
Desarrollo de un dispositivo IoT para monitoreo médico continuo mediante adquisición de señales bioeléctricas

Development of an IoT Device for Continuous Medical Monitoring through Bioelectrical signal Acquisition

Ronald Rovira Jurado¹, Manuel Montaña Blacio², Marcia Bayas Sampedro³, Andrés Villón Quimí⁴, Oscar Gómez Morales⁵, Junior Figueroa Olmedo⁶

Resumen:

La combinación de competencias en internet de las cosas (IoT), y el diseño e implementación de dispositivos innovadores en el ámbito de la salud, ha permitido la creación de una solución innovadora que contribuye al monitoreo y a la gestión de condiciones médicas mediante la adquisición de variables bioeléctricas. Por lo tanto, en este artículo se presenta el diseño de un dispositivo capaz de registrar parámetros como la frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, empleando sensores de alta precisión y un diseño compacto y funcional. Posteriormente estos datos son enviados a través de Internet a una plataforma IoT para el monitoreo continuo por parte del personal especializado. Este desarrollo responde a la necesidad de contar con dispositivos accesibles que permitan la adquisición de variables bioeléctricas de manera no invasiva. Se desarrollo un algoritmo para adquirir, filtrar y enviar los datos capturados por los sensores hacia una plataforma IoT. Este proceso involucra varias etapas que garantizan la precisión, integridad y disponibilidad de los datos.

Palabras clave: señales bioeléctricas, Internet de las cosas, monitoreo médico.

Abstract:

The combination of skills in IoT, and the design and implementation of innovative devices in the healthcare field, has enabled the creation of an innovative solution that contributes to the monitoring and management of medical conditions through the

¹ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ph.D. en Ciencias de la Ingeniería, Orcid <https://orcid.org/0000-0002-4686-7289>

² Universidad Estatal Península de Santa Elena, Magíster en Ciencias y Tecnologías de la Computación, Orcid <https://orcid.org/0000-0001-6816-0439>

³ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ph.D. en Ciencias de la Ingeniería, Orcid <https://orcid.org/0000-0002-0636-4951>

⁴ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Estudiante del 8vo semestre de telecomunicaciones, Orcid <https://orcid.org/0000-0002-7589-4892>

⁵ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Magíster en Electricidad, mención Energías Renovables, Orcid <https://orcid.org/0000-0003-4654-7231>

⁶ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Magister en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Orcid <https://orcid.org/0000-0001-8498-6601>

Autor de correspondencia: Marcia Bayas Sampedro mbayas@upse.edu.ec

acquisition of bioelectrical variables. Therefore, this paper presents the design of a device capable of recording parameters such as heart rate, oxygen saturation, and body temperature, using high-precision sensors and a compact, functional design. Subsequently, these data are sent via the internet to an IoT platform for continuous monitoring by specialized personnel. This development addresses the need for accessible devices that allow the acquisition of bioelectrical variables in a non-invasive manner. An algorithm was developed to acquire, filter, and send the data captured by the sensors to an IoT platform. This process involves several stages that ensure the accuracy, integrity, and availability of the data.

Keywords: Bioelectrical signals, Internet of Things, medical monitoring

Introducción

En la actualidad, el avance de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) ha transformado significativamente la atención médica mediante soluciones basadas en el Internet de las Cosas (IoT). Este enfoque innovador permite la monitorización en tiempo real de variables fisiológicas críticas, facilitando la atención tanto en entornos hospitalarios como en el hogar (Chowdhury et al., 2024). El desarrollo de dispositivos IoT no invasivos y modulares ha logrado la recopilación eficiente y continua de datos como la temperatura corporal, la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en la sangre (SpO₂), indicadores esenciales para el diagnóstico temprano y la prevención de enfermedades (Vanitha et al., 2024).

La pandemia de COVID-19 expuso la necesidad urgente de dispositivos accesibles, económicos y precisos que permitan monitorear la salud de manera remota y continua (Gopi et al., 2024). Variables como la saturación de oxígeno, la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal se han convertido en parámetros vitales para detectar y monitorear afecciones respiratorias, cardiovasculares y metabólicas (Suprayitno et al., 2019). Ante este panorama, el desarrollo de soluciones tecnológicas asequibles, modulares y precisas representa una contribución significativa para mejorar la calidad de vida, optimizar los recursos médicos y facilitar el acceso a la atención médica (Tham et al., 2020).

La importancia de este estudio radica en la creciente demanda de dispositivos portátiles, económicos y de fácil implementación que permitan el monitoreo continuo de parámetros bioeléctricos. El monitoreo en tiempo real no solo facilita la atención preventiva, sino que también permite a los profesionales de la salud, cuidadores y familiares tomar decisiones informadas, reduciendo hospitalizaciones y costos médicos innecesarios (Nugroho et al., 2024). Además, el diseño modular e impreso en 3D responde a la necesidad de soluciones personalizadas y escalables, adaptables a diferentes escenarios y contextos, especialmente en comunidades rurales o con recursos limitados (Vanitha et al., 2024).

La motivación principal surge del potencial que tiene la tecnología IoT para revolucionar la atención médica y proporcionar herramientas accesibles y precisas que beneficien tanto a pacientes como a profesionales de la salud. El uso de sensores económicos y de alto rendimiento, como el MAX30100 para la medición de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno (Tham et al., 2020), y el DS18B20 para la temperatura corporal (Chowdhury et al., 2024), junto con la integración de plataformas en la nube y transmisión de datos en tiempo real, permite crear un dispositivo versátil y funcional para la monitorización continua (Ali et al., 2020).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un dispositivo IoT modular no invasivo para la medición de variables bioeléctricas: temperatura corporal, frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno en la sangre, que cuente con un diseño ergonómico, económico y adaptable, permitiendo su aplicación en diversos entornos médicos y no médicos. Además, se enfoca en garantizar la precisión en la medición de los parámetros, así como en la transmisión eficiente y en

tiempo real de los datos recopilados a una plataforma digital para su análisis y monitoreo.

El monitoreo continuo de estos parámetros resulta crucial para la detección temprana de condiciones críticas, como la hipoxia, una alteración en los niveles de SpO₂ que requiere intervención inmediata (Suprayitno et al., 2019). Asimismo, la medición constante de la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal permite evaluar el estado general de salud del individuo, proporcionando información vital para la toma de decisiones clínicas oportunas (Tham et al., 2020).

