

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	11
1.3 Metodología	12
1.4 Estructura de la tesis	12
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	16
2.2.2 Escalas para describir el entorno físico	17
2.3 Modelos de confort térmico	17
2.3.1 Modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado	17
2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado	19
2.4 Variables fisiológicas como indicadores de confort térmico	21
2.5 Confort térmico en México	22
2.6 Dispositivos portátiles y tecnologías abiertas en el confort térmico	24
3 Diseño, desarrollo y validación	27
3.1 Metodología	27
3.2 Construcción del dispositivo	37
3.3 Encuestas e interfaz	37
3.4 Calibración	40
3.5 Lógica de programación	43
3.6 Instrucciones de uso	48
3.7 Validación del funcionamiento del reloj inteligente	53
4 Conclusiones	57
4.1 Contribuciones del proyecto	57
4.2 Limitantes del proyecto	58

4.3 Trabajo futuro	59
4.4 Conclusión general	60
Referencias	61

Listado de Figuras

2.1 Relación PMV-PPD	19
3.1 Circuito de control del motor vibrador.	32
3.2 Partes de la carcasa del dispositivo (el seguro se muestra a mayor escala para su mejor visualización).	34
3.3 Diagrama de conexiones: a) circuito vibrador, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, c) circuito de la batería.	35
3.4 Diagrama de bloques funcional del reloj inteligente.	36
3.5 Gráficos de dispersión de las mediciones del sensor GY-906 y la cámara termográfica Fluke Ti9 antes y después de la calibración.	43
3.6 Diagrama de flujo de la función actualizar hora.	46
3.7 Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.	47
3.8 Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.	49
3.9 Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.	50
3.10 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.	54

Listado de Tablas

2.1 Escala unipolar	17
2.2 Escala bipolar	17
2.3 Valores de e	20
3.1 Comparación de características de conectividad y hardware en placas de desarrollo.	28
3.2 Especificaciones técnicas detalladas de la placa XIAO ESP32C3.	29
3.3 Comparación de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3.	30
3.4 Comparación de sensores de temperatura por rango operativo y precisión.	30
3.5 Comparación de Sensores de frecuencia cardíaca.	31
3.6 Tabla de componentes seleccionados.	33
3.7 Tabla de equivalencia de prendas a CLO.	38
3.8 Tabla equivalencia de actividades a MET.	38
3.9 Escala del voto de sensación térmica con su descripción.	39
3.10 Error Absoluto Medio (EAM) para diferentes valores de RATE_SIZE en el MAX30102.	41
3.11 Estadísticas de las Mediciones del Sensor GY-906 y la Cámara Termográfica Fluke Ti9.	42
3.12 Librerías utilizadas y sus versiones recomendadas para el funcionamiento del reloj inteligente.	51
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).	56

Resumen

Abstract

Agradecimientos

Agradezco a ...

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 cumplir con 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 esfuerzo de los sistemas de climatización para mantener condiciones de confort térmico adecuadas, incrementando así el consumo de energía y, por consiguiente, 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 auditorías 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 de 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 Mitigation of Climate Change (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 óptimas de iluminación, temperatura y humedad del aire, buscando obtener espacios con condiciones adecuadas para que los ocupantes se encuentren confort térmico, lumínico y acústico. La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2017) es una organización global que desarrolla estándares y guías para sistemas de construcción, eficiencia energética, calidad del aire al interior y sostenibilidad. Define 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 variables climatológicas como 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, ya que una campaña de evaluación de confort térmico generalmente implica estar en un ambiente controlado y con limitaciones de espacio o acciones, lo que puede comprometer la calidad de los datos obtenidos.

Recientemente han surgido nuevas herramientas tecnológicas como el IoT, la inteligencia artificial (IA) o los dispositivos portátiles que pueden ayudar a solucionar esta problemática. Distintos autores destacan como estas tecnologías permiten una mejor recopilación y análisis de datos para la evaluación y predicción del confort térmico 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.

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 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.

Otro beneficio del uso de estas tecnologías es la generación de bases de datos que se pueden usar 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) 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 una mayor precisión 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.

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:

- **Introducción:** En el capítulo 1 se establece el contexto del proyecto, se definen los objetivos y se justifica la importancia de la investigación sobre confort térmico.
- **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* (ASHRAE55 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 este se define 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. En este sentido, se puede considerar como un equilibrio térmico entre el cuerpo humano y su entorno, donde la temperatura corporal se regula a través de procesos fisiológicos, como la sudoración, la vasoconstricción y la vasodilatación (Sakoi et al. 2023). Además, el confort térmico no solo depende de las condiciones ambientales, sino también de cómo los individuos interpretan estas condiciones según sus experiencias y expectativas personales (ASHRAE55 2017).

Los factores que afectan la sensación de confort térmico se pueden agrupar en dos categorías principales: factores ambientales y factores personales.

Factores ambientales

Los factores ambientales incluyen la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire, la humedad relativa, y la presión atmosférica (ASHRAE55 2017). 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.

- **Temperatura del aire:** Influye en la sensación de calor o frío percibida a través de la piel. 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 promedio de las superficies que rodean a una persona. Las superficies frías pueden absorber el calor del cuerpo humano, mientras que las superficies calientes pueden irradiar calor hacia el cuerpo, afectando la sensación de frío o calor. 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 favorece la evaporación del sudor, lo cual genera un efecto refrescante. Según estudios, la velocidad óptima del aire mejora significativamente los niveles de confort térmico, el rendimiento cognitivo y la satisfacción general (Cen, Cheng, y Wong 2023).
- **Humedad relativa:** 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 puede influir en la percepción del confort térmico, especialmente en entornos de gran altitud o en condiciones climáticas extremas.

Factores personales

Los factores personales incluyen la actividad física, la vestimenta, la edad, el sexo y aspectos culturales y socioeconómicos.

- **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. La producción de calor se mide en unidades de “met”, donde 1 *met* equivale a la producción de calor de una persona en reposo, aproximadamente 58.2 W/m^2 (ASHRAE 2009).
- **Vestimenta:** Actúa como un aislante térmico que ayuda a retener el calor en el cuerpo. El nivel de aislamiento térmico de la ropa se mide en unidades de “clo”. Un 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, que reducen la capacidad de termorregulación (Larriva y García 2019).
- **Sexo:** El sexo también influye en la percepción del confort térmico. J. Lyu et al. (2023) demuestra que las mujeres tienden a soportar temperaturas más cálidas en comparación con los hombres. Chaudhuri et al. (2018) y Choi y Yeom (2017) también mencionan que el confort térmico está influenciado por el sexo del individuo.

- **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

A pesar de que el confort térmico es un término subjetivo, este se puede evaluar a través de encuestas de confort térmico. Para ello, la ISO en su norma 10551 (2019) establece escalas de juicio subjetivo para evaluar el entorno físico, con el objetivo de garantizar que los espacios sean diseñados teniendo en cuenta al usuario. 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 percepción. Mientras que para el entorno físico son dos: aceptabilidad y satisfacción.

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. 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. 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.
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. 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.

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, mientras que el polo es intolerable.

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)

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

2.3 Modelos de confort térmico

Además de las encuestas utilizadas para evaluar el confort térmico, se han desarrollado modelos diseñados específicamente para predecirlo. Estos modelos 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, velocidad del aire, presión atmosférica, nivel metabólico del ocupante y nivel de aislamiento térmico de la ropa. Dispone de una escala 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 pensado para edificaciones que cuenten con sistemas de aire acondicionado y fue desarrollado por Fanger (1970).

