

Implementación de un dispositivo IoT para el monitoreo del dolor en niños a través de variables fisiológicas

RESUMEN: El manejo adecuado del dolor pediátrico es esencial en la práctica médica, pero presenta desafíos significativos debido a la subjetividad y limitaciones comunicativas en pacientes infantiles. Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un dispositivo IoT para la monitorización continua del dolor infantil mediante variables fisiológicas objetivas, específicamente frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno (SpO_2). Utilizando el sensor MAX30102, un microcontrolador ESP32 y una interfaz móvil desarrollada en Flutter, el dispositivo permite la captura y visualización en tiempo real de estos parámetros. Los resultados preliminares, obtenidos bajo condiciones simuladas controladas, muestran un funcionamiento estable y coherente en la adquisición de las variables fisiológicas seleccionadas. A pesar de que no se realizaron comparaciones directas con dispositivos de referencia, los hallazgos respaldan la viabilidad técnica del prototipo. Si bien su desempeño depende de la precisión del sensor integrado y no se incorporaron mejoras adicionales en la captura de datos en esta fase, el sistema representa un paso inicial hacia la construcción de herramientas objetivas de monitoreo del dolor infantil, con la necesidad de integrar biomarcadores adicionales y validación clínica en estudios futuros.

PALABRAS CLAVE: Dolor infantil, Frecuencia cardíaca, IoT en salud, Monitorización fisiológica.



Colaboración

Verónica Guzmán Sandoval; Miguel Sebastián Frausto Zapata; José Enrique Guerrero Pérez; Juan Diego Terriquez Polanco; Pedro César Santana Mancilla, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025

Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

ABSTRACT: Effective management of pediatric pain is essential in medical practice, but it poses significant challenges due to the subjectivity of assessment and the communication limitations of young patients. This study presents the design and development of an IoT device for continuous monitoring of pediatric pain through objective physiological variables, specifically heart rate and blood oxygen saturation (SpO_2). Using the MAX30102 sensor, an ESP32 microcontroller, and a mobile interface developed in Flutter, the device enables real-time acquisition and visualization of these parameters. Preliminary results, obtained under controlled simulated conditions, demonstrate stable and consistent performance in acquiring the selected physiological variables. Although no direct comparisons with reference devices were conducted, the findings support the technical feasibility of the prototype. While its performance depends on the accuracy of the integrated sensor and no additional enhancements in data capture were included at this stage, the system represents an initial step toward developing objective tools for pediatric pain monitoring, with the need to integrate additional biomarkers and clinical validation in future studies.

KEYWORDS: Pediatric pain; Heart rate; IoT in healthcare; Physiological monitoring.

INTRODUCCIÓN

El dolor es una experiencia sensorial y emocional desagradable y compleja porque involucra parámetros fisiológicos, emocionales, cognitivos y conductuales [1].

La evaluación y el manejo adecuado del dolor constituyen un derecho humano en la atención pediátrica integral. El dolor no solo impacta el bienestar inmediato del niño, sino que también influye significativamente en su recuperación y cuadro clínico, debido a que es un estímulo adverso que desencadena una respuesta del Sistema Nervioso Autónomo (SNA), que se manifiesta en respuestas simpáticas que se manifiestan en parámetros como la frecuencia cardíaca (FC), frecuencia respiratoria (FR) y tensión arterial (TA). No obstante, estos indicadores clásicos, utilizados de forma aislada, no evalúan todo el espectro del dolor. Investigaciones más recientes se han centrado en biomarcadores no invasivos de la actividad del SNA, como la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC o HRV) y la Actividad Electrodérmica (AED o EDA). La VFC, que refleja el balance simpático-vagal, ha mostrado alteraciones en niños con dolor crónico y agudo. La AED, que mide cambios en la conductancia de la piel debidos a la actividad simpática de las glándulas sudoríparas, se ha correlacionado con la respuesta a estímulos dolorosos en diversas poblaciones, incluyendo neonatos.

A pesar de conocer los correlatos del dolor con variables fisiológicas no se incluyen en todas las escalas del dolor. Entonces, la evaluación del dolor en la población pediátrica presenta desafíos importantes, derivados de la etapa de desarrollo cognitivo y la capacidad de comunicación del niño, así como, en centrarse en la evaluación de parámetros emocionales y conductuales. Estas dificultades se agravan en pacientes preverbales, no verbales o con condiciones como el Trastorno del Espectro Autista (TEA), donde la incapacidad para expresar verbalmente el sufrimiento no niega su existencia ni la necesidad urgente de intervención. La evaluación inadecuada y la falta de un tratamiento oportuno del dolor pueden conllevar secuelas significativas, incluyendo la cronificación del dolor y un impacto negativo en la calidad de vida del niño [2].

