

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

Julio César Landa López

2024-10-10

Tabla de contenidos

Resumen	5
Abstract	6
Agradecimientos	7
1 Introducción	8
2 Marco teórico	12
2.0.1 Sensores de temperatura	12
2.0.2 La Aplicación Cozie y su Integración con Smartwatches	12
2.0.3 ESOLMET-IER	14
3 Diseño, desarrollo y validación	16
3.1 Metodología	16
3.2 Construcción del dispositivo	26
3.3 Encuestas e interfaz	26
3.4 Calibración	29
3.5 Lógica de programación	34
3.6 Instrucciones de uso	38
3.7 Validación del funcionamiento del reloj inteligente	43
4 Conclusiones	47
4.1 Contribuciones del proyecto	47
4.2 Limitantes del proyecto	48
4.3 Trabajo futuro	49
4.4 Conclusión general	50
Referencias	51

Listado de Figuras

3.1	Circuito de control del motor vibrador.	21
3.2	Partes de la carcasa del dispositivo (el seguro se muestra a mayor escala para su mejor visualización).	23
3.3	Diagrama de conexiones: a) circuito vibrador, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, c) circuito de la batería.	24
3.4	Diagrama de bloques funcional del reloj inteligente.	25
3.5	Gráficos de dispersión de las mediciones del sensor GY-906 y la cámara termográfica Fluke Ti9 antes y después de la calibración.	32
3.6	Gráficos de dispersión para validación de la calibración del Sensor GY-906.	33
3.7	Diagrama de flujo de la función actualizar hora.	36
3.8	Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.	37
3.9	Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.	39
3.10	Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.	40
3.11	Interfaz del reloj inteligente: (a) pantalla principal, (b) activación de la encuesta, (c) pregunta sobre la vestimenta actual, (d) pregunta sobre la actividad realizada, (e) pregunta sobre la ubicación, (f) pregunta sobre la sensación térmica, (h) pregunta sobre la aceptación de la sensación térmica, (i) ventana emergente indicando el inicio de las mediciones, y (j) ventana emergente con los resultados de las mediciones.	44

Listado de Tablas

3.1	Comparación de características de conectividad y hardware en placas de desarrollo.	17
3.2	Especificaciones técnicas detalladas de la placa XIAO ESP32C3.	18
3.3	Comparación de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3.	19
3.4	Comparación de sensores de temperatura por rango operativo y precisión. . . .	19
3.5	Comparación de Sensores de frecuencia cardíaca.	20
3.6	Tabla de componentes seleccionados.	22
3.7	Tabla de equivalencia de prendas a CLO.	27
3.8	Tabla equivalencia de actividades a MET.	27
3.9	Escala del voto de sensación térmica con su descripción.	28
3.10	Error Absoluto Medio (EAM) para diferentes valores de RATE_SIZE en el MAX30102.	30
3.11	Estadísticas de las Mediciones del Sensor GY-906 y la Cámara Termográfica Fluke Ti9.	31
3.12	Error Medio (EM) y Error Absoluto Medio (EAM) para el conjunto inicial y el conjunto de validación antes y después de la calibración.	33
3.13	Librerías utilizadas y sus versiones recomendadas para el funcionamiento del reloj inteligente.	41
3.14	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 y la frecuencia de uso de espacios con aire acondicionado (F). . . .	46

Resumen

Abstract

Agradecimientos

Poner atención en el título, no convence “Medición de confort térmico”, no se puede medir el confort térmico

1 Introducción

El reporte de Cambio Climático 2023 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) advierte sobre un probable aumento en la temperatura superior a 1.5°C entre los años 2021 y 2040, alcanzando hasta los 5.7°C para 2100 (Synthesis Report 2023). Para limitar este calentamiento, 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 luego disminuir en un 43% para el año 2030, llegando a cero neto para el año 2050, conforme los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (2015).

Las emisiones de GEI generadas por el uso de energía representan el 73.2% a nivel global, y el uso de energía en edificaciones constituye el 17.5%, desglosado en un 6.6% en edificaciones no residenciales y un 10.9% en 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).

La eficiencia energética desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático al optimizar el uso de recursos. Avanzar hacia la eficiencia energética implica reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo cual favorece la descarbonización del sistema energético. Las fuentes de energías renovables pueden ser un aliado valioso en el camino a la eficiencia energética.

Además, es importante destacar que una parte esencial en la búsqueda de la eficiencia energética en edificaciones es la aplicación de estrategias de diseño bioclimático. Estas consisten en el diseño de la edificación de acuerdo al clima del lugar donde estará construida (Olgyay et al. 1963). Esto propicia tener espacios que satisfagan las necesidades y expectativas de los ocupantes, proporcionando condiciones de confort térmico para una mejor calidad de vida y productividad.

La digitalización energética tiene como objetivo contribuir a la eficiencia energética y la fiabilidad del sistema energético en su conjunto mediante el análisis de datos y la integración de tecnologías digitales en la producción, almacenamiento, distribución y consumo de energía. Esto implica el uso de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) o el internet de las cosas (IoT) (Olabi, Abdelkarem, y Jouhara 2023). Esto favorece indirectamente a la sustentabilidad al respaldar la eficiencia energética y fortalecer la fiabilidad del sistema energético.

Si bien la digitalización energética es prometedora en este sentido para la eficiencia energética y la descarbonización, también presenta desafíos debido a que se espera un aumento en la demanda de energía a nivel global (Mitigation of Climate Change 2022). Para poder llevar a cabo un proceso de digitalización energética adecuado que permita lograr los objetivos de descarbonización, se debe buscar una democracia energética con tres perspectivas clave: soberanía popular, un gobierno participativo y propiedad civil (Judson, Fitch-Roy, y Soutar 2022).

En la búsqueda de un futuro sustentable, la transición hacia fuentes de energía renovables, tecnologías eficientes, edificaciones sustentables y una democracia energética son de vital importancia; aunado a la creciente necesidad de abordar la crisis climática, el consumo energético de edificaciones requiere de acciones inmediatas.

El confort térmico se define como una condición mental que expresa la satisfacción con el ambiente, y es un juicio cognitivo influenciado por procesos físicos, fisiológicos y otros factores (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017). Desempeña un papel esencial en el consumo de energía en edificaciones, pues está intrínsecamente ligado a la forma en que diseñamos las edificaciones. 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.

Para el confort térmico se toman en cuenta siete variables físicas, las cuales están relacionadas a la transferencia de calor entre el ocupante y su entorno, así como a los modelos de predicción de confort térmico. Estas variables incluyen la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, temperatura radiante, presión atmosférica, aislamiento térmico de la ropa y nivel metabólico del ocupante (Enescu 2017). Asimismo, existen variables fisiológicas altamente relacionadas con el confort térmico que pueden servir como indicadores, tales como la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (Bogatu et al. 2023).