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2, se realiza una revisión de los trabajos relacionados y se detallan las tecnologías más relevantes utilizadas en el desarrollo de dispositivos de monitoreo IoT. En la Sección 3, se describe el diseño e implementación del dispositivo, especificando los componentes, materiales y la metodología aplicada. La Sección 4 presenta los resultados obtenidos, incluyendo pruebas de funcionamiento, precisión de los sensores y validación del sistema desarrollado. En la Sección 5, se discuten las ventajas del dispositivo propuesto, su impacto en la atención médica y las posibles aplicaciones futuras. Finalmente, en la Sección 6, se concluye el trabajo destacando las contribuciones del estudio y sugiriendo líneas de investigación futuras para la mejora y optimización del dispositivo.

Trabajos relacionados

En los últimos años, la implementación de dispositivos IoT en el ámbito de la salud ha revolucionado la manera en que se monitorean variables bioeléctricas y signos vitales. Diversos trabajos han abordado el diseño y desarrollo de sistemas IoT para la medición de parámetros fisiológicos, destacando la integración de sensores económicos y tecnologías de transmisión de datos en tiempo real. Esta sección presenta un análisis de investigaciones relevantes que sirven como base para el desarrollo del dispositivo propuesto.

El uso del sensor MAX30100 para la medición de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno (SpO₂) ha sido ampliamente documentado. Por ejemplo, estudios como (Suprayitno et al., 2019) integraron este sensor con un microcontrolador Arduino Nano para monitorear SpO₂ y frecuencia cardíaca, demostrando una precisión del 97.55% comparado con dispositivos estándar. Asimismo, se integró el sensor MLX90614 para medir la temperatura corporal de manera no invasiva, lo que refuerza la viabilidad de combinar múltiples parámetros en un solo sistema.

En otro enfoque, (Ali et al., 2020) desarrollaron un sistema IoT basado en Arduino que, además de medir SpO₂ y frecuencia cardíaca, transmitía los datos a una aplicación móvil mediante Bluetooth y a la nube utilizando Wi-Fi. Este diseño mostró que es posible proporcionar monitoreo continuo y acceso remoto a datos de salud, facilitando la atención personalizada. De manera similar, (Chamanthi & Posonia, 2024) propusieron la integración de sensores como el LM35 para temperatura, MAX30100 para SpO₂ y DHT11 para monitoreo ambiental, destacando la importancia de considerar factores externos al evaluar el estado de salud de los pacientes.

Por otra parte, sistemas avanzados como el propuesto en (Nugroho et al., 2024) introdujeron un brazalete inteligente que combina sensores para monitorear frecuencia cardíaca, oxígeno en la sangre y temperatura corporal. Los datos se transmiten a aplicaciones móviles como Telegram, demostrando la utilidad de notificaciones automáticas en casos de emergencia. Este tipo de desarrollo resalta la necesidad de implementar alertas en tiempo real, un elemento crucial en sistemas de monitoreo remoto.

Estudios recientes también han incorporado el uso de plataformas en la nube para análisis de datos y almacenamiento seguro. Por ejemplo, (Jaishankar et al., 2024) propusieron un sistema basado en ESP32 que monitorea parámetros vitales como la presión arterial, frecuencia cardíaca y temperatura, enviando los resultados a una base de datos en la nube. El uso de algoritmos de inteligencia artificial en el procesamiento de datos permitió realizar análisis predictivos y emitir alertas automáticas ante posibles anomalías.

En cuanto a la implementación de interfaces amigables para el usuario, (Chamanthi & Posonia, 2024; Suprayitno et al., 2019) destacan el uso de pantallas OLED para mostrar mediciones en tiempo real. Esta característica mejora la interpretación de los datos tanto por profesionales de la salud como por pacientes, facilitando su adopción en entornos domésticos y hospitalarios.

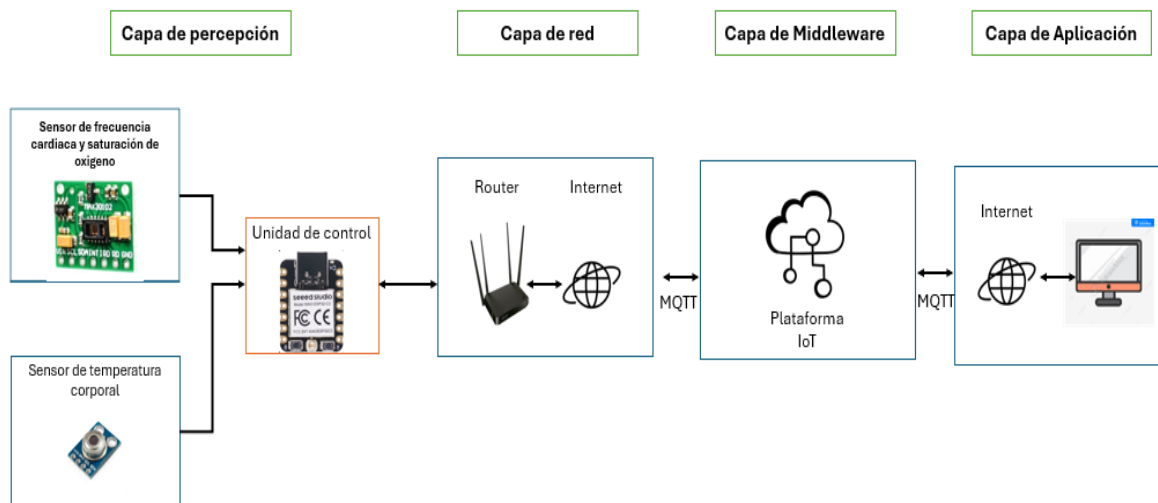
En síntesis, los trabajos relacionados evidencian la viabilidad de desarrollar dispositivos IoT modulares, no invasivos y económicos para la medición de variables bioeléctricas. Estos estudios destacan la integración de sensores como MAX30100 y DS18B20, el uso de microcontroladores como Arduino y ESP32, y la implementación de plataformas en la nube para el almacenamiento y análisis de datos. Sin embargo, existe la necesidad de optimizar la precisión de las mediciones, mejorar la portabilidad y asegurar la integración eficiente de estas tecnologías en aplicaciones de salud personal y profesional.

