Design of a Portable Non-Invasive Prototype for Preliminary Anemia Risk Screening Using Photoplethysmography and IoT

Javier-Fernando Angulo-Osorio[1]; Dayron-Jesús Ale-Sánchez[2];
Juan-Carlos-Elías Carpio-Mamani[3]; Alain-Midwar Marron-Pampa[4];
Daniela-Maylet-Josefa Sullón-Valdivia[5]

[1,2,3,4,5] Universidad Católica de Santa María, Perú, jangulo@ucsm.edu.pe,
dayron.ale@estudiante.ucsm.edu.pe, juan.carpiom@estudiante.ucsm.edu.pe,
alain.marron@estudiante.ucsm.edu.pe, daniela.sullon@estudiante.ucsm.edu.pe

***Resumen*—The early detection of anemia remains a significant public health challenge, particularly in vulnerable populations with limited access to laboratory-based diagnostic services. According to the World Health Organization (WHO), anemia continues to affect a substantial proportion of children, women, and pregnant individuals worldwide, highlighting the need for accessible and non-invasive screening alternatives. This study presents the design of a portable prototype for preliminary anemia screening based on photoplethysmographic (PPG) signal acquisition and Internet of Things (IoT) technologies. The proposed system integrates an ESP32 microcontroller, a MAX30100 bio-optical sensor, and an OLED display to capture and process optical variations associated with peripheral blood perfusion using red and infrared wavelengths. A signal processing methodology based on the analysis of pulsatile and non-pulsatile components is proposed to obtain optical indicators potentially related to anemic conditions. The proposed prototype was assessed through user acceptance and usability evaluations employing structured Likert-scale questionnaires, obtaining favorable responses regarding ease of use, comfort, and perceived usefulness. The proposed system shows potential as a non-invasive tool for preliminary anemia screening and preventive monitoring. However, future work will focus on the physical implementation of the prototype and its clinical validation against conventional hematological measurements.**

***Index Terms*—Anemia, Photoplethysmography, Internet of Things, ESP32, MAX30100, Preliminary Screening.**

Diseño de un prototipo portátil no invasivo para el tamizaje preliminar del riesgo de anemia mediante fotopletismografía e Internet de las Cosas (IoT).

***Resumen*—**La detección temprana de la anemia continúa siendo un desafío importante de salud pública, especialmente en poblaciones con acceso limitado a servicios de diagnóstico basados en laboratorio. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta condición afecta a una proporción significativa de niños, mujeres y gestantes en todo el mundo, lo que evidencia la necesidad de desarrollar alternativas accesibles y no invasivas para su tamizaje oportuno. En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo portátil orientado al tamizaje preliminar de anemia mediante la adquisición de señales fotopletismográficas (PPG) y tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT). El sistema propuesto integra un microcontrolador ESP32, un sensor bioóptico MAX30100 y una pantalla OLED para la captura y procesamiento de variaciones ópticas asociadas con la perfusión sanguínea periférica. Asimismo, se propone una metodología de procesamiento de señales orientada a obtener indicadores ópticos potencialmente relacionados con condiciones anémicas. La propuesta fue evaluada mediante instrumentos de aceptación tecnológica y usabilidad basados en escalas tipo Likert, obteniéndose respuestas favorables en términos de facilidad de uso, comodidad y utilidad percibida. Los resultados de la evaluación de aceptación tecnológica sugieren que la propuesta presenta potencial como herramienta no invasiva para el tamizaje preliminar y el monitoreo preventivo. Como trabajo futuro, se plantea la implementación física del prototipo y su validación clínica mediante comparación con pruebas hematológicas convencionales.

***Index Terms*—**Anemia, Fotopletismografía, Internet de las Cosas, ESP32, MAX30100, Tamizaje Preliminar.

I. Introducción

La anemia se define como una condición clínica caracterizada por una disminución en la cantidad de glóbulos rojos o en la concentración de hemoglobina, lo que limita la capacidad del organismo para transportar oxígeno hacia los tejidos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta condición continúa representando un importante problema de salud pública a nivel mundial, afectando principalmente a niños, mujeres en edad reproductiva y mujeres gestantes [1].

A pesar de su alta prevalencia, el diagnóstico convencional de la anemia continúa dependiendo principalmente de procedimientos hematológicos basados en la extracción de muestras sanguíneas mediante punciones capilares o venosas. Estos métodos requieren equipamiento especializado, personal capacitado y acceso a laboratorios clínicos, lo cual puede representar una limitación en comunidades con recursos restringidos o con dificultades de acceso a servicios médicos [1].

Ante esta problemática, el desarrollo de tecnologías no invasivas para el monitoreo preventivo de condiciones hematológicas ha generado un creciente interés en el área de la ingeniería biomédica. Entre estas tecnologías destaca la fotopletismografía (PPG), una técnica óptica ampliamente utilizada para registrar variaciones en el volumen sanguíneo periférico mediante el análisis de la absorción de luz en diferentes longitudes de onda. La señal PPG presenta una componente continua (DC), asociada a tejidos estáticos y sangre no pulsátil, y una componente alterna (AC), relacionada con los cambios pulsátiles producidos durante el ciclo cardíaco, proporcionando información fisiológica de gran utilidad para aplicaciones de monitoreo clínico y biomédico [2].

Los avances en sensores bioópticos y sistemas embebidos han permitido el desarrollo de dispositivos portátiles capaces de adquirir señales fisiológicas en tiempo real. Sensores como el MAX30100 integran emisores de luz roja e infrarroja junto con fotodetectores de alta sensibilidad, permitiendo la obtención de señales fotopletismográficas para aplicaciones de monitoreo cardiovascular y análisis fisiológico [3].

Paralelamente, el crecimiento de la inteligencia artificial aplicada a la salud ha impulsado el desarrollo de modelos predictivos capaces de estimar parámetros hematológicos a partir de señales ópticas no invasivas. Estudios recientes han demostrado que las señales PPG multicanal obtenidas mediante múltiples longitudes de onda pueden emplearse para estimar niveles de hemoglobina utilizando técnicas de extracción de características, aprendizaje automático e inteligencia artificial explicable, obteniendo resultados prometedores para la detección temprana de anemia sin necesidad de extracción sanguínea [4].

