Ligeramente templado
1	Templado
1.5	Ligeramente caluroso
2	Caluroso
2.5	Muy caluroso
3	Calor extremo

- **Aceptación térmica:** Presenta la pregunta: “¿Aceptas la sensación térmica actual?”, donde el usuario puede responder “Sí” o “No”. Esta pregunta busca evaluar si, independientemente de la sensación térmica reportada, el usuario la percibe como aceptable.

2. Interfaz de usuario

La interfaz del dispositivo ha sido diseñada utilizando la biblioteca LVGL, que ofrece herramientas para la creación de interfaces gráficas en microcontroladores integrados con pantallas táctiles. Cada una de las preguntas descritas previamente se presenta en una pantalla distinta, permitiendo al usuario navegar de manera intuitiva y sencilla. La interfaz se diseñó con los siguientes elementos:

- Navegación entre pantallas: Cada pantalla tiene botones laterales para avanzar o retroceder entre las preguntas de la encuesta. Una vez completadas todas las preguntas, el usuario puede presionar el botón “Finalizar”.
- Interacción con pantallas: Cada pantalla que presenta una lista predefinida de opciones cuenta con botones para moverse entre las diferentes opciones disponibles. Esto permite al usuario seleccionar fácilmente la opción deseada, asegurando una interacción fluida y precisa con el dispositivo.

3. Funcionalidades adicionales y validación

Una vez que se completa la encuesta, al pulsar el botón “Finalizar”, aparece un mensaje emergente que solicita al usuario mantenerse inmóvil mientras que los sensores de temperatura de la piel (GY-906) y de frecuencia cardíaca (MAX30102) llevan a cabo sus mediciones correspondientes, estas mediciones se realizan en un lapso de diez segundos. Los resultados se muestran al usuario para su validación. Si el usuario considera que los resultados son válidos, puede enviarlos; de lo contrario, tiene la opción de repetir las mediciones.

Los datos recolectados son enviados a la plataforma ThingsBoard para su almacenamiento y análisis posterior. Esta funcionalidad permite construir una base de datos que facilite el estudio del confort térmico en diferentes espacios y condiciones dentro del IER.

3.4 Calibración

Esta sección describe el proceso de calibración de los sensores GY-906 y MAX30102, utilizados para medir la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca, respectivamente.

1. Calibración del sensor GY-906

Para la calibración del sensor de temperatura GY-906, se emplea como referencia el termómetro infrarrojo AET-R1B1. Este termómetro está diseñado específicamente para medir la temperatura de la piel, mientras que el sensor GY-906 se configura con una emisividad de 0.98, valor que corresponde a la emisividad promedio de la piel humana. Las pruebas de calibración se realizan en la zona de la muñeca bajo condiciones ambientales controladas, sometiendo la

piel a variaciones de temperatura mediante el uso de compresas calientes y bolsas de hielo para generar un rango amplio de condiciones térmicas.

Para la campaña de medición, se configura el reloj inteligente con un botón que al ser pulsado inicia la medición del sensor GY-906. Este realiza 20 mediciones durante un intervalo de 10 segundos, calcula el promedio y almacena el resultado. De manera simultánea, la temperatura en el mismo punto es registrada manualmente utilizando el termómetro AET-R1B1. Tras esta campaña, se obtienen 115 pares de mediciones cuyos datos estadísticos se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Estadísticas de las mediciones del sensor GY-906 y el termómetro infrarrojo AET-R1B1.

Estadística	GY-906 [°C]	AET-R1B1 [°C]
Media	34.6	36.7
Desviación estándar	1.0	0.7
Mínimo	30.6	32.8
Máximo	36.9	38.6

Para el proceso de calibración se utilizan el Error Medio (EM), Error Absoluto Medio (EAM) y la técnica de Z-score. El EM se define como una métrica para cuantificar la desviación media del sensor (GY-906) respecto a la referencia (AET-R1B1). Un valor positivo de EM indica que las lecturas del sensor son superiores a las de la referencia, mientras que un valor negativo indica que las lecturas del sensor son inferiores a las de la referencia. El EM se calcula mediante la Ecuación 3.1.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{s,i} - X_{r,i}) \quad (3.1)$$

donde $X_{s,i}$ y $X_{r,i}$ son las mediciones hechas con el sensor y la referencia, respectivamente, correspondientes a la i -esima observación en el conjunto de datos. El Error Absoluto Medio (EAM) se define como el promedio de las diferencias absolutas entre las mediciones del sensor y la referencia, este no considera el signo de las desviaciones. El EAM se calcula mediante la Ecuación 3.2.

El **Error Absoluto Medio (EAM)** mide el promedio de las diferencias absolutas entre las mediciones del sensor y la referencia, sin considerar el signo de las desviaciones, y se calcula como:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{s,i} - X_{r,i}| \quad (3.2)$$

Por otro lado, el Z-score se define como métrica empleada para identificar valores atípicos en un conjunto de datos. Representa la cantidad de desviaciones estándar que un valor se encuentra por encima o por debajo de la media. Se calcula mediante la Ecuación 3.3.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (3.3)$$

donde X es el valor del dato, μ es la media del conjunto de datos y σ es la desviación estándar. Para emplear la técnica Z-score e identificar valores atípicos se debe definir un umbral, usualmente fijado en ± 1.5 , ± 2 o ± 3 desviaciones estándar. Los valores obtenidos por el Z-score del conjunto de datos que excedan este umbral son considerados atípicos.

Se realiza un análisis inicial entre las mediciones obtenidas por el termómetro y el sensor GY-906. Los resultados estadísticos clave son los siguientes:

- Error Medio (EM): -2.1°C
- Error Absoluto Medio (EAM): 2.1°C

La calibración se lleva a cabo de dos maneras, sin eliminar valores atípicos y eliminando valores atípicos para comparar sus resultados.

Sin eliminar valores atípicos

Se aplica una calibración mediante un modelo de regresión lineal, obteniéndose los siguientes valores clave:

- Pendiente: 0.54 ± 0.04
- Intercepto: $18.06 \pm 1.42^{\circ}\text{C}$

Con estos valores, se ajustan las mediciones del sensor empleando la función de regresión lineal. Al comparar los datos ajustados con las mediciones del termómetro, se obtienen los siguientes errores:

- EM: $3.2 \times 10^{-15}^{\circ}\text{C}$
- EAM: 0.3°C

Eliminando valores atípicos

Posteriormente, se hace un análisis para la detección de valores atípicos con la técnica de Z-score con un umbral de ± 1.5 . Se identifican y se excluyen 8 valores atípicos. Con este nuevo conjunto de datos se aplica una calibración mediante un modelo de regresión lineal y se obtienen los siguientes valores clave:

- Pendiente: 0.72 ± 0.04
- Intercepto: $11.7 \pm 1.38^{\circ}\text{C}$

Mientras que al emplear la función de regresión linea obtenida se obtienen los siguientes errores:

- EM: $-2.9 \times 10^{-15}^{\circ}\text{C}$
- EAM: 0.3°C

Debido a que tanto eliminando valores atípicos como sin eliminarlos se llegan a resultados similares, se opta por elegir la calibración sin eliminar outliers. La Figura 3.6 muestra la comparación entre las mediciones del sensor GY-906 y del termómetro AET-R1B1 antes y después de la calibración. En la figura a) se observa el conjunto de datos original (color azul) junto con los valores atípicos (color naranja) detectados por la técnica de Z-score, así como las lineas de regresión encontradas para el conjunto de datos original y el conjunto de datos sin outliers. En la figura b) se observa el conjunto de datos calibrado con la función de regresión lineal obtenida con el conjunto de datos completo.