Materiales y métodos

La propuesta de este trabajo se fundamenta en la implementación de un sistema basado en tecnologías del Internet de las cosas (IoT) para la adquisición y monitoreo de variables bioeléctricas. La arquitectura planteada se desarrollará bajo un enfoque modular de múltiples capas, considerando que esta metodología permite segmentar las funcionalidades de sistema, optimizando su desempeño y facilitando la resolución de problemas específicos (Montaño-Blacio et al., 2023). Cada capa puede encargarse de tareas específicas, como la adquisición de datos, el procesamiento, la comunicación y la gestión de la seguridad. Esta segmentación reduce la complejidad de cada capa individual, garantizando ser un sistema eficiente lo que facilita la identificación y resolución de problemas.

Figura 1

Arquitectura para el sistema de monitoreo continuo



Nota. Autores, (2024)

En la figura 1 se aprecia el diseño del sistema que integra sensores especializados que recogen parámetros clave, como frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, dato que serán procesados por un microcontrolador central. La arquitectura de este sistema se caracteriza por su enfoque de múltiples capas. Estas capas desempeñan roles específicos y están diseñadas para aprovechar las capacidades del Internet de las cosas (IoT). El modelo está compuesto por cuatro capas: capa de percepción, capa de red, capa de middleware y capa de aplicación.

La capa de percepción constituye el nivel fundamental del sistema, encargándose de la detección y adquisición de variables bioeléctricas del estudio. Los sensores MAX30102 y el MLX90614, integrados en esta capa, son calibrados para proporcionar mediciones precisas y confiables. La información obtenida se transmite a la unidad de control, donde se inicia su procesamiento preliminar. Esta capa es crítica para garantizar que los datos recolectados sean representativos y estén listos para ser enviados a las etapas superiores del sistema.

La conexión a Internet del dispositivo se implementa mediante la capa de red, que utiliza protocolos de comunicación inalámbrica en este caso WiFi para establecer una conexión estable a la infraestructura de IoT. Esta conexión inicial es fundamental porque permite que los datos capturados por la capa de detección se envíen a la siguiente etapa de manera oportuna y continua. Una red sólida garantiza que el sistema mantenga un flujo continuo de información, proporcionando monitoreo remoto en tiempo real.

Una vez establecida la conexión, se inicia el protocolo MQTT, que permite la transmisión de los datos recolectados. MQTT se caracteriza por ser un protocolo orientado a la publicación y suscripción, lo que optimiza el envío de datos en tiempo real desde el dispositivo hacia un broker MQTT, el cual actúa como intermediario para gestionar la información de manera eficiente.

La capa de middleware implementa la lógica de comunicación y seguridad. Utilizando el protocolo MQTT, los datos procesados por la capa anterior se empaquetan en mensajes estructurados livianos en formato JSON y luego se publican en un tópico específico. Este método garantiza una transferencia de datos segura y de baja latencia. Además, la capa de middleware también tiene la función de reconectarse automáticamente cuando se desconecta, lo que asegura la continuidad del monitoreo sin causar mucha pérdida de información.

Finalmente, a nivel de aplicación, los datos recibidos del broker MQTT son interpretados y visualizados en una interfaz gráfica destinada al monitoreo en tiempo real de variables bioeléctricas. La interfaz se puede alojar en una plataforma que permita a los usuarios observar tendencias, crear alertas personalizadas y generar informes basados en los datos recopilados. La comunicación basada en MQTT también permite enviar comandos desde la interfaz al dispositivo para un ajuste remoto, como la calibración del sensor o la reconfiguración del sistema.

Diseño electrónico

La figura 2 muestra el diseño electrónico del dispositivo IoT, se implementó utilizando el software Fritzing, una herramienta fundamental para la creación de diagramas de circuitos y su implementación física. Esta plataforma facilita una representación visual clara de la disposición de componentes, lo cual es crucial para minimizar errores durante el montaje y asegurar una configuración precisa.

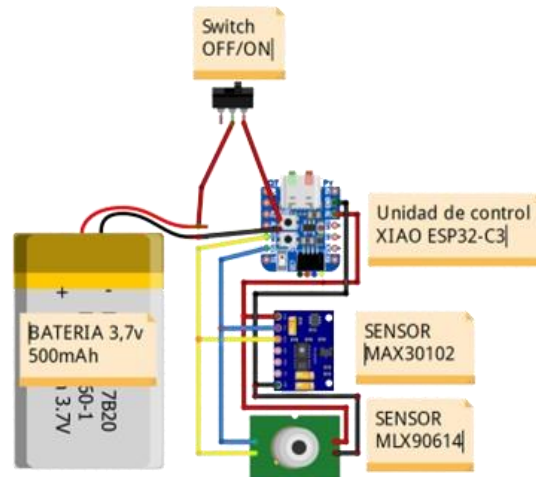
La estructura del prototipo integra el sensor de temperatura, un sensor de frecuencia cardíaca y un sensor de saturación de oxígeno en la sangre, todos conectados a la placa de desarrollo Xiao ESP32-C3. Este microcontrolador se seleccionó por su versatilidad y eficiencia energética, ofreciendo compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación y un sistema de gestión de carga integrado para simplificar la arquitectura del circuito.

En cuanto a la alimentación, el sistema utiliza una batería de litio de 3,7 V, integrada directamente al microcontrolador, que incluye un circuito de control de carga para facilitar la recarga mediante un puerto USB tipo C y proporcionar protección contra sobrecargas. Esta configuración no solo optimiza el mantenimiento del dispositivo permitiendo actualizaciones de software y ajustes de configuración directamente desde un ordenador, sino que también mejora la portabilidad y reduce los costos de producción.

Además, la conexión de los sensores se realiza a través de pines configurados para la comunicación I2C, lo que asegura una transferencia de datos precisa y una sincronización eficiente entre los componentes, contribuyendo a un diseño compacto y ordenado del dispositivo. La validación del diseño se hizo en términos de recopilación de datos y estabilidad energética, garantizando una integración efectiva y una funcionalidad confiable en aplicaciones de monitoreo de salud.