Asimismo, la incorporación de tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) amplía significativamente las capacidades de estos sistemas mediante la transmisión inalámbrica de datos biomédicos, el almacenamiento remoto, el monitoreo continuo y el acceso a plataformas de telemedicina. Estas características favorecen el desarrollo de soluciones orientadas a la prevención, el seguimiento y el control de enfermedades en diversos contextos poblacionales [5].

En el contexto peruano, la anemia continúa siendo una problemática prioritaria de salud pública. De acuerdo con los reportes de la Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES) del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), los niveles de prevalencia de anemia mantienen una presencia significativa en poblaciones vulnerables, especialmente en niños y grupos materno-infantiles [6]. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que faciliten estrategias de monitoreo preventivo y acceso temprano a evaluaciones de riesgo.

A pesar de los avances reportados en la literatura sobre métodos no invasivos para el tamizaje preliminar de anemia, aún persisten desafíos relacionados con la validación clínica, la

complejidad de implementación y la necesidad de desarrollar soluciones accesibles para contextos con recursos limitados. El objetivo general de esta investigación consiste en proponer el diseño de un prototipo portátil para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas mediante métodos no invasivos basados en señales fotopletismográficas e Internet de las Cosas (IoT).

I-A. Planteamiento del Problema

En el Perú, la anemia continúa representando uno de los principales problemas de salud pública debido a su elevada prevalencia y a las consecuencias asociadas al déficit de hemoglobina sobre el desarrollo físico, cognitivo y productivo de la población. Los reportes emitidos por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) muestran que esta condición mantiene una presencia significativa en grupos vulnerables, especialmente en niños menores de cinco años y mujeres gestantes [6].

Aunque existen procedimientos clínicos confiables para determinar la concentración de hemoglobina, la mayoría de ellos requiere extracción sanguínea, equipamiento especializado y acceso a laboratorios clínicos. Estas condiciones dificultan la realización de evaluaciones frecuentes en zonas rurales, comunidades alejadas o poblaciones con acceso limitado a servicios de salud [7].

Ante esta situación, la ingeniería de sistemas y las tecnologías embebidas ofrecen nuevas oportunidades para el diseño de dispositivos biomédicos portátiles orientados al monitoreo preventivo mediante técnicas no invasivas. La combinación de sensores ópticos basados en fotopletismografía, metodologías de procesamiento digital de señales y plataformas IoT permite explorar estrategias innovadoras para el tamizaje preliminar de anemia sin recurrir a procedimientos invasivos [4], [5].

Por ello, la presente investigación propone el diseño de un prototipo portátil basado en fotopletismografía e Internet de las Cosas (IoT), utilizando un sensor bioóptico MAX30100 y un microcontrolador ESP32, con el propósito de establecer una base tecnológica para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas y contribuir al fortalecimiento de estrategias de monitoreo preventivo y detección temprana en contextos con recursos limitados. La implementación física del prototipo y su validación clínica frente a métodos hematológicos convencionales se plantean como trabajo futuro.

I-B. Objetivos del Proyecto

El objetivo general de esta investigación consiste en proponer el diseño de un prototipo portátil para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas mediante métodos no invasivos basados en señales fotopletismográficas e Internet de las Cosas (IoT).

- Diseñar la arquitectura de un nodo detector basado en un microcontrolador ESP32 y un sensor bioóptico MAX30100 para la adquisición de señales fotopletismográficas.
- Proponer una metodología de procesamiento digital de señales fotopletismográficas orientada a la obtención de indicadores ópticos potencialmente relacionados con posibles condiciones anémicas.
- Diseñar una interfaz local de interacción con el usuario mediante una pantalla OLED y un transductor piezoeléctrico para la visualización de información y la emisión de alertas.
- Definir una arquitectura de conectividad basada en Internet de las Cosas (IoT) para la transmisión de las métricas obtenidas hacia plataformas de monitoreo remoto.

I-C. Trabajos Relacionados

Diversas investigaciones han explorado métodos no invasivos para la detección preliminar de anemia mediante técnicas ópticas, procesamiento digital de señales e inteligencia artificial.

Mannino et al. [8] desarrollaron un sistema basado en imágenes obtenidas mediante teléfonos inteligentes para la estimación no invasiva de hemoglobina utilizando características cromáticas del tejido ungueal. Los resultados demostraron el potencial de los métodos ópticos como herramientas de tamizaje preliminar para la detección de anemia.

Posteriormente, Das et al. [9] desarrollaron la aplicación NiADA, la cual emplea inteligencia artificial para estimar concentraciones de hemoglobina mediante imágenes capturadas con dispositivos móviles, obteniendo resultados clínicamente prometedores para la detección temprana de anemia.

De manera más reciente, Sahu et al. [4] propusieron un sistema de estimación no invasiva de hemoglobina basado en señales fotopletismográficas multicanal adquiridas mediante múltiples longitudes de onda. Los autores aplicaron técnicas avanzadas de extracción de características, modelos de aprendizaje automático e inteligencia artificial explicable (XAI), demostrando que las señales PPG contienen información relevante para la predicción de niveles de hemoglobina.

Asimismo, investigaciones basadas en sensores ópticos MAX30100 y principios derivados de la Ley Modificada de Beer-Lambert han demostrado la viabilidad de emplear señales ópticas para el monitoreo no invasivo de concentraciones de hemoglobina utilizando plataformas embebidas como ESP32 [10].

Por otra parte, diversos estudios han evidenciado las ventajas de integrar arquitecturas IoT en sistemas biomédicos portátiles, permitiendo la transmisión remota de datos fisiológicos, el almacenamiento en la nube y el monitoreo continuo de pacientes, favoreciendo aplicaciones de telemedicina y seguimiento preventivo [5].

A diferencia de los trabajos previamente descritos, la presente investigación propone el diseño de un prototipo portátil basado en un microcontrolador ESP32, un sensor bioóptico MAX30100 y una arquitectura orientada a Internet de las Cosas (IoT), con el propósito de establecer una base tecnológica para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas. Asimismo, se plantea una metodología de procesamiento de señales fotopletismográficas y una evaluación de la aceptación tecnológica de la propuesta, dejando como trabajo futuro la implementación física del prototipo y su validación clínica frente a métodos hematológicos convencionales.