Las ecuaciones para calcular el PMV son:

$$\text{PMV} = [0.303 e^{-0.036 M} + 0.028] \left\{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99 (M - W) - p_a] - 0.42 [(M - W) - 58.1] \right\} \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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 (${}^\circ C$)

HR : Humedad relativa (%)

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 directamente relacionado con el PMV y fue propuesto por Fanger (1970). La ecuación que lo define se expresa de la siguiente manera:

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

ASHRAE55 (2017) indica que el PPD no debe ser mayor al 10%, 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.

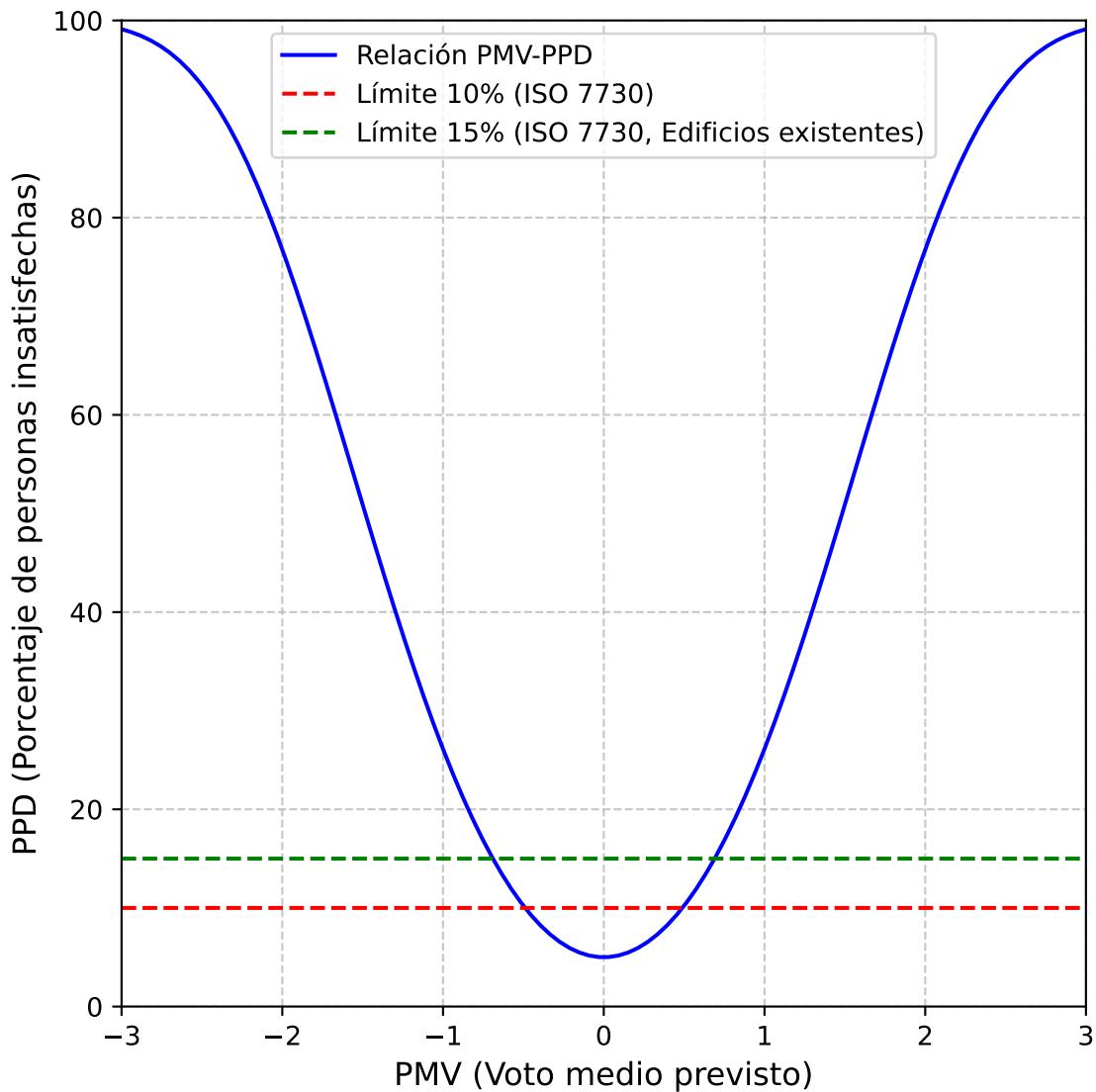


Figura 2.1: Relación PMV-PPD

2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado

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

Adaptativos

ePMV

el ePMV 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 la duración del clima cálido a lo largo del año y la presencia de 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*

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 calculo del ePMV además de calcular el valor de *e*, se debe considerar el valor del estado metabólico del ocupante (MET). usualmente el MET se evalúa mediante cuestionarios que determinan el tiempo dedicado a actividades específicas como estar sentado, de pie o caminando. 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:

$$M_{mod} = (0.067 * PMV)M \quad (2.7)$$

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

Adaptative Predicted Mean Vote, 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

Se utiliza la Ecuación 2.9 del Índice Humidex Ontario pero realizado con encuestas en la ciudad de Colima. Modifica la relación con la sensación térmica e incluye época de frío. (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 relacionadas con la respuesta del cuerpo humano a las condiciones ambientales e incluyen la tasa de sudoración, la temperatura de la piel y la frecuencia cardíaca (Bogatu et al. 2023). La medición de estas variables permite identificar cómo una persona está reaccionando a las condiciones térmicas y si se encuentra en un estado de confort. J. K. Sim, Yoon, y Cho (2018) midieron la tasa de sudoración a través de una cámara de humedad y mencionaron que el estado térmico puede ser medido a través del sudor. Sin embargo, Bogatu et al. (2023) señala que la sudoración no siempre es un indicador fiable del confort térmico debido a que la sudoración se puede ver afectada por factores emocionales o estrés. Además de que en ambientes fríos la poca sudoración de la piel dificulta la medición de esta variable. 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 votode 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 precisión.

Bogatu et al. (2023) también concluyeron que la temperatura de la piel es un buen indicador de confort térmico debido a su facilidad de medición, ya que 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. Identificaron 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, identificaron la frecuencia cardíaca y su variabilidad (VFC, variabilidad de la frecuencia cardíaca) como buenos indicadores del confort térmico. La VFC está vinculada al estado de homeostasis del cuerpo y puede reflejar el nivel de confort térmico de una persona, con estudios que muestran variaciones de HRV según el entorno térmico y una precisión del 93.7% al predecir el estado térmico de un individuo utilizando algoritmos de clasificación de aprendizaje automático. De hecho, el estudio de Nkurikiyeyezu, Suzuki, y Lopez (2017) refuerza esta idea, mostrando que la VFC puede predecir el estado 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 el estado térmico con una precisión de hasta el 93.7%.

2.5 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. (**LopezPerez2019?**) 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. Dispositivo con la capacidad de recopilar continuamente datos ambientales y fisiológicos ha 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.

Garces et al. (2021) se apoyaron de la tecnología portátil para la estimación del confort térmico a través del modelo PMV-PPD. Crearon un nodo sensor con sensores de temperatura del aire y humedad relativa (DHT22), y un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad del aire y, variables que son clave para la estimación del modelo. 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 principal 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 experimentado por el usuario, 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 del aire y la humedad relativa. Un algoritmo de inteligencia artificial integró estas mediciones con encuestas subjetivas de confort térmico, utilizando escalas como el TSV, para personalizar un modelo predictivo. Este sistema permitió controlar un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés).

