

# Revisión sistemática de técnicas de monitoreo con electrocardiograma y fotopletismografía enfocadas en la ingeniería mecatrónica.

(agosto de 2025)

Wilmer Alexis Caballero Oviedo, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Santander, Colombia,  
wilmer.caballero@ustabuca.edu.co

**Resumen** - Esta monografía presenta una revisión sistemática para el monitoreo no invasivo de la presión arterial utilizando señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletismografía (PPG), en el contexto académico de la ingeniería mecatrónica. Se abordan los fundamentos fisiológicos, los métodos de adquisición y procesamiento de señales, y parámetros clave como el tiempo de tránsito del pulso (PTT) y el tiempo de llegada del pulso (PAT). La revisión se llevó a cabo mediante ecuaciones de búsqueda aplicadas a bases de datos científicas, con un filtro de publicaciones recientes y pertinentes. Se analizaron nueve estudios agrupados en tres enfoques principales: bases teóricas, desarrollo de dispositivos portátiles y uso de modelos computacionales para la estimación de presión arterial. Los resultados evidencian la viabilidad de sistemas no invasivos, precisos y compactos, aunque persisten desafíos relacionados con la validación clínica. Este trabajo ofrece una base formativa y técnica para el desarrollo de soluciones inteligentes aplicadas al monitoreo fisiológico desde la ingeniería mecatrónica.

**Palabras claves:** Monitorización de la presión arterial, Electrocardiograma (ECG), Fotopletismografía (PPG), Técnicas no invasivas, Tiempo de llegada del pulso (PAT), Tiempo de tránsito del pulso (PTT), Dispositivos portátiles.

**Abstract** - This monograph presents a systematic review for noninvasive blood pressure monitoring using electrocardiogram (ECG) and photoplethysmography (PPG) signals in the academic context of mechatronic engineering. Physiological fundamentals, signal acquisition and processing methods, and key parameters such as pulse transit time (PTT) and pulse arrival time (PAT) are addressed. The review was conducted using search equations applied to scientific databases, with a filter of recent and relevant publications. Nine studies grouped into three main approaches were analyzed: theoretical bases, development of portable devices and use of computational models for blood pressure estimation. The results demonstrate the feasibility of noninvasive, accurate and compact systems, although challenges related to clinical validation remain. This work offers a formative and technical

basis for the development of intelligent solutions applied to physiological monitoring from mechatronic engineering.

**Keywords:** Blood pressure monitoring, Electrocardiogram (ECG), Photoplethysmography (PPG), Non-invasive techniques, Pulse Arrival Time (PAT), Pulse Transit Time (PTT), Wearable devices.

## I. INTRODUCCION

En el campo de la medicina, el control y tratamiento adecuado de la presión arterial son de vital importancia para garantizar una atención médica de calidad. El diagnóstico de hipertensión arterial es un procedimiento común y esencial en la práctica clínica diaria[1], donde la precisión y exactitud de las mediciones desempeñan un papel crucial. Con el fin de abordar esta problemática, las técnicas de electrocardiograma (ECG) y fotopletismografía (PPG) se han estudiado ampliamente como métodos no invasivos para la adquisición de la presión arterial [2].

La presente propuesta de investigación se justifica en la necesidad de establecer una base sólida de conocimientos en el campo del monitoreo no invasivo de la presión arterial, utilizando las técnicas de ECG y PPG, específicamente en el contexto académico de la ingeniería mecatrónica. El objetivo principal es proporcionar una referencia y guía para futuros investigadores interesados en este campo, brindando una visión clara y completa sobre las técnicas y metodologías empleadas [3].

Dentro de esta investigación, se abordarán conceptos fundamentales como los biopotenciales, que son los resultados medibles de los potenciales eléctricos en células vivas, tejidos y organismos [4]. Además, se explorarán los modelos eléctricos utilizados en la medición de las señales, así como sus características físicas. Esto permitirá comprender en profundidad la actividad eléctrica generada por las señales de ECG y PPG, y cómo estos datos pueden ser utilizados por los profesionales de la salud para realizar diagnósticos precisos y una investigación adecuada sobre las complicaciones de salud.

Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Ingeniería mecatrónica.