Figura 2

Diseño electrónico



Nota. Autores, (2024)

Diseño de la carcasa en 3D del prototipo

Para la carcasa del dispositivo (Figura 3 y 4) de medición se optó por un diseño tipo pinza, combinando funcionalidad y estética. Este diseño fue concebido a partir de la definición detallada de los requerimientos, incluyendo las dimensiones necesarias para alojar los componentes electrónicos como sensores, el microcontrolador, baterías e interruptores.

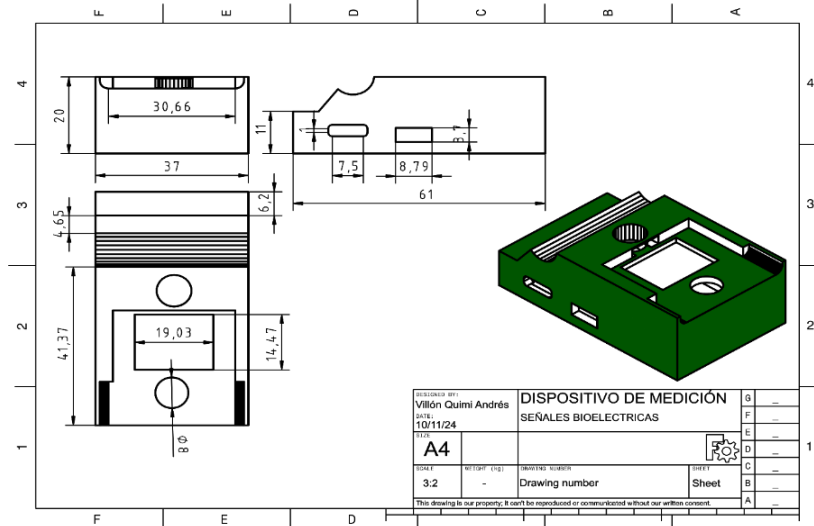
El concepto de la carcasa tipo pinza fue elaborado con el objetivo de ser ergonómico y práctico, siendo ligero y adaptable a diferentes tamaños para su colocación, por ejemplo, en el dedo de un usuario. Este diseño inicial fue realizado utilizando el software FreeCAD, dividiendo la estructura en dos partes principales: la base para los sensores y el microcontrolador, y la parte superior para la batería de litio.

El diseño de la base del dispositivo se centró en integrar eficientemente los componentes electrónicos esenciales. Utilizando FreeCAD, se desarrolló un diseño paramétrico que permite adaptar las dimensiones y características a necesidades específicas, asegurando que cada componente esté bien acoplado y facilitando la conectividad.

Se diseñaron cavidades específicas para cada sensor y el microcontrolador, asegurando su estabilidad y accesibilidad. Por ejemplo, el sensor MAX30102 se posicionó de manera que permita contacto directo con la piel, mientras que el MLX90614 se colocó en una abertura que garantiza una medición precisa de la temperatura. Estos detalles no solo optimizan la funcionalidad del dispositivo, sino que también mejoran su estética y ergonomía, facilitando el mantenimiento y la interacción del usuario con el dispositivo.

Figura 3

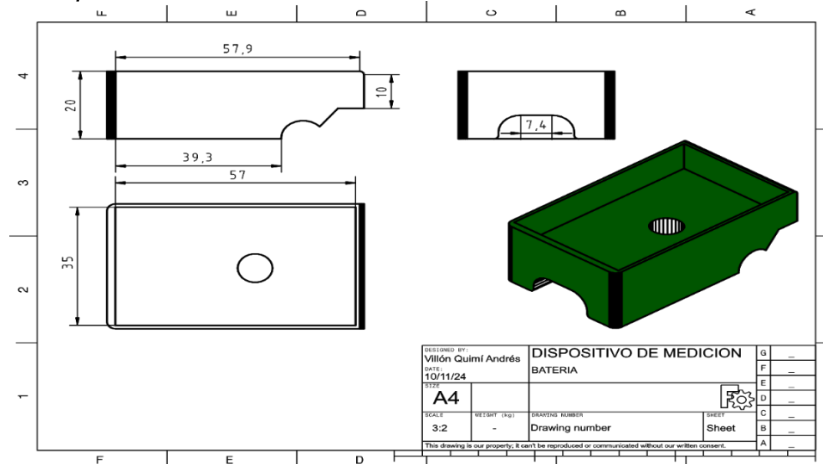
Diseño de la base



Nota. Autores, (2024)

Figura 4

Diseño de la parte superior



Nota. Autores, (2024)

Configuración de la plataforma IoT

La configuración de una plataforma IoT es crucial en el desarrollo de sistemas de monitoreo remoto, proporcionando la infraestructura necesaria para visualizar, analizar y gestionar datos de sensores. En este proyecto se seleccionó la plataforma IoT desarrollada por el grupo TECED por su versatilidad y soporte al protocolo MQTT, facilitando una comunicación segura y eficaz. El proceso de configuración implica crear una cuenta, emparejar dispositivos y personalizar el panel de control, incluyendo la generación de credenciales como el registro de dispositivos IoT.

Los dispositivos interactúan con la plataforma a través de mensajes MQTT en formato JSON, lo que asegura una transmisión ordenada y clara. Para configurar el broker MQTT, se especifica la dirección IP o URL del servidor, en este caso, broker.emqx.io, utilizando el puerto estándar 1883 para conexiones sin cifrar.

Además, se debe configurar y asignar un "topic" específico, que en este proyecto es biomédica/cliente100, para garantizar que los datos se publiquen correctamente.

Resultados

La figura 5 muestra el dispositivo IoT, el montaje se lo realizó por fases, durante la primera fase del montaje, se posicionaron cuidadosamente los sensores dentro de la carcasa; el sensor MAX30102 se colocó para tener contacto directo con la piel del usuario, asegurando mediciones precisas, y el sensor MLX90614 se instaló en un orificio diseñado para medir la temperatura de manera efectiva. Además, se aseguró el microcontrolador ESP32-C3 en la base utilizando el puerto Tipo-C, lo que facilita la programación y la carga del dispositivo.