El proyecto Coolbit, desarrollado por Nazarian et al. (2021), utilizó relojes inteligentes Fitbit equipados con sensores iButton para medir variables como la temperatura del aire, la humedad

relativa, la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca y la humedad de la piel. Además, integraron retroalimentación subjetiva mediante encuestas para evaluar la percepción de confort térmico. A través de métodos de regresión, se estableció una correlación entre estas variables y la percepción 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 preferencias térmicas individuales. Utilizaron el brazalete Empatica E4, que mide variables fisiológicas como la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca, la conductancia eléctrica de la piel (EDA, por sus siglas en inglés) y la actividad física. También utilizaron el sensor ambiental Ubibot WS1 que mide la temperatura del aire, la humedad relativa y el nivel de luz. Diseñaron una aplicación móvil 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. Los datos recopilados se integraron en un modelo de regresión logística multinomial, alcanzando una precisión promedio del 80.3% en la predicción de preferencias térmicas individuales.

Un enfoque diferente fue explorado en el estudio de He et al. (2025), en el cual utilizaron sensores iniciales (IMU, por sus siglas en inglés) para correlacionar actividades humanas con niveles 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 acciones asociadas con estados térmicos de frío, neutro y calor. Estas actividades, como frotarse las manos, abanicarse con las manos, usar el teléfono o abrocharse botones. 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 distintos estados de confort térmico. 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 sensores del reloj como la frecuencia cardíaca y la ubicación, aunque actualmente únicamente se encuentra disponible para Apple Watch y algunos modelos de Fitbit. En este estudio se midieron variables como 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 exterior, derivada 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 del aire interior y la humedad relativa, registradas mediante sensores adicionales instalados en los espacios interiores de 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 empleó el F1-score, obteniendo un promedio de 0.78.

Estos estudios demuestran que el uso de dispositivos portátiles en el confort térmico ha revolucionado la manera en que se obtienen datos fisiológicos y ambientales 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 ?? 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 ?? detalla el proceso de calibración de los sensores. En la Sección ?? 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 ?? se verifica la funcionalidad del reloj inteligente para recopilar información de las encuestas de confort térmico y las mediciones de las variables fisiológicas, como la frecuencia cardíaca y la temperatura de la piel, así como 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 frecuencia cardíaca y de la temperatura de la piel, variables cuya relación con el confort térmico se discutió 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 en un bioclima cálido semihúmedo (Infonavit 2024) en Temixco, Morelos. 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.

2. Selección de componentes

Para garantizar el funcionamiento preciso y adecuado 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, precisión y capacidad de procesamiento en el caso del microcontrolador.

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
Arduino Nano 33 IoT	si	4.2	SPI, I2C, I2S, UART	Micro USB	30 GPIOs, 8 ADC
Arduino nano esp32	si	LE	UART, I2C, SPI, I2S, CAN(TWAI)	USB C	22 GPIOs, 8 ADC
Arduino nano RP2040 connect	si	si	STI, I2C, I2S, PIO, UART	USB C	30 GPIOs, 8 ADC
Raspberry pi pico W	si	5.2	UART, I2C, SPI	Micro USB	26 GPIOs, 3 ADC
ESP32 pico kit	si	si	I2C, I2S, SPI	Micro USB	34 GPIOs
Seeed Studio XIAO ESP32C3	si	5	1x UART, 1x IIC, 1x SPI	USB C	11 GPIOs, 4 ADC
Seeed Studio XIAO ESP32S3	si	5	1x UART, 1x IIC, 1x SPI	USB C	11 GPIOs, 9 ADC

Si bien todas las placas presentadas son opciones viables, Seeed Studio ha desarrollado placas orientadas a aplicaciones de dispositivos portátiles. Estas tienen las características deseadas y además plazas empatan 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 influye 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 bitRISC-V160 MHz
Conectividad	2.4 GHz WiFiBLE: 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 x 17.8 mm
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 µA
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 ~ 85 °C

Pantalla

La elección de la pantalla debe alinearse con los criterios establecidos para la placa de desarrollo. se busca una pantalla que ademas 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: Comparación de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3.

Pantalla	Pantalla táctil	tecnología	dimensión
Seeed Studio Round Display for XIAO	si	TFT LCD	1.28''
Waveshare Módulo de visualización	no	OLED RGB	1.5''
GC9A01 Pantalla	no	TFT LCD	1.28''

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 orientado a aplicaciones de dispositivos portátiles. La compatibilidad entre los componentes, tecnología táctil y diseño redondo, 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 se manejan en 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: Comparación de sensores de temperatura por rango operativo y precisión.

Nombre del sensor	Tipo de sensor	Rango de temperatura	Precisión	Comunicación
GY-906 (MLX90614)	Sensor de temperatura infrarrojo	-70°C a 382.2°C	±0.5°C (0°C a 50°C)	I2C
ZTP-115M	Sensor de temperatura infrarrojo	-20°C a 100°C	±1°C (32°C a 42°C)	Salida analógica
NTC	Termistor NTC	-55°C a 125°C	±0.2°C (dependiendo de la resistencia)	Ninguna (sensor resistivo)
MF52AT				
BetaTherm 10K3A1	Termistor NTC	-50°C a 150°C	±0.2°C (25°C a 45°C)	Ninguna (sensor resistivo)
AHT20	Sensor de temperatura y humedad	-40°C a 85°C	±0.3°C (temperatura) / ±2% HR (humedad)	I2C

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 sensores ópticos se han consolidado como una buena opción para la medición de la frecuencia cardíaca en dispositivos portátiles. 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 una comparación entre los sensores MAX30100, MAX30102 y MAX30105.

Tabla 3.5: Comparación de Sensores de frecuencia cardíaca.

Sensor	Tipo de almacenamiento	Resolución ADC	Funcionalidades	Consumo de Energía
MAX30100	16-bit FIFO	14-bit	Frecuencia cardíaca y SpO ₂	600 µA a 1 mA
MAX30102	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, SpO ₂	600 µA a 1.2 mA
MAX30105	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, SpO ₂ , detección de partículas	600 µA a 1.2 mA

El MAX30102 se elige como la mejor opción para este proyecto por su equilibrio entre funcionalidad, capacidad de captura de datos 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 no son una característica actual del reloj inteligente planteado en esta tesis, pero podrían ser una variables de interés en investigaciones futuras.

Circuito vibrador

El dispositivo 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

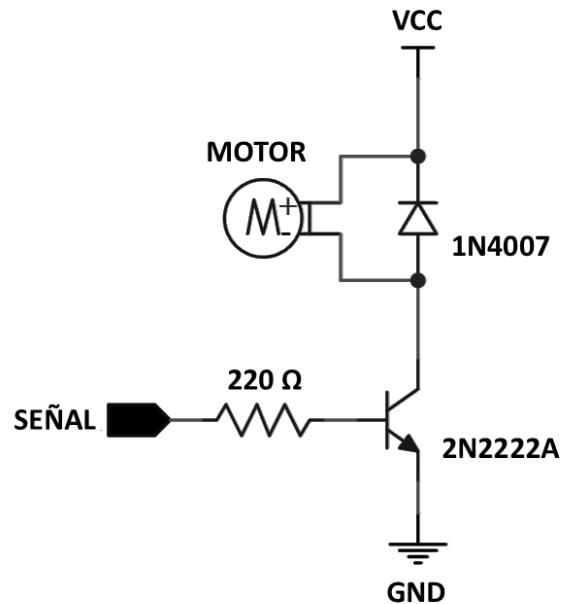


Figura 3.1: Circuito de control del motor vibrador.