Durante la fase de diseño de una edificación, el empleo de modelos predictivos de confort térmico se convierte en una herramienta esencial para desarrollar estrategias efectivas de diseño bioclimático. Además, es crucial realizar encuestas de evaluación durante la ocupación para determinar el nivel de confort térmico y evaluar la efectividad de las estrategias implementadas durante la fase de diseño. Estas encuestas se basan principalmente en cuestionarios destinados a recabar la opinión de los ocupantes sobre su experiencia ambiental, mientras que las mediciones experimentales de las variables físicas que inciden en el entorno sirven como un respaldo fundamental (Aguirre 2021).

En este contexto, la transición hacia edificaciones sustentables no se trata solo de reducir el consumo energético, sino de hacerlo de manera eficiente sin comprometer el confort térmico, acústico y lumínico.

Existen diversos modelos que se utilizan para la predicción del confort térmico en edificaciones. Estos modelos se clasifican comúnmente en dos categorías: para edificaciones con sistemas de aire acondicionado y para edificaciones sin este tipo de sistemas. Entre los modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado, el modelo más utilizado es el conocido como

método Fanger, este método se basa en las variables físicas relacionadas al confort térmico mencionadas previamente. Estas variables se utilizan en ecuaciones para calcular el índice de sensación térmica (PMV por sus siglas en inglés) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD por sus siglas en inglés) (Fanger 1970). Mientras que para los sistemas sin aire acondicionado existen algunos modelos como el PMV adaptativo o el PMV extendido (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017), entre otros, los cuales, se explicaran más a detalle en el siguiente capítulo.

Un problema es la precisión de los modelos existentes como el caso del método Fanger (PMV-PPD), un estudio realizado por Cheung et al. (2019) donde se determina la precisión del modelo con la base de datos de confort térmico global del ASHRAE, reporta que el PMV tiene una precisión del 34% respecto a la sensación térmica observada, mientras que el PPD puede llegar a sobreestimar la insatisfacción de los ocupantes. Esto da pie a continuar con la investigación y desarrollo de más modelos, como el caso de la implementación de algoritmos de aprendizaje automático.

En años recientes se han utilizado nuevas herramientas como el caso de los dispositivos wearables para el desarrollo de modelos de confort, la implementación de dichos dispositivos con sensores integrados, tienen la capacidad de medir variables ambientales y fisiológicas que permiten generar bases de datos que incluyan datos fisiológicos de los ocupantes y la obtención de modelos de confort más precisos.

En esta tesis se presenta el desarrollo de un prototipo de wearable con software y hardware libres que recopile y envíe datos sobre encuestas de confort térmico e información extra de variables fisiológicas a una plataforma de IoT, con el fin de crear una base de datos que permita el desarrollo de modelos de confort térmico. A continuación se presenta las contribuciones de este proyecto.

Medición precisa y en tiempo real de variables fisiológicas: El uso de un dispositivo wearable permite la captura directa de variables fisiológicas relacionadas al confort térmico, como la temperatura corporal y la frecuencia cardíaca.

Monitoreo continuo y no intrusivo: Al ser un dispositivo portable y de uso constante, este permite el monitoreo continuo y no intrusivo de las variables fisiológicas mencionadas previamente, facilitando la recopilación de datos a lo largo del tiempo, lo cual es fundamental para el análisis de patrones y tendencias en el confort térmico.

Encuestas de confort térmico simplificadas: La función de encuestas periódicas de confort térmico es una de las partes más importantes en el desarrollo del dispositivo para la creación de una base de datos. Estas encuestas permiten al usuario evaluar su nivel de confort térmico de manera rápida y sencilla.

Contextualización de los datos de confort térmico: Al integrarse el dispositivo a la red de Internet de las Cosas del Instituto de Energías Renovables junto con los demás dispositivos de medición de variables físicas previamente instalados en el instituto, permite contextualizar los datos de confort térmico del usuario en relación con las condiciones ambientales del entorno.

Potencial desarrollo de modelos de confort térmico: El desarrollo de este proyecto a un futuro puede tomar dos vertientes. Una en donde se puedan generar modelos de confort personalizados para cada individuo, favoreciendo a la digitalización energética y la automatización de espacios. Y la otra vertiente para generar modelos predictivos de confort térmico contextualizados para la comunidad del instituto.

2 Marco teórico

– Aquí van todos los antecedentes de confort térmico, ya están en el archivo estado.qmd –

2.0.1 Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura se clasifican en dos tipos principales: sensores de contacto y sensores sin contacto. Los sensores de contacto, a su vez, se subdividen en tres categorías según su método de medición:

Termopares: Utilizan el efecto Seebeck para generar una voltaje por la unión de dos metales diferentes.

Termistores: Son resistores sensibles a la temperatura, cuya resistencia eléctrica varía en función de los cambios de temperatura. Están fabricados con materiales cerámicos o poliméricos. Existen dos tipos principales: los NTC (coeficiente de temperatura negativo) y los PTC (coeficiente de temperatura positivo).

Detectores de temperatura de resistencia (RTD): Utilizan metales puros, como el platino, para medir la temperatura a través de la variación lineal y predecible de su resistencia eléctrica.

Por otro lado, los sensores sin contacto incluyen los sensores infrarrojos, diseñados para detectar la radiación infrarroja emitida por un objeto a distancia.

En el sector de la salud, los termistores son ampliamente utilizados debido a su alta precisión en los rangos de temperatura corporal y su rápida respuesta a los cambios de temperatura. Sin embargo, a raíz de la pandemia de COVID-19 en 2020, el uso de sensores infrarrojos se populariza considerablemente. Esto ha impulsado avances en su tecnología, lo que los hace cada vez más comunes para medir la temperatura corporal.

2.0.2 La Aplicación Cozie y su Integración con Smartwatches

Cozie es una aplicación de código abierto desarrollada con el propósito de recopilar datos subjetivos mediante encuestas en tiempo real, enfocándose en estudios de confort térmico y calidad ambiental. Su diseño busca integrar encuestas breves y específicas directamente en dispositivos portátiles, eliminando la necesidad de usar teléfonos inteligentes u otros medios adicionales

para registrar las respuestas del usuario. Este enfoque ha facilitado su uso en investigaciones ambientales y ergonomía, proporcionando datos contextuales y en tiempo real.