Autor de contacto: Wilmer Alexis Caballero Oviedo, estudiante del programa de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Santo Tomás. Correo electrónico: wilmer.caballero@ustabuca.edu.co

Director: Ing. Carlos Daniel Pimentel Díaz, M.Sc., docente investigador y líder del Grupo de Investigación Hamilton de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Santo Tomás. Correo electrónico: carlos.pimentel@ustabuca.edu.co

La metodología empleada en la investigación se basará en una revisión sistemática de bases de datos, documentos y artículos de investigación relevantes en el campo. Permitiendo recopilar la información más actualizada y relevante sobre las técnicas de monitoreo no invasivo de la presión arterial utilizando ECG y PPG. Con base en estos hallazgos, se establecerán bases de conocimientos fundamentales que contribuyan al avance científico y tecnológico en este campo de estudio.

## II. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se ha optado por realizar una revisión sistemática en referencia a los estudios científico-técnicos que aplican técnicas no invasivas para la estimación de la presión arterial mediante señales de electrocardiograma (ECG) y fotoplethismografía (PPG). El propósito es construir un corpus de conocimiento actualizado que permita conocer los aspectos de las bases de dichas técnicas, las aplicaciones, los puntos a favor y los obstáculos de estas metodologías. Para ello se realizó una búsqueda estructurada en aquellas bases de datos académicas de impacto alto: IEEE Xplore, PubMed, Scopus y ScienceDirect que prioriza los artículos científicos con revisión por pares y los capítulos de libros específicos publicados entre 2019 - 2025 y tanto en inglés como en español [2].

Con la finalidad de guiar la búsqueda bibliográfica y definir qué criterios seguir para seleccionar los estudios, se plantearon cuatro preguntas metodológicas clave, las cuales permitieron acotar el enfoque temático de la revisión, guiar la elaboración de las ecuaciones de búsqueda y asegurar que los documentos seleccionados respondiesen a las expectativas de la revisión, así como su interpretación, facilitando la estructuración del análisis que debía considerar los fundamentos, las aplicaciones, las ventajas y las limitaciones del monitorizado no invasivo de la presión arterial, utilizando las señales ECG y PPG.

- ¿Cuáles son los fundamentos fisiológicos y técnicos necesarios para realizar un monitoreo de la presión arterial no invasivo? Esta pregunta permite la recuperación de las investigaciones que ofrecen las nociones fundamentales de la dinámica cardiovascular, así como los principios técnicos correspondientes a la adquisición de las señales biomédicas como ECG y PPG [5].
- ¿En qué consiste la utilización de las señales de un electrocardiograma (ECG) y de la fotoplethismografía (PPG) para la estimación continua y sin manguito de la presión arterial? Fue esta la pregunta la que dirigió la búsqueda hacia trabajos que fueran explicativos del uso combinado de dichas señales para el cálculo de parámetros relevantes (presión de pulso (PTT) o bien otras variables en las que se aplica para el cálculo de la presión arterial de forma indirecta) sin intervención del uso de dispositivos compresores [6].
- ¿Cómo se implementan técnicamente los sistemas de adquisición de señales ECG y PPG y los sistemas de control no invasivos de la presión arterial? Pretendía

comprender cómo se realizan físicamente las mediciones, que implicaban por un lado el uso de electrodos para captar la actividad eléctrica del corazón (ECG), y del otro, el uso de sensores ópticos para registrar las variaciones del volumen sanguíneo (PPG), junto a los principios de funcionamiento y las condiciones de aplicación de estos sistemas [7].

- ¿Qué aportaciones clínicas y tecnológicas ofrecen los enfoques no invasivos respecto a los métodos invasivos tradicionales? Esta pregunta permitió identificar estudios que mostraron las ventajas prácticas del monitoreo no invasivo, como mayor confort para el paciente, portabilidad de los dispositivos, posibilidad de monitoreo continuo y disminución del riesgo clínico en relación con el método invasivo [8].

Siguiendo las palabras claves y términos de búsqueda asociados de la investigación presente en las preguntas clave, se plantean tres ecuaciones de búsqueda de acuerdo con una forma sistemática para obtener resultados de calidad y relevantes. El objetivo es obtener conceptos esenciales en el contexto de monitoreo no invasivo de la adquisición de electrocardiograma (ECG) y fotoplethismografía (PPG) [9].