Las metodologías actuales para evaluar el dolor pediátrico, aunque validadas para ciertos contextos, presentan ciertas limitaciones, por ejemplo: se centran más en las escalas de autoinforme, como las escalas visuales analógicas (EVA), de caras o numéricas, las cuales dependen críticamente de la capacidad cognitiva y comunicativa del niño, restringiendo su uso en edades tempranas o en pacientes con alteraciones neurológicas. Por otro lado, las escalas observacionales basadas en el lenguaje no verbal y la conducta (ej., FLACC que es una escala no verbal de valoración del dolor en niños con alteraciones neurocognitivas; la escala Neonatal Infants Pain Scale (NIPS), que es una escala para valoración del dolor en neonatos (0 días-1 mes); Escala de CARAS-REVISADA que realiza una valoración del dolor en niños entre 3 y 7 años [3], si bien útiles en pacientes, requieren entrenamiento específico del observador y pueden carecer de especificidad, confundiendo las manifestaciones del dolor con otros necesidades. Por

ejemplo, en el caso de los niños con dolor oncológico, existe una necesidad fehaciente de evaluar constantemente su dolor por la cantidad de tratamientos clínicos invasivos y, la monitorización digital es una alternativa eficiente; a este respecto en el metanálisis de Simon et al. [3], se encontraron 14 aplicaciones de monitorización para niños de 0 a 18 años, en 121 publicaciones de bases de datos, que usaron pulseras digitales para medir el dolor, su eficacia fue probada. Por su parte en otro estudio realizado con una aplicación para monitoreo y tratamiento del dolor encontraron menor dolor en los niños que usaron dicha aplicación y mayor satisfacción en los padres que en los niños que no tuvieron la atención con la aplicación de monitoreo del dolor [4].

No existe un método universalmente aplicable a toda la población de niños, evidenciando una brecha crítica entre la necesidad clínica de una evaluación fiable y las herramientas disponibles actualmente [5]. Ante estas limitaciones, la exploración de variables fisiológicas como indicadores objetivos de la respuesta al dolor ha ganado interés.

La complejidad de la respuesta al dolor sugiere que un enfoque multimodal, integrando varias señales fisiológicas mediante técnicas de procesamiento avanzado como el Machine Learning (ML), es necesario para mejorar la precisión y fiabilidad. El avance reside en reconocer patrones complejos a partir de múltiples flujos de datos, más que en identificar un único marcador fisiológico [6], [7], [8].

En el ámbito pediátrico, las problemáticas principales para la instrumentación tecnológica incluyen la necesidad de sensores de bajo consumo y no invasivos que sean tolerables para el niño, la transmisión inalámbrica confiable de datos en tiempo real y la interpretación inicial de parámetros fisiológicos sin generar molestias adicionales. El diseño propuesto aborda estas necesidades mediante la integración de un sensor óptico (MAX30102) con un microcontrolador de conectividad nativa (ESP32) y una aplicación móvil que permite visualización continua. Aunque en esta fase no se implementaron algoritmos completos de clasificación de dolor, se incorporaron rangos de referencia reportados en la literatura para frecuencia cardíaca y SpO₂ como base preliminar para la detección de estados de alerta. La definición de umbrales clínicos y el desarrollo de reglas para la identificación automática del dolor se establecen como un objetivo explícito de futuras fases del proyecto.

El desarrollo exponencial de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), y en particular del Internet de las Cosas Médicas (IoMT), junto con la miniaturización de sensores vestibles (wearables), ofrece una oportunidad sin precedentes para la monitorización continua y no invasiva de la salud pediátrica. Estas tecnologías permiten la captura remota de datos fisiológicos en

tiempo real, superando las limitaciones logísticas de las evaluaciones tradicionales, que son a menudo puntuales y restringidas al entorno clínico. Esta infraestructura tecnológica habilita el desarrollo de sistemas prácticos y continuos para la monitorización objetiva del dolor pediátrico, basados en la adquisición de señales como la VFC y la AED en el entorno natural del niño [9].

Ante estas limitaciones, este artículo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de dispositivo IoT específicamente concebido para la monitorización del dolor en niños a través de la medición continua de variables fisiológicas asociadas a la respuesta del SNA, como la VFC y la AED. El sistema está diseñado considerando las necesidades de la población pediátrica, incluyendo aquellos con dificultades de comunicación. La contribución de este trabajo radica en la propuesta de una arquitectura hardware-software integrada, la selección y validación de sensores apropiados para uso pediátrico, y el desarrollo inicial de algoritmos para el procesamiento de las señales fisiológicas capturadas. Con este desarrollo, se busca ofrecer una herramienta complementaria para abordar la brecha existente en la evaluación objetiva y continua del dolor pediátrico, aprovechando las sinergias entre la fisiología, la tecnología de sensores y el paradigma IoT.