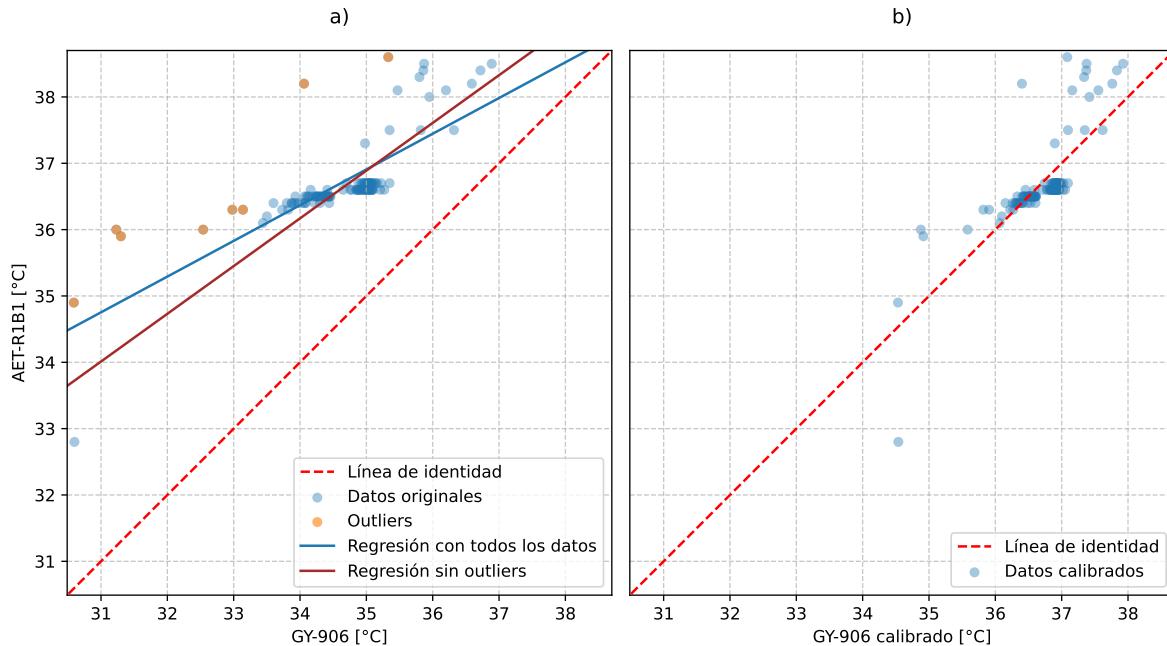


Figura 3.6: Análisis de mediciones del sensor GY-906 y el termómetro AET-R1B1: a) identificación de valores atípicos y regresiones lineales con datos originales y sin valores atípicos, b) datos calibrados utilizando la regresión lineal del conjunto de datos original.

2. Calibración del Sensor MAX30102

Para la calibración del sensor MAX30102, se utiliza como referencia un oxímetro de pulso Yonker YK-81C, que ofrece una precisión de ± 1 bpm. Dado que las mediciones del reloj inteligente se realizan en intervalos de 10 segundos, este mismo periodo se emplea durante el

proceso de calibración. El sensor se configura mediante Arduino y la librería de SparkFun para los sensores MAX3010X. La calibración se enfoca en la configuración de varios parámetros ajustables buscando disminuir el error, los parámetros son: `ledBrightness`, `sampleAverage`, `ledMode`, `sampleRate`, `pulseWidth`, `adcRange` y `RATE_SIZE`.

- **ledBrightness** (0 - 255): Controla la intensidad de los LED infrarrojo y rojo, afectando la penetración de la luz en el tejido de la piel y, en consecuencia, la calidad de la señal obtenida. Un valor más alto aumenta la intensidad de la luz, mejorando la detección en condiciones de baja perfusión, pero incrementa el consumo de energía.
- **sampleAverage** (1, 2, 4, 8, 16, 32): Define cuántas muestras se promedian antes de almacenarse en la memoria FIFO. Un mayor promedio reduce el ruido y estabiliza la señal, a costa de reducir la capacidad de respuesta a cambios rápidos.
- **ledMode** (1 - 3): Establece el modo de operación del sensor. El valor 1 utiliza solo el LED rojo, el valor 2 emplea tanto el LED rojo como el infrarrojo para medir la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno, y el valor 3 incluye un tercer LED verde en algunos modelos de la serie MAX3010X.
- **sampleRate** (50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1600, 3200 Hz): Define la frecuencia con la que se toman las muestras de la señal, afectando la resolución temporal y la capacidad de captar variaciones rápidas en la frecuencia cardíaca. Una mayor frecuencia proporciona una mejor resolución temporal, pero puede aumentar el ruido en la señal, por lo que la implementación de filtros digitales adicionales podría ser necesario para el procesamiento de la señal.
- **pulseWidth** (69, 118, 215, 411 µs): Controla la duración del pulso de luz emitido por los LED. Un mayor ancho de pulso mejora la resolución de las mediciones, pero también incrementa el consumo de energía del sensor y la cantidad de luz reflejada, lo cual puede saturar el ADC en ciertos tipos de piel.
- **adcRange** (2048, 4096, 8192, 16384 nA): Establece el rango de entrada del convertidor analógico-digital. Aumentar el rango permite al sensor manejar señales más intensas sin saturarse, mientras que un rango menor mejora la sensibilidad para señales débiles.
- **RATE_SIZE** (tamaño del búfer): Determina el tamaño del búfer para el cálculo de la frecuencia cardíaca. Este parámetro afecta la cantidad de datos utilizados para calcular la frecuencia cardíaca promedio. Aumentar el tamaño del búfer de 4 a 6 mejora la precisión de las lecturas, ya que permite reducir la variabilidad entre mediciones consecutivas y suavizar fluctuaciones causadas por ruido o movimiento, logrando cálculos más consistentes.

Inicialmente, los parámetros se configuran con valores predeterminados, pero los resultados muestran un Error Absoluto Medio (EAM) de 18.5 bpm respecto al oxímetro de referencia, lo cual no es aceptable. Se decide utilizar únicamente el EAM porque mide la magnitud promedio del error, sin distinguir entre mediciones que están por encima o por debajo del estándar, lo cual es ideal para evaluar la exactitud general del sensor. Para disminuir el error, se exploran valores extremos del parámetro `RATE_SIZE`, variando desde 1 hasta 100. Con `RATE_SIZE` igual a 1, se obtienen resultados rápidos pero poco exactos, mientras que con `RATE_SIZE` igual a 100,

se logran errores bajos, pero se requieren múltiples intervalos de 10 segundos, incrementando el tiempo total de medición. Para encontrar un equilibrio entre exactitud y tiempo de medición, se evalúan valores intermedios de RATE_SIZE entre 4 y 16. El valor encontrado es RATE_SIZE igual a 6, lo cual reduce el EAM a 4.4 bpm.

La Tabla 3.11 muestra el error absoluto medio (EAM) obtenido para diferentes valores de RATE_SIZE entre 4 y 16, destacando que el mejor valor para RATE_SIZE es 6.

Tabla 3.11: Error Absoluto Medio (EAM) para diferentes valores de RATE_SIZE en el MAX30102.

Número de Mediciones	RATE_SIZE	EAM (bpm)
20	4	18.5
20	6	4.4
20	8	12.0
20	10	19.6
20	12	7.7
20	14	13.6
20	16	15.8

Posteriormente, con RATE_SIZE fijado en 6, se ajusta el valor de sampleAverage de 4 a 8, logrando un EAM de 3.6 bpm, lo cual representa una mejora en la señal. La configuración final incluye los siguientes valores: ledBrightness en 31, sampleAverage en 8, ledMode en 2, sampleRate en 400, pulseWidth en 411, adcRange en 2048 y RATE_SIZE en 6.

3.5 Lógica de programación

A continuación, se describe el funcionamiento general del reloj inteligente, detallando la estructura del programa y la función de cada uno de los archivos que componen el proyecto desarrollado en Arduino. También se presentan los diagramas de flujo de los procesos clave, como la función `actualizar_hora` y el procedimiento para responder una encuesta y medir la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca. Además, se destacan aspectos relevantes, como los horarios programados para las encuestas y las estrategias implementadas para el ahorro de la batería del reloj inteligente.

1. Descripción de la funcionalidad de los archivos del proyecto

El proyecto se desarrolla en Arduino, empleando principalmente la librería LVGL para el diseño de la interfaz gráfica (LVGL Project 2024). Consta de varios archivos de código, cada uno con una función específica. A continuación, se ofrece una breve descripción de cada uno de ellos:

1. **Proyecto_confort.ino:** Este es el archivo principal del proyecto. En él se ejecuta el código principal, se incluyen las librerías necesarias y se declaran tanto las variables como las funciones usadas.
2. **ui.c y ui.h:** Estos archivos se encargan de la ejecución y configuración general de la interfaz gráfica. El archivo header (**ui.h**) contiene las declaraciones de funciones y variables utilizadas en **ui.c**.
3. **ui_Inicio.c:** Configura la pantalla principal del reloj. En la pantalla se muestra la hora actual, un contador regresivo que indica cuánto tiempo falta hasta el momento de contestar la siguiente encuesta, y el botón para iniciar la encuesta cuando esta está disponible.
4. **ui_Clo.c:** Configura la pantalla para la pregunta sobre el nivel de aislamiento térmico de la ropa que usa el usuario. Este archivo contiene un diccionario con distintas prendas de ropa con sus respectivos valores de aislamiento térmico.
5. **ui_Met.c:** Configura la pantalla para la pregunta sobre el nivel de actividad metabólica del usuario. Este archivo contiene un diccionario con diversas actividades y sus respectivos valores de nivel metabólico.
6. **ui_Ubicacion.c:** Configura la pantalla para la pregunta sobre la ubicación del usuario. Este archivo contiene una lista de ubicaciones del lugar donde se llevan a cabo las campañas de mediciones.
7. **ui_Sensacion.c:** Configura la pantalla para la pregunta sobre el nivel de sensación térmica. Este archivo contiene un diccionario con la escala de sensación térmica, que va de -3.0 a 3.0 y la descripción correspondiente para cada nivel.
8. **ui_Aceptacion.c:** Configura la pantalla destinada a la pregunta de aceptación térmica.
9. **ui_events.c y ui_events.h:** Contienen todas las funciones creadas específicamente para el proyecto, tanto las relacionadas con la gestión de eventos generados por la interfaz como otras funciones generales del programa. El archivo de encabezado (**ui_events.h**) contiene las declaraciones de las funciones y variables utilizadas en **ui_events.c**.
10. **ui_helpers.c y ui_helpers.h:** Contienen funciones auxiliares de la librería LVGL, diseñadas para facilitar la implementación y el manejo de la interfaz gráfica. El archivo header (**ui_helpers.h**) contiene las declaraciones de funciones y variables utilizadas en **ui_helpers.c**.