Compatibilidad y Funcionamiento

Inicialmente, Cozie fue diseñada para dispositivos Fitbit, y posteriormente se amplió para incluir Apple Watch, aprovechando la capacidad de estos dispositivos para integrar datos fisiológicos con respuestas subjetivas. Las principales características de Cozie incluyen:

- **Compatibilidad con Smartwatches:** Actualmente, Cozie es compatible con ciertos modelos de Fitbit (como el Versa 4) y con el Apple Watch (a partir de Series 3). La versión de Apple Watch incorpora la funcionalidad del framework HealthKit, lo que permite acceder a datos como frecuencia cardíaca y temperatura corporal.
- **Encuestas Directamente en el Dispositivo:** Las preguntas se despliegan en la pantalla del smartwatch, y el usuario puede responder con simples interacciones táctiles, lo que hace el proceso rápido y conveniente.
- **Integración con Datos Fisiológicos:** En el caso de Apple Watch, Cozie puede combinar las respuestas de las encuestas con mediciones fisiológicas como frecuencia cardíaca y temperatura de la piel, mejorando el contexto de los datos recolectados.
- **Código Abierto:** Su naturaleza de código abierto permite a los desarrolladores personalizar ciertas funcionalidades y adaptarlas a las necesidades específicas de un proyecto.

Ventajas

Cozie presenta varias ventajas que la han convertido en una herramienta útil para estudios de confort térmico:

1. **Conveniencia:** Al permitir que los usuarios respondan encuestas directamente desde sus relojes inteligentes, elimina la necesidad de dispositivos adicionales como teléfonos o tabletas.
2. **Datos Contextualizados y en Tiempo Real:** Las respuestas se registran junto con datos fisiológicos y temporales, proporcionando una visión más completa de las condiciones del usuario.
3. **Portabilidad:** Al estar integrada en un smartwatch, facilita la recolección de datos en cualquier lugar, incluso durante actividades cotidianas.

Desventajas

A pesar de sus beneficios, Cozie enfrenta limitaciones que pueden restringir su uso en ciertos contextos:

1. **Compatibilidad Limitada:** Actualmente, Cozie solo está disponible para Apple Watch y algunos modelos de Fitbit más antiguos. Dispositivos más recientes de Fitbit han eliminado el soporte para aplicaciones de terceros, restringiendo aún más su implementación.

2. **Costo Elevado de los Dispositivos:** Los dispositivos compatibles, como el Apple Watch Series 8 (aproximadamente \$5,500 MXN) y el Fitbit Versa 4 (aproximadamente \$4,200 MXN), presentan precios significativamente altos, lo que limita su accesibilidad para usuarios o instituciones con recursos limitados.
3. **Interfaz poco Intuitiva:** Aunque funcional, la interfaz de Cozie no está optimizada para facilitar encuestas largas o altamente personalizadas, lo que podría ser un obstáculo en estudios más complejos.
4. **Dificultades en la Descarga de Datos:** Extraer y manejar los datos recopilados no es tan directo como en soluciones personalizadas, ya que depende de las herramientas y plataformas asociadas a cada dispositivo (HealthKit en Apple y Fitbit Dashboard).

Conclusión sobre Cozie

La aplicación Cozie ha demostrado ser una herramienta valiosa en investigaciones sobre confort térmico y calidad ambiental, especialmente para estudios que requieren datos en tiempo real y contextuales. Sin embargo, sus limitaciones en términos de compatibilidad, accesibilidad económica y flexibilidad de la interfaz restringen su adopción en escenarios más amplios. Esto resalta la necesidad de soluciones alternativas, como dispositivos personalizados y basados en tecnologías abiertas, que puedan proporcionar funcionalidades similares a costos más accesibles y con mayor adaptabilidad para diversas investigaciones.

2.0.3 ESOLMET-IER

El Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha establecido un robusto ecosistema de monitoreo ambiental que facilita la investigación y el desarrollo en energías renovables y confort térmico. Este ecosistema se centra en la Estación Solarimétrica y Meteorológica del IER-UNAM (ESOLMET-IER) y en el desarrollo de dispositivos complementarios para mediciones locales en espacios específicos.

Estación Solarimétrica y Meteorológica del IER-UNAM (ESOLMET-IER):

La ESOLMET-IER, ubicada en Temixco, Morelos, opera desde 2001 y proporciona datos meteorológicos y solarimétricos esenciales para investigaciones en energías renovables. Esta estación mide variables como:

- **Irradiancia solar directa, global, difusa y UV:** Medidas en W/m², fundamentales para estudios de energía solar.
- **Temperatura del aire ambiente:** Registrada en grados Celsius.
- **Humedad relativa:** Expresada en porcentaje.
- **Velocidad del viento:** Medida en metros por segundo.
- **Presión barométrica:** Registrada en milibares.

Los datos recopilados se almacenan en el Sistema de Información de datos Solarimétricos y Meteorológicos IER (SISMET-IER), que permite consultas por día o por rangos de fechas, facilitando el análisis histórico y en tiempo real de las variables medidas. ESOLMET

Desarrollo de dispositivos para mediciones locales:

Además de la ESOLMET-IER, el IER está desarrollando dispositivos para medir variables ambientales en espacios específicos, como aulas o áreas delimitadas. Estos dispositivos se centran en:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Velocidad del viento

La implementación de estos dispositivos permite obtener datos más precisos y contextualizados, esenciales para estudios de confort térmico y eficiencia energética en interiores. Al integrar estas mediciones con los datos de la ESOLMET-IER, se logra una comprensión más completa de las condiciones ambientales, tanto a nivel macro como micro, beneficiando proyectos de investigación y aplicaciones prácticas en el diseño de espacios sostenibles.

Este ecosistema de monitoreo ambiental en el IER refleja el compromiso de la UNAM con la investigación de vanguardia en energías renovables y confort térmico, proporcionando herramientas y datos esenciales para el avance científico y tecnológico en estas áreas.

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 μ A
Consumo de energía con WIFI activo	Modo activo: < 75 mA
Consumo de energía con Bluetooth activo	Modo modem-sleep: < 27 mA
Temperatura de trabajo	-40 °C ~ 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

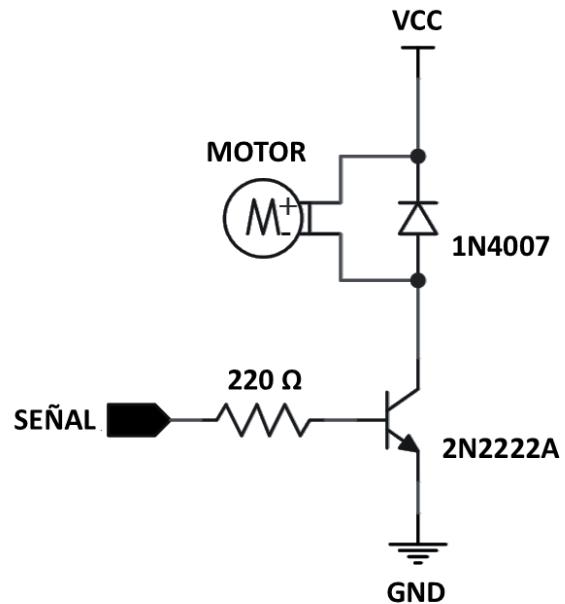


Figura 3.1: Circuito de control del motor vibrador.