Revisión de literatura

La investigación en el campo del monitoreo y manejo del dolor en niños, ha desvelado las complejidades de esta experiencia única. La definición misma del dolor en niños destaca que va más allá de una simple sensación física, incorporando elementos emocionales y cognitivos en su naturaleza. Esta perspectiva subraya la necesidad de adoptar enfoques holísticos que reconozcan el dolor [10].

En este contexto, las diferencias entre la percepción del dolor en niños y adultos se han convertido en un área de exploración fundamental. Los factores biológicos y psicosociales influyen en cómo los niños interpretan y reaccionan al dolor. El hecho de que los niños presten atención intensificada al dolor, amplificando sus aspectos sensoriales, subraya la importancia de abordar también los aspectos emocionales y psicológicos. Esta comprensión recalca la necesidad de considerar el dolor infantil como una experiencia multidimensional [10].

La evaluación del dolor en pacientes pediátricos es un desafío importante porque los niños no tienen la capacidad verbal para describir el dolor de manera efectiva y la percepción del dolor puede variar según la edad y el desarrollo cognitivo. Por lo tanto, es fundamental medir variables fisiológicas en la evaluación del dolor pediátrico. La medición de estas variables puede brindar información objetiva sobre la intensidad y la naturaleza del dolor, lo que ayuda a los médicos a elegir la opción de tratamiento adecuado [11].

El dolor tiene un componente cognitivo, emocional, conductual y fisiológico. Dentro de los parámetros fisiológicos que se alteran con el dolor se encuentra la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria y la presión arterial [11], [12], [13]. Estas variables pueden ser medidas mediante el uso de monitores de signos vitales y la evaluación suele ser menos invasiva, más precisa y objetiva, que algunas escalas psicológicas. Pero aun así es fundamental usar dispositivos válidos y adaptados, esto insta a abordar la evaluación del dolor infantil con sensibilidad y comprensión [14], [15].

Entonces la evaluación del dolor en niños debería ser integral, inocua y de calidad para esta población [10]. La investigación multidisciplinaria y los avances en tecnología han proporcionado alternativas a la evaluación y el manejo del dolor. En este sentido se han empleado diseños centrados en el Internet de las Cosas médicas (IoMT, por sus siglas en inglés) [8], [16].

Los dispositivos que usan IoMT están desempeñando un papel cada vez más relevante en la atención médica y continuarán haciéndolo en el futuro debido al crecimiento de la medicina, la complejidad de las enfermedades, la brecha de acceso a los servicios de salud y la vulnerabilidad de grupos, como es la población infantil [17]. Además, destaca que la categoría de IoMT no se limita a dispositivos específicos, ya que incluso los teléfonos móviles, pueden funcionar como IoMT al monitorear datos de salud. Ejemplos adicionales incluyen inhaladores inteligentes, medidores de glucosa en sangre y sistemas de administración de medicamentos.

El uso de tecnologías como el IoT puede proporcionar una solución a esta problemática al permitir la monitorización de signos vitales como la frecuencia respiratoria y saturación de oxígeno; además de monitorear el dolor de los niños de manera remota y en tiempo real, lo que permite a los médicos y cuidadores hacer un seguimiento de la efectividad del tratamiento y ajustar el manejo del dolor en consecuencia [18].

A pesar de estos avances, aún existe una necesidad crítica por desarrollar y validar sistemas integrados específicos para la población pediátrica, especialmente aquellos pacientes que presentan limitaciones severas de comunicación o trastornos del desarrollo. En este contexto, el presente trabajo explora una solución tecnológica integrada basada en IoT para contribuir a cubrir esta brecha clínica y tecnológica.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología de este trabajo se limitó a demostrar la viabilidad técnica del prototipo en fases tempranas de maduración tecnológica (TRL 2-3). El desarrollo incluyó la integración de sensores, microcontrolador y aplicación móvil, así como la validación funcional en condiciones simuladas. En esta etapa no se abordó la correlación clínica de los parámetros fisiológicos con

la intensidad del dolor, ni la definición de reglas diagnósticas, aspectos que forman parte de fases posteriores de investigación. De este modo, el alcance del presente artículo corresponde a la implementación y validación técnica inicial del dispositivo.