Tabla I
COMPARACIÓN DE TRABAJOS RELACIONADOS CON LA PROPUESTA DEL PRESENTE TRABAJO.

Trabajo	**Método**	**Sensor**	**IA**	**Principal aporte**
Mannino et al. [8]	Imágenes de uñas	Cámara Smartphone	Sí	Estimación no invasiva de hemoglobina mediante procesamiento de imágenes.
Das et al. [9]	Aplicación móvil	Cámara Smartphone	Sí	Predicción de anemia mediante inteligencia artificial en teléfonos inteligentes.
Healthcare [10]	Fotopletismografía	MAX30100	No	Estimación de hemoglobina utilizando la Ley Modificada de Beer-Lambert.
Sahu et al. [4]	PPG Multicanal	Sensores ópticos	Sí	Estimación de hemoglobina mediante aprendizaje automático e IA explicable.
Propuesta del presente trabajo	PPG + IoT	ESP32 + MAX30100	No (trabajo futuro)	Diseño conceptual de un prototipo portátil para tamizaje preliminar de anemia y evaluación de aceptación tecnológica.

II. DISEÑO DEL MODELO DEL HARDWARE

II-A. Modelo del Diseño Externo del Proyecto

Con el propósito de garantizar la portabilidad, la ergonomía y reducir la interferencia de la luz ambiental durante la adquisición de señales fotopletismográficas, se propone el modelado de la estructura externa del dispositivo. Siguiendo criterios de diseño biomédico, la carcasa fue concebida con materiales opacos para minimizar la incidencia de luz externa y favorecer condiciones adecuadas para la captura de señales ópticas.



Figura 1. Modelado tridimensional y vista conceptual del prototipo portátil propuesto para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas.

La Figura 1 presenta el modelado tridimensional y la vista conceptual del diseño externo propuesto para un prototipo portátil orientado al tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas. La configuración mecánica se planteó considerando criterios de portabilidad, ergonomía, estabilidad estructural y control de las condiciones de adquisición óptica, con el propósito de favorecer mediciones consistentes y reducir las perturbaciones ocasionadas por factores externos.

La unidad principal contempla una pantalla de visualización frontal destinada a presentar los indicadores ópticos, el estado del sistema y mensajes de retroalimentación para el usuario. En la parte inferior se propone un conjunto de elementos de interacción conformado por botones de control y un sistema de señalización luminosa, con el objetivo de facilitar una operación intuitiva del dispositivo.

El módulo de captura biomédica considera la incorporación de un sensor óptico dispuesto en una estructura articulada ajustable, diseñada para posicionar adecuadamente el dedo índice del usuario durante el proceso de adquisición. Este mecanismo busca proporcionar un soporte mecánico estable que contribuya a reducir movimientos involuntarios y variaciones en la presión ejercida sobre el sensor, factores que pueden afectar la calidad de las señales fotopletismográficas.

Asimismo, la carcasa se diseñó utilizando materiales opacos y superficies de confinamiento lumínico con el objetivo de disminuir la incidencia de luz ambiental sobre el sistema sensor. Esta característica pretende mejorar la relación señal-ruido de las mediciones ópticas y favorecer la repetibilidad de futuras mediciones experimentales.

Finalmente, el diseño modular propuesto permite la integración de los componentes electrónicos, la batería recargable y los sistemas de comunicación y procesamiento, estableciendo una base para la futura implementación de un dispositivo portátil orientado al tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas.

III. ESPECIFICACIÓN DEL HARDWARE Y MATRIZ DE COMPONENTES

La propuesta de hardware biomédico está conformada por un conjunto de componentes electrónicos seleccionados para el diseño del prototipo portátil. En la Tabla II se presenta el listado de los principales elementos considerados para su integración.

La Tabla II presenta la matriz de componentes electrónicos seleccionados para el diseño del prototipo portátil. La elección de cada elemento se realizó considerando criterios de capacidad de procesamiento, precisión en la adquisición de señales biomédicas, eficiencia energética, portabilidad y facilidad de integración dentro de una arquitectura embebida compacta. La Figura 2 muestra los principales componentes electrónicos considerados.

El núcleo de procesamiento propuesto está constituido por el módulo ESP32, un sistema en chip (SoC) de 32 bits que opera a una frecuencia máxima de 240 MHz. Este dispositivo se plantea como la unidad encargada de administrar la adquisición de datos provenientes del sensor biomédico, ejecutar la metodología de procesamiento de señales propuesta, coordinar la comunicación entre los distintos periféricos y gestionar la transmisión inalámbrica de información hacia plataformas basadas en Internet de las Cosas (IoT).