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.

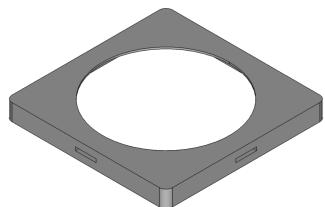
La parte superior de la carcasa está diseñada con el fin de mantener la pantalla táctil en su posición y cerrar el dispositivo. Todas las piezas se ensamblan una con otra por presión, evitando el uso de tornillos.

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.

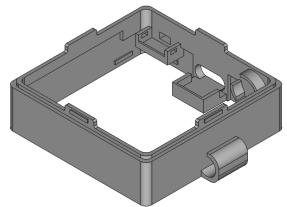
En la Figura 3.2 Se observan las tres piezas principales de la carcasa.

Diseño de los circuitos

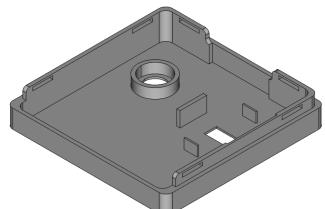
El diseño de los circuitos del reloj inteligente se divide en tres circuitos, circuito vibrador para alarma Figura 3.3 a) , circuito de sensores y microcontrolador Figura 3.3 b) y el circuito de la batería Figura 3.3 c). Cada uno de estos circuitos está diseñado para mantener las conexiones



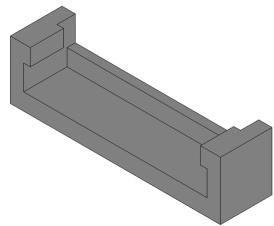
Parte superior



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.

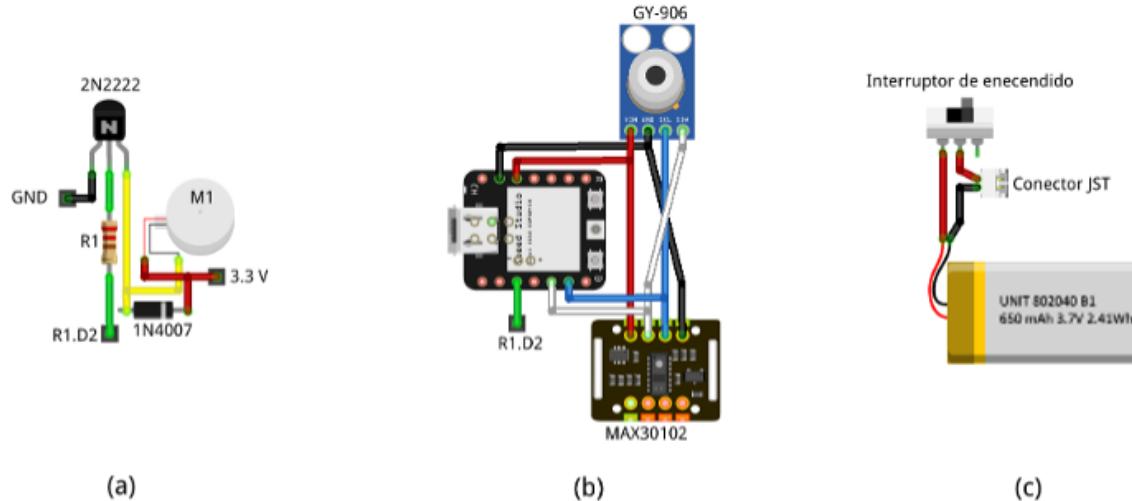


Figura 3.3: Diagrama de conexiones: a) circuito vibrador, b) circuito de sensores y placa de desarrollo, c) circuito de la batería.

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.

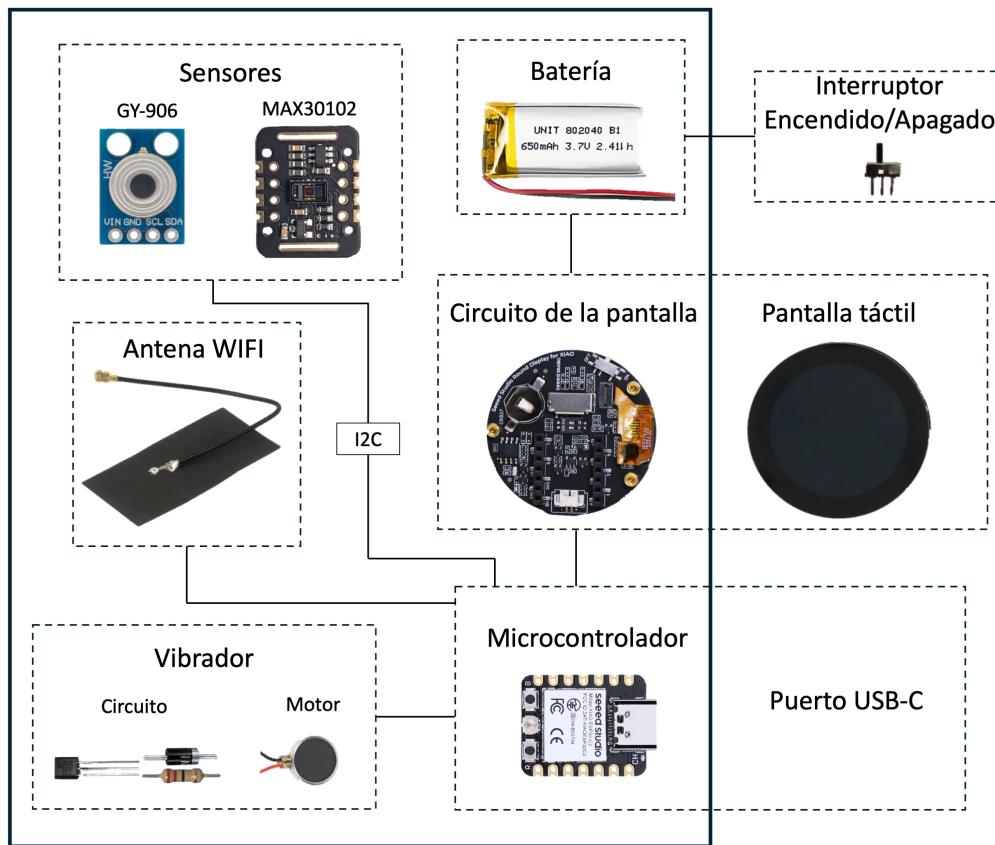


Figura 3.4: Diagrama de bloques funcionales del reloj inteligente.

