

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
3 Desarrollo, construcción y validación	13
3.1 Metodología	13
3.2 Construcción del dispositivo	22
3.3 Encuestas e interfaz	22
3.4 Calibración	25
3.4.1 Calibración del Sensor MAX30102	26
3.4.2 Calibración del Sensor GY-906	28
3.5 Lógica de programación	28
3.6 Instrucciones de uso	29
3.7 Validación	29
4 Conclusiones	30
4.1 Discusión	30
4.1.1 Interpretación de los resultados	30
4.1.2 Contribuciones y limitaciones	30
4.2 Conclusiones	30
Referencias	31

Listado de Figuras

3.1	Circuito de control del motor vibrador	18
3.2	Diagrama de conexiones	20
3.3	Diagrama de conexiones	21
3.4	Imagen generica	26

Listado de Tablas

3.1	Comparación de características de conectividad y hardware en placas de desarrollo	14
3.2	Especificaciones técnicas detalladas de la placa XIAO ESP32C3	15
3.3	Comparacion de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3	16
3.4	Comparación de Sensores de Temperatura por Rango Operativo y Precisión . .	16
3.5	Comparación de Sensores de frecuencia cardíaca	17
3.6	Tabla de componentes seleccionados	19
3.7	Tabla de equivalencia de prendas a CLO	23
3.8	Tabla equivalencia de actividades a MET	24
3.9	Escala del voto de sensación térmica con su descripción	24
3.10	sdfsdfs	27

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 sobrestimar 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 –

2.0.0.0.0.1 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.

3 Desarrollo, construcción y validación

En esta sección se describe el proceso completo de desarrollo, construcción y validación del dispositivo presentado en esta tesis. La Sección ?? aborda la metodología general del proyecto, incluyendo una descripción detallada del dispositivo, 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, para asegurar fiabilidad en las mediciones. En la Sección ?? se presenta la lógica de programación del dispositivo, y en la Sección 3.6 se proporcionan instrucciones de uso. Finalmente, en la Sección ?? comprueba la funcionalidad del dispositivo para recopilar y almacenar información de confort térmico.

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 datos fisiológicos, tales como la frecuencia cardíaca y 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 IoT 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 principales son los siguientes:

- Placa de desarrollo
- Pantalla
- Batería
- Sensores

Placa de desarrollo

La selección de la tarjeta o placa 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 y comunicación I2C. Además, debe tener un bajo consumo energético para garantizar el uso portátil prolongado del dispositivo.

Se buscan placas compactas con conectividad inalámbrica. Opciones con microcontroladores como los de Arduino, ESP y Raspberry ofrecen estas características.

Durante el proceso de selección se identifican dos placas con pantallas integradas, que aunque podrían ser útiles, no cumplen con los requisitos del proyecto. La placa LILYGO TTGO, no cuenta con tecnología táctil, lo cual limita su utilidad para realizar encuestas de confort térmico. Por otro lado, la MCU RP2040 con LCD redondo de 1.28 pulgadas, aunque cuenta con una pantalla táctil, no ofrece conectividad WiFi, un requisito esencial. Aunque estas dos placas no son tomadas en cuenta por las razones ya mencionadas, sirven como referencia para la búsqueda de otras opciones. 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 placas 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. 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

Parametro	Seeed Studio XIAO ESP32C3
Procesador	ESP32-C3 32 bit RISC-V 160 MHz
Conectividad	2.4 GHz Wi-Fi BLE: Bluetooth 5.0, Bluetooth mesh
On-chip Memory	400 KB SRAM & 4 MB Flash
Interfaz	1x UART, 1x IIC, 1x SPI, 11x GPIO(PWM), 4x ADC, 1x Reset button, 1x Boot button
Dimensiones	21 x 17.8 mm
Características eléctricas	Voltaje de entrada (Type-C): 5 V Voltaje de operación 3.3 V Circuit operating Voltage (ready to operate):- 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
WiFi activado Consumo de energía	Modo activo: < 75 mA
Bluetooth activado Consumo de energía	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 además de ser de tamaño reducido, sea compatible con la placa seleccionada. En la tabla Tabla 3.3, se presentan las características básicas de las pantallas consideradas durante el proceso.

Tabla 3.3: Comparacion de pantallas compatibles con la XIAO ESP32C3

Pantalla	touchscreen	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 perfectamente 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

Característica	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 MF52AT	Termistor NTC	-55°C a 125°C	±0.2°C (dependiendo de la resistencia)	Ninguna (sensor resistivo)
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 digital	-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, diseño adecuado y comunicación digital por I2C. Aunque el termistor NTC MF52AT ofrece una

alternativa viable, se descarta por ser un sensor analógico. Dado que el dispositivo 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 una transmisión de datos confiable y estable en entornos compactos.