Investigación básica

En esta primera fase se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre la evaluación del dolor infantil, medición de variables fisiológicas relevantes y tecnologías emergentes relacionadas con el IoT. El objetivo principal fue establecer una sólida base conceptual y técnica que permitió definir las especificaciones y funcionalidades necesarias del dispositivo IoT propuesto para el monitoreo del dolor pediátrico.

Desarrollo tecnológico

En el nivel TRL 2, con base en la fase previa, se determinaron de manera precisa las variables fisiológicas clave necesarias para evaluar el dolor infantil, específicamente la Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) y la saturación de oxígeno. Los detalles técnicos del sensor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sensor.

Sensor	Modelo	Parámetros medidos	Precisión	Protocolo
Frecuencia cardíaca y SpO ₂	MAX30102	FC, SpO ₂	±2%	I2C

Fuente: Elaboración propia.

En el nivel TRL 3, se concretó el diseño detallado del dispositivo, incluyendo la integración de sensores vestibles (wearables) para la adquisición continua y no invasiva de señales fisiológicas. El sistema se fundamentó en un microcontrolador ESP32, debido a sus capacidades de procesamiento y conectividad inalámbrica mediante Bluetooth LE (ver Tabla 2 para detalles de selección de componentes).

Tabla 2. Componentes del dispositivo IoT.

Componente	Razón de elección principal
Microcontrolador ESP32	Conectividad Bluetooth integrada, bajo consumo, costo reducido
MAX30102	Alta precisión en medición de FC y oxigenación, bajo consumo energético
Batería LiPo 3.7 V	Tamaño reducido, duración adecuada para pruebas piloto

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se desarrolló una aplicación móvil específica para la visualización y monitoreo en tiempo real de los datos adquiridos, facilitando la interacción y la interpretación clínica por parte del personal médico.

Diseño de la arquitectura

La arquitectura propuesta se basó en la conexión al microcontrolador los sensores, así como la comuni-

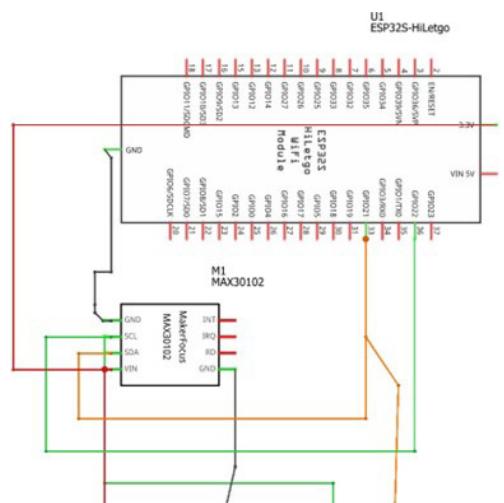
cación con la aplicación móvil. Los sensores seleccionados, en particular el MAX30102 para la medición de frecuencia cardíaca y oxigenación, transmiten datos en tiempo real al microcontrolador mediante protocolos inalámbricos.

El microcontrolador procesa y envía la información de manera continua a una aplicación móvil diseñada específicamente para mostrar gráficamente la información fisiológica capturada.

El dispositivo se empareja con la aplicación móvil mediante Bluetooth Low Energy presionando el botón físico de sincronización, estableciendo un enlace cifrado de baja latencia que permite la transmisión continua de datos fisiológicos.

Esta aplicación permite además almacenar los datos recopilados para análisis posteriores, facilitando el monitoreo prolongado del dolor en niños en condiciones naturales y clínicas.

La Figura 1, muestra el diagrama esquemático del dispositivo IoT.



128x64
I2C OLED

Figura 1: Diagrama esquemático del dispositivo IoT.
Fuente: Elaboración propia.

Escenario de prueba

Para garantizar la seguridad de los participantes pediátricos y evitar la inducción de dolor real, todas las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones totalmente simuladas. En primer lugar, se generaron señales fisiológicas sintéticas de frecuencia cardíaca (FC) y saturación de oxígeno (SpO_2) ajustando los rangos de salida del sensor de pulso-oxímetro integrado. Con base en umbrales reportados en la literatura [19], se definieron los valores de referencia para el dolor pediátrico.

Finalmente, para verificar el comportamiento del sistema ante situaciones extremas, se inyectaron manualmente valores fuera de umbral, definidos como frecuencia cardíaca mayor a 160 lpm y SpO_2 por debajo de 85 %, en el dataset sintético. Esta estrategia permitió confirmar que el componente de clasificación identificara correctamente estos casos como "peligro inmediato", garantizando así una evaluación exhaustiva de los límites de operación del dispositivo.