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 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 dispositivo. 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
XIAO Round Display	Pantalla circular táctil de 1.28 pulgadas
GY-906	Sensor infrarrojo de temperatura sin contacto
MAX30102	Sensor óptico de frecuencia cardíaca
Circuito vibrador	Circuito vibrador para notificaciones silenciosas
Batería 650 mAh	Batería LiPo recargable

3. Diseño del dispositivo

Una vez seleccionados los componentes principales del dispositivo, 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 esta diseñada para ser impresa en 3D y consta de tres partes principales 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 el microcontrolador, el motor vibrador y el interruptor de encendido. La 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.

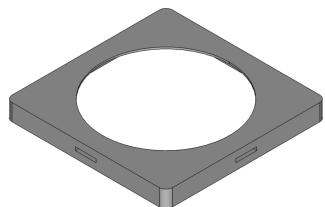
La parte superior de la carcasa está diseñada con el fin de mantener la pantalla táctil en su posición y cerrar el dispositivo. Todas las piezas se ensamblan una con otra por presión, evitando el uso de tornillos.

Adicional, 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 pieza y deja fijo el interruptor.

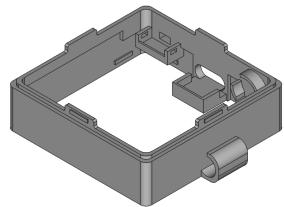
En la Figura 3.2 Se observan las tres piezas principales de la carcasa.

Diseño de los circuitos

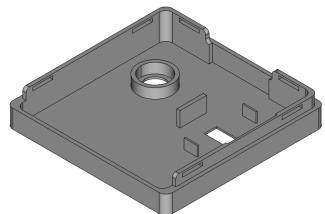
El diseño de los circuitos del reloj inteligente se divide en tres circuitos, circuito vibrador para alarma Figura 3.3 a) , circuito de sensores y microcontrolador Figura 3.3 b) y el circuito de la batería Figura 3.3 c). Cada uno de estos circuitos está diseñado para mantener las conexiones



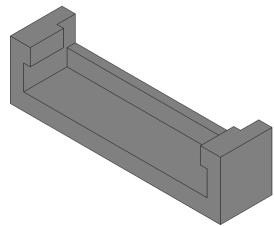
Parte superior



Parte central



Parte inferior



Seguro

Figura 3.2: Partes de la carcasa del dispositivo (el seguro se muestra a mayor escala para su mejor visualización).

lo más simples y cortas posibles. Dado que la placa XIAO ESP32C3 y la pantalla XIAO Round Display se ensamblan directamente, se omite ese circuito.

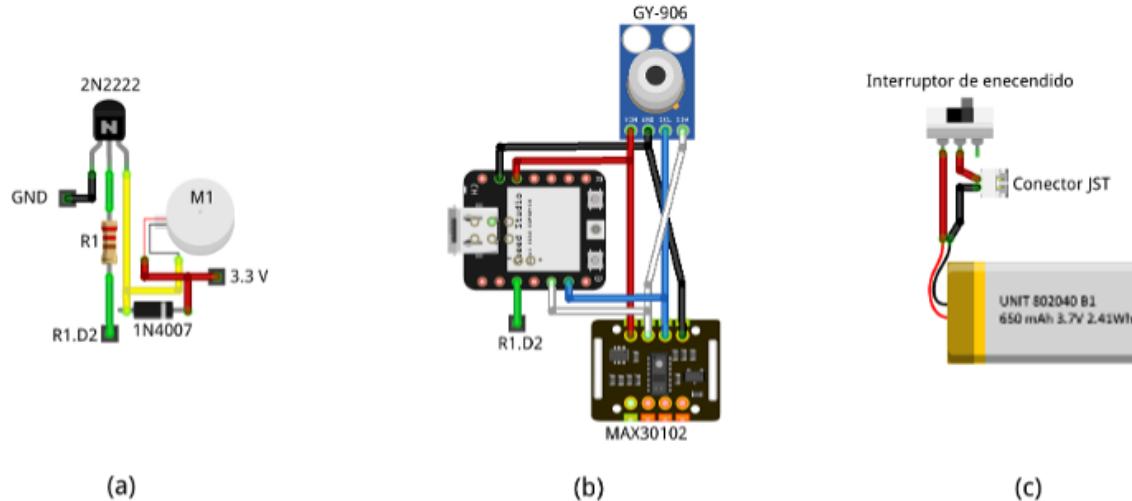


Figura 3.3: Diagrama de conexiones: a) circuito vibrador, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, c) circuito de la batería.

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

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

El circuito vibrador es un circuito sencillo de control de motor. su principal objetivo 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 de bloques funcional 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.

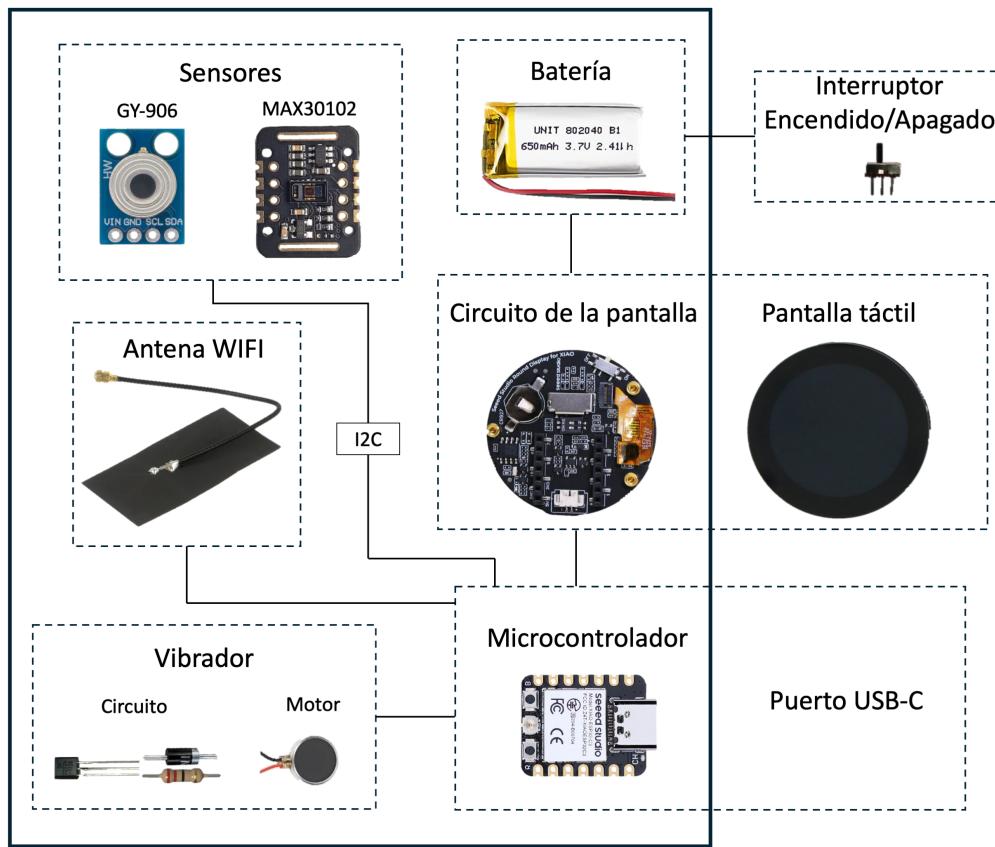


Figura 3.4: Diagrama de bloques funcionales del reloj inteligente.