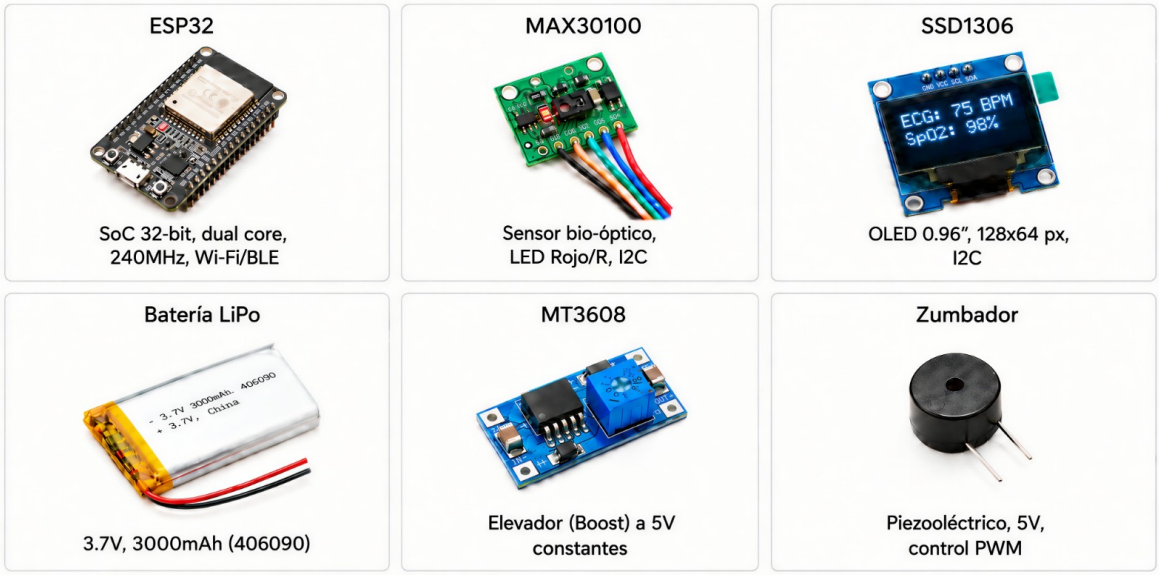


Figura 2. Principales componentes electrónicos considerados para el diseño conceptual del prototipo portátil.

Tabla II
LISTADO DE COMPONENTES DEL PROTOTIPO PROPUESTO

Componente	**Especificación**	**Función**
ESP32	SoC 32-bit, 240MHz, Wi-Fi/Bluetooth	Procesamiento central
MAX30100	Sensor bio-óptico, interfaz I2C	Adquisición de señales PPG
SSD1306	Pantalla OLED 0.96", 128×64	Interfaz visual de usuario
Batería LiPo	3.7V, 3000mAh	Alimentación eléctrica
MT3608	Módulo elevador a 5V	Estabilización de voltaje
Zumbador	Transductor piezoeléctrico	Emisión de alertas sonoras
Módulo MicroSD	Interfaz SPI, 3.3V–5V	Almacenamiento local de datos

La adquisición de información fisiológica se plantea mediante el sensor biooptico MAX30100, el cual integra diodos emisores de luz roja e infrarroja junto con un fotodetector de alta sensibilidad. Su principio de funcionamiento se basa en la técnica de fotopletismografía (PPG), permitiendo registrar las variaciones en la absorción de la luz ocasionadas por los cambios en el volumen sanguíneo durante el ciclo cardíaco. Estas señales constituyen la principal fuente de información para la obtención de indicadores ópticos potencialmente relacionados con posibles condiciones anémicas.

Para la interacción con el usuario, el diseño contempla una pantalla OLED SSD1306 de 0.96 pulgadas y resolución de 128 × 64 píxeles, destinada a la visualización de los indicadores obtenidos, el estado operativo del sistema y mensajes de retroalimentación. La tecnología OLED fue seleccionada debido a su bajo consumo energético, elevado contraste y adecuada visibilidad en diferentes condiciones de iluminación.

La alimentación del sistema se plantea mediante una batería recargable de polímero de litio (LiPo) de 3.7 V y 3000 mAh. Asimismo, se considera la incorporación del módulo elevador de tensión MT3608 para proporcionar un nivel de voltaje estable a los componentes que lo requieran, favoreciendo el funcionamiento adecuado de la arquitectura electrónica propuesta.

Finalmente, el diseño incorpora un zumbador piezoeléctrico como mecanismo de notificación acústica para señalar eventos del sistema, tales como el inicio y finalización del proceso de adquisición, errores durante la captura de señales o alertas asociadas al funcionamiento del dispositivo.

La selección de los componentes electrónicos también consideró criterios de disponibilidad comercial, bajo costo, consumo energético reducido y compatibilidad entre dispositivos, favoreciendo la futura implementación de un prototipo portátil accesible para aplicaciones de monitoreo preventivo.

IV. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES

La metodología propuesta se fundamenta en la adquisición y procesamiento de señales fotopletismográficas (PPG) mediante el sensor biooptico MAX30100. Este dispositivo integra emisores de luz roja con una longitud de onda aproximada de 660 nm y emisores de luz infrarroja cercana con una longitud de onda aproximada de 880 nm, además de un fotodetector de alta sensibilidad encargado de registrar las variaciones de absorción óptica generadas por el flujo sanguíneo pulsátil.

Durante el proceso de adquisición, se plantea que el usuario posicione el dedo índice sobre el módulo sensor, permitiendo que la radiación óptica emitida atraviese parcialmente el tejido vascular periférico. Las variaciones en la intensidad lumínica

detectada se asocian a cambios en el volumen sanguíneo durante el ciclo cardíaco, generando una señal fotopletismográfica susceptible de procesamiento digital.

Las señales adquiridas presentan dos componentes principales: una componente continua (DC), relacionada con los tejidos estáticos, huesos y sangre no pulsátil, y una componente alterna (AC), asociada al comportamiento pulsátil del sistema cardiovascular. Con el propósito de reducir las interferencias producidas por movimientos involuntarios, iluminación ambiental y ruido electrónico, se propone una etapa de acondicionamiento digital orientada a mejorar la relación señal-ruido.

El coeficiente de absorción relativa se calcula mediante la expresión presentada en la Ecuación (1):

$$R = \frac{(AC_{\text{rojo}}/DC_{\text{rojo}})}{(AC_{\text{IR}}/DC_{\text{IR}})} \tag{1}$$

donde:

- AC_{rojo} corresponde a la componente pulsátil de la señal roja.
- DC_{rojo} representa la componente continua de la señal roja.
- AC_{IR} corresponde a la componente pulsátil de la señal infrarroja.
- DC_{IR} representa la componente continua de la señal infrarroja.

La relación expresada en la Ecuación (1) se fundamenta en el comportamiento óptico de las señales fotopletismográficas adquiridas mediante luz roja e infrarroja. La componente alterna (AC) representa las variaciones pulsátiles ocasionadas por el flujo sanguíneo durante el ciclo cardíaco, mientras que la componente continua (DC) corresponde a la absorción producida por tejidos estáticos, huesos y sangre no pulsátil.

La normalización de la componente pulsátil respecto a la componente continua permite reducir el efecto de factores externos como diferencias en la intensidad luminosa, variaciones anatómicas entre individuos y cambios en la presión ejercida sobre el sensor. Posteriormente, la relación entre ambas longitudes de onda genera el coeficiente óptico R, el cual ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones biomédicas basadas en fotopletismografía debido a que refleja diferencias en la absorción de la luz asociadas con las propiedades ópticas de la sangre. En esta investigación dicho parámetro se plantea como un indicador potencial para futuras estrategias de tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas.