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 61 pares de mediciones, la `?@tbl-estadisticas-camara` 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	34.58	35.30
Desviación estándar	0.75	0.63
Mínimo	32.36	32.80
Máximo	35.83	35.83

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

- Error Medio (EM): 0.72°C

- Error Absoluto Medio (EAM): 0.77°C

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

- Pendiente: 0.47
- Intercepto: 18.99

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 obtiene un error estándar de la estimación S_e de 0.54, mientras que los errores obtenidos son los siguientes:

- EM: 2.19×10^{-15}
- EAM: 0.39

La Figura 3.5 muestra la comparación entre las gráficas de dispersión de datos antes y después de la calibración.

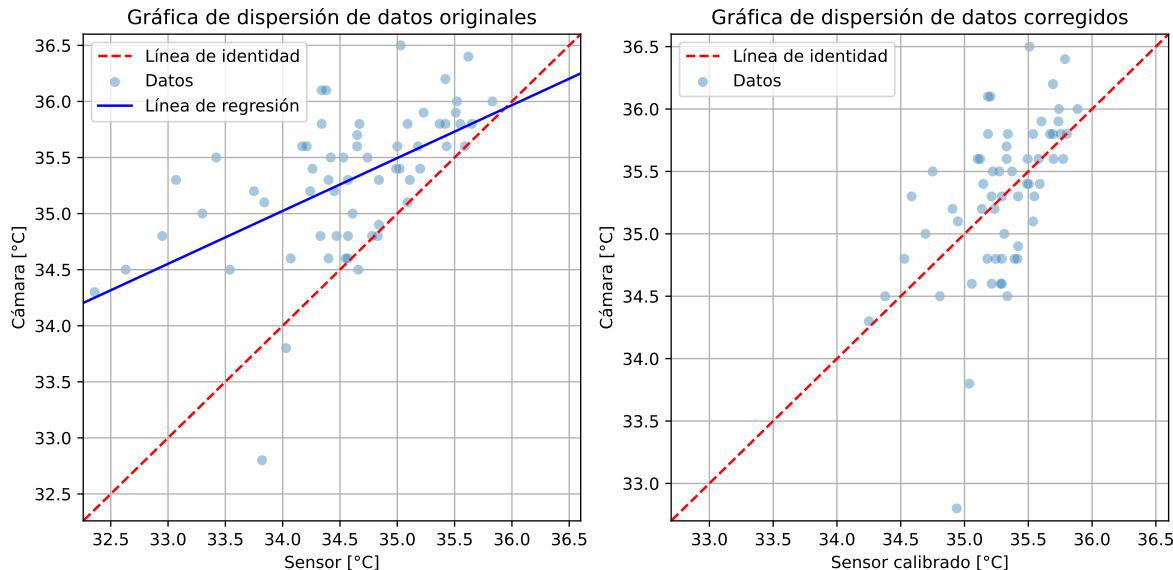


Figura 3.5: Gráficos de dispersión de las mediciones del sensor GY-906 y la cámara termográfica Fluke Ti9 antes y después de la calibración.

Posteriormente, se lleva a cabo una segunda campaña de medición, recopilando 25 pares de datos adicionales, con la finalidad de validar la función de regresión lineal obtenida. Juntando ambos conjuntos de datos, se obtiene un total de 86 pares de mediciones. Los errores iniciales de este conjunto son:

- EM: 0.59

- EAM: 0.66

Aplicando la función de regresión lineal, se obtiene un error estándar de la estimación S_e de 0.54, lo cual demuestra la consistencia del valor entre el primer conjunto de datos y este nuevo conjunto, mientras que los errores son los siguientes:

- EM: -0.08
- EAM: 0.41

La Figura 3.6 muestra la comparación de las gráficas de dispersión del conjunto total de datos (86 mediciones), antes y después de la calibración.

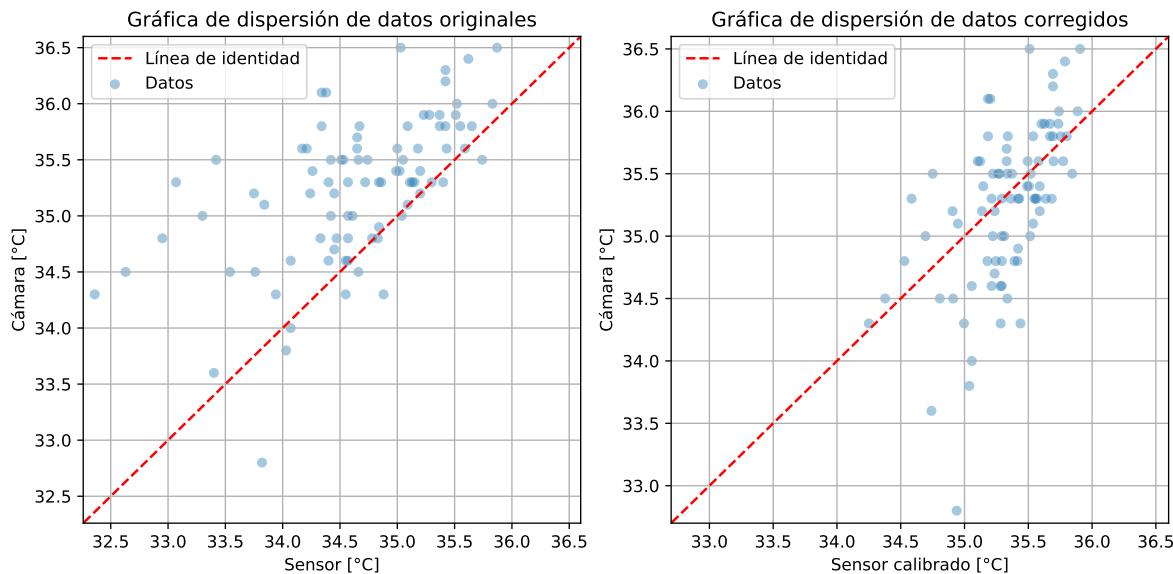


Figura 3.6: Gráficos de dispersión para validación de la calibración del Sensor GY-906.

Finalmente, la Tabla 3.12 muestra los EM y EAM antes y después de la calibración de los dos conjuntos de datos, el conjunto inicial a partir del cual se obtuvo la los parámetros para realizar el modelo de regresión lineal y el conjunto de validación en el cual se llevo a cabo una segunda campaña de medición para obtener más datos y verificar la fiabilidad de la calibración.

Tabla 3.12: Error Medio (EM) y Error Absoluto Medio (EAM) para el conjunto inicial y el conjunto de validación antes y después de la calibración.

	Conjunto inicial <i>Sin calibrar</i>	<i>Calibrado</i>	Conjunto de validación <i>Sin calibrar</i>	<i>Calibrado</i>
EM	0.5	0.89	0.65	-0.08
EAM	0.72	0.54	0.61	0.43

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 deshabilita el botón para realizar la encuesta según el horario o si esta ya fue o no contestada. Esta función también es la encargada de emitir la alarma para alertar al usuario la disponibilidad de una nueva encuesta. El diagrama de flujo de esta función se presenta en la Figura 3.7.