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 y la integración y montaje de todos los elementos en la carcasa.

Carcasa: los archivos STL para la impresión de la carcasa los puedes encontrar en el repositorio del proyecto

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: Una vez realizadas las conexiones, se lleva a cabo el montaje de los circuitos dentro de la carcasa, esta se ensambla y se colocan las correas.

En el artículo XXX puede encontrar información más detallada acerca del diseño y los pasos a seguir para la construcción del dispositivo.

3.3 Encuestas e interfaz

Una de las principales características del reloj inteligente presentado, 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 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 este 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 calor de CLO.

Tabla 3.7: Tabla de equivalencia de prendas a CLO.

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 que permiten calcular 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 equivalencia de actividades a MET.

Actividad	Valor de MET
Tomando clase sentado	1.3
Tomando clase de pie	1.8
Dando clase sentado	2.0
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: “¿Dónde te encuentras?” donde el usuario selecciona una única opción de una lista predefinida de ubicaciones dentro 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 a 3 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	Helado
-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	Ardiendo

- **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.

- **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 frecuencia cardíaca (MAX30102) y de temperatura de la piel (GY-906) 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 coherentes, 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

La calibración de los sensores en el dispositivo es esencial para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones. Esta sección describe el proceso de calibración de los sensores MAX30102 y GY-906, utilizados para medir la frecuencia cardíaca y la temperatura de la piel, respectivamente.

1. 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 óptima de varios parámetros ajustables: `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 si la señal no se filtra adecuadamente.
- **pulseWidth** (69, 118, 215, 411 μ s): 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 buffer): Determina el tamaño del buffer 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 buffer de 4 a 6 mejora la precisión de las lecturas, ya que permite una mayor estabilidad en los cálculos.

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 precisión general del sensor. Para mejorar la precisión, 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 precisos, mientras que con RATE_SIZE igual a 100, se logra alta precisión, pero se requieren múltiples intervalos de 10 segundos, incrementando el tiempo total de medición. Para encontrar un equilibrio entre precisión y tiempo de medición, se evalúan valores intermedios de RATE_SIZE entre 4 y 16. El valor óptimo encontrado es RATE_SIZE igual a 6, lo cual reduce el EAM a 4.4 bpm.

La Tabla 3.10 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 3.10: 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

Número de Mediciones	RATE_SIZE	EAM (bpm)
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 estabilidad de la señal. La configuración final optimizada 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.

2. Calibración del Sensor GY-906

Para la calibración del sensor de temperatura GY-906, se utiliza una cámara termográfica Fluke Ti9 como referencia. Tanto el sensor como la cámara se configuran con una emisividad de 0.98, correspondiente a la emisividad promedio de la piel humana. Las pruebas se realizan durante tres días, entre las 10:00 a. m. y las 06:00 p. m., con mediciones cada media hora para capturar diferentes condiciones ambientales.

Durante cada sesión de medición, el sensor GY-906 realiza diez mediciones consecutivas en un lapso de diez segundos, y el promedio de estas mediciones se envía a la plataforma Thingsboard, lo cual permite reducir el ruido y aumentar la precisión. Simultáneamente, las lecturas de la cámara termográfica se registran manualmente. Para minimizar el error por movimiento, el dispositivo emite una alerta vibratoria de un segundo, seguida de una pausa de cuatro segundos antes de realizar la medición, permitiendo al usuario mantener la mano inmóvil durante el proceso de medición. Se obtienen 86 pares de mediciones, la Tabla 3.11 muestra las características estadísticas de ambos conjuntos de datos.

Tabla 3.11: Estadísticas de las Mediciones del Sensor GY-906 y la Cámara Termográfica Fluke Ti9.

Estadística	Sensor (°C)	Cámara (°C)
Media	34.65	35.25
Desviación estándar	0.72	0.65
Mínimo	32.36	32.80
Máximo	35.87	35.87

Se realiza un análisis inicial entre las mediciones de la cámara respecto al sensor y se obtienen los siguientes datos:

- Error Medio (EM): 0.60°C

- Error Absoluto Medio (EAM): 0.66°C

Dada la naturaleza de los datos, se aplica una calibración mediante un modelo de regresión lineal, obteniéndose los siguientes valores clave:

- Pendiente: 0.54 ± 0.08
- Intercepto: 16.70 ± 2.77

Una vez obtenidos estos valores, se aplica la función de regresión lineal sobre los datos del sensor para generar una nueva columna con datos corregidos. Al comparar esta nueva columna con las lecturas de la cámara se obtienen los siguientes errores:

- EM: $-3.39 \times 10^{-15}^{\circ}\text{C}$
- EAM: 0.41°C

La Figura 3.5 compara las gráficas de dispersión de los datos, donde la figura a) muestra los datos antes de la calibración y la figura b) presenta los datos después de la calibración.

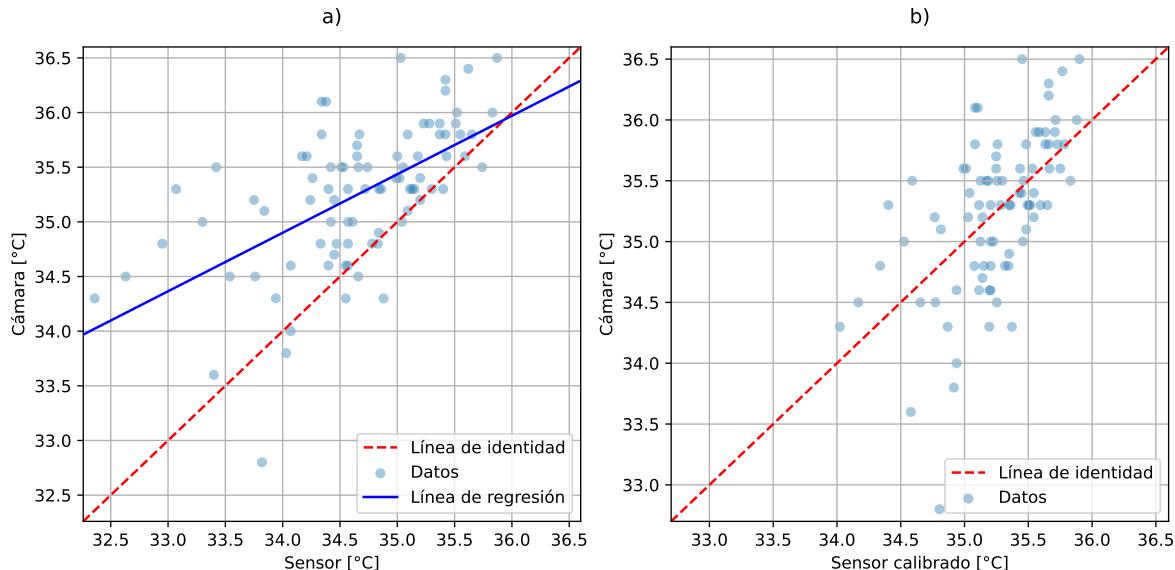


Figura 3.5: Gráficos de dispersión de las mediciones del sensor GY-906 y la cámara termográfica Fluke Ti9 antes y después de la calibración.