El parámetro R constituye un indicador óptico derivado de la relación entre ambas longitudes de onda y ha sido reportado en la literatura como una métrica de interés para el análisis de señales fotopletismográficas. En esta investigación, se propone su utilización como un indicador óptico potencialmente relacionado con posibles condiciones anémicas dentro de una estrategia de tamizaje preliminar.

Es importante señalar que la propuesta no pretende reemplazar las pruebas hematológicas convencionales realizadas en entornos clínicos, sino establecer una base metodológica para el desarrollo de una herramienta no invasiva orientada al tamizaje preliminar y al monitoreo preventivo. La implementación física del prototipo y su validación clínica frente a métodos convencionales se consideran como trabajo futuro.

Finalmente, la arquitectura propuesta contempla la visualización de los indicadores obtenidos mediante una pantalla OLED y la transmisión de la información hacia plataformas basadas en Internet de las Cosas (IoT), con el propósito de facilitar el almacenamiento, el monitoreo remoto y el análisis longitudinal de los datos biomédicos.

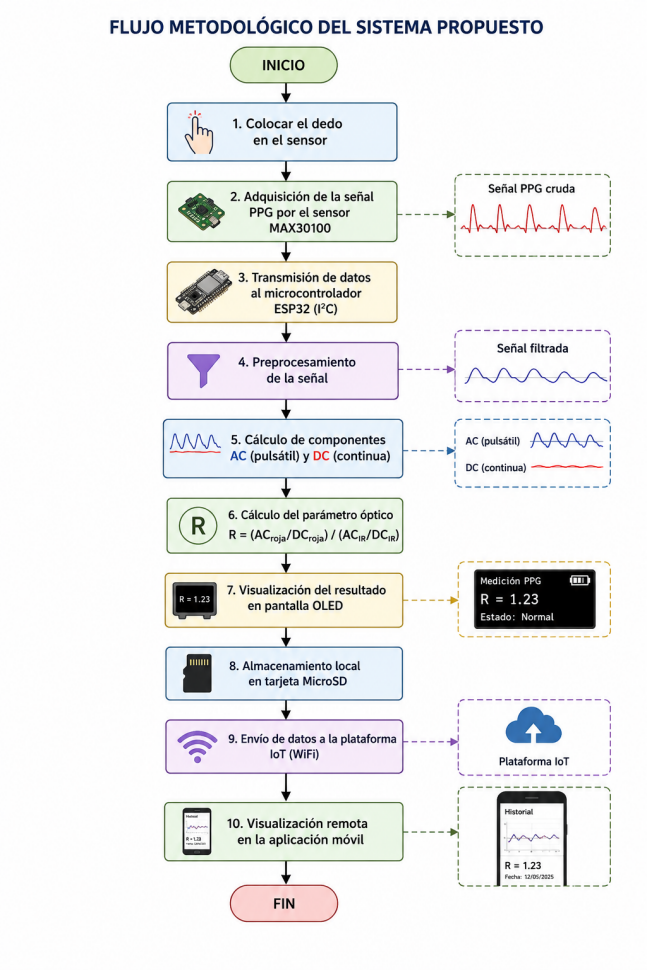


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico secuencial que abarca desde la captura inicial con el sensor MAX30100 hasta la extracción del parámetro óptico R, finalizando con el almacenamiento local en MicroSD, despliegue en pantalla OLED y monitoreo remoto vía IoT/app móvil.

La Figura 3 presenta el diagrama de flujo metodológico secuencial que abarca desde la captura inicial con el sensor MAX30100 hasta la extracción del parámetro óptico R, finalizando con el almacenamiento local en MicroSD, despliegue en pantalla OLED y monitoreo remoto vía IoT.

IV-A. Arquitectura General del Sistema

El sistema propuesto se estructura en cuatro etapas principales: adquisición de señales, procesamiento digital, extracción de indicadores ópticos y visualización de resultados. La arquitectura propuesta integra un sensor bio-óptico MAX30100, un

microcontrolador ESP32 y una interfaz de usuario basada en pantalla OLED, permitiendo la adquisición y procesamiento de señales fotopletismográficas (PPG).

La señal obtenida mediante el sensor MAX30100 es enviada al microcontrolador ESP32, donde se realiza el acondicionamiento inicial de los datos, filtrado digital y análisis de las componentes alterna (AC) y continua (DC). Posteriormente, se calculan indicadores ópticos derivados de la señal procesada, los cuales pueden ser utilizados para el análisis preliminar de posibles condiciones asociadas a niveles anormales de hemoglobina.

Finalmente, los indicadores obtenidos son visualizados mediante una pantalla OLED integrada en el dispositivo, contemplándose además una futura integración con plataformas basadas en Internet de las Cosas (IoT) para el almacenamiento y monitoreo remoto de la información biomédica.



Fig. 2. Arquitectura general del sistema propuesto.

Figura 4. Arquitectura general del sistema propuesto. Diagrama del flujo de procesamiento: adquisición de luz roja e infrarroja mediante el sensor MAX30100, filtrado de componentes AC/DC de la señal PPG en el ESP32, cálculo del índice de absorbancia R para tamizaje de anemia y despliegue de resultados en pantalla OLED y módulo IoT.

La Figura 4 ilustra la arquitectura general del sistema propuesto, mostrando el flujo de procesamiento desde la adquisición de luz roja e infrarroja hasta el despliegue de resultados.

La Figura 5 presenta la arquitectura funcional propuesta para la integración del sensor biomédico, el procesamiento local y la comunicación IoT.