En la segunda fase se organizó meticulosamente el cableado interno para conectar los sensores, el microcontrolador y la batería, garantizando un ensamblaje ordenado y seguro. La carcasa se completó con un compartimento especial para la batería de litio, equipado con una tapa a presión que la protege y asegura en su lugar. Finalmente, las dos mitades de la carcasa se unieron mediante un sistema de cierre hermético que protege los componentes de elementos externos, mejorando así la robustez del dispositivo en variados entornos operativos. Este riguroso proceso de ensamblaje culmina en la creación de un dispositivo compacto y ergonómico, que no solo cumple con los estándares de tecnología médica portátil, sino que también optimiza la monitorización bioeléctrica.

Figura 5

Ensamble del dispositivo IoT



Nota. Autores, (2024)

Autonomía y consumo energético

Para garantizar la autonomía adecuada del prototipo, se realizaron mediciones del consumo energético de cada componente en diferentes estados de operación, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Consumo total de corriente del prototipo propuesto

Componente	Consumo
MAX30102	1.2 [mA]
MLX90614	0.17 [mA]
ESP32-C3	75 [mA]
Total, estimado	76.37 [mA]

Nota. Autores, (2024)

De acuerdo con las características de la batería de litio, las cuales son de 3.7 [V] y 500 mAh, la autonomía fue calculada mediante la fórmula 1.

$$Autonomia = \frac{Capacidad\ de\ la\ bateria}{Consumo\ del\ dispositivo} \quad (1)$$

$$Autonomia = \frac{500 [mAh]}{76.37 [mA]}$$

$$Autonomia \approx 6,54 [h]$$

Considerando un uso activo promedio de 76.37 mA y con la capacidad de la batería, se obtuvo una duración aproximada de 6 horas en condiciones normales de operación.

Una característica destacable es el puerto USB tipo C integrado en el microcontrolador, permite una carga rápida y confiable de la batería, lo cual es fundamental para garantizar el funcionamiento continuo de los dispositivos en aplicaciones de monitoreo a largo plazo. Esta configuración no solo asegura un rendimiento adecuado del dispositivo, sino que también subraya su potencial para ser empleado eficazmente en contextos médicos prolongados.

Análisis de datos de frecuencia cardiaca

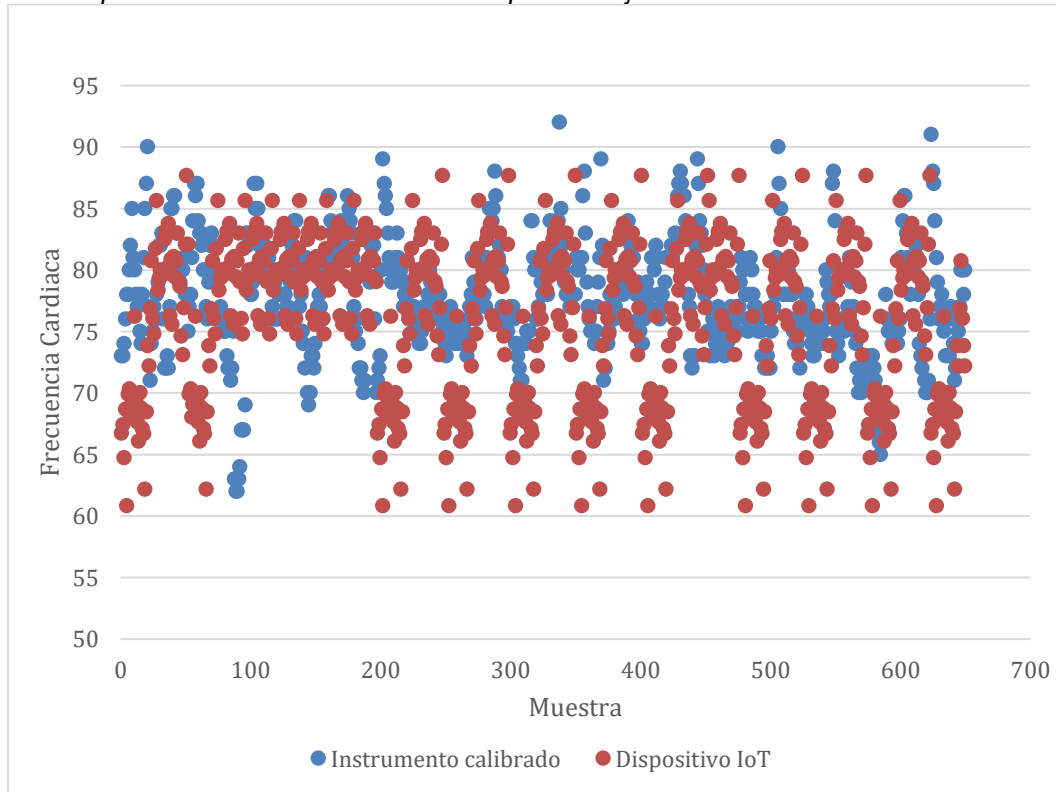
En base al diagrama de dispersión de la Figura 6 y los datos proporcionados, se realizó un análisis estadístico comparativo basado en las lecturas de frecuencia cardíaca entre el dispositivo IoT y el oxímetro. El dispositivo dio un promedio 75,64 bpm, que fue ligeramente inferior al promedio del oxímetro de 77,73 bpm. Esto sugiere que, en promedio, el dispositivo mide una frecuencia cardíaca ligeramente más baja.

La mediana (que representa el valor central de la distribución) fue 76,81 para los dispositivos y 77 para los oxímetros, lo que muestra una tendencia similar. Las modas, o los valores observados con mayor frecuencia, muestran más variabilidad entre unidades que un solo estado 76 (76.04, 85.61, 78.35, 79.32, 80, 79.63, 79.61, 82.48, 83.12, 83.16, 83.16, mayor prevalencia en la diversidad). En general, si bien

las lecturas de las dos unidades son similares y siguen un patrón, las del dispositivo parece tener una tendencia a medir frecuencias ligeramente más bajas y tener más variación en las lecturas.

Figura 6

Grafica de dispersión de frecuencia cardiaca en personas jóvenes



Nota. Autores, (2024)

Cálculo del margen de error

Para realizar el cálculo del margen de error se lo obtiene mediante la siguiente formula:

$$\text{margen de error} = \frac{|\text{diferencia entre los promedios}|}{\text{promedio real}} \times 100 \quad (2)$$

Ahora procedemos a obtener los promedios tanto de los datos del dispositivo IoT como los datos del oxímetro.