RESULTADOS

La implementación del dispositivo IoT propuesto para el monitoreo del dolor en niños proporcionó resultados prometedores durante las pruebas iniciales. A continuación, se presentan los hallazgos principales derivados del montaje y funcionamiento del prototipo, así como las pruebas internas realizadas para verificar la precisión en la adquisición de señales fisiológicas.

Integración y funcionamiento del dispositivo

El dispositivo IoT desarrollado fue montado exitosamente utilizando el microcontrolador ESP32, el sensor MAX30102 para mediciones fisiológicas y una pantalla OLED para visualización en tiempo real Figura 2. La integración física entre estos componentes permitió una captura efectiva y continua de las variables fisiológicas mencionadas.

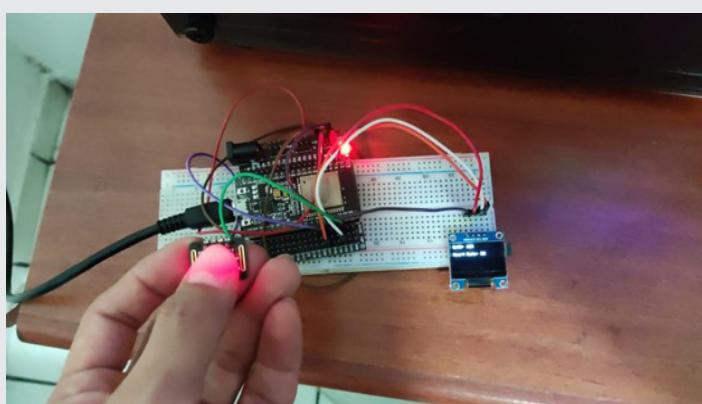


Figura 2. Montaje del dispositivo IoT sobre protoboard.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se desarrolló una aplicación móvil utilizando la plataforma Flutter, que facilitó la comu-

nicación Bluetooth con el dispositivo. La interfaz de la aplicación mostró efectivamente la información recibida, incluyendo el ritmo cardíaco (BPM) y la saturación de oxígeno en sangre (SpO_2), lo que validó la capacidad del sistema para transmitir datos en tiempo real Figura 3.

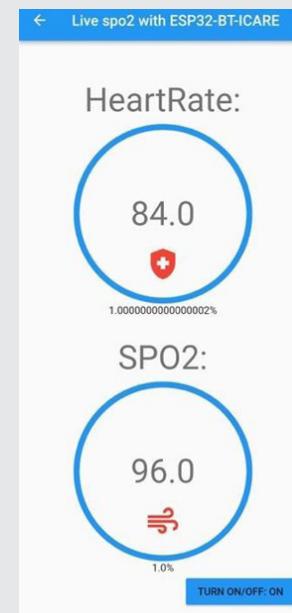


Figura 3. Aplicación móvil de monitoreo de las variables fisiológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Validación interna del dispositivo

Con el objetivo de verificar la precisión en la captura y transmisión de datos del dispositivo, se realizaron diversas pruebas internas con el conjunto de datos mencionado previamente.

Las pruebas simuladas se realizaron durante sesiones de observación continua de 5 a 10 minutos por escenario, lo que permitió verificar la estabilidad del sistema en la adquisición de señales. La calibración del dispositivo se limitó a los parámetros de fábrica del sensor MAX30102, sin ajustes adicionales en esta fase. Los datos se transmitieron desde el ESP32 hacia la aplicación móvil mediante Bluetooth Low Energy con una frecuencia promedio de 1 Hz (una muestra por segundo). Se reconoce que la colocación del sensor en distintas posiciones del dedo puede introducir sesgos o artefactos en las lecturas, lo cual constituye una limitación del prototipo. Finalmente, en esta fase los umbrales clínicos de dolor no fueron programados; únicamente se utilizaron como referencia los rangos de frecuencia cardíaca y SpO_2 reportados en la literatura para comprobar la capacidad del sistema de detectar estados fisiológicos extremos.

Los resultados obtenidos demostraron coherencia interna y precisión en la medición de variables fisiológicas, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de pruebas internas del dispositivo IoT.