3.5 Lógica de programación

A continuación, se describe el funcionamiento general del reloj inteligente, detallando la estructura del sistema 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 las variables fisiológicas. Además, se destacan aspectos relevantes, como los horarios programados para las encuestas y las estrategias implementadas para el ahorro de energía.

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. Está compuesto por 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 esenciales.
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 esta 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 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_Ubicación.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 a 3, y la descripción correspondiente para cada nivel.
8. **ui_Aceptación.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. 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 estabilizar 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 3.6.

3. Descripción del proceso para contestar una encuesta, medir variables fisiológicas 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 Figura 3.7.

4. Estrategias para el ahorro de energía

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

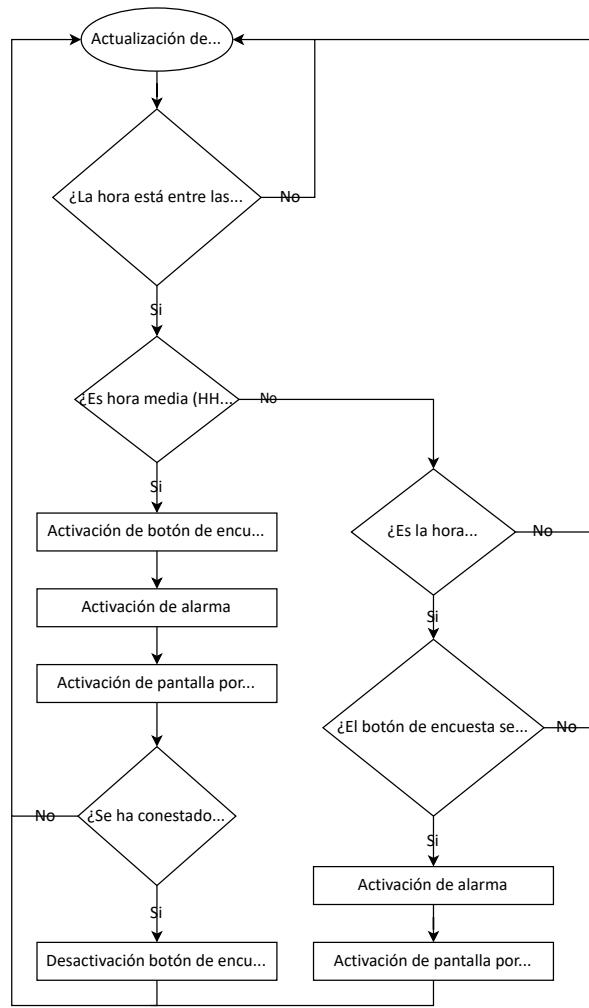


Figura 3.6: Diagrama de flujo de la función actualizar_hora.

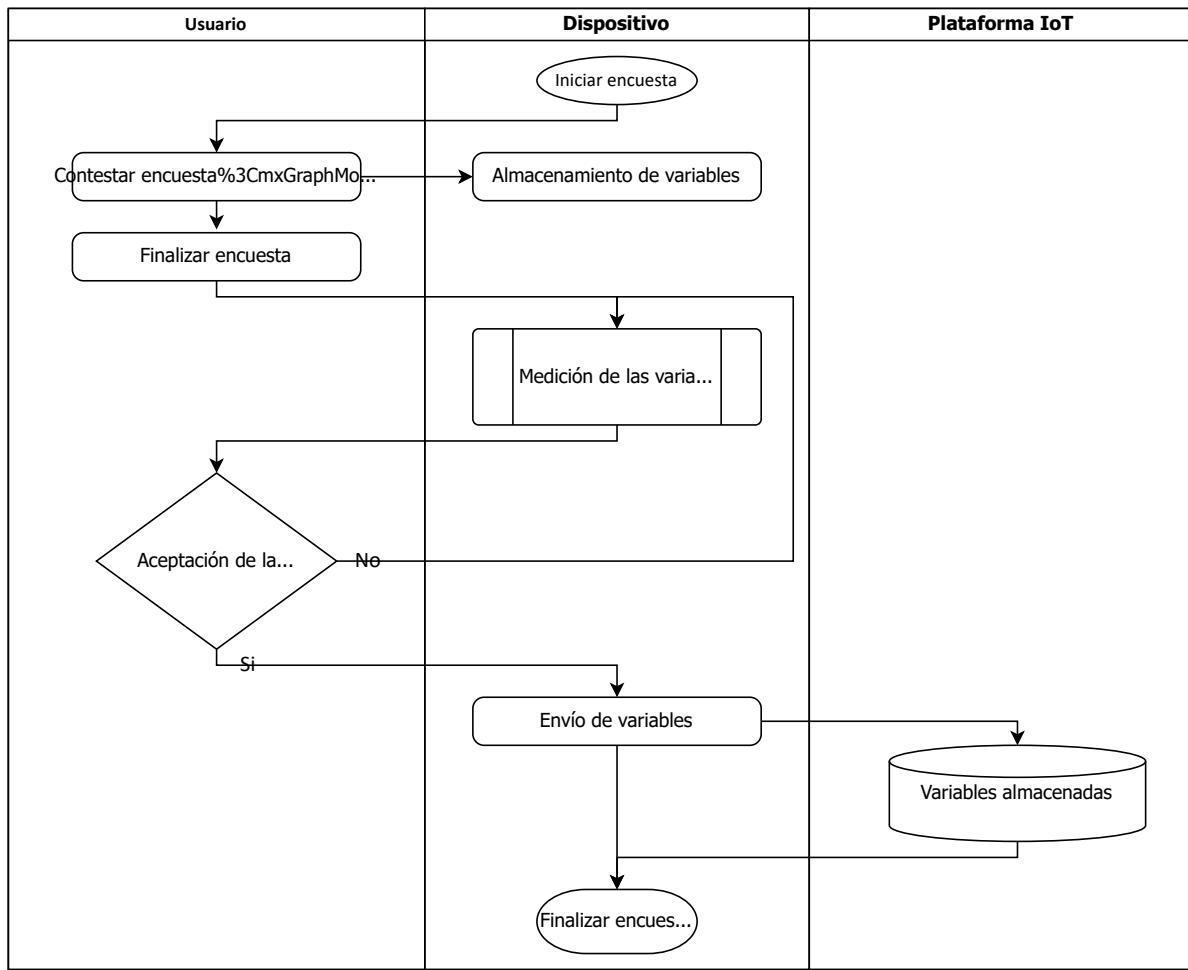


Figura 3.7: Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.

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 paqueterías y librerías 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 última, 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

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 3.8, la flecha roja en la figura señala al recuadro en donde debe colocarse la URL.

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 sistema ESP32 de Espressif, como se muestra en la Figura 3.9. 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 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 reemplazarla por la carpeta de librerías existente en la máquina local, que generalmente se encuentra en el directorio “Documentos”.