- ("blood pressure" OR "presión arterial") AND ("Electrocardiogram" OR "ECG") AND ("photoplethysmography" OR "PPG")
- ("monitoring" OR "measurement") AND ("blood pressure" OR "presión arterial") AND ("non-invasive" OR "no invasivo") AND ("techniques" OR "técnicas")
- ("cardiovascular monitoring" OR "monitoreo cardiovascular") AND ("electrocardiogram" OR "ECG") AND ("photoplethysmography" OR "PPG") AND ("review" OR "revisión")

El proceso de búsqueda se realizó en las bases de datos IEEE Xplore, PubMed, ScienceDirect y Scopus, seleccionadas por su amplia cobertura en las áreas de ingeniería, electrónica aplicada y ciencias de la salud. Se incluyeron artículos originales, revisiones sistemáticas, trabajos presentados en conferencias científicas y capítulos de libros, siempre que el enfoque principal estuviera relacionado con las técnicas de monitoreo no invasivo de la presión arterial mediante señales de electrocardiograma (ECG) y fotoplethismografía (PPG).

Con el fin de asegurar la actualidad y pertinencia de la información, se establecieron criterios de inclusión que limitaron la selección a publicaciones de los últimos cinco años, y que abordaran aspectos directamente relacionados con el alcance de esta revisión, ya fuera desde una perspectiva fisiológica, tecnológica o computacional, en el contexto académico de la ingeniería mecatrónica.

Con la ayuda de las tres ecuaciones de búsqueda basadas en los términos clave definidos en la investigación. Tras su aplicación en las bases seleccionadas, se identificaron 15 artículos en la

primera búsqueda, 13 en la segunda y 14 en la tercera, todos dentro del marco temático del monitoreo no invasivo de la presión arterial a partir de señales ECG y PPG. Posteriormente, los documentos fueron filtrados conforme a criterios de vigencia, relevancia técnica, alineación temática y disponibilidad de acceso completo.

### III. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

#### • Biopotenciales.

Un biopotencial es el resultado de un potencial eléctrico que puede medirse entre dos puntos en células vivientes, tejidos y organismos, que son consecuencia de algunos de sus procesos bioquímicos. Por ejemplo, el corazón produce una señal llamada ECG, el cerebro produce una señal llamada Electroencefalograma (EEG), la actividad de los músculos, como la contracción y la relajación, produce una señal de Electromiografía (EMG). El movimiento ocular produce una señal llamada Electrooculografía (EOG), y la retina dentro de los ojos produce el Electroretinograma (ERG) [4].

Las mediciones de estas y otras señales eléctricas del cuerpo proporcionan pistas vitales sobre las funciones normales o patológicas de los órganos. Debido a esto los potenciales bioeléctricos del cuerpo humano son indeterminados ya que las magnitudes varían con el tiempo. Además, que con respecto a la biología de cada persona pueden causar que los valores difieran en gran manera, así estén en las mismas condiciones.

Entre las características más notables de los biopotenciales son:

- Amplitudes pequeñas (10 pV-10 mV)
- Rango de baja frecuencia de señales

En la siguiente tabla se observan algunos de estos biopotenciales, sus aplicaciones clínicas representativas y sus índices de medición clave y sensores asociados [4].

**Tabla 1.** Biopotenciales, especificaciones y aplicaciones

| Fuente | Amplitud (mV) | Banda ancha (Hz) | Error de medición Fuente                                             | Aplicaciones Seleccionadas                                             |
|--------|---------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| ECG    | 1-5           | 0.05-100         | Artefacto de movimiento, 50/60 Hz de potencia interferencia de línea | Diagnóstico de isquemia, Arritmia, Defectos de conducción bioeléctrica |
| EEG    | 0.001-0.001   | 0.5-40           | Térmica (Johnson), Ruido RF, 50/60 Hz                                | Estudios del sueño, Detección de convulsiones, Mapeo cortical          |
| EMG    | 1-10          | 20-2000          | 50/60 Hz, RF                                                         | Función muscular, Enfermedad neuromuscular, Prótesis                   |
| EOG    | 0.01-0.1      | de-10            | Potencial de la piel movimiento                                      | Posición de los ojos, Estado de sueño, Reflejo vestibulo ocular        |

Adaptado [4].