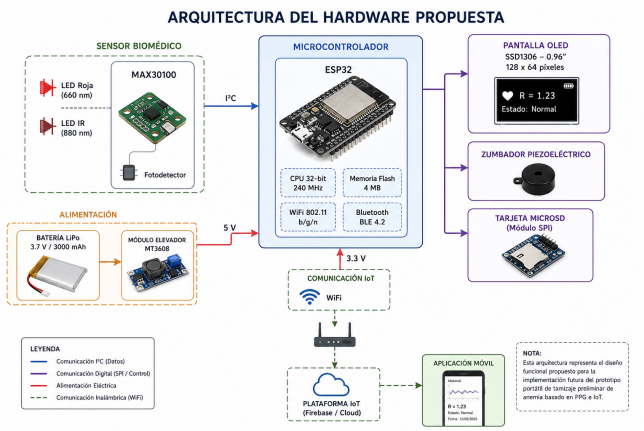


Figura 5. Arquitectura funcional propuesta para la integración del sensor biomédico, el procesamiento local y la comunicación IoT.

V. Validación del Diseño Propuesto e Instrumentos de Evaluación

V-A. Especificación Técnica del Prototipo Propuesto

En esta investigación se definió la arquitectura de hardware del prototipo propuesto para el tamizaje preliminar de posibles condiciones anémicas. La selección de los componentes electrónicos se realizó considerando criterios de capacidad de procesamiento, precisión en la adquisición de señales fotopletismográficas (PPG), bajo consumo energético, portabilidad y facilidad de integración.

El diseño contempla el uso de un microcontrolador ESP32 como unidad principal de procesamiento, un sensor bioóptico MAX30100 para la adquisición de señales PPG y una pantalla OLED para la visualización de la información. Asimismo, se consideró la incorporación de una batería recargable, un módulo regulador de voltaje, un zumbador piezoeléctrico y un módulo de almacenamiento local, conformando una propuesta de arquitectura para un futuro desarrollo del dispositivo.

V-B. Enfoque Metodológico

Con el propósito de evaluar el nivel de aceptación tecnológica, la percepción de utilidad y la experiencia de interacción con el diseño propuesto, se diseñó un proceso de validación basado en instrumentos de opinión estructurados mediante escalas tipo Likert.

La población participante estuvo conformada por 123 personas, incluyendo estudiantes universitarios, docentes, profesionales de diversas disciplinas y ciudadanos pertenecientes a distintos contextos académicos y sociales, permitiendo obtener una apreciación heterogénea sobre la pertinencia de una herramienta no invasiva orientada al monitoreo temprano de posibles estados anémicos.

La estrategia metodológica se organizó en dos etapas complementarias. La primera correspondió a un diagnóstico de línea base (Pre-test), destinado a identificar necesidades, limitaciones de los métodos tradicionales y expectativas respecto al uso de tecnologías biomédicas domiciliarias. La segunda etapa

consistió en una evaluación posterior al diseño conceptual del prototipo (Post-test), orientada a analizar aspectos relacionados con la ergonomía, facilidad de uso, funcionalidades adicionales y percepción general de aceptación.

Es importante señalar que el presente proceso de validación se enfoca en la aceptación tecnológica y la experiencia de usuario del sistema propuesto. La validación clínica de la capacidad predictiva del algoritmo frente a pruebas hematológicas convencionales constituye una línea de investigación futura que requerirá estudios controlados con muestras biológicas y protocolos aprobados por comités de ética especializados.

V-C. Fase 1: Diagnóstico de Línea Base (Pre-test)

Esta etapa permitió identificar la percepción de la población respecto a la problemática de la anemia, las barreras asociadas a los procedimientos invasivos convencionales y el interés potencial en tecnologías de monitoreo preventivo de uso doméstico:

- Aceptación de métodos de diagnóstico actuales.
- Necesidades de monitoreo frecuente y accesible.
- Expectativas respecto a nuevas tecnologías biomédicas.

V-D. Análisis Estadístico de la Línea Base (Pre-test)

1. Frecuencia de Exámenes

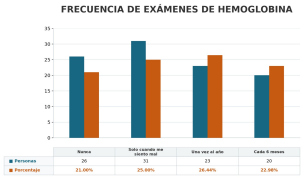


Figura 6. 1. Frecuencia de Exámenes

La mayoría de los encuestados reporta realizarse exámenes de forma periódica (anual o semestral), aunque existe un grupo significativo que solo acude cuando presenta síntomas, lo que subraya la necesidad de herramientas de monitoreo preventivo constante.

2. Antecedentes de Anemia



Figura 7. 2. Antecedentes de Anemia

Los datos indican que una proporción relevante de la muestra ya cuenta con antecedentes de anemia, lo cual valida la importancia de implementar soluciones que faciliten el control clínico recurrente para este grupo.

3. Incomodidad en Análisis Tradicionales



Figura 8. 3. Incomodidad en Análisis Tradicionales

El dolor asociado al pinchazo, junto con los costos y tiempos de espera, son los factores que más disuaden a los usuarios. Esto justifica plenamente la búsqueda de una alternativa tecnológica no invasiva y eficiente.

4. Utilidad del Monitoreo en Casa

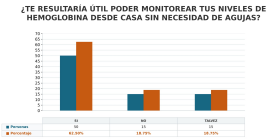


Figura 9. 4. Utilidad del Monitoreo en Casa

Existe una percepción mayoritaria sobre la utilidad de contar con un sistema de monitoreo en el hogar, reflejando una clara apertura hacia el autocuidado asistido por tecnología.

5. Disposición a Sensores de Luz

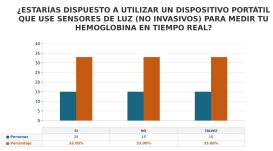


Figura 10. 5. Disposición a Sensores de Luz

La alta disposición hacia sensores de luz sugiere que la tecnología basada en fotometría es vista como una alternativa viable y aceptable para reemplazar o complementar los métodos invasivos.

6. Prioridad en el Dispositivo



Figura 11. 6. Prioridad en el Dispositivo

La precisión en el resultado se mantiene como la prioridad prin-

cipal, seguida de cerca por el precio accesible. Esto establece un estándar crítico para cualquier desarrollo tecnológico.

7. Situaciones de Uso

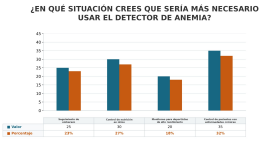


Figura 12. 7. Situaciones de Uso

Existe un alto interés en aplicar el monitoreo tanto para control de nutrición en niños como para la gestión de enfermedades crónicas, posicionando al dispositivo como una herramienta versátil.