Promedio del dispositivo: 75.64

Promedio del instrumento calibrado: 77.73

$$\text{margen de error} = \frac{|77.73 - 75.64|}{77.73} \times 100\%$$

$$\text{margen de error} = \frac{2.09}{77.73} \times 100\%$$

margen de error = 2.68%

El margen de error muestra que, en promedio, las lecturas del dispositivo IoT tiene una variación de 2.68 latidos por minuto en comparación con los valores dados por el oxímetro. Este nivel de error es aceptable dentro del rango clínico, donde los cambio en la frecuencia cardiaca son significativos solo cuando superan los 5 bpm.

Análisis de datos de la saturación de oxígeno

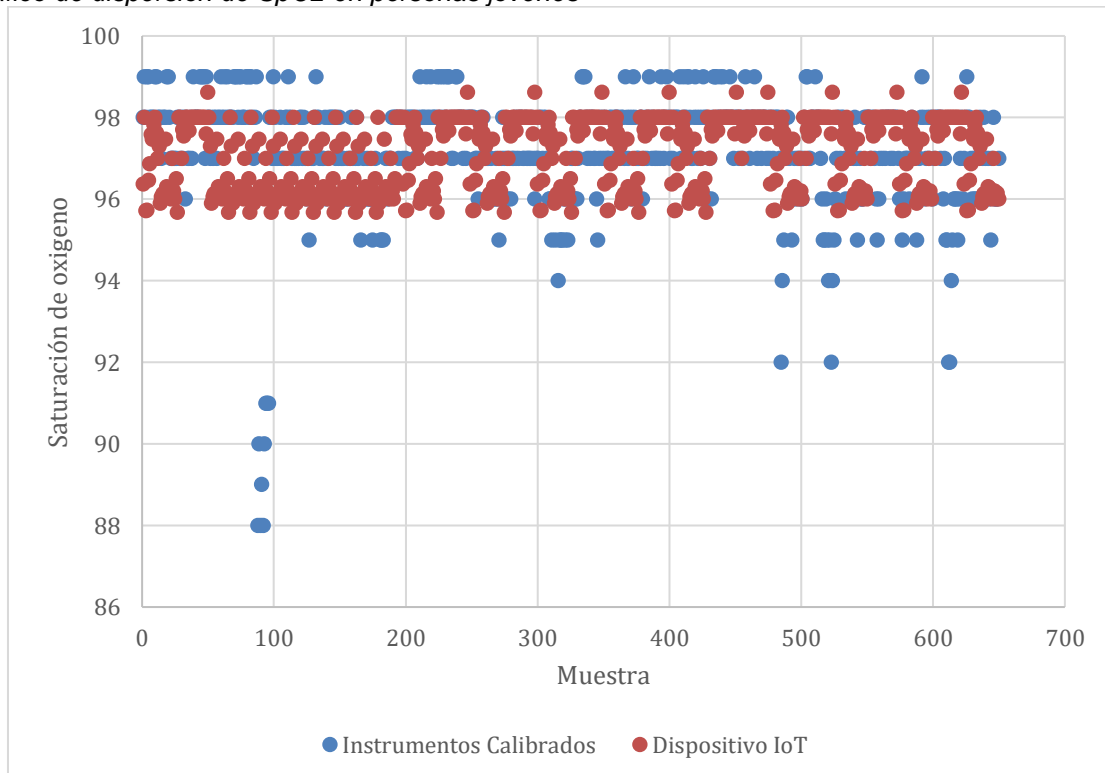
El gráfico de dispersión presentado en la figura 7 muestra los niveles de oxígeno en la sangre, donde los puntos azules representan los datos obtenidos por el oxímetro y los puntos naranja corresponden al dispositivo propuesto. Según los datos proporcionados, la media del dispositivo es de 97.09, con una mediana de 97.3 y una moda de 98.

En contraste, los datos del oxímetro tienen una media de 97.2, una mediana de 97 y una moda de 98. Se puede apreciar que los puntos azules del oxímetro están alineados de manera agrupados hacia el valor de 98, lo que indica poca variabilidad en las mediciones.

Por otro lado, los puntos de color naranja del dispositivo muestran una mayor dispersión alrededor del valor de 97, sugiriendo que el dispositivo presenta una variabilidad menor en sus lecturas de SpO2. Una diferencia en las mediciones de dispersión y tendencia central entre los dos dispositivos no significa que las mediciones sean inconsistentes.

Figura 7

Gráfico de dispersión de SpO2 en personas jóvenes



Nota. Autores, (2024)

Cálculo del margen de error

Ahora procedemos a obtener los promedios tanto de los datos del dispositivo IoT como los datos del oxímetro.

- Promedio del dispositivo: 97.09
- Promedio del instrumento calibrado: 97.2

$$\text{margen de error} = \frac{|97.2 - 97.09|}{97.2} \times 100\%$$

$$\text{margen de error} = \frac{0.11}{97.2} \times 100\%$$

$$\text{margen de error} = 0.115\%$$

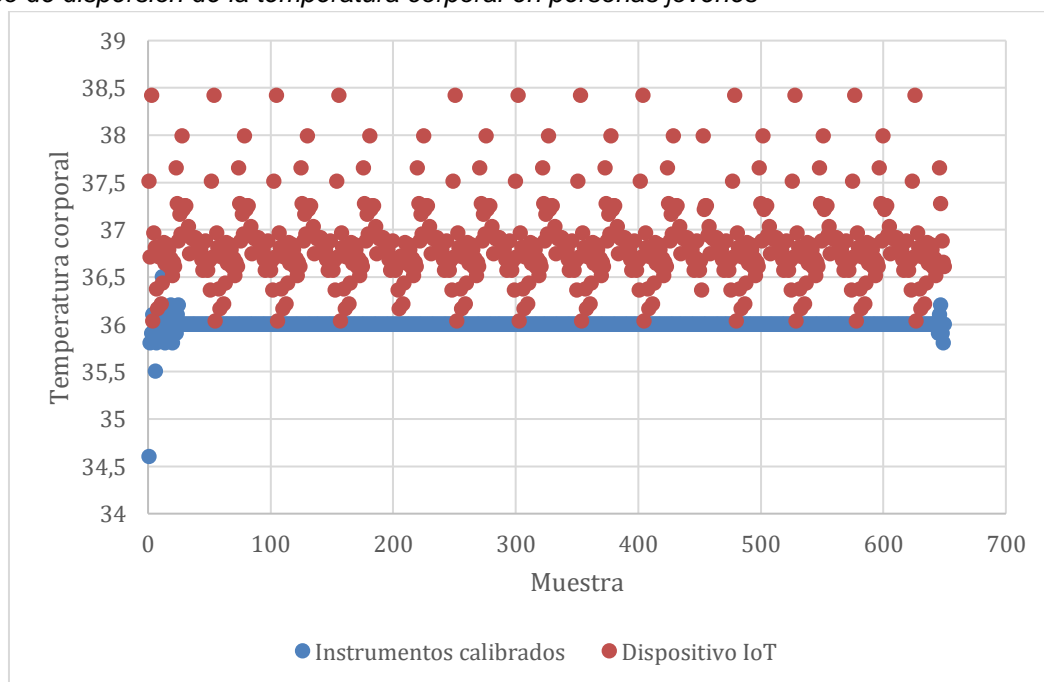
Un margen de error de 0.115% muestra una desviación muy baja entre las mediciones de ambos dispositivos. Este valor está dentro de los estándares de precisión esperados para dispositivos médicos portátiles, donde márgenes de error menores al 2% son vistos como ideales.