ID	Ritmo cardíaco (BPM)	SpO2 (%)	Estado
1	86	97	Reposo
2	102	96	Activo
3	84	96	Reposo
4	99	97	Reposo
5	87	98	Activo
6	92	96	Reposo
7	100	99	Activo
8	95	98	Reposo
9	104	95	Activo
10	80	100	Reposo

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se observa que, en estado de reposo (n= 6), la frecuencia cardíaca promedió 89.3 BPM (rango 80-99) y la SpO₂ 97.3 % (rango 96-100), mientras que en estado activo (n= 4) la frecuencia cardíaca aumentó a un promedio de 98.3 BPM (rango 87-104) y la SpO₂ se mantuvo estable en 97.0 % (rango 95-99). Esta diferenciación clara entre reposo y actividad, con variaciones esperadas en la frecuencia cardíaca y mínimos cambios en la saturación de oxígeno, respalda la capacidad del dispositivo para capturar y transmitir datos coherentes y precisos en distintos niveles de demanda fisiológica.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el dispositivo IoT propuesto es técnicamente viable para la monitorización continua y objetiva de variables fisiológicas relacionadas con la respuesta al dolor en niños, específicamente mediante la medición de la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en sangre (SpO₂). Estos hallazgos iniciales son congruentes con investigaciones previas que resaltan la utilidad potencial de tecnologías IoT y sensores vestibles para mejorar la precisión en la evaluación del dolor pediátrico.

La integración exitosa del microcontrolador ESP32 con el sensor MAX30102 y la comunicación eficiente mediante Bluetooth LE con la aplicación móvil desarrollada, demuestra que la adquisición remota de datos fisiológicos puede realizarse de manera efectiva en tiempo real, superando limitaciones de métodos tradicionales que usualmente requieren evaluaciones puntuales en contextos clínicos específicos. Este aspecto es fundamental considerando la dificultad inherente en la evaluación subjetiva del dolor infantil, particularmente en pacientes preverbales o con discapacidades cognitivas o comunicativas.

Sin embargo, es importante señalar ciertas limitaciones del presente desarrollo. Aunque las pruebas internas demostraron una buena precisión y coherencia en la adquisición de datos, estas fueron realizadas bajo condiciones controladas y simuladas, lo que indica la necesidad de estudios adicionales en entornos clínicos reales para validar completamente la eficacia

del dispositivo. Además, el dispositivo desarrollado en esta fase no alcanza todavía la precisión de dispositivos clínicos certificados, siendo necesarias posteriores iteraciones tecnológicas y metodológicas para alcanzar estándares médicos.

La norma ISO 80601-2-61 para oxímetros de pulso clínicos establece un error raíz cuadrático medio (Arms) de SpO₂ ≤ 2 % (rango 70-100 %) y una precisión de frecuencia cardíaca de ± 3 lpm como requisitos para certificación. Dado que nuestros datos (Tabla 3) provienen únicamente de las lecturas operativas del dispositivo IoT y no contamos con mediciones simultáneas frente a un monitor de referencia certificado, no es posible calcular de manera fiable ni el Arms de SpO₂ ni el error medio absoluto en frecuencia cardíaca. Esta limitación metodológica, derivada de la ausencia de pruebas con usuarios pediátricos y la imposibilidad de inducir dolor para validación clínica, se abordará en trabajos futuros mediante un estudio comparativo con equipos de referencia bajo condiciones controladas.

Adicionalmente, el presente estudio exploró variables limitadas como la frecuencia cardíaca y SpO₂, reconociendo que otros biomarcadores, como la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) y la Actividad Electrodérmica (AED), podrían ofrecer mayor especificidad para la evaluación objetiva del dolor, tal como ha sido sugerido por la literatura reciente. La inclusión de estos parámetros en futuras versiones del dispositivo podría mejorar sustancialmente su valor clínico.

Otro punto crítico para el desarrollo futuro del dispositivo es la incorporación de técnicas avanzadas de procesamiento de datos como Machine Learning. La aplicación de algoritmos que permitan identificar patrones específicos en las señales fisiológicas podría mejorar significativamente la interpretación clínica de los datos recolectados, incrementando la capacidad del sistema para discriminar entre respuestas fisiológicas específicas asociadas al dolor y otras situaciones emocionales o de estrés generalizado.

El alcance de este prototipo corresponde a la validación funcional del sensado y la transmisión inalámbrica de variables fisiológicas en población pediátrica bajo condiciones simuladas. Si bien la literatura reporta umbrales de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno asociados a estados de dolor, en esta fase dichos valores se emplearon únicamente como referencia para pruebas internas y no se implementaron reglas clínicas de decisión. Por lo tanto, el dispositivo distingue únicamente entre estados fisiológicos básicos de reposo y actividad, sin inferir directamente niveles de dolor. La definición de umbrales clínicos validados y el desarrollo de algoritmos para correlacionarlos con la experiencia de dolor constituyen la siguiente etapa de investigación.