El reloj está programado para realizar encuestas de confort térmico cada hora entre las 08:30 a.m. y las 09:30 p.m. Programar las encuestas para realizarse en el minuto 30 de cada hora permite proporcionar al usuario un periodo de adaptación térmica previo a responder la primera encuesta, asumiendo que el usuario entra a un espacio o salón a la hora en punto. Esto se debe a que las actividades en el IER suelen iniciar en horas exactas, lo que asegura que los usuarios tengan tiempo suficiente para adaptar al lugar su sensación térmica antes de

contestar la primera encuesta.

2. Descripción de la función actualizar hora

La función denominada `actualizar_hora`, que se encuentra en el archivo `ui_events.c`, se encarga de actualizar la hora en pantalla, además habilita o desahabilita el botón para realizar la encuesta según el horario o si esta ya fue o no contestada. Esta función también es la encargada de emitir la alarma para alertar al usuario la disponibilidad de una nueva encuesta. El diagrama de flujo de esta función se presenta en la Figura 3.7.

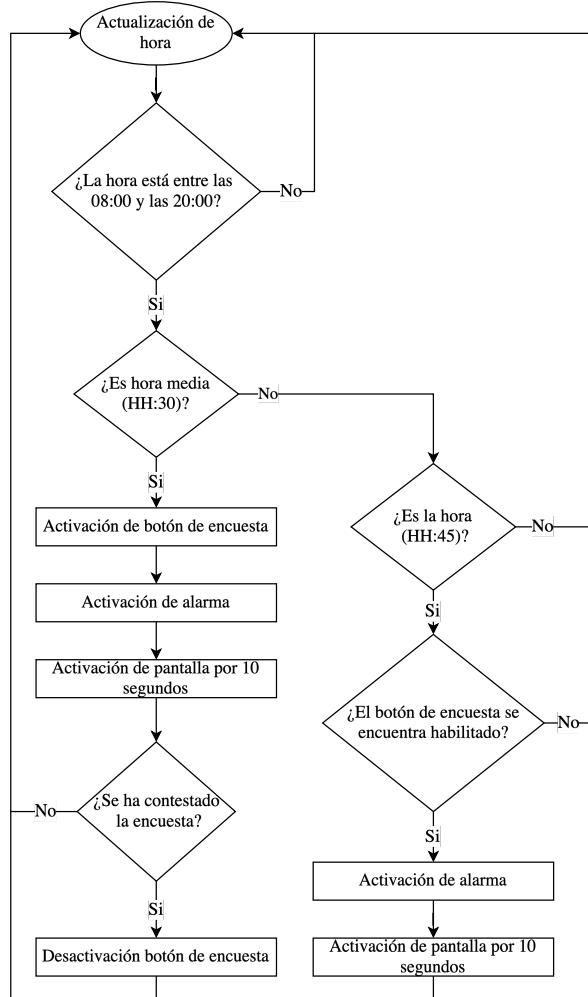


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la función `actualizar hora`.

3. Descripción del proceso para contestar una encuesta, medir la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca, y mandar los datos a ThingsBoard

Cuando el usuario presiona el botón para iniciar la encuesta, se da inicio a un proceso que consta de varias etapas: primero, el usuario responde a las preguntas de la encuesta; luego, se registran las variables fisiológicas; seguidamente, se validan las mediciones obtenidas; y, finalmente, se envían los datos a la plataforma ThingsBoard.

Es importante destacar que, una vez enviada la encuesta, las respuestas y mediciones no se reinician automáticamente. Esto permite que, al iniciar una nueva encuesta, el reloj conserve las respuestas de la última encuesta realizada. De esta manera, el usuario puede optar por mantener las mismas respuestas o modificarlas según sea necesario. Esta funcionalidad tiene dos objetivos principales: en primer lugar, reducir el tiempo necesario para responder encuestas de manera consecutiva; y, en segundo lugar, permitir al usuario observar cómo evolucionan sus respuestas a lo largo del día.

En caso de que las mediciones de los sensores no sean aceptadas por el usuario, estas se realizan nuevamente. El diagrama de flujo que describe el proceso de la encuesta se presenta en la Figura 3.8.

4. Estrategias para la optimización del consumo de energía del reloj inteligente

Para optimizar el consumo de energía, se implementan dos estrategias principales. La primera consiste en mantener la pantalla del reloj apagada mientras el dispositivo está en reposo. Si la pantalla está encendida y no se detecta actividad durante más de 10 segundos, se apaga automáticamente. No obstante, el usuario puede reactivarla en cualquier momento con un simple toque para consultar la hora. La segunda estrategia consiste en mantener apagados el sensor de temperatura (GY-906) y el sensor de frecuencia cardíaca (MAX30102), activándose únicamente durante el proceso de medición de las variables fisiológicas.

3.6 Instrucciones de uso

El procedimiento de configuración e interacción con el reloj inteligente se puede dividir en cuatro etapas. La primera etapa consiste en la preparación del entorno de desarrollo, que implica la instalación del software Arduino con las paquetes y bibliotecas necesarias, así como la configuración del dispositivo en la plataforma ThingsBoard. La segunda etapa se centra en el registro de los datos del usuario mediante un formulario de Google. La tercera etapa corresponde a la configuración y carga del código a la placa de desarrollo. Por último, la cuarta etapa consiste en las instrucciones generales para interactuar con el dispositivo a través de sus diferentes pantallas.

1. Preparación del entorno de desarrollo

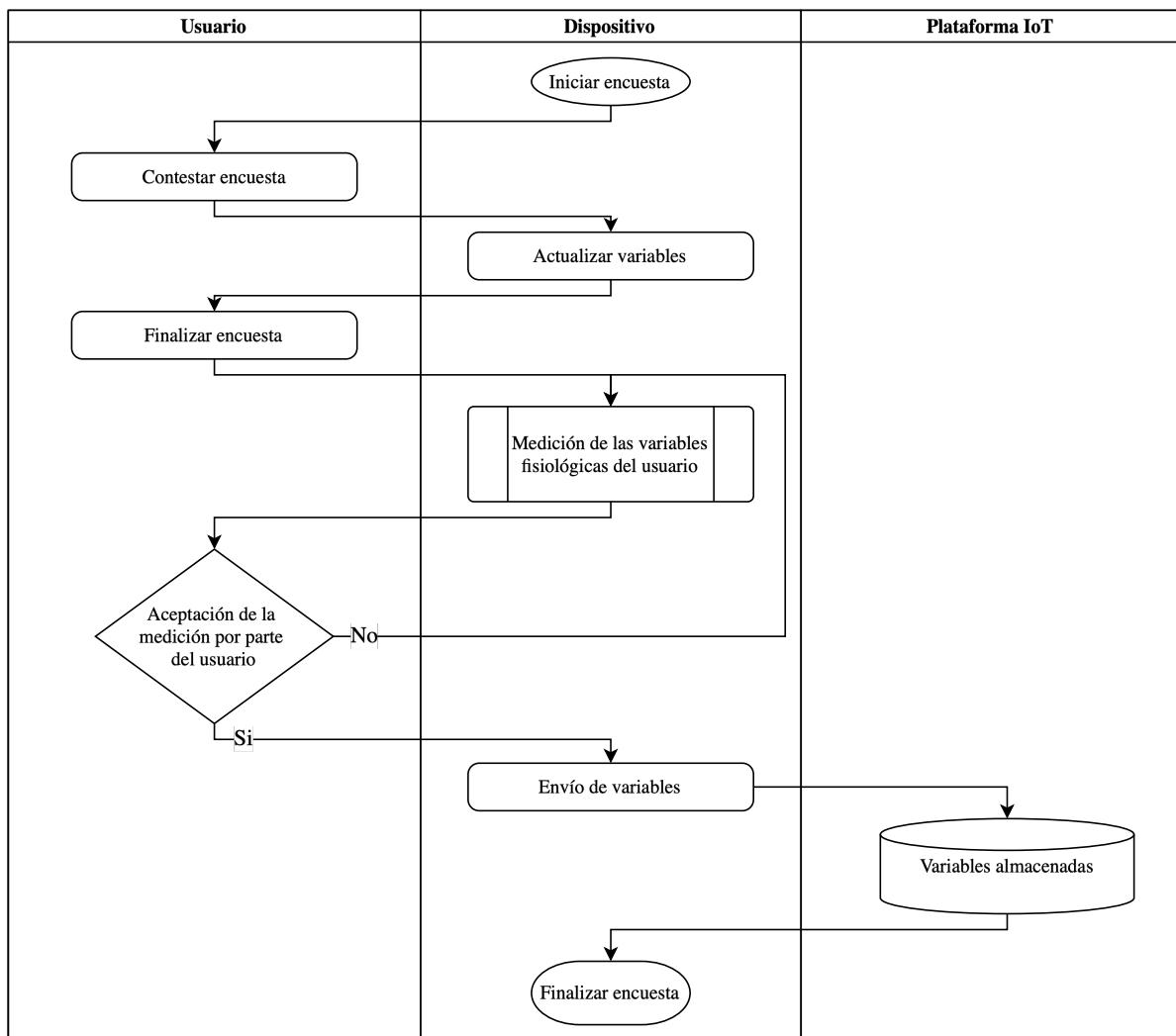


Figura 3.8: Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.