Análisis de datos de la temperatura corporal

El diagrama de dispersión de la Figura 8 muestra la temperatura de una persona comparando la lectura del dispositivo (naranja) con la lectura del termómetro (azul).

Figura 8

Gráfico de dispersión de la temperatura corporal en personas jóvenes



Nota. Autores, (2024)

Los puntos azules están distribuidos de manera más uniforme alrededor de la línea de 36 °C, correspondiente a sus mediciones estadísticas: media, mediana y moda a 36 °C. En el caso del punto naranja es más variable y tiene un rango más amplio de variación de temperatura, aunque tiene una media de 36.84°C, una mediana de 36.79°C y una moda de 36.91°C. Esto sugiere que las lecturas de temperatura del dispositivo propuesto pueden ser ligeramente más variables en comparación con un termómetro cuyos datos muestran una estabilidad más consistente.

Cálculo del margen de error

Ahora procedemos a obtener los promedios tanto de los datos del dispositivo IoT como los datos de un termómetro.

- Promedio del dispositivo: 36.84
- Promedio del instrumento calibrado: 36

$$\text{margen de error} = \frac{|36 - 36.84|}{36} \times 100\%$$

$$\text{margen de error} = \frac{0.84}{36} \times 100\%$$
$$\text{margen de error} = 2.34\%$$

El margen de error de 2.34% indica una diferencia promedio significativa entre las mediciones del dispositivo IoT y el termómetro. Aunque esta diferencia es algo mayor comparada con otras variables, es importante tener en cuenta que los sensores infrarrojos, como el usado en el dispositivo, pueden ser más vulnerables a interferencias del entorno y a la ubicación del sensor con relación al cuerpo humano.

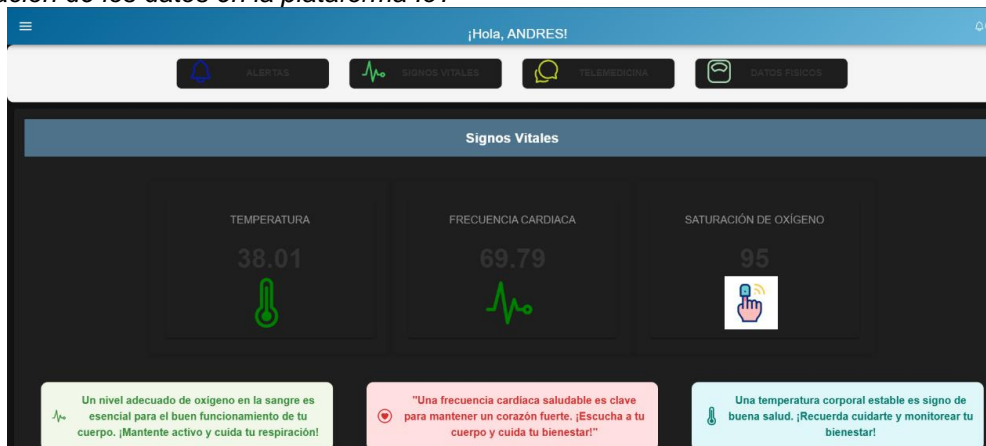
Integración del dispositivo con la plataforma IoT

La plataforma IoT desarrollada por el grupo de investigación TECED ofrece una interfaz gráfica optimizada para monitorizar signos vitales como temperatura corporal, saturación de oxígeno (SpO2) y frecuencia cardíaca (Figura 9). Cada variable se presenta con iconos intuitivos para facilitar su interpretación: un termómetro para la temperatura, que registró 38.01°C; un oxímetro para la SpO2 con un valor de 95%; y un electrocardiograma para la frecuencia cardíaca con 69.79 pulsaciones por minuto. Los datos se transmiten a la plataforma mediante el protocolo MQTT, asegurando una entrega eficiente y en formato digital.

Además, se realizaron pruebas con el protocolo MQTT utilizando Node-RED, que demostraron la efectividad del sistema de "publicación-suscripción" del protocolo. Se configuró un nodo MQTT para suscribirse al tema "biomédica/cliente100" y conectarse al broker "broker.emqx.io:1883", lo que permitió recibir datos en tiempo real. Estos se visualizaron en Node-RED como objetos JSON, incluyendo información como temperatura, frecuencia cardíaca y SpO2, mostrando la capacidad del sistema para manejar comunicaciones eficientes y facilitar análisis posteriores o almacenamiento de los datos recopilados.

Figura 9

Visualización de los datos en la plataforma IoT



Nota. Autores, (2024)

DISCUSIÓN

El dispositivo IoT desarrollado presenta avances significativos y diferencias notables respecto a los estudios previos revisados. El dispositivo muestra una mayor eficiencia energética proporcionando una autonomía de 6.54 horas en comparación con la solución propuesta en (Ali et al., 2020), donde si bien se desarrolló un sistema para monitorear SpO2, frecuencia cardíaca y temperatura, no se hace énfasis en la optimización del consumo de energía, no priorizan en la eficiencia del diseño y emplean múltiples dispositivos electrónicos, aumentando el consumo energético. Así mismo, utilizan dos tecnologías de comunicación Bluetooth para conexiones locales y Wi-Fi para comunicaciones externas, aumentando así el gasto energético.