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 3.8.

4. Estrategias para el ahorro de energía

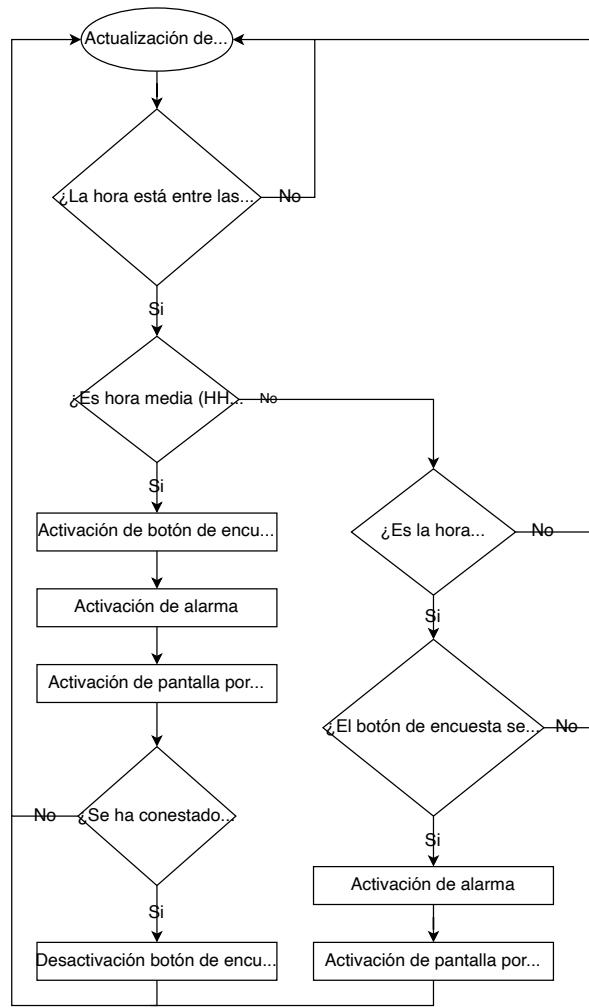


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la función actualizar_hora.

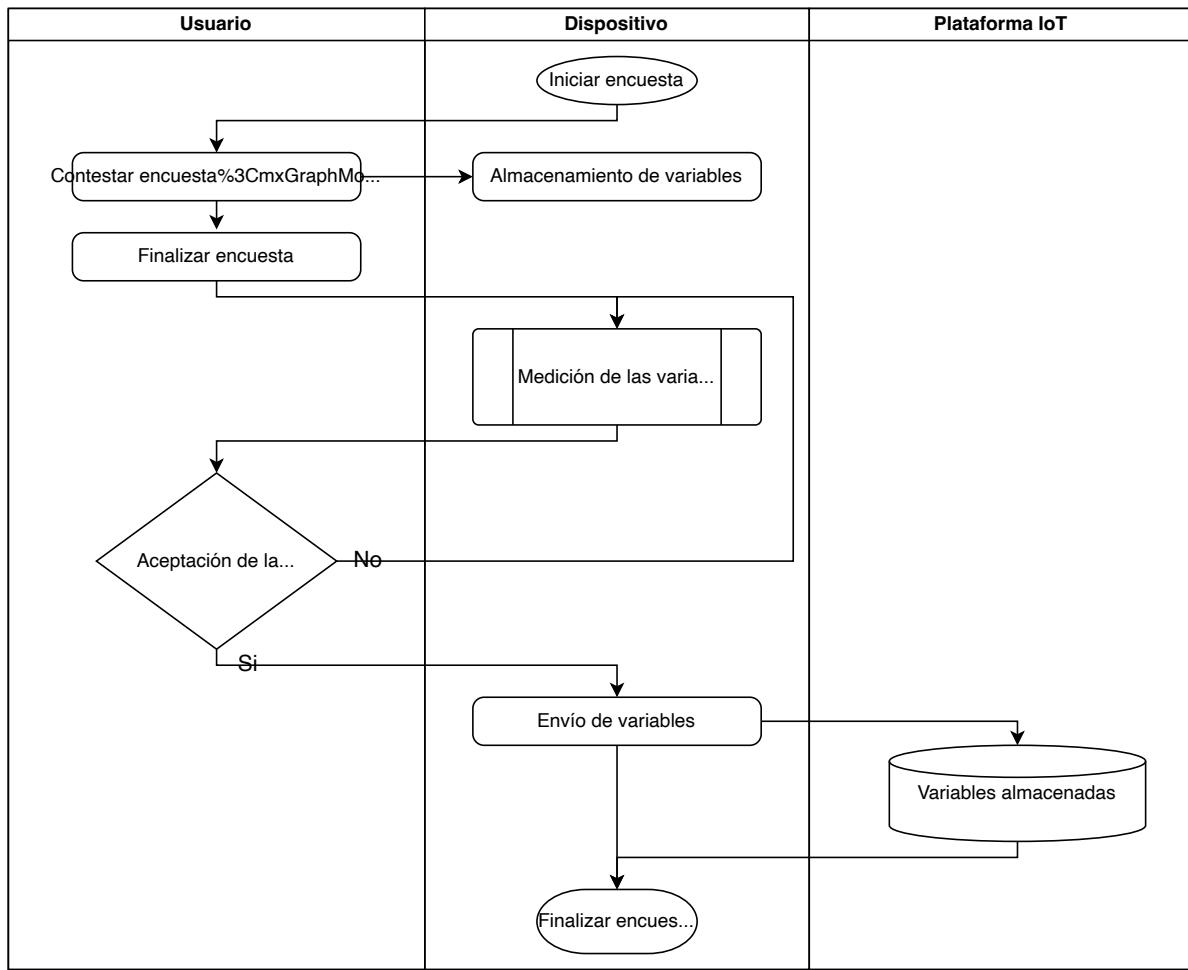


Figura 3.8: Diagrama de flujo de encuesta y medición de variables.

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

3.6 Instrucciones de uso

El procedimiento de configuración e interacción con el reloj inteligente se puede dividir en cuatro etapas. La primera etapa consiste en la preparación del entorno de desarrollo, que implica la instalación del software Arduino con las 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 3.9, 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 3.10. La flecha roja en la figura señala el paquete que debe instalarse.

Posteriormente, se configuran las librerías necesarias para el proyecto. Es importante instalar las librerías en las versiones especificadas para garantizar el correcto funcionamiento del reloj inteligente. La Tabla 3.13 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”.