8. Confianza en el Método No Invasivo

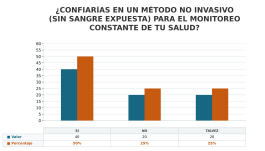


Figura 13. 8. Confianza en el Método No Invasivo

La mayoría muestra confianza en la tecnología no invasiva, con tendencia a validar resultados mediante comparaciones clínicas.

9. Prevención Comunitaria



Figura 14. 9. Prevención Comunitaria

Existe un consenso sobre el impacto positivo directo en la salud pública y prevención comunitaria.

V-E. Evaluación de Aceptación Tecnológica del Prototipo (Post-test)

1. Comodidad del diseño

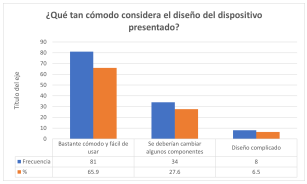


Figura 15. 1. Comodidad del diseño

El 65,9 % considera que el diseño es bastante cómodo y fácil de usar, mientras que el 27,6 % sugiere optimizaciones en la ergonomía y organización de componentes.

2. Claridad de la pantalla

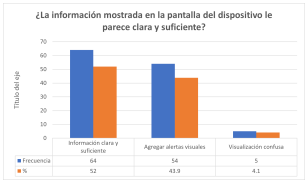


Figura 16. 2. Claridad de la pantalla

El 52 % considera que la información presentada es clara y precisa; un 43,9 % sugiere incorporar alertas visuales adicionales o indicadores luminosos.

3. Característica técnica prioritaria

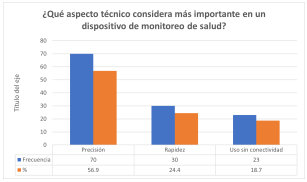


Figura 17. 3. Característica técnica prioritaria

El 56,9 % prioriza la precisión del algoritmo por encima de la rapidez. Esto demuestra que los usuarios depositan mayor importancia en la confiabilidad clínica.

4. Diseño de la aplicación móvil

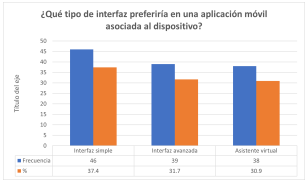


Figura 18. 4. Diseño de la aplicación móvil

El 37,4 % prefiere una interfaz simple, mientras que otros optan por funciones avanzadas como gráficos. Los usuarios valoran la navegación intuitiva pero con funciones de seguimiento detallado.

5. Función adicional más útil

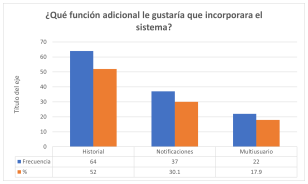


Figura 19. 5. Función adicional más útil

El 52 % considera que el historial de resultados es la función más útil, seguido por notificaciones. Los participantes valoran el seguimiento continuo y el intercambio de información.

6. Manejo de resultados anormales

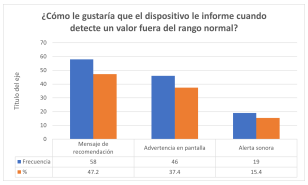


Figura 20. 6. Manejo de resultados anormales

El 47,2 % prefiere recibir recomendaciones médicas ante valores anormales, buscando una experiencia orientada al acompañamiento y no solo a la visualización de datos.

7. Personalización de rangos

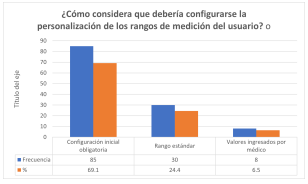


Figura 21. 7. Personalización de rangos

El 69,1 % considera importante realizar una configuración inicial personalizada de los rangos de hemoglobina, adaptando los parámetros a su edad, sexo o condición fisiológica.

8. Limpieza y mantenimiento

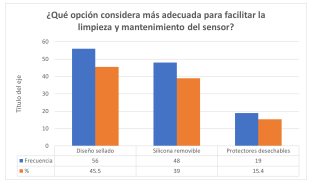


Figura 22. 8. Limpieza y mantenimiento

El 45,5 % prefiere una superficie sellada fácil de desinfectar, lo que confirma que la higiene es clave para la seguridad sanitaria y durabilidad del equipo.

9. Alimentación eléctrica

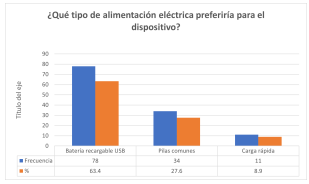


Figura 23. 9. Alimentación eléctrica

El 63,4 % prefiere una batería recargable mediante USB, valorando la comodidad, sostenibilidad y evitando gastos en pilas para el uso cotidiano.

V-F. Limitaciones del Estudio

A pesar de los resultados favorables obtenidos en términos de aceptación y percepción de utilidad, el presente trabajo presenta ciertas limitaciones inherentes al nivel de desarrollo alcanzado por el prototipo.

En primer lugar, las estimaciones derivadas de las señales fotopletismográficas no fueron contrastadas experimentalmente con mediciones hematológicas obtenidas mediante hemogramas clínicos, por lo que el sistema debe considerarse actualmente como una herramienta exploratoria de tamizaje y monitoreo preventivo.

Asimismo, la muestra utilizada en la evaluación estuvo orientada principalmente a analizar aspectos de experiencia de usuario y aceptación tecnológica, sin contemplar procedimientos de validación biomédica bajo condiciones hospitalarias controladas.

Finalmente, futuras investigaciones podrán incorporar modelos de aprendizaje automático entrenados con bases de datos clínicas, ampliar el tamaño muestral y desarrollar estudios comparativos con equipos médicos certificados, con el objetivo de incrementar la capacidad predictiva y robustez del sistema propuesto.

VI. Conclusiones

Tras el proceso de diseño y evaluación de la propuesta presentada, se establecen las siguientes conclusiones:

- Se diseñó una propuesta de prototipo portátil para el tami-

zaje preliminar de posibles condiciones anémicas mediante fotopletismografía (PPG) e Internet de las Cosas (IoT), definiendo una arquitectura basada en un microcontrolador ESP32, un sensor bioóptico MAX30100 y una pantalla OLED, orientada al desarrollo de una herramienta no invasiva para aplicaciones de monitoreo preventivo.