Nuestra propuesta aborda de manera integral la portabilidad, gestión de datos y eficiencia energética. Esto no solo mejora la portabilidad y la usabilidad del dispositivo, sino que también reduce significativamente la necesidad de recargas frecuentes, un aspecto crítico para dispositivos portátiles destinados al monitoreo continuo de la salud.

Conjuntamente, en términos de gestión y conexión de datos, el dispositivo supera lo observado en (Suprayitno et al., 2019), que aunque integra mediciones de SpO2, frecuencia cardíaca y temperatura en un solo instrumento, no muestra una integración avanzada con plataformas IoT que permitan una gestión efectiva de los datos recolectados.

El dispositivo, por otro lado, se integra de manera efectiva con una plataforma IoT avanzada, permitiendo no solo la visualización en tiempo real de los datos sino también su análisis y almacenamiento en la nube, lo cual facilita la monitorización a distancia y la toma de decisiones médicas basada en datos actualizados y precisos.

En comparación con el sistema presentado en (Tham et al., 2020), que también utiliza MCU para la transmisión de datos pero se limita a un análisis básico de SpO2 y frecuencia cardíaca, el dispositivo ofrece un enfoque más holístico. Integra medidas

adicionales como la temperatura corporal y utiliza algoritmos avanzados para mejorar la precisión de las lecturas, asegurando que los datos sean no solo recopilados sino también filtrados y procesados para eliminar cualquier posible error o valor atípico, lo que garantiza una mayor fiabilidad en los resultados finales.

Esta combinación de eficiencia energética mejorada, integración avanzada con plataformas IoT y un enfoque más completo en el procesamiento de datos posiciona la propuesta como una solución superior dentro del campo emergente de la tecnología médica IoT.

Estos aspectos no solo mejoran la usabilidad y aplicabilidad del dispositivo en entornos reales, sino que también abren nuevas posibilidades para su implementación en escenarios clínicos y domésticos, donde la continuidad y la precisión del monitoreo son esenciales.

CONCLUSIONES

El desarrollo del dispositivo IoT para monitoreo de signos vitales destaca su éxito en integrar tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética, la precisión en la medición de datos críticos como la temperatura corporal, la saturación de oxígeno y la frecuencia cardíaca, y la efectividad en la transmisión y gestión de datos a través de una robusta plataforma IoT. Este dispositivo no solo cumple con los estándares clínicos requeridos para dispositivos médicos portátiles, sino que también supera las limitaciones de modelos anteriores al ofrecer un sistema más integrado y fácil de usar.

La capacidad del dispositivo para operar con una eficiencia energética optimizada y su integración con tecnologías de comunicación modernas facilitan su aplicación en una variedad de entornos, tanto médicos como domésticos, asegurando que es una solución viable para la monitorización continua y remota. La precisión y confiabilidad de las mediciones, junto con la interfaz intuitiva de la plataforma IoT, contribuyen a su potencial para mejorar la gestión del cuidado de la salud, permitiendo intervenciones oportunas y mejorando los resultados del tratamiento.

Un desarrollo futuro prometedor para el dispositivo IoT podría ser la integración de algoritmos de aprendizaje automático (ML) para la predicción de enfermedades. Utilizando la capacidad del dispositivo para recoger datos continuos sobre signos vitales, se podrían desarrollar modelos predictivos que identifiquen patrones indicativos de condiciones médicas emergentes. Esto permitiría anticipar problemas de salud antes de que se manifiesten, mejorando la prevención y gestión de enfermedades, y potenciando la medicina personalizada mediante el ajuste de los modelos a las condiciones individuales de cada paciente.

REFERENCIAS

- Ali, M. M., Haxha, S., Alam, M. M., Nwibor, C., & Sakel, M. (2020). Design of internet of things (IoT) and android based low cost health monitoring embedded system wearable sensor for measuring SpO₂, heart rate and body temperature simultaneously. *Wireless Personal Communications*, 111, 2449–2463.
- Chamanthi, R., & Posonia, M. (2024). VitalLink: NodeMCU IoT Solution for Vital Signs Surveillance. *2024 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 1709–1714.
- Chowdhury, S., Rahman, M. M., Dristy, A. R., Yeara, R. S., Uddin, M. F., Hasan, M., & Uddin, M. R. (2024). An IoT-Based Wearable Healthcare Monitoring Device and Medical Emergency Response System. *2024 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 1–5.
- Gopi, R. S., Suganthi, R., Hephzipah, J. J., Amirthayogam, G., Sundararajan, P. N., & Pushparaj, T. (2024). Elderly People Health Care Monitoring System Using Internet of Things (IOT) For Exploratory Data Analysis. *Babylonian Journal of Artificial Intelligence*, 2024, 54–63.
- Jaishankar, B., Poornesh, M., Kishorekumar, M., Prasad, K., & Namadeep, P. (2024). IoT Based Health Risk Monitoring System. *2024 Ninth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*, 1–6.
- Montaño-Blacio, M., González-Escarabay, J., Jiménez-Sarango, Ó., Mingo-Morocho, L., & Carrión-Aguirre, C. (2023). DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 30, 9–18.
- Nugroho, E. A., Herlambang, R., Juhaeriyah, J., & Wulandari, R. (2024). Design and Development of Smart Bracelet System for Heart Health Monitoring Based on Internet of Things (IoT). *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*, 217–221.
- Suprayitno, E. A., Marlianto, M. R., & Mauliana, M. I. (2019). Measurement device for detecting oxygen saturation in blood, heart rate, and temperature of human body. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(3), 33110.
- Tham, O. Y., Markom, M. A., Bakar, A. H. A., Tan, E. S. M. M., & Markom, A. M. (2020). IoT health monitoring device of oxygen saturation (SpO₂) and heart rate level. *2020 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE)*, 128–133.
- Vanitha, L., Fathima, R. W., Shrija, K., Vinothini, B., Kavitha, S., & Snegapriya, V. (2024). Remote Monitoring System using IoT for Healthcare Applications. *2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 1063–1067.