Para iniciar, se instala la versión más reciente del Arduino IDE, disponible para descarga en su sitio oficial. A continuación, se agrega el paquete de placas ESP32 al entorno del Arduino IDE. Para ello, se abre el programa, se selecciona la opción “Archivo” y luego “Preferencias”. En el cuadro de texto “URLs adicionales para el gestor de tarjetas”, se inserta la URL:

```
https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino  
-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json
```

tal como se muestra en la Figura 3.9, la flecha roja en la figura señala al recuadro en donde debe colocarse la URL.

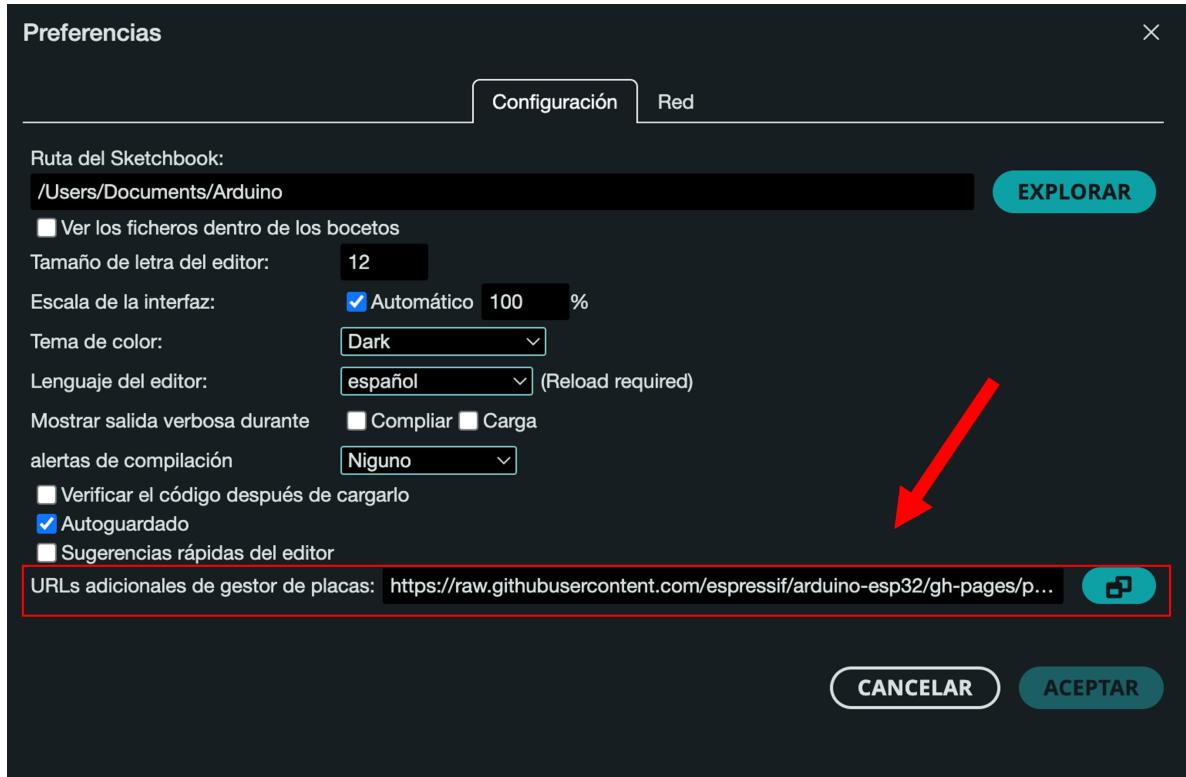


Figura 3.9: Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.

A continuación, se accede al Gestor de placas dando click en “Herramientas”, seguido de “Placa” y, finalmente, “Gestor de placas”. En el gestor, se busca “esp32” y se procede a instalar el paquete esp32 de Espressif Systems, como se muestra en la Figura 3.10. La flecha roja en la figura señala el paquete que debe instalarse.

Posteriormente, se configuran las librerías necesarias para el proyecto. Es importante instalar las librerías en las versiones especificadas para garantizar el correcto funcionamiento del reloj

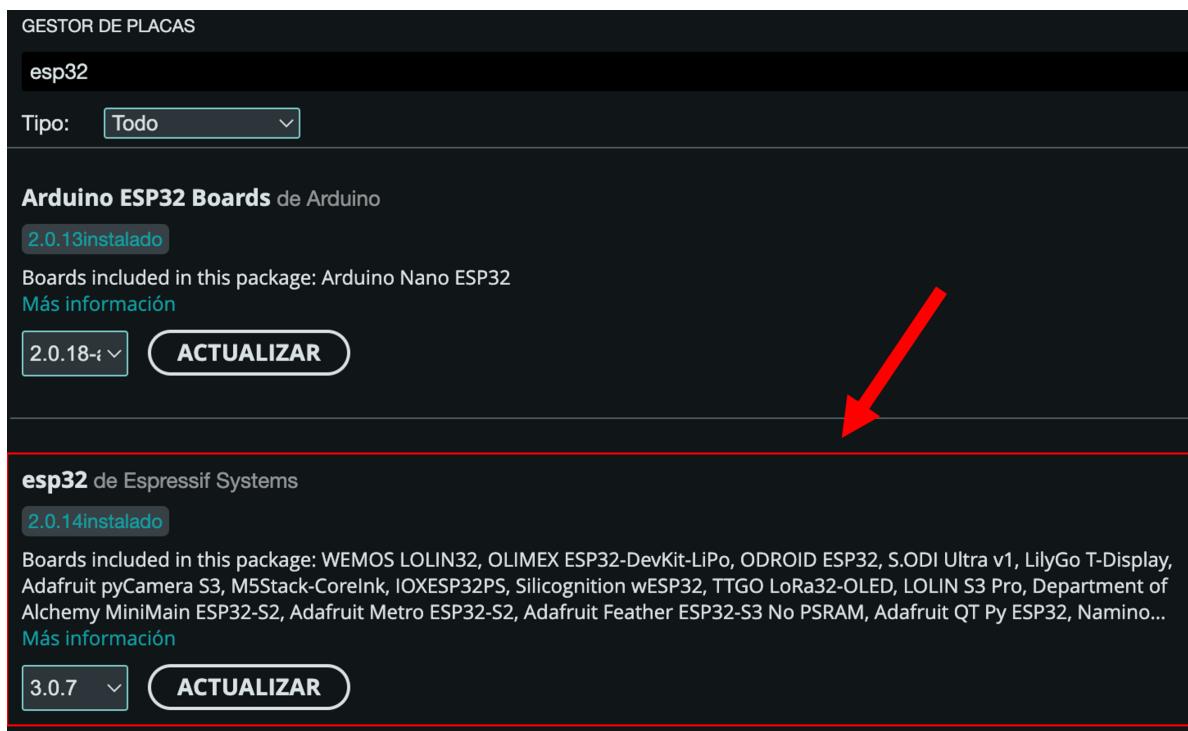


Figura 3.10: Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.

inteligente. La Tabla 3.12 presenta las librerías requeridas junto con las versiones recomendadas. Estas librerías pueden instalarse manualmente, una por una, o, de manera alternativa, se puede descargar la carpeta llamada “Arduino” del repositorio del proyecto y copiarla en la carpeta de librerías existente en la máquina local, que generalmente se encuentra en el directorio “Documentos”.

Tabla 3.12: Librerías utilizadas y sus versiones recomendadas para el funcionamiento del reloj inteligente.

Librería	Versión instalada
Adafruit BusIO	1.16.1
Adafruit GFX Library	1.11.9
Adafruit MLX90614 Library	2.1.5
ArduinoHttpClient	0.6.0
ArduinoJson	7.0.4
I2C BM8563 RTC	1.0.4
lvgl	8.3.10
Seeed Arduino Round display	1.0.0
SparkFun MAX3010x Pulse and Proximity Sensor Library	1.1.2
TBPubSubClient	2.9.4
TFT_eSPI	2.5.34
ThingsBoard	0.13.0

Una vez configurado el entorno de Arduino, es necesario registrar el dispositivo en la plataforma IoT ThingsBoard instalada en los servidores del IER. Se requiere una cuenta activa e iniciar sesión en el servidor de ThingsBoard del IER. Una vez dentro, se accede a la sección “Devices” y se selecciona “Add new device”. En la ventana de configuración, es fundamental asignar un nombre que identifique claramente el reloj inteligente asociado al usuario. Además, se puede optar por utilizar el token generado automáticamente por ThingsBoard o definir uno personalizado. Este token es indispensable para enlazar el reloj inteligente con la plataforma.