Sensor de pulso cardíaco

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 MAX20100, 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 SpO2	600 μ A a 1 mA
MAX30102	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, SpO2	600 μ A a 1.2 mA
MAX30105	32-bit FIFO	18-bit	Frecuencia cardíaca, SpO2, detección de partículas	600 μ A a 1.2 mA

El MAX30102 se elige como la mejor opción para este proyecto por su equilibrio entre funcionalidad, costo y tamaño. A comparación del MAX30105, este es más económico y más compacto. La funcionalidad de detección de partículas no es de interés para este proyecto. Además, el MAX30102 ofrece mejoras significativas respecto al MAX30100, tanto en la resolución como en el tipo de almacenamiento. La medición de oxigenación en la sangre no es una característica actual del dispositivo planteado en esta tesis, pero podría ser una variable 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 Display, un sensor GY-906, un sensor MAX30102 y un circuito vibrador, es crucial seleccionar

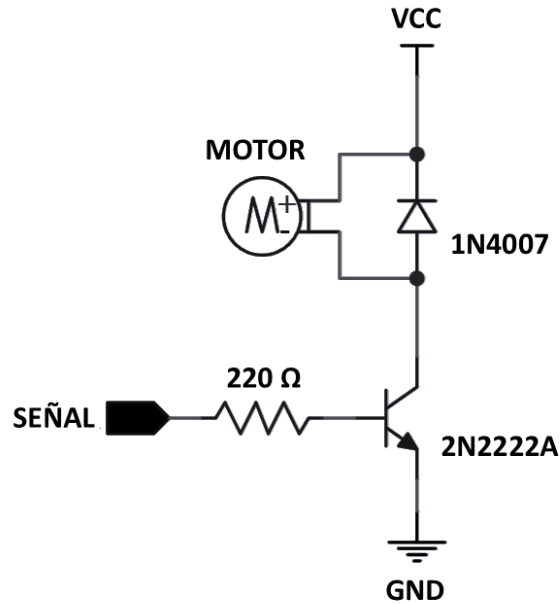


Figura 3.1: Circuito de control del motor vibrador

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 encienden al momento de llevar a cabo sus mediciones; el motor vibrador se enciende únicamente por breves periodos 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 centra en crear una carcasa compacta y adecuada en donde los componentes puedan colocarse sin interferir entre ellos y así mismo el desarrollo de 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.

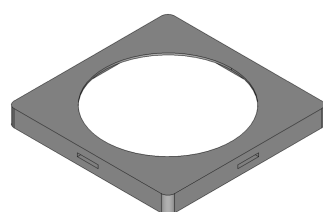
La parte superior de la carcasa está diseñada con el fin de mantener la pantalla táctil en su posición y cerrar el dispositivo. Todas las piezas se ensamblan una con otra por presión, evitando el uso de tornillos.

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.

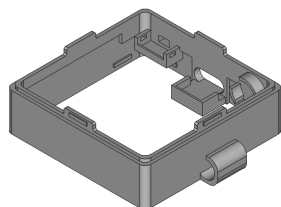
En la Figura 3.2 Se observan las tres piezas principales de la carcasa.

Diseño de los circuitos

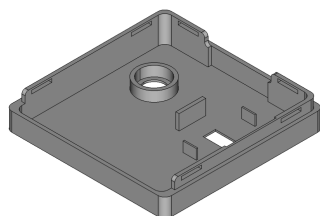
El diseño de los circuitos se divide en tres circuitos, circuito vibrador para alarma Figura 3.3 a) , circuito de sensores y microcontrolador Figura 3.3 b) y el circuito de la batería Figura 3.3 c). Cada uno de estos circuitos está diseñado para mantener las conexiones lo más simples