#### • Modelo eléctrico de Medición de un Biopotencial.

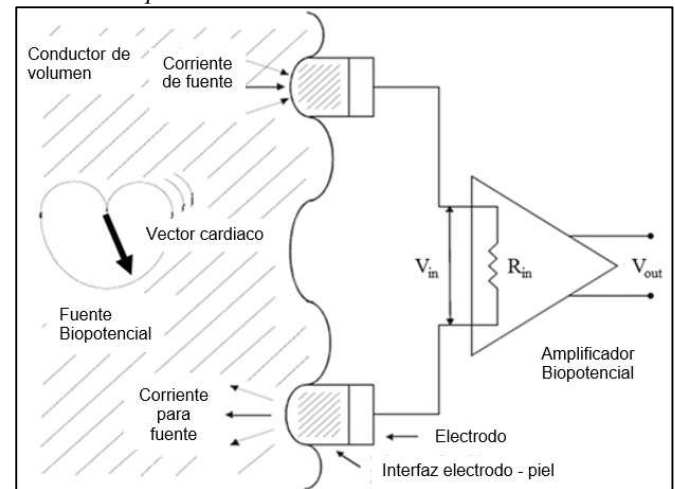
Al momento ubicar el elemento metálico (electrodo) en contacto con una disolución iónica, se crea una interfaz entre electrodo y disolución (semicélula) que, en equilibrio causa un potencial de contacto. Por el cual, al pasar una corriente por esta interfaz, el equilibrio se modifica dando lugar a una variación de dicho potencial, que vendrá dado por:

$$\Delta V_p = V_s - V_c$$

Donde  $\Delta V_p$  es el incremento de tensión de polarización,  $V_s$  es el potencial de la semicélula al pasar la corriente y  $V_c$  el potencial de contacto. Si la semicélula es independiente de la corriente,  $\Delta V_p$  será cero (electrodos no polarizables o reversibles) y en el caso en que la semicélula sea en función de la corriente,  $\Delta V_p$  será distinta de cero y su signo dependerá de la dependencia del electrodo (electrodos polarizables o irreversibles). Entre los primeros, el más utilizado es el electrodo de plata-cloruro de plata (Ag-ClAg) [10].

Observando la figura 1 tenemos el registro de una diferencia de biopotencial mediante dos electrodos, al momento de realizar la adquisición de un bioseñal.

**Figura 1.** Modelo de registro de diferencias de biopotencial mediante un par de electrodos



Tomado [2].

Analizando la figura 1 tendremos el circuito equivalente de electrodo-electrolito-piel en el cual los generadores  $E_{he}$  y  $E_{se}$  representan respectivamente la diferencia de potencial de la semicélula y de contacto con la piel. Los elementos  $R_d$  y  $C_d$  modelizan la impedancia asociada con el electrodo y el contacto con el electrolito, así como los efectos de polarización.  $R_s$  representa la resistencia del electrolito. Por último, el paralelo  $R_e-C_e$  corresponde a la impedancia de la epidermis y  $R_u$  a la impedancia puramente resistiva que presenta la dermis [8].

#### • Electrocardiograma (ECG).

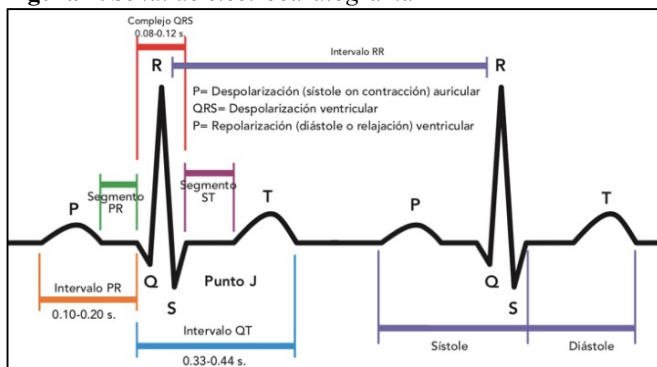
El electrocardiograma es la representación gráfica (gráfica 1) de la actividad eléctrica que genera el corazón en función del tiempo, cuando se adquiere la señal mediante el uso de

electrodos que se conectan directamente en el torso, los brazos o las piernas.