2. Registro de datos del usuario

Al asignar el reloj inteligente a un usuario, es necesario recopilar información básica sobre este. Para ello, se diseña un formulario que debe ser completado con los datos del usuario una vez que se le ha asignado el dispositivo. Las preguntas incluidas en el formulario son las siguientes:

- Nombre y apellidos
- Indique su fecha de nacimiento
- ¿Cuál es su peso? [kg]
- ¿Cuál es su altura? [m]

- ¿Cuál es su sexo?
- ¿Con qué frecuencia a la semana sueles estar en espacios con aire acondicionado?
- ¿Cuánto tiempo llevas viviendo en Temixco?
- Nombre del dispositivo
- Token
- ID del dispositivo

El registro de estos datos al inicio de una campaña de medición permite generar una base de datos más robusta y contextualizada. Esto es importante, ya que la percepción de confort térmico personal puede estar influenciada por factores como la edad, peso, altura, sexo, la exposición frecuente a espacios con aire acondicionado y la adaptación del usuario al entorno donde reside.

El formulario se desarrolla utilizando la plataforma Google Forms, lo que facilita su acceso y su rápida respuesta por parte de los usuarios. Además, esta herramienta permite almacenar automáticamente las respuestas en un archivo con formato .xlsx, el cual puede ser procesado de diversas maneras, ya sea con programas de hojas de cálculo como Excel o mediante herramientas de análisis de datos en Python. Se puede acceder a un formulario de muestra en el siguiente enlace:

<https://forms.gle/ZsjcZm1dNc3Wr1so7>

3. Configuración y carga del código

El código completo del proyecto se encuentra disponible en la carpeta Proyecto_confort dentro del repositorio. Para inicializar el dispositivo, es necesario realizar configuraciones básicas únicamente en el archivo `Proyecto_confort.ino`. Estas configuraciones incluyen la conexión a la red Wi-Fi donde se utilizará el dispositivo, modificando las siguientes líneas de código:

```
const char* ssid = "RED_WIFI";
const char* password = "CLAVE_WIFI";
```

Asimismo, se debe configurar el dispositivo para su integración con la plataforma ThingsBoard, especificando el token del dispositivo y la dirección del servidor, mediante la edición de las siguientes líneas:

```
const char* TOKEN = "TOKEN_DISPOSITIVO";
const char* THINGSBOARD_SERVER = "URL_SERVIDOR";
```

Una vez realizadas estas configuraciones, el código se carga en la placa de desarrollo seleccionando la opción de placa XIAO_ESP32C3 en el Arduino IDE.

4. Instrucciones generales de interacción con el reloj inteligente

El reloj inteligente se carga a través de un puerto USB-C. Es importante que el interruptor del dispositivo permanezca en posición de encendido durante la carga, ya que, de lo contrario, no será posible cargar la batería.

La interfaz del reloj está compuesta por siete pantallas principales y dos ventanas emergentes. La pantalla principal (Figura 3.11(a)) permite al usuario visualizar la hora actual, el tiempo restante para la siguiente encuesta y el porcentaje de batería disponible.

Cuando se habilita el botón para responder una encuesta, se muestra la pantalla de encuesta (Figura 3.11(b)), que guía al usuario a través de las preguntas del formulario. Cada una de las preguntas está asociada con una pantalla específica:

- La primera pregunta, relacionada con la vestimenta actual del usuario, se visualiza en la Figura 3.11(c).
- La segunda pregunta, relacionada con la actividad que el usuario está realizando en ese momento, se muestra en la Figura 3.11(d).
- La tercera pregunta, relacionada con la ubicación actual del usuario, aparece en la Figura 3.11(e).
- La cuarta pregunta, relacionada con la sensación térmica del usuario, se despliega en la Figura 3.11(f).
- La quinta y última pregunta, relacionada con la aceptación de la sensación térmica, se presenta en la Figura 3.11(h).

Adicionalmente, el reloj cuenta con dos ventanas emergentes. La primera ventana emergente (Figura 3.11(i)) se activa al finalizar la encuesta e indica que los sensores han comenzado a realizar mediciones. La segunda ventana emergente (Figura 3.11(j)) se muestra una vez que los sensores han terminado de medir, presentando los resultados al usuario. En esta pantalla, el usuario puede aceptar los resultados y enviarlos a ThingsBoard o rechazarlos para repetir las mediciones. Es importante mencionar que cada pantalla de la encuesta cuenta con botones que permiten navegar entre las pantallas y seleccionar las opciones según las necesidades del usuario.

3.7 Validación del funcionamiento del reloj inteligente

Los datos generados por el reloj inteligente se almacenan en la plataforma ThingsBoard, desde donde pueden descargarse para su posterior análisis. Para facilitar este proceso, se diseña una libreta de Jupyter, disponible en la carpeta descarga_thingsboard del repositorio. Esta libreta, denominada `Descarga_datos.ipynb`, está programada en Python y requiere realizar configuraciones previas para su ejecución.

Requisitos previos

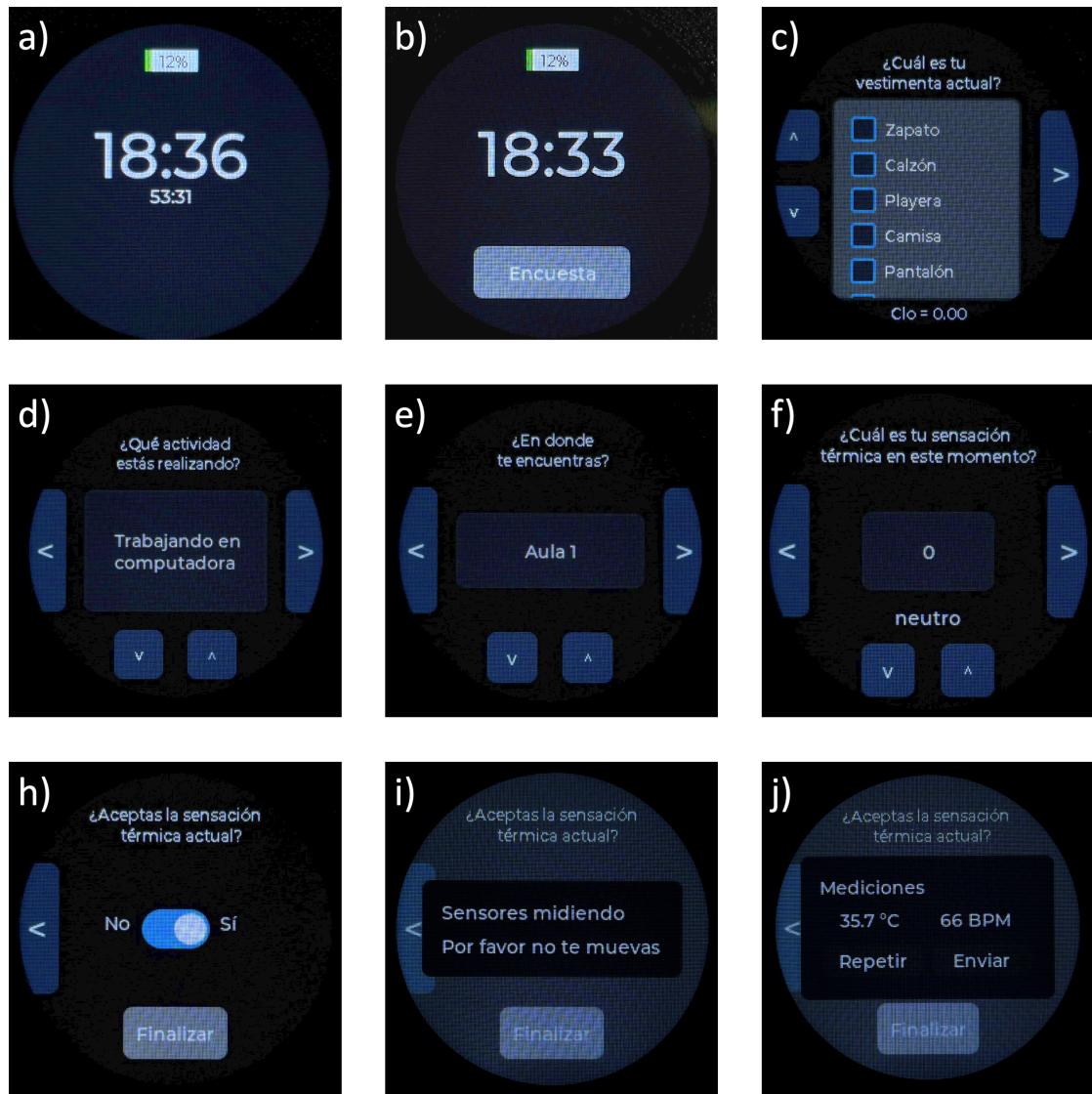


Figura 3.11: Interfaz del reloj inteligente: (a) pantalla principal, (b) activación de la encuesta, (c) pregunta sobre la vestimenta actual, (d) pregunta sobre la actividad realizada, (e) pregunta sobre la ubicación, (f) pregunta sobre la sensación térmica, (g) pregunta sobre la aceptación de la sensación térmica, (h) ventana emergente indicando el inicio de las mediciones y (j) ventana emergente con los resultados de las mediciones.