- La revisión de la literatura permitió identificar que la fotopletismografía constituye una alternativa prometedora para el desarrollo de sistemas no invasivos orientados al monitoreo fisiológico, respaldando la viabilidad teórica del empleo de sensores ópticos como base para futuras herramientas de apoyo al tamizaje preliminar de anemia.
- Los resultados de la evaluación de aceptación tecnológica evidenciaron una percepción favorable por parte de los participantes respecto al interés, la utilidad y la facilidad de uso de la propuesta, lo que sugiere un adecuado nivel de aceptación potencial para aplicaciones de monitoreo preventivo.
- Como trabajo futuro, se propone implementar físicamente el prototipo, desarrollar los algoritmos necesarios para el procesamiento de señales fotopletismográficas, realizar pruebas experimentales y efectuar una validación clínica mediante comparación con métodos hematológicos convencionales, con el fin de evaluar la precisión, confiabilidad y aplicabilidad del prototipo propuesto.

VII. Discusión

Los resultados de la evaluación de aceptación tecnológica permiten evidenciar una aceptación favorable del diseño propuesto como una alternativa tecnológica orientada al monitoreo preventivo y no invasivo de posibles estados anémicos. La percepción positiva observada en las encuestas realizadas sugiere un interés creciente por herramientas biomédicas portátiles que reduzcan la dependencia de procedimientos hematológicos convencionales.

Diversos estudios reportados en la literatura científica han demostrado el potencial de las técnicas ópticas para la detección temprana de anemia. Mannino et al. [8] desarrollaron un sistema basado en imágenes adquiridas mediante teléfonos inteligentes, alcanzando sensibilidades cercanas al 70 % a 90 % y errores inferiores a ±2.4 g/dL en la estimación de hemoglobina. Estos resultados respaldan la viabilidad del empleo de métodos ópticos como mecanismos preliminares de tamizaje.

De manera similar, investigaciones recientes han incorporado modelos de aprendizaje automático y técnicas avanzadas de procesamiento de señales fotopletismográficas con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva de sistemas no invasivos. Sin embargo, muchos de estos enfoques requieren infraestructuras computacionales complejas, grandes volúmenes de datos clínicos o plataformas de procesamiento externo.

En contraste, la propuesta presentada en esta investigación se orienta hacia el desarrollo de una solución basada en un microcontrolador ESP32 y un sensor MAX30100, permitiendo realizar procesamiento local de señales, visualización inmediata mediante pantalla OLED y posibilidades futuras de integración con plataformas IoT para monitoreo remoto.

No obstante, es importante reconocer que el presente trabajo se encuentra en una etapa de validación tecnológica centrada en aspectos de aceptación, ergonomía y experiencia de usuario. La capacidad predictiva del sistema respecto a concentraciones reales de hemoglobina deberá ser evaluada en investigaciones posteriores mediante estudios comparativos con hemogramas clínicos y protocolos biomédicos controlados.

Finalmente, la arquitectura propuesta constituye una base prometedora para futuras investigaciones orientadas a incorporar algoritmos de aprendizaje automático, modelos de calibración personalizados y estrategias de telemedicina que permitan ampliar el alcance del monitoreo preventivo en poblaciones vulnerables y zonas con acceso limitado a servicios especializados de salud.

Referencias

[1] World Health Organization (WHO), "Anaemia," WHO Fact Sheets, Geneva, Switzerland, Apr. 2024. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/anaemia

[2] J. Allen, "Photoplethysmography and its Application in Clinical Physiological Measurement," *Physiological Measurement*, vol. 28, no. 3, pp. R1–R39, 2007. doi:10.1088/0967-3334/28/3/R01. [Online]. Available: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17322588/

[3] Maxim Integrated, "MAX30100 Pulse Oximetry and Heart-Rate Sensor IC for Wearable Health," Datasheet, 2023. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX30100.pdf

[4] G. Sahu, P. Verma, and N. Tapas, "Non-Invasive Anemia Detection: A Multichannel PPG-Based Hemoglobin Estimation with Explainable Artificial Intelligence," *arXiv Preprint*, arXiv:2602.17290, 2026. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2602.17290

[5] M. A. Al-Rakhami, A. M. Gumaei, and A. Alamri, "A Survey on Internet of Things-Based Healthcare Systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 101176–101192, 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2109.02042

[6] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES)," Lima, Perú, 2025. [Online]. Available: https://www.inei.gob.pe

[7] Ministerio de Salud del Perú (MINSA), "Plan Multisectorial para la Prevención y Reducción de la Anemia Materno Infantil en el Perú," Lima, Perú, 2025. [Online]. Available: https://www.gob.pe/minsa

[8] R. G. Mannino, D. Myers, S. Tyburski, C. Caruso, J. Boudreaux, T. Leong, O. Clifford, G. Lam, A. T. Tien, and W. A. Lam, "Smartphone App for Non-Invasive Detection of Anemia Using Only Patient-Sourced Photos," *Nature Communications*, vol. 9, no. 4924, 2018. doi:10.1038/s41467-018-07262-2. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41467-018-07262-2

[9] S. Das, F. Ahamed, A. Das, D. Das, J. Nandi, and K. Banerjee, "NiADA (Non-Invasive Anemia Detection App), a Smartphone-Based Application with Artificial Intelligence to Measure Blood Hemoglobin in Real-Time: A Clinical Validation," *Cureus*, vol. 16, e65442, 2024. doi:10.7759/cureus.65442. [Online]. Available: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11669323/

[10] Healthcare, "Portable Hemoglobin Concentration Monitoring System Using ESP32 and MAX30100 Based on Modified Beer-Lambert Law," *Healthcare*, vol. 9, no. 6, Art. 647, 2021. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2227-9032/9/6/647

[11] Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, "Non-Invasive Hemoglobin Monitoring Using MAX30100," ECE445 Senior Design Project, 2024. [Online]. Available: https://courses.grainger.illinois.edu/ece445/getfile.asp?id=12790