Las señales de ECG en la superficie del cuerpo son pequeñas en amplitud, lo que hace que las mediciones sean susceptibles a eventos como, los artefactos a su alrededor, el movimiento relativo generado por el electrodo-piel y así como por la actividad de los músculos cercanos, por eso una consideración importante en una buena adquisición de señal de ECG es el uso de electrodos de alta calidad, se recomiendan electrodos hechos de plata recubierta con cloruro de plata o de material plata / cloruro de plata (Ag-AgCl) sinterizado.

Al instante de realizar ese ejercicio se aconseja minimizar los artefactos en el contacto electrodo-piel, así como la interferencia electromagnética de todas las fuentes externas, debido que los instrumentos de ECG a menudo se usan en entornos de cuidados críticos y por eso deben aislarse eléctricamente por seguridad y protegerse de los altos voltajes generados por otros dispositivos.

**Figura 2.** Señal de electrocardiograma



Tomado [11].

**Tabla 2.** Componentes señal de electrocardiograma.

| Componente     | Descripción                               |
|----------------|-------------------------------------------|
| Onda P         | Representa la despolarización auricular.  |
| Complejo QRS   | Refleja la despolarización ventricular.   |
| Onda T         | Indica la repolarización ventricular.     |
| Onda U         | Pequeña desviación que sigue a la onda T. |
| Componente R/S | Muestra la contracción del miocardio.     |

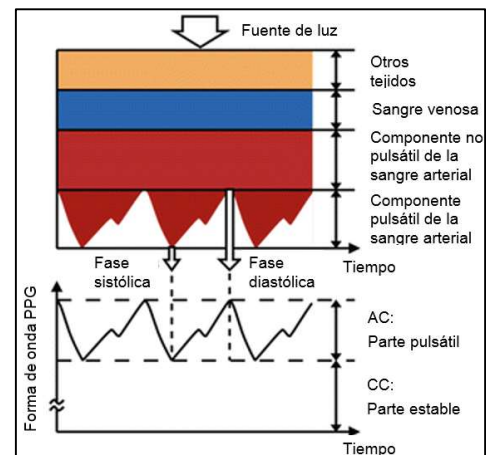
Adaptado [11].

- **Fotoplethismografía (PPG)**

La fotoplethismografía es una técnica que consiste en medir el cambio del volumen en un órgano durante su estado de actividad. Este método implementa en un haz de luz que viaja a través del tejido biológico donde puede ser absorbida por diferentes sustancias, pigmentos de la piel, los huesos y la sangre arterial y venosa. Por ejemplo, en el ciclo cardiaco al presentarse la fase de sistólica, las arterias contienen una mayor cantidad de flujo sanguíneo que en la fase diastólica, lo cual al usar un sensor de PPG detecta ópticamente el cambio en el flujo sanguíneo debido al cambio de la intensidad en la luz detectada, durante la transmisión (Reflexión) a través del tejido [12], [13].

En la figura 3 observamos como la onda de PPG, cuenta de componentes de corriente continua (CC) y de corriente alterna (AC). La parte de corriente CC de la onda de PPG es la que corresponde a la señal óptica reflejada detectada del tejido, dependiendo del tejido y del volumen de sangre.

**Figura 3.** Variaciones en la atenuación de la luz por tejido



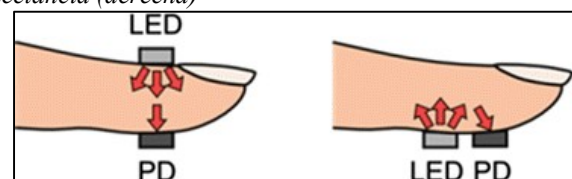
Tomado [5].

El componente CC es el correspondiente de cambiar lentamente con la respiración en cambio la componente AC muestra cambios con respecto al volumen sanguíneo en las fases del ciclo cardiaco [5].

- **Señales transmitidas y reflejadas**

La adquisición de la señal de PPG portátil se puede realizar por dos modos principales que serían transmitancia y reflectancia.