Es necesario instalar la herramienta `git`, la cual puede descargarse desde el siguiente enlace: descarga git. Asimismo, se requiere la instalación de las siguientes librerías de Python: `matplotlib`, `datetime`, `pandas` e `iertools`. Esta última puede instalarse mediante el comando:

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

Además, es necesario contar con el archivo `.xlsx` generado a partir del formulario completado con la información del usuario.

Con las librerías instaladas, se procede a configurar el archivo `config.ini`, en el cual deben ingresarse las credenciales del dispositivo y de la plataforma ThingsBoard. Los parámetros a configurar en este archivo son los siguientes:

- **dispositivo:** Nombre del dispositivo, utilizado para identificarlo en la libreta
- **token:** Token del dispositivo en ThingsBoard
- **device_id:** ID del dispositivo
- **tenant:** Cuenta de usuario en ThingsBoard
- **password:** Contraseña de la cuenta
- **host:** Dirección del servidor de ThingsBoard
- **port:** Puerto del servidor

Configuración de la libreta

Dentro de la libreta `Descarga_datos.ipynb`, se debe indicar:

- La ruta de ubicación del archivo `.xlsx` del formulario, como se muestra a continuación:

```
formulario = '../data/Formulario.xlsx'
```

- El nombre del dispositivo, tal como está definido en el archivo `config.ini`:

```
nombre_dispositivo = 'Nombre del dispositivo'
```

- El rango de fechas para la descarga de datos:

```
fecha1 = parse("2024-01-01")
fecha2 = datetime.datetime.now()
```

Descarga y procesamiento de datos

Una vez configurada la libreta, se realiza la descarga de los datos almacenados en ThingsBoard dentro del rango de fechas especificado. Posteriormente, se genera un dataframe que combina estas mediciones con las respuestas obtenidas del formulario. Este proceso permite validar que el dispositivo es capaz de registrar encuestas, medir variables fisiológicas y enviar correctamente los datos a ThingsBoard para su almacenamiento.

Resultados de la validación

Para validar el funcionamiento del reloj inteligente, se realizaron dos campañas de medición, cada una con un individuo distinto, obteniendo un total de 60 mediciones. La Tabla 3.13 proporciona una muestra que incluye tres mediciones correspondientes al primer individuo y tres mediciones del segundo individuo. En la tabla, la columna correspondiente a la frecuencia de uso de espacios con aire acondicionado (F) se muestra de forma numérica. Esto se debe a que los valores de esta columna están codificados según un diccionario, cuyo propósito es simplificar la visualización de los datos. La equivalencia de este diccionario es la siguiente:

```
diccionario_frecuencia = {
    "Todos los días": 3,
    "3 a 5 días a la semana": 2,
    "1 a 3 días a la semana": 1,
    "Nunca": 0
}
```

Tabla 3.13: Conjunto de datos de cinco encuestas térmicas y mediciones, que incluye el nivel de aislamiento de la ropa (I_{cl}), la tasa metabólica (M_r), la ubicación, el voto de sensación térmica (TSV), la aceptación térmica (TA), la temperatura de la piel de la muñeca (T_w), la frecuencia cardíaca (H_r), la edad, el peso (W), la altura (H), el sexo, la frecuencia de uso de espacios con aire acondicionado (F) y el identificador del individuo que está usando el reloj inteligente (I).

Fecha	I_{cl}	M_r	Ubicación	TSV	TA	T_w	H_r	Edad	W	H	Sexo	F	I
AAAA-MM-DD HH:MM	clo	met	-	-	-	°C	bpm	años	kg	m	-	-	-
2024-07-17 13:32	0.21	1.5	Aula 1	0.0	Sí	34.3	66	28	65	1.70	M	1	1
2024-07-17 14:32	0.21	1.5	Aula 1	0.0	Sí	35.4	77	28	65	1.70	M	1	1
2024-07-17 16:45	0.21	2.0	Aula 1	2.0	No	35.2	85	28	65	1.70	M	1	1
...

Fecha	<i>AAAA-MM-DD HH:MM</i>	<i>I_{cl}</i> <i>clo</i>	<i>M_r</i> <i>met</i>	Ubicación	TSV	TA	<i>T_w</i> °C	<i>H_r</i> bpm	Edad <i>años</i>	<i>W</i> kg	<i>H</i> m	Sexo	<i>F</i>	<i>I</i>
2024-11-13 08:46	0.48	1.3	Aula 2	0.0	Sí	33.6	62	46	73	1.70	M	1	2	
2024-11-14 16:45	0.40	1.3	Aula 2	0.0	Sí	36.9	64	46	73	1.70	M	1	2	
2024-11-14 20:45	0.40	1.3	Aula 2	0.0	Sí	35.0	93	46	70	1.70	M	1	2	

4 Conclusiones

Este proyecto presenta el diseño, desarrollo y validación de un reloj inteligente basado en tecnologías abiertas, capaz de recopilar datos de confort térmico. El reloj realiza encuestas simplificadas y mide la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca, integrando esta información con la plataforma IoT ThingsBoard. El uso de hardware de código abierto, como la placa de desarrollo XIAO ESP32C3 y los sensores GY-906 (temperatura de la piel) y MAX30102 (frecuencia cardíaca) garantiza que el dispositivo sea replicable y adaptable a diversas investigaciones. Además, el reloj cuenta con una alarma vibrante que notifica al usuario cuando debe responder una nueva encuesta, promoviendo la regularidad y periodicidad en la recopilación de datos. En pruebas realizadas en Temixco, Morelos, el reloj logró recopilar y enviar cincuenta y dos mediciones a ThingsBoard en una campaña de cinco días, demostrando su funcionalidad en condiciones reales.

4.1 Contribuciones del proyecto

1. Diseño basado en tecnologías abiertas

El reloj inteligente se desarrolla por completo utilizando tecnologías abiertas, tanto en hardware como en software. Para el hardware, el dispositivo integra componentes como la placa de desarrollo XIAO ESP32C3, el sensor MAX30102, el sensor GY-906, la pantalla XIAO Round Display y otros componentes electrónicos. Para el software, el dispositivo se programa utilizando Arduino IDE, empleando lenguajes de programación como Arduino y C++. Los datos recopilados se envían a ThingsBoard, una plataforma de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) de código abierto, para su almacenamiento.

Todo el proyecto se encuentra disponible en un repositorio de GitHub bajo la licencia GPL-3.0, lo que garantiza que cualquier persona pueda replicar, modificar o colaborar en el desarrollo del dispositivo, fomentando la accesibilidad y colaboración en investigaciones futuras relacionadas con el confort térmico.

2. Uso en condiciones reales

El reloj inteligente está diseñado para realizar campañas de medición prolongadas en condiciones reales, recolectando datos de usuarios en sus entornos habituales sin la necesidad de equipos complejos. Para facilitar la recolección de datos de manera periódica, el reloj incluye una alarma vibrante que notifica al usuario cuando es momento de responder una encuesta simplificada de confort térmico. Los datos recopilados por el reloj se combinan con información proporcionada en el formulario de registro generando una base de datos contextualizada que permite correlacionar las respuestas del usuario con las condiciones ambientales reales. Para ello, en el Instituto de Energías Renovables (IER) se está trabajando en un ecosistema de dispositivos que miden variables ambientales (temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento), además de que se cuenta con una estación meteorológica que puede proporcionar la información de las variables AMBIENTALES requeridas.

3. Bajo costo

La aplicación Cozie, si bien ofrece una solución para el levantamiento de encuestas en relojes inteligentes, su uso está restringido a los Apple Watch y algunos modelos de Fitbit. Además, estos dispositivos tienen un costo elevado. El Apple Watch Series 8 (Apple Watch más económico que incluye sensor de temperatura) tiene un precio aproximado en el mercado al momento de la publicación de esta tesis de \$5,500 MXN, mientras que, el Fitbit Versa 4 (compatible con Cozie) tiene un precio aproximado al momento de la publicación de esta tesis de \$4,200 MXN. Existen dispositivos más económicos como el Fitbit Inspire 3 por un precio aproximado de \$2,000 MXN que cumplen con la función de medir la temperatura de la piel y frecuencia cardíaca, sin embargo no cuenta con la funcionalidad de realizar encuestas.