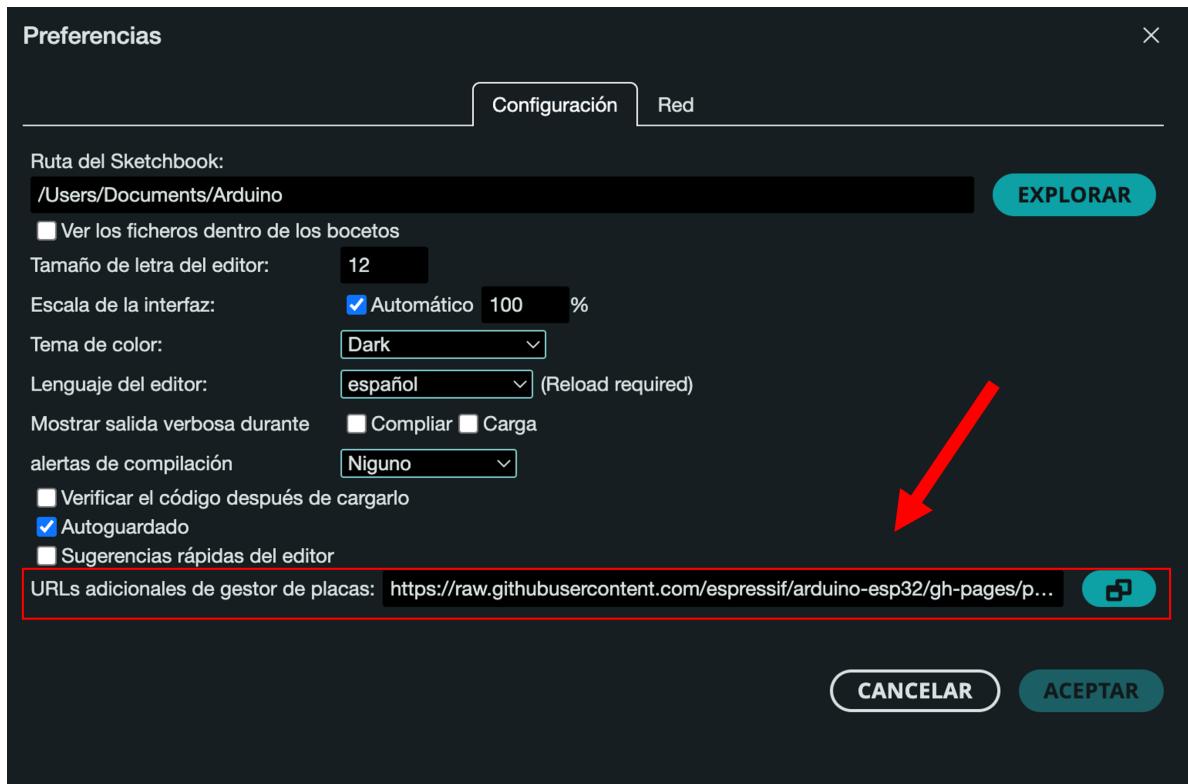


Figura 3.9: Configuración de las URLs adicionales en el gestor de tarjetas del Arduino IDE para agregar el paquete de placas ESP32.

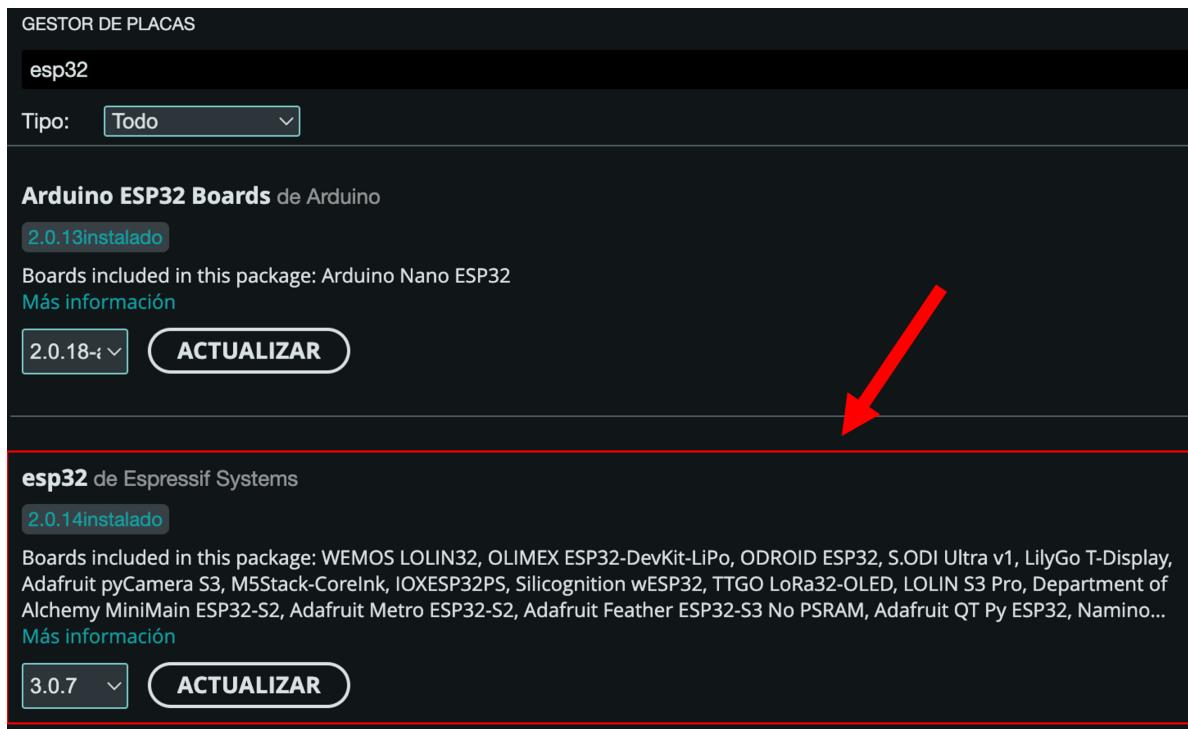


Figura 3.10: Selección e instalación del paquete ESP32 de Espressif Systems en el Gestor de placas del Arduino IDE.

Tabla 3.13: 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 3.11(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 3.11(b)), que guía al usuario a través de las preguntas del formulario. Cada una de las preguntas está asociada con una pantalla específica:

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

Adicionalmente, el reloj cuenta con dos ventanas emergentes. La primera ventana emergente (Figura 3.11(i)) se activa al finalizar la encuesta e indica que los sensores han comenzado a realizar mediciones. La segunda ventana emergente (Figura 3.11(j)) se muestra una vez que los sensores han terminado de medir, presentando los resultados al usuario. En esta 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`. 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.