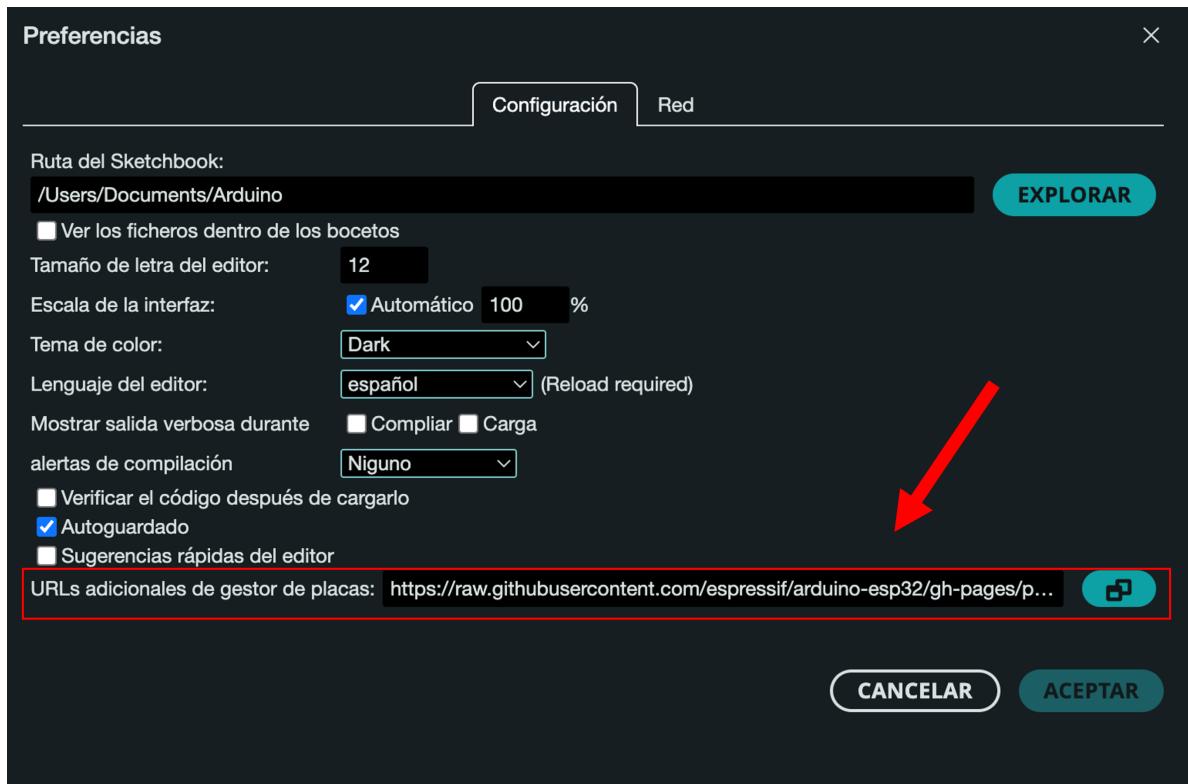


Figura 3.8: Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.

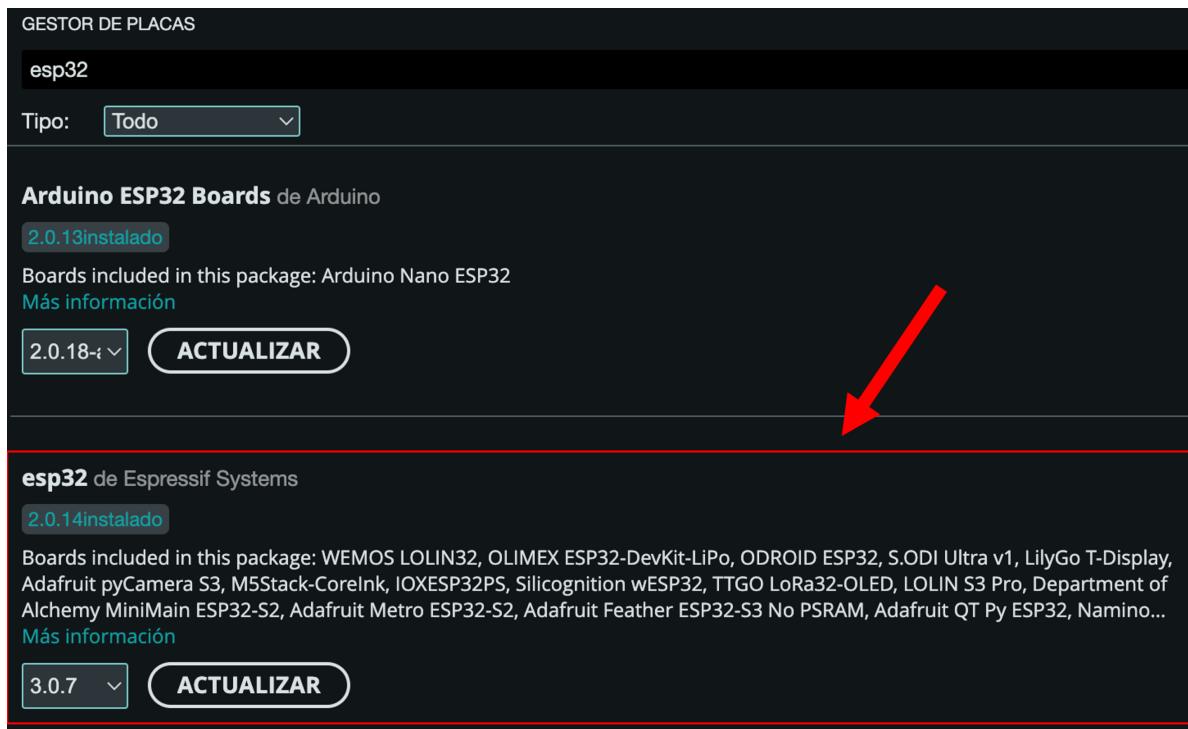


Figura 3.9: Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.

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. A continuación se muestra el formulario hecho en Google Forms:

Cargando...

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 carcasa del reloj incluye pestañas laterales diseñadas para sujetar las correas y ajustarlo cómodamente a la muñeca del usuario.

La interfaz del reloj está compuesta por siete pantallas principales y dos ventanas emergentes. La pantalla principal (Figura 3.10(a)) permite al usuario visualizar la hora actual y el tiempo restante para la siguiente encuesta.

Cuando se habilita el botón para responder una encuesta, se muestra la pantalla de encuesta (Figura 3.10(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 3.10(c).
- La segunda pregunta, relacionada con la actividad que el usuario está realizando en ese momento, se muestra en la Figura 3.10(d).
- La tercera pregunta, relacionada con la ubicación actual del usuario, aparece en la Figura 3.10(e).
- La cuarta pregunta, relacionada con la sensación térmica del usuario, se despliega en la Figura 3.10(f).
- La quinta y última pregunta, relacionada con la aceptación de la sensación térmica, se presenta en la Figura 3.10(h).

Adicionalmente, el reloj cuenta con dos ventanas emergentes. La primera ventana emergente (Figura 3.10(i)) se activa al finalizar la encuesta e indica que los sensores han comenzado a realizar mediciones. La segunda ventana emergente (Figura 3.10(j)) se muestra una vez que los sensores han terminado de medir, presentando los resultados al usuario. En esta ventana, 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

Es necesario instalar la herramienta `git`, la cual puede descargarse desde el siguiente enlace: [descarga git](https://github.com/AltamarMx/iertools.git). Asimismo, se requiere la instalación de las siguientes librerías de Python: `matplotlib`, `datetime`, `pandas` e `iertools`. Esta ultima 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.