Finalmente, desde un punto de vista práctico y de

usabilidad, será fundamental avanzar hacia la miniaturización del dispositivo, optimizar la interfaz de usuario para facilitar su interpretación por personal clínico y asegurar la comodidad y portabilidad en su uso pediátrico. Estos aspectos prácticos pueden influir notablemente en la aceptación clínica y la implementación efectiva del sistema.

Aunque se encuentran aún en fases iniciales, los resultados respaldan el potencial del dispositivo propuesto como herramienta complementaria para la evaluación objetiva del dolor infantil, estableciendo claramente las bases para futuras investigaciones tecnológicas y clínicas que permitan validar plenamente su utilidad en contextos reales.

CONCLUSIONES

El desarrollo del dispositivo IoT para el monitoreo del dolor infantil mediante variables fisiológicas mostró resultados prometedores en términos de viabilidad técnica y funcionalidad práctica. La integración efectiva del sensor MAX30102 y el microcontrolador ESP32, junto con la aplicación móvil desarrollada, permitió una adquisición y visualización confiable de datos como la saturación de oxígeno (SpO2) y el ritmo cardíaco, fundamentales para evaluar respuestas fisiológicas asociadas al dolor.

Las pruebas internas realizadas, en condiciones simuladas, permitieron validar de manera inicial la estabilidad del prototipo en la adquisición de variables fisiológicas, sin que se hayan realizado comparaciones directas con dispositivos comerciales en esta fase. La evaluación de medidas de efectividad frente a equipos de referencia clínicos y comerciales constituye parte de las etapas futuras del proyecto. En este sentido, estudios previos de nuestro grupo de investigación [20], [21], han demostrado la viabilidad de sistemas IoT e IoMT en validaciones con equipos comerciales, lo cual sustenta la pertinencia de avanzar hacia dichas pruebas en el contexto pediátrico. Este resultado refuerza la potencial utilidad clínica del dispositivo, aunque se reconoce la necesidad imperativa de realizar pruebas adicionales en entornos clínicos reales para consolidar su efectividad y precisión.

La investigación destacó también limitaciones inherentes al prototipo actual, especialmente relacionadas con la necesidad de expandir la gama de parámetros fisiológicos monitoreados, considerados como marcadores más específicos para la evaluación del dolor. Además, es clave la integración futura de técnicas avanzadas de análisis inteligente para aumentar la capacidad diagnóstica y predictiva del sistema.

Este trabajo identificó claras direcciones para futuras investigaciones, incluyendo la optimización de la interfaz de usuario, la miniaturización y portabilidad del dispositivo, así como la obtención de aprobaciones

médicas y normativas necesarias para su uso clínico extendido. Estas mejoras serán fundamentales para garantizar la aceptación y uso efectivo del dispositivo en contextos clínicos pediátricos, contribuyendo sustancialmente a la calidad de vida y atención médica de niños con dificultades comunicativas o condiciones especiales que dificultan la evaluación tradicional del dolor.

Finalmente, este proyecto establece una base para el desarrollo de tecnologías IoT especializadas en pediatría, con potencial significativo para mejorar la evaluación objetiva del dolor y la calidad de la atención médica pediátrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R.-D. Treede et al., «Chronic pain as a symptom or a disease: the IASP Classification of Chronic Pain for the International Classification of Diseases (ICD-11)», *Pain*, vol. 160, n.o 1, pp. 19-27, ene. 2019, doi: 10.1097/j.pain.0000000000001384.
- [2] E. Johnson, K. Van Zijl, y A. Kuyler, «Pain communication in children with autism spectrum disorder: A scoping review», *Paediatric and Neonatal Pain*, vol. 5, n.o 4, pp. 127-141, dic. 2023, doi: 10.1002/pne2.12115.
- [3] T. Hechler et al., «Systematic Review on Intensive Interdisciplinary Pain Treatment of Children With Chronic Pain», *Pediatrics*, vol. 136, n.o 1, pp. 115-127, jul. 2015, doi: 10.1542/peds.2014-3319.
- [4] J. D. H. P. Simon et al., «Pain monitoring app leads to less pain in children with cancer at home: Results of a randomized controlled trial», *Cancer*, vol. 130, n.o 13, pp. 2339-2350, jul. 2024, doi: 10.1002/cncr.35100.
- [5] C. Gallego Muñoz, M. J. Martínez Bautista, N. Guerrero Navarro, I. Romero Hernández, F. García Martín, y M. V. Manzano Martín, «Manejo del dolor en el paciente oncológico pediátrico y factores que influyen en su percepción», *Revista Cubana de Farmacia*, vol. 49, n.o 2, pp. 394-411, 2015.
- [6] N. Ahmad, R. P. George, y R. Jahan, «Emerging trends in IoT for categorized health care», en 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, Kerala, India: IEEE, jul. 2019, pp. 1438-1441. doi: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993208.
- [7] O. Al-Mahmud, K. Khan, R. Roy, y F. Mashuque Alamgir, «Internet of Things (IoT) Based Smart Health Care Medical Box for Elderly People», en 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India: IEEE, jun. 2020,

pp. 1-6. doi: 10.1109/INCET49848.2020.9153994.