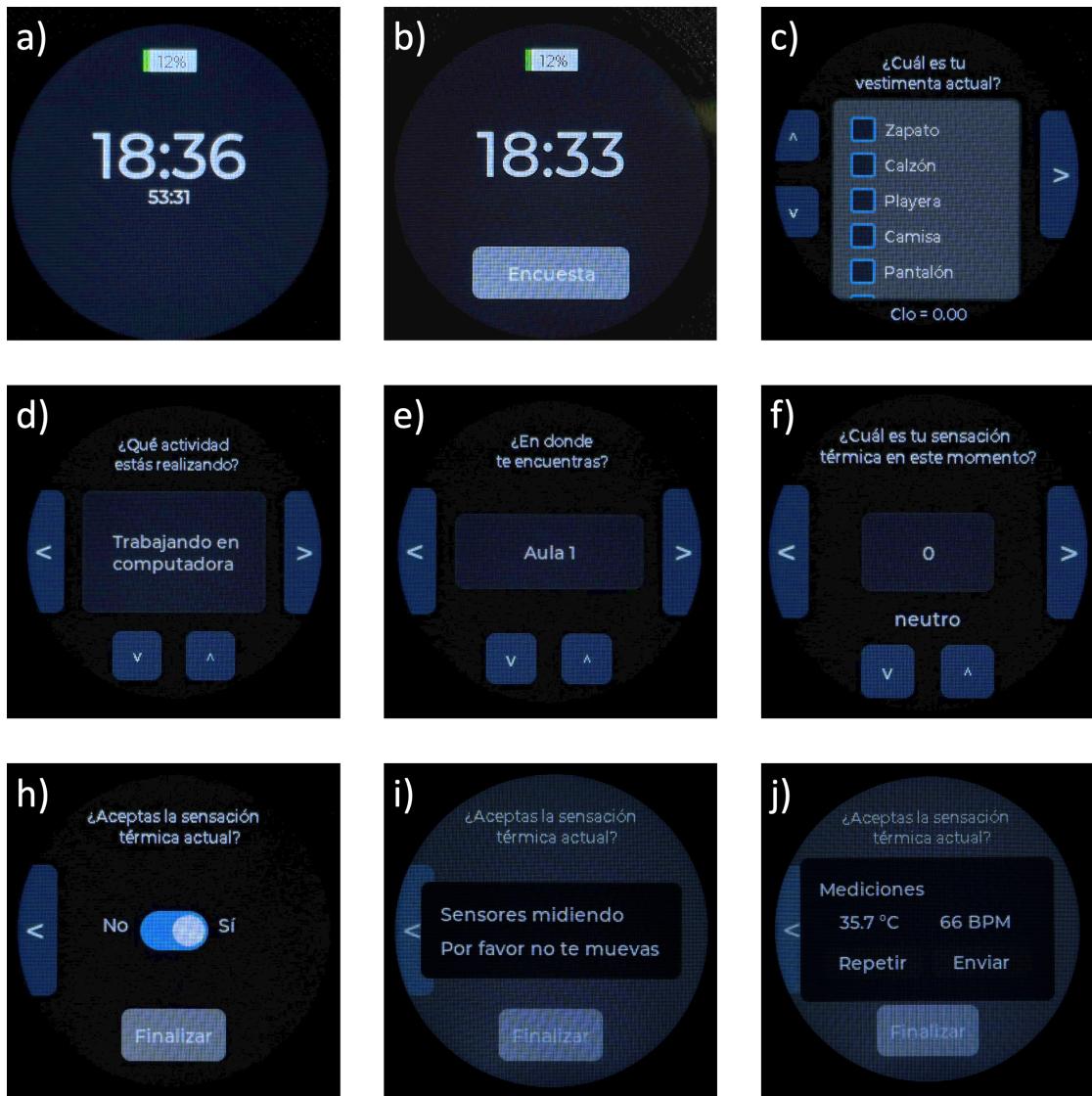


Figura 3.11: Interfaz del reloj inteligente: (a) pantalla principal, (b) activación de la encuesta, (c) pregunta sobre la vestimenta actual, (d) pregunta sobre la actividad realizada, (e) pregunta sobre la ubicación, (f) pregunta sobre la sensación térmica, (g) pregunta sobre la aceptación de la sensación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

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 lleva a cabo una campaña de prueba con una duración de cinco días, en la cual se recopilan un total de cincuenta y dos mediciones. La Tabla 3.14 presenta una muestra de cinco mediciones obtenidas durante esta campaña.

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 3.14: 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 y la frecuencia de uso de espacios con aire acondicionado (F).

Fecha AAAA- MM- DD HH:MM 13:32	I_{cl} clo	M_r met	Ubicación -	TSV -	TA -	T_w °C	H_r bpm	Edad años	W kg	H m	Sexo	F
2024-07- 17 14:32	0.21	1.5	Aula 1	0.0	Sí	34.3	66	28	65	1.70	M	1
2024-07- 17 16:45	0.21	1.5	Aula 1	0.0	Sí	35.4	77	28	65	1.70	M	1
2024-07- 17 17:43	0.21	2.0	Aula 1	2.0	No	35.2	85	28	65	1.70	M	1
2024-07- 17 20:50	0.21	1.8	Aula 1	2.0	No	34.6	59	28	65	1.70	M	1
				1.0	No	35.0	57	28	65	1.70	M	1

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, 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 Watana-be, 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>.
- Cheung, Toby, Stefano Schiavon, Thomas Parkinson, Peixian Li, y Gail Brager. 2019. «Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II». *Building and Environment* 153: 205-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>.
- Enescu, Diana. 2017. «A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (noviembre): 1353-79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.175>.
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press. <https://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>.
- Infonavit. 2024. «Listado de Regiones Bioclimáticas». https://portalmx.infonavit.org.mx/wp/s/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>.
- Judson, Emily, Oscar Fitch-Roy, y Iain Soutar. 2022. «Energy democracy: A digital future?» *Energy Research and Social Science* 91 (septiembre). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102732>.

- 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>.
- Melexis. 2009. *MLX90614 Infra Red Thermometer in TO-39*. <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/mlx90614-datasheet>.
- 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>.
- 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>.
- Ritchie, Hannah. 2020. «Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?» *Our World in Data*.
- Secretaría de Energía. 2023. «Balance Nacional de Energía Preliminar 2022». https://www.google.mx/cms/uploads/attachment/file/841526/BNE_2022.pdf.
- Solution, ETA. 2024. *ETA6003 2.5A, 3MHz Switching Charger with Dynamic Power Path Management*. ETA Solution. https://files.seedstudio.com/wiki/round_display_for_xiao_charge-IC-datasheet.pdf.
- Studio, Seeed. 2024. «Seeed Studio XIAO ESP32C3 Development Board». <https://www.seedstudio.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>.
- uElectronics. 2024. «Motor de Vibración 5V». <https://uelectronics.com/producto/motor-vibracion-5v/?srsltid=AfmBOoobMBx68FsKl3OQeHRxlqV72c0WFIDICCubVzyQFrHrNYflB-w4>.