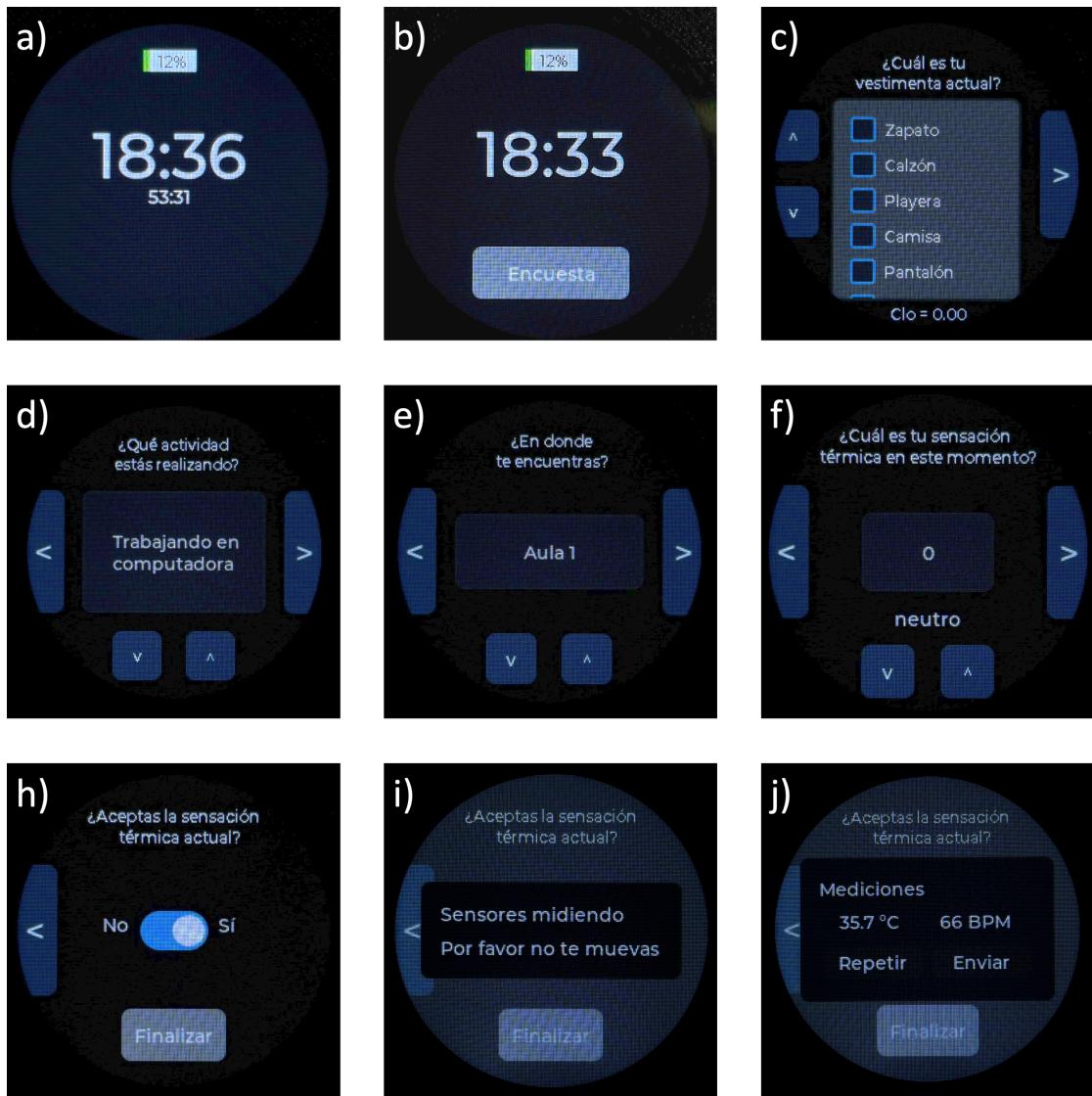


Figura 3.10: Interfaz del reloj inteligente: (a) pantalla principal, (b) activación de la encuesta, (c) pregunta sobre la vestimenta actual, (d) pregunta sobre la actividad realizada, (e) pregunta sobre la ubicación, (f) pregunta sobre la sensación térmica, (g) pregunta sobre la aceptación de la sensación térmica, (h) ventana emergente indicando el inicio de las mediciones, y (j) ventana emergente con los resultados de las mediciones.

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 realizan dos campañas de medición, cada una con diferentes individuos, obteniendo un total de 60 mediciones. La Tabla 3.13 proporciona una muestra que incluye tres mediciones correspondientes al primer sujeto y tres mediciones del segundo sujeto.

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 <i>HH:MM</i>	clo	met	-	-	-	°C	bpm	años	kg	m	-	-	-
2024-07-10.23:32	1.5	Aula 1	0.0	Sí	34.3	66	28	65	1.70	M	1	1	
2024-07-10.24:32	1.5	Aula 1	0.0	Sí	35.4	77	28	65	1.70	M	1	1	
2024-07-10.26:45	2.0	Aula 1	2.0	No	35.2	85	28	65	1.70	M	1	1	
...
2024-11-10.08:46	1.3	Aula 2	0.0	Sí	33.6	62	46	73	1.70	M	1	2	
2024-11-10.10:45	1.3	Aula 2	0.0	Sí	36.9	64	46	73	1.70	M	1	2	
2024-11-10.20:45	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 dispositivo realiza encuestas simplificadas y mide variables fisiológicas como la frecuencia cardíaca y la temperatura de la piel, integrando esta información con la plataforma IoT ThingsBoard. La utilización de hardware abierto como la placa de desarrollo XIAO ESP32C3 y sensores como el MAX30102 y el GY-906 asegura que el dispositivo sea replicable y adaptable a diversas investigaciones. En pruebas realizadas en Temixco, Morelos, el reloj logró recopilar cincuenta y dos mediciones 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. 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.

3. Bajo costo

El desarrollo del reloj inteligente basado en tecnologías abiertas ha permitido implementar funcionalidades similares a las ofrecidas por combinaciones de dispositivos comerciales y aplicaciones existentes a un costo reducido. 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 frecuencia cardíaca y la temperatura de la piel, 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. Precisión 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 precisión y exactitud. Aunque estos sensores fueron sometidos a un proceso de calibración para disminuir errores, las mediciones podrían mejorarse con sensores de mayor precisión, 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 incomodo para algunos usuarios durante su uso de manera prolongada. Además, la carcasa presenta cierta fragilidad al no estar optimizada 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 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 más amplia y contextualizada, 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, se necesitan llevar a cabo campañas de medición durante varios meses con distintos usuarios. Para ello se requiere la fabricación de más relojes inteligentes, para aumentar la cantidad de participantes. A largo plazo, esta estrategia propiciara el estudio del confort térmico en Temixco, Morelos y en lugares con climas similares al de Temixco (Cálido subhúmedo)

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 es un punto que con conocimientos de diseño industrial e impresión 3D puede optimizarse bastante.

El diseño del dispositivo puede optimizarse mediante el uso de herramientas de 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 con Thingsboard, abre la posibilidad de desarrollar modelos de confort térmico adaptativos.

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

La integración del reloj inteligente al ecosistema 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

- Aguirre, Verónica Ivette Calixto. 2021. «Thermal comfort studies». Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0814603/Index.html>.
- 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 Watanebe, Yosuke Kaneko, y Ongun B. Kazancı. 2023. «Human physiology for personal thermal comfort-based HVAC control – A review». *Building and Environment* 240 (julio): 110418. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110418>.
- 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.BUILDENV.2017.05.004>.
- 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/thermalcomfort0000fang>.

- 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.
- Garces, Hugo O., Eduardo Morales, Rodrigo Gomez, 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.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- Nkurikiyezu, 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>.
- 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>.
- 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 Apriliyanti, 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=AfmBOoobMBx68FsKl3OQeHRxlqV72c0WFDIICCubVzyQFrHrNYflB-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>.