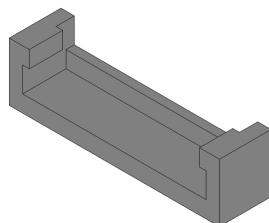
Parte superior



Parte central



Parte inferior



Seguro

Figura 3.2: Diagrama de conexiones

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

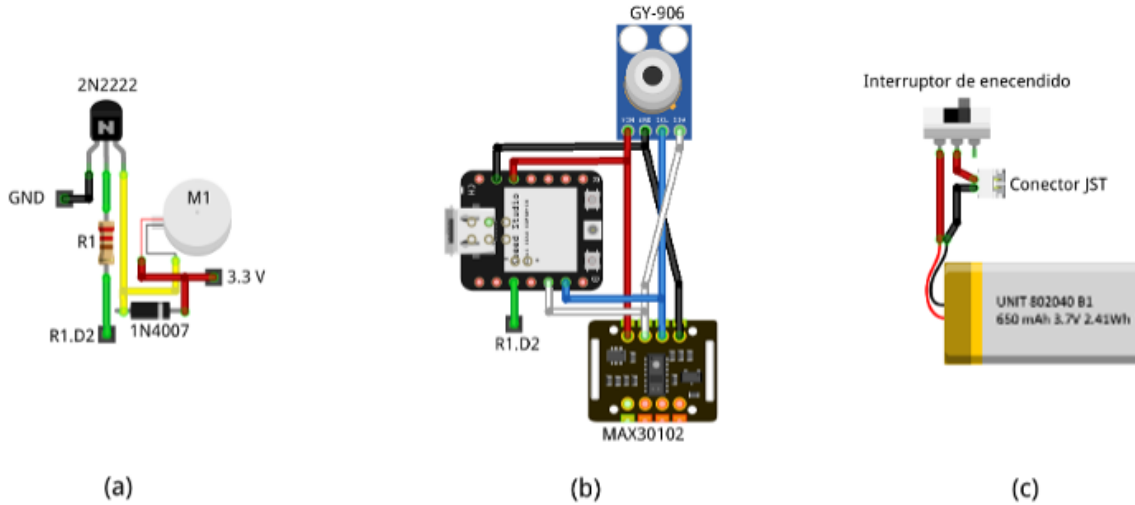


Figura 3.3: Diagrama de conexiones

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. Este circuito tiene la finalidad de proteger el microcontrolador al evitar que el motor se alimente directamente del pin digital del microcontrolador, si no que lo haga directamente de la alimentación general del dispositivo, dejando al pin del microcontrolador únicamente la tarea de dar la señal de activación.

El circuito de los sensores y el microcontrolador tiene la función de comunicar de forma paralela ambos sensores por protocolo I2C al microcontrolador.

El circuito de la batería sirve para añadir el interruptor de encendido y agregar un conector JST, el cual se conecta a la pantalla XIAO Round Display.

En resumen, el diseño del dispositivo está enfocado en optimizar las conexiones, el espacio y facilitar su montaje, esto a la vez que se asegura su funcionalidad y ergonomía.

3.2 Construcción del dispositivo

La construcción del dispositivo en tres etapas: La impresión de la carcasa, la conexión de los componentes electrónicos y la integración y montaje de todos los elementos.

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 8:00 a. m. y las 9:00 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 XXX Podría mencionarse a Ibet o buscar la referencia en las notas de la clase con Guadalupe. 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
Zapato	0.02
Calzón	0.04
Playera	0.09
Camisa	0.15
Pantalón	0.25
Calcetines	0.02
Sombrero	0.05
Bufanda	0.10
Guantes	0.10
Chaqueta	0.30
Suéter	0.18
Falda	0.14
Shorts	0.06
Vestido	0.15
Pantalón de mezclilla	0.23
Abrigo	0.40
Gorro de lana	0.08
Bata de baño	0.30
Chaleco	0.10
Botas	0.10
Impermeable	0.20
Sandalías	0.02
Brasier	0.02
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: Se 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: Se 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: Finalmente, se 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.

La Figura 3.4 muestra todas las pantallas

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.

Aquí falta una imagen



Figura 3.4: Imagen generica

3.4.1 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 (MAE) de 18.5 bpm respecto al oxímetro de referencia, lo cual no es aceptable. 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 MAE a 4.4 bpm.

La Tabla 3.10 muestra el error absoluto medio (MAE) obtenido para diferentes valores de **RATE_SIZE** entre 4 y 16, destacando que el mejor valor para **RATE_SIZE** es 6:

Tabla 3.10: sdfsd fsd

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

Posteriormente, con **RATE_SIZE** fijado en 6, se ajusta el valor de **sampleAverage** de 4 a 8, logrando un MAE 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.

3.4.2 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 6:00 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. 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.

El análisis de los resultados revela un error sistemático, ya que el sensor GY-906 tiende a medir temperaturas ligeramente inferiores a las registradas por la cámara termográfica. Inicialmente, se registra un error promedio de -0.72°C , con un error absoluto medio (MAE) de 0.77°C . Para corregir este error, se aplica un método de calibración que incluye la detección y eliminación de valores atípicos mediante técnicas estadísticas, tales como la envolvente elíptica y la distancia de Mahalanobis, eliminando un total de 7 valores atípicos.

Posteriormente, se determina un factor de corrección constante de 0.47, que se suma a las lecturas del sensor para alinear los resultados con los valores de la cámara termográfica. La validación de esta corrección se realiza mediante una segunda campaña de medición, que confirma una mejora significativa, reduciendo el error promedio a 0.17°C y el MAE a 0.34°C . Esto garantiza que el sensor proporcione mediciones más alineadas con los valores reales, mejorando la calidad y confiabilidad de los datos recopilados.

A continuación, se presenta la gráfica que muestra la comparación entre las mediciones del sensor GY-906 y la cámara termográfica antes y después de la calibración:

3.5 Lógica de programación

XXX Agregar diagrama de flujo del artículo de Francia y después desglosarlo por partes.
XXX

3.6 Instrucciones de uso

1. Integración con la plataforma iot
2. manejo de los datos

3.7 Validación

4 Conclusiones

4.1 Discusión

4.1.1 Interpretación de los resultados

4.1.2 Contribuciones y limitaciones

4.2 Conclusiones

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 Watanaabe, Yosuke Kaneko, y Ongun B. Kazanci. 2023. «Human physiology for personal thermal comfort-based HVAC control – A review». *Building and Environment* 240 (julio): 110418. <https://doi.org/10.1016/J.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/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/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>.
- 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>.
- Olgyay, 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.gob.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.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>.
- uElectronics. 2024. «Motor de Vibración 5V». <https://uelectronics.com/producto/motor-vibracion-5v/?srsltid=AfmBOoobMBx68FsKl3OQeHRxlqV72c0WFDIICubVzyQFrHrNYfIB-w4>.