**Figura 4.** Colocación de diodos emisores de luz (LED) y fotodetectores (PD) para transmisión (izquierda) y reflectancia (derecha)



Tomado [5].

Observado la figura 4 distinguimos como en el modo de transmitancia, la luz es transmitida a través del medio y es detectada por un fotodetector en una ubicación opuesta al LED, mientras que, en el modo de reflectancia, el fotodetector espera la luz que es enviada al ser reflejada por los tejidos, huesos o vasos sanguíneos [5].

La revisión de los principios fisiológicos y eléctricos detrás de las señales de ECG y PPG permite comprender las bases sobre las que se fundamentan muchas de las técnicas modernas de monitoreo no invasivo. Estos enfoques teóricos tratan sobre cómo se originan las señales, qué información transportan y por qué resultan útiles para estimar parámetros cardiovasculares como la presión arterial. Al establecer esta base teórica, se

sientan las condiciones necesarias para interpretar con claridad los enfoques utilizados en investigaciones actuales y futuras.

#### IV. INVESTIGACIONES REALIZADAS

A partir del proceso de revisión sistemática, se seleccionaron nueve investigaciones representativas que abordan el monitoreo no invasivo de la presión arterial desde tres enfoques complementarios: los fundamentos fisiológicos, el desarrollo de dispositivos portátiles y la implementación de modelos computacionales aplicados al análisis de señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletimografía (PPG). Estos trabajos ofrecen una visión integral de los métodos actuales para la adquisición, procesamiento e interpretación de señales fisiológicas, constituyendo un aporte formativo especialmente valioso dentro del contexto académico de la ingeniería mecatrónica.

Las investigaciones analizadas abordan el problema desde diferentes perspectivas metodológicas y niveles de aplicación. Algunas se enfocan en revisiones teóricas orientadas a los principios biomédicos y técnicos que sustentan estas técnicas, mientras que otras presentan diseños experimentales y validaciones de sistemas portátiles implementados en condiciones reales. Asimismo, se destacan estudios que integran técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático (machine learning) y el aprendizaje profundo (deep learning), con el fin de mejorar la precisión, continuidad y adaptabilidad en la estimación de la presión arterial.

En las secciones siguientes, se presenta el análisis detallado de cada uno de los estudios seleccionados, destacando su propósito, metodología, principales hallazgos y relevancia en el desarrollo de tecnologías orientadas al monitoreo no invasivo de la presión arterial.

##### 1. FUNDAMENTOS FISIOLÓGICOS Y TÉCNICOS

Los estudios incluidos en este bloque se enfocan en comprender los mecanismos fisiológicos y eléctricos que permiten el monitoreo no invasivo de la presión arterial. Se analizan conceptos clave como el tiempo de tránsito del pulso (PTT), el tiempo de llegada del pulso (PAT), la relación entre los componentes de las señales ECG y PPG, y las implicaciones clínicas y técnicas del uso de estas variables. Estos enfoques permiten entender los aspectos esenciales del comportamiento hemodinámico y la trazabilidad fisiológica de las señales, elementos indispensables para el diseño de soluciones tecnológicas confiables y precisas en contextos médicos o ingenieriles.

- *Continuous cuffless and non-invasive measurement of arterial blood pressure — concepts and future perspectives*

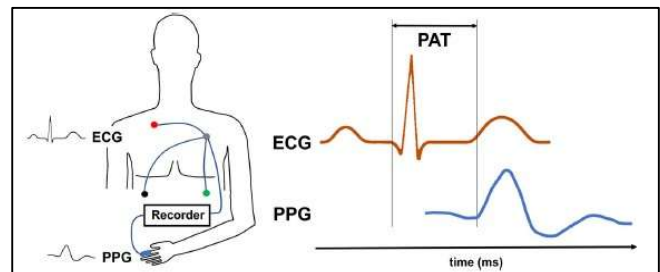
Este artículo presenta una revisión detallada de los enfoques actuales para la estimación continua y sin brazalete inflable de la presión arterial, utilizando señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletimografía (PPG). Los autores clasifican las

metodologías en dos líneas principales: por un lado, los modelos fisiológicos, que se basan en parámetros como el tiempo de tránsito del pulso (PTT) y el tiempo de llegada del pulso (PAT); y por otro, los modelos computacionales, que emplean técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para predecir la presión arterial directamente a partir de las señales fisiológicas.