[8] M. F. Khan et al., «An IoMT-Enabled Smart Healthcare Model to Monitor Elderly People Using Machine Learning Technique», *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2021, n.o 1, p. 2487759, ene. 2021, doi: 10.1155/2021/2487759.

[9] L. A. Durán-Vega et al., «An IoT System for Remote Health Monitoring in Elderly Adults through a Wearable Device and Mobile Application», *Geriatrics*, vol. 4, n.o 2, p. 34, may. 2019, doi: 10.3390/geriatrics4020034.

[10] S. Mencía, C. Alonso, C. Pallás-Alonso, J. López-Herce, y Maternal and Child Health and Development Network II (SAMID II), «Evaluation and Treatment of Pain in Fetuses, Neonates and Children», *Children*, vol. 9, n.o 11, p. 1688, nov. 2022, doi: 10.3390/children9111688.

[11] J. E. Beyer y N. Wells, «The Assessment of Pain in Children», *Pediatric Clinics of North America*, vol. 36, n.o 4, pp. 837-854, ago. 1989, doi: 10.1016/S0031-3955(16)36724-4.

[12] L. Becerra et al., «Intrinsic brain networks normalize with treatment in pediatric complex regional pain syndrome», *NeuroImage: Clinical*, vol. 6, pp. 347-369, 2014, doi: 10.1016/j.nicl.2014.07.012.

[13] M. A. Fortier, W. W. Chung, A. Martinez, S. Gago-Masague, y L. Sender, «Pain buddy: A novel use of m-health in the management of children's cancer pain», *Computers in Biology and Medicine*, vol. 76, pp. 202-214, sep. 2016, doi: 10.1016/j.combiomed.2016.07.012.

[14] C. Merino Bonilla, «Valoración del dolor en pediatría: validez de las escalas del dolor», Grado de Enfermería, Universitat de les Illes Balears, 2019. [En línea]. Disponible en: https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/150314/Merino_Bonilla_Cristina_150314.pdf.

[15] F. Reinoso-Barbero, A. I. Lahoz Ramón, M. P. Durán Fuente, G. Campo García, y L. E. Castro Parga, «Escala LLANTO: instrumento español de medición del dolor agudo en la edad preescolar», *Anales de Pediatría*, vol. 74, n.o 1, pp. 10-14, ene. 2011, doi: 10.1016/j.anpedi.2010.08.005.

[16] P. C. Santana-Mancilla, L. E. Anido-Rifón, J. Contreras-Castillo, y R. Buenrostro-Mariscal, «Heuristic Evaluation of an IoMT System for Remote Health Monitoring in Senior Care», *IJERPH*, vol. 17, n.o 5, p. 1586, mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17051586.

[17] B. N. Rosenbloom et al., «Prognostic factors».

of chronic postsurgical pain in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis», *Reg Anesth Pain Med*, vol. 50, n.o 2, pp. 144-152, feb. 2025, doi: 10.1136/rappm-2024-105696.

[18] B. Stevens, C. Johnston, P. Petryshen, y A. Taddio, «Premature Infant Pain Profile: Development and Initial Validation», *The Clinical Journal of Pain*, vol. 12, n.o 1, pp. 13-22, mar. 1996, doi: 10.1097/00002508-199603000-00004.

[19] D. Jaramillo-Quintanar, I. A. Cruz-Albaran, V. M. Guzman-Sandoval, y L. A. Morales-Hernandez, «Smart Sensor Based on Biofeedback to Measure Child Relaxation in Out-of-Home Care», *Sensors*, vol. 20, n.o 15, p. 4194, jul. 2020, doi: 10.3390/s20154194.

[20] V. M. Guzman-Sandoval, L. S. Gaytan-Lugo, y P. C. Santana-Mancilla, «i-Care: an IoMT Remote Monitoring System Of Physiological Pain in Pediatric Patients», en 2021 Mexican International Conference on Computer Science (ENC), Morelia, Mexico: IEEE, ago. 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/ENC53357.2021.9534829.