El reloj desarrollado en este proyecto, tiene un costo aproximado de \$1,120 MXN e integra las capacidades de medición de variables fisiológicas y realización de encuestas. Esto lo convierte en una opción accesible y funcional.

4. Adaptabilidad

El reloj inteligente cuenta con un diseño que permite su adaptación a diversas aplicaciones además de las encuestas de confort térmico. Puede configurarse para implementar otros tipos de encuestas o funcionalidades específicas según las necesidades del proyecto. Además, al estar desarrollado en Arduino sobre un microcontrolador ESP32 y emplear la biblioteca LVGL, ofrece la posibilidad de migrar su software a MicroPython, ampliando su versatilidad.

4.2 Limitantes del proyecto

A pesar de los logros alcanzados, el proyecto enfrenta algunas limitantes:

1. Exactitud de los sensores de bajo costo

Los sensores utilizados son sensores comerciales de bajo costo, que si bien cumplen con la funcionalidad requerida, se pueden ver afectados en términos de exactitud. Aunque estos sensores fueron sometidos a un proceso de calibración para disminuir errores, las mediciones podrían mejorarse con sensores de mayor exactitud, aunque eso implicaría un costo más elevado del reloj.

2. Ergonomía del reloj inteligente

El diseño actual del reloj inteligente lo convierte en un dispositivo grande para un reloj, lo cual puede resultar incómodo para algunos usuarios durante su uso de manera prolongada. Además, la carcasa presenta cierta fragilidad al no estar diseñada para impactos o condiciones adversas.

4.3 Trabajo futuro

El desarrollo del reloj inteligente plantea diversas oportunidades para extender su funcionalidad y aplicabilidad:

1. Integración con el ecosistema de dispositivos del IER

Una de las principales tareas de trabajo a futuro es la integración del reloj inteligente al ecosistema de dispositivos del IER, que incluye la estación meteorológica ESOLMET y los distintos dispositivos en desarrollo en el Laboratorio de Tecnologías Abiertas y Más (LATA+). La integración del reloj con este ecosistema permitirá generar una base de datos amplia y contextualizada para Temixco, Morelos. Así como también permitirá la correlación de diferentes variables para el análisis de confort térmico.

2. Campañas prolongadas de medición

Para generar una base de datos amplia representativa sobre confort térmico en Temixco, Morelos, es necesario llevar a cabo campañas de medición durante varios meses con la participación de distintos usuarios. Para ello se requiere la fabricación de un mayor número de relojes inteligentes. A largo plazo, esta estrategia contribuirá el estudio del confort térmico en Temixco, Morelos, y en otros lugares donde se adopte el uso de este reloj inteligente.

3. Desarrollo de modelos de confort térmico

La creación de una base de datos amplia y contextualizada abre la posibilidad al desarrollo de modelos de confort térmico adaptativos a contextos específicos, como el bioclima cálido subhúmedo característico de Temixco. Estos modelos podrían integrar variables ambientales como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, tomadas desde la estación meteorológica ESOLMET o los dispositivos desarrollados en el IER, junto con las variables fisiológicas tomadas por el reloj inteligente y datos obtenidos del formulario, tales como la edad, sexo, peso, altura y frecuencia de uso de aire acondicionado.

4. Mejoras en los sensores

El diseño modular del reloj facilita la búsqueda e integración de sensores de mayor calidad que puedan reemplazar a los sensores actuales para facilitar el proceso de calibración, aumentar la exactitud y precisión de las lecturas y mejorar la fiabilidad de los datos recopilados.

5. Mejoras en el diseño de la carcasa

La carcasa del reloj inteligente puede mejorarse con la aplicación de conocimientos en diseño industrial e impresión 3D. Estas mejoras permitirían reducir el tamaño del dispositivo, hacerlo más cómodo y aumentar su resistencia a condiciones adversas.

4.4 Conclusión general

El reloj inteligente desarrollado en este proyecto demuestra cómo las tecnologías abiertas pueden utilizarse para crear herramientas funcionales destinadas a la investigación, en este caso específico, en el campo del confort térmico. La simplicidad del diseño lo convierte en una solución viable para estudios de confort térmico en ambientes reales. Aunado a su capacidad para la recolección de datos de manera eficiente a través de la conexión a internet con una plataforma de IoT, abre la posibilidad de desarrollar modelos de confort térmico adaptativos.

No obstante, el dispositivo enfrenta algunos retos a superar, como mejorar la exactitud de los sensores y mejorar el diseño y resistencia de la carcasa.

La integración del reloj inteligente al ecosistema de dispositivos del IER, así como las campañas de recolección de datos para la creación de bases de datos contextualizadas, permitirá a largo plazo correlacionar variables ambientales y fisiológicas para llevar a cabo estudios de confort térmico. El Desarrollo de modelos de confort adaptativos basados en estas bases de datos no solo contribuirá al estudio del confort térmico de manera general, sino que también servirá como base para el desarrollo de estrategias de diseño bioclimático específicas para regiones con bioclimas cálidos subhúmedos.

Este proyecto aporta una herramienta accesible para el ámbito de la investigación, al tiempo que abre nuevos retos y oportunidades de colaboración interdisciplinaria y de desarrollo tecnológico. Además, se alinea con la filosofía de las tecnologías abiertas, promoviendo su uso en beneficio de la comunidad científica y fomentando la transparencia, la colaboración y el acceso a herramientas que impulsen nuevas investigaciones.

Referencias

- Allen, John. 2007. «Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement». *Physiological Measurement* 28 (3): R1. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2009. *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI Edition)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Standard 55-2017. American Society of Heating, Refrigerating; Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bogatu, Dragos Ioan, Jun Shinoda, José Joaquín Aguilera, Bjarne W. Olesen, Futa Watanabe, Yosuke Kaneko, y Ongun B. Kazanci. 2023. «Human physiology for personal thermal comfort-based HVAC control – A review». *Building and Environment* 240 (julio): 110418. <https://doi.org/10.1016/J.BUILENV.2023.110418>.
- Calixto Aguirre, Verónica Ivette. 2021. «Thermal Comfort Studies». Mathesis, Temixco, Morelos, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Instituto de Energías Renovables. <http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0814603/Index.html>.
- Cen, Chao, Siyu Cheng, y Nyuk Hien Wong. 2023. «Effect of elevated air temperature and air velocity on thermal comfort and cognitive performance in the tropics». *Building and Environment* 234: 110203-3. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110203>.
- Chaudhuri, Tanaya, Yeng Chai Soh, Hua Li, y Lihua Xie. 2020. «Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature». *Building and Environment* 170 (marzo): 106615. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106615>.
- Chaudhuri, Tanaya, Deqing Zhai, Yeng Chai Soh, Hua Li, y Lihua Xie. 2018. «Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology». *Energy and Buildings* 166 (mayo): 391-406. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.02.035>.
- Cho, Seonghun, Hong Jae Nam, Chuanqi Shi, Choong Yeon Kim, Sang-Hyuk Byun, Karen-Christian Agno, Byung Chul Lee, Jianliang Xiao, Joo Yong Sim, y Jae-Woong Jeong. 2023. «Wireless, AI-enabled wearable thermal comfort sensor for energy-efficient, human-in-the-loop control of indoor temperature». *Biosensors and Bioelectronics* 223 (marzo): 115018. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.115018>.
- Choi, Joon Ho, y Dongwoo Yeom. 2017. «Study of data-driven thermal sensation prediction model as a function of local body skin temperatures in a built environment». *Building and Environment* 121 (agosto): 130-47. <https://doi.org/10.1016/J.BUILENV.2017.05.004>.

- Departamento de Defensa de EE.UU. 2009. «Desarrollo de Tecnología Abierta: Lecciones aprendidas y mejores prácticas para software militar». <https://dodcio.defense.gov/Portals/0/Documents/FOSS/OTD-lessons-learned-military-signed.pdf>.
- Enescu, Diana. 2017. «A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (noviembre): 1353-79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.175>.
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press. <https://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>.
- Fanger, P. O., y Jørn Toftum. 2002. «Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates». *Energy and Buildings* 34 (6): 533-36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8).
- Feng, Yanxiao, Julian Wang, Nan Wang, y Chenshun Chen. 2023. «Alert-based wearable sensing system for individualized thermal preference prediction». *Building and Environment* 232 (marzo): 110047. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110047>.
- Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit), Instituto del. 2020. «Anexo 1. Listado de regiones bioclimáticas». https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a/12.+Anexo/%2B1./%2BListado/%2Bde/%2Bregiones/%2Bbioclim/%C3%A1ticas.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=ROOTWORKSPACE-005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a-mmCFC0.
- Garcés, Hugo O., Eduardo Morales, Rodrigo Gómez, Hans Cabrera, y Eduardo Espinosa. 2021. «Design and calibration of low cost sensor node for thermal comfort estimation». *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2021*, junio, 1215-21. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480306>.
- Gnecco, Veronica Martins, Ilaria Pigliautile, y Anna Laura Pisello. 2023. «Long-Term Thermal Comfort Monitoring via Wearable Sensing Techniques: Correlation between Environmental Metrics and Subjective Perception». *Sensors* 23 (enero): 576. <https://doi.org/10.3390/s23020576>.
- Gómez-Azpetia, G., E. López Gómez, y M. Peña. 2006. «Adaptación del índice Humidex para el clima de la ciudad de Colima, México, de acuerdo con el enfoque adaptativo». *Anuario VIII*: 77-92.
- He, Weilin, Cheng Fan, Zebin Wu, y Qiaoqiao Yong. 2025. «An IMU dataset for human thermal comfort activities identification: Experimental designs and applications». *Energy and Built Environment* 6: 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.09.001>.
- Infonavit. 2024. «Listado de Regiones Bioclimáticas». https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a/12.%2BAnexo%252B1.%252BListado%252Bde%252Bregiones%252Bbioclim%25C3%25A1ticas.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=ROOTWORKSPACE-005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a-mmCFC0.
- Integrated, Maxim. 2015. *MAX30102 High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health*. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/859400/MAXIM/MAX30102.html>.
- International Organization for Standardization. 2019. «Ergonomics of the thermal environment

- Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales». ISO Standard 10551. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/45126.html>.
- International Standardization Organization (ISO). 2005. «Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort». ISO Standard 7730. Geneva.
- Landa, Julio, Guillermo Barrios del Valle, y Guadalupe Huelsz Lesbros. 2024. «IoT smartwatch based on open technologies for the collection of thermal comfort data». *HardwareX*.
- Larriva, María Teresa Baquero, y Ester Higueras García. 2019. «Confort térmico de adultos mayores: una revisión sistemática de la literatura científica». *Revista Española de Geriatría y Gerontología* 54 (5): 280-95. <https://doi.org/10.1016/j.regg.2019.01.006>.
- Liu, Shichao, Stefano Schiavon, Hari Prasanna Das, Ming Jin, y Costas J. Spanos. 2019. «Personal thermal comfort models with wearable sensors». *Building and Environment* 162 (septiembre): 106281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106281>.
- López-Pérez, L. A., J. J. Flores-Prieto, y C. Ríos-Rojas. 2019. «Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate». *Building and Environment* 150 (marzo): 181-94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>.
- Lorentzen, Diego M. P. Chatellier, y Michael A. McNeil. 2020. «Electricity demand of non-residential buildings in Mexico». *Sustainable Cities and Society* 59 (agosto). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102165>.
- LVGL Project. 2024. «LVGL – Light and Versatile Embedded Graphics Library». <https://lvgl.io/>.
- Lyu, Junmeng, Yongxiang Shi, Heng Du, y Zhiwei Lian. 2023. «Sex-based thermal comfort zones and energy savings in spaces with joint operation of air conditioner and fan». *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111002>.
- Lyu, Kun Jung, Arianna Brambilla, Anastasia Globa, y Richard de Dear. 2023. «2. A socio-cultural perspective to semi-outdoor thermal experience and restorative benefits – Comparison between Chinese and Australian cultural groups». *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110622>.
- Malakhatka, Elena, Anas Al Rahis, Osman Osman, y Per Lundqvist. 2021. «Monitoring and Predicting Occupant's Sleep Quality by Using Wearable Device OURA Ring and Smart Building Sensors Data (Living Laboratory Case Study)». *Buildings* 11 (octubre): 459. <https://doi.org/10.3390/buildings11100459>.
- Martínez, Rincón, Martínez torres, González Trevizo, y Fernández Melchor. 2020. «Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C.»
- Masterton, J. M., F. A. Richardson, y Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1979. *Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity, by J.M. Masterton and F.A. Richardson.* 28cm. cli,1. Service de l'environnement atmosphérique. <https://books.google.com.mx/books?id=DBIazQEACAAJ>.
- Melexis. 2009. *MLX90614 Infra Red Thermometer in TO-39*. <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/mlx90614-datasheet>.

- Mishra, Asit Kumar, y Maddali Ramgopal. 2013. «Field studies on human thermal comfort — An overview». *Building and Environment* 64 (junio): 94-106. <https://doi.org/10.1016/J.BUILENV.2013.02.015>.
- Mitigation of Climate Change, Climate Change 2022 -. 2022. «Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>.
- Naheed, Sanober, y Salman Shooshtarian. 2021. «A Review of Cultural Background and Thermal Perceptions in Urban Environments». *Sustainability* 13 (16): 9080-80. <https://doi.org/10.3390/SU13169080>.
- Nazarian, Negin, Sijie Liu, Manon Kohler, Jason K W Lee, Clayton Miller, Winston T L Chow, Sharifah Badriyah Alhadad, et al. 2021. «Project Coolbit: can your watch predict heat stress and thermal comfort sensation?» *Environmental Research Letters* 16 (marzo): 034031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd130>.
- Nkurikiyeyezu, Kizito N., Yuta Suzuki, y Guillaume F. Lopez. 2017. «Heart rate variability as a predictive biomarker of thermal comfort». *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 9 (5): 1465-77. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0567-4>.
- Olabi, A. G., Mohammad Ali Abdelkarem, y Hussam Jouhara. 2023. «Energy digitalization: Main categories, applications, merits, and barriers». *Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126899>.
- Olgay, V., D. Lyndon, J. Reynolds, y K. Yeang. 1963. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition*. Princeton University Press. <https://books.google.com.mx/books?id=RRQ-CgAAQBAJ>.
- Olsen, Alexander. 2024. «Indoor Climate». En, 385-94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57974-5_34.
- Organización de las Naciones Unidas. 2015. «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development». <https://digitallibrary.un.org/record/3923923>.
- Oropeza-Perez, Ivan, Astrid H. Petzold-Rodriguez, y Claudia Bonilla-Lopez. 2017. «Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling». *Energy and Buildings* 145 (junio): 251-58. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>.
- Pedro Mondelo, Rafael García, Antoni Santaliestra, y Miguel Sanz. 2001. *Ergonomía 2: Confort y Estrés Térmico*. 3rd ed. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rincón-Martínez, J C, y Int. 2019. «Experimental thermal comfort under lab controlled conditions:An applied case». *Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com* 9: 18-26. <https://doi.org/10.9790/9622-0912021826>.
- Ritchie, Hannah. 2020. «Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?» *Our World in Data*.
- Sakoi, Tomonori, Yoshihito Kurazumi, Sri Rahma Apriliyanthi, Shin-ichi Sawada, y Chuansi Gao. 2023. «5. Human body heat balance equation to consider core body temperature in assessment of heatstroke risk». *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111020>.
- Secretaría de Energía. 2023. «Balance Nacional de Energía Preliminar 2022». https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/841526/BNE_2022.pdf.

- Sim, Jai Kyoung, Sunghyun Yoon, y Young-Ho Cho. 2018. «Wearable Sweat Rate Sensors for Human Thermal Comfort Monitoring». *Scientific Reports* 8 (enero): 1181. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19239-8>.
- Sim, Soo Young, Myung Jun Koh, Kwang Min Joo, Seungwoo Noh, Sangyun Park, Youn Ho Kim, Kwang Suk Park, y Angelo Maria Sabatini. 2016. «Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures». <https://doi.org/10.3390/s16040420>.
- Solution, ETA. 2024. *ETA6003 2.5A, 3MHz Switching Charger with Dynamic Power Path Management*. ETA Solution. https://files.seeedstudio.com/wiki/round_display_for_xiao/charge-IC-datasheet.pdf.
- Studio, Seeed. 2024. «Seeed Studio XIAO ESP32C3 Development Board». <https://www.seeedstudio.com/Seeed-XIAO-ESP32C3-p-5431.html?srsltid=AfmBOopHrrta3vMhxj9CZJasHKtro5S9tVjwzPT3-KtKiNUV8CeFVebb>.
- Synthesis Report, Climate Change 2023: 2023. «IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.» Editado por Paola Arias, Mercedes Bustamante, Ismail Elgizouli, Gregory Flato, Mark Howden, Carlos Méndez-Vallejo, Joy Jacqueline Pereira, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Tartarini, Federico, Stefano Schiavon, Matias Quintana, y Clayton Miller. 2022. «Personal comfort models based on a 6-month experiment using environmental parameters and data from wearables». *Indoor Air* 32 (noviembre). <https://doi.org/10.1111/ina.13160>.
- uElectronics. 2024. «Motor de Vibración 5V». <https://uelectronics.com/producto/motor-vibracion-5v/?srsltid=AfmBOoobMBx68FsKl3OQeHRxlqV72c0WFIDICCubVzyQFrHrNYflB-w4>.
- Yao, Runming, Baizhan Li, y Jing Liu. 2009. «A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)». *Building and Environment* 44 (10): 2089-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>.
- Zepeda-Gil, Carlos, y Sukumar Natarajan. 2022. «Thermal comfort in naturally ventilated dwellings in the central Mexican plateau». *Building and Environment* 211 (marzo). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108713>.