El artículo destaca las ventajas y limitaciones de ambos enfoques: como los modelos fisiológicos que son trazables y clínicamente interpretables y los modelos basados en inteligencia artificial ofrecen mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a diferentes condiciones. Como propuesta principal, los autores sugieren una integración de ambas metodologías, apuntando hacia un modelo híbrido que combine precisión, fiabilidad y capacidad de personalización [8].

Esta comparación conceptual se ilustra en la figura 5, donde se diferencian los enfoques convencionales y los métodos cuffless que, denominados a los métodos de medición de la presión arterial sin brazalete, resaltando el papel de las señales ECG y PPG en ambos esquemas.

**Figura 5.** Panel izquierdo: Diseño técnico de adquisición de señales ECG y PPG, incluyendo conversión analógica y preprocesamiento. Panel derecho: Ejemplo de detección del PAT desde el inicio de la onda Q en el ECG hasta el ascenso de la señal PPG, con variaciones según los puntos seleccionados en cada señal



Tomado [8].

Asimismo, se discute la falta de protocolos estandarizados de validación para dispositivos sin brazalete inflable, lo cual limita su adopción clínica a gran escala. No obstante, se reconoce el alto potencial de estas tecnologías, especialmente en aplicaciones ambulatorias y dispositivos portátiles.

Para en sus conclusiones, los autores enfatizan que, aunque los sistemas cuffless han avanzado de forma significativa, aún existen retos técnicos y normativos por resolver para lograr su aceptación como herramienta diagnóstica confiable. Subrayan que el camino más prometedor es el desarrollo de modelos híbridos que integren la comprensión fisiológica con la capacidad de adaptación y aprendizaje de los algoritmos modernos. Esta integración permitirá el diseño de dispositivos más robustos, personalizados y clínicamente aceptables, capaces de ofrecer monitoreo continuo con alta precisión y menor intervención. Esta visión refuerza el valor de estas

investigaciones en campos como la ingeniería mecatrónica, donde convergen la adquisición de señales, el diseño de

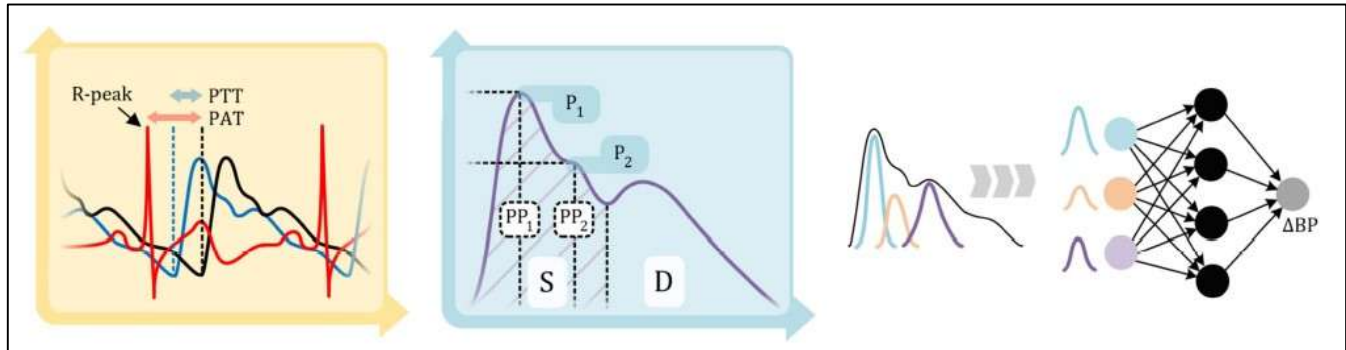
sensores y el desarrollo de soluciones embebidas para la salud [8].

- *Advances in Non-Invasive Blood Pressure Measurement Technique*

**Figura 6.** Panel izquierdo: Diferencia entre PTT y PAT desde señales ECG y PPG.

Panel central: Análisis morfológico de la onda de pulso (PWA) con parámetros relevantes.

Panel derecho: Descomposición de la onda de pulso (PDA) utilizada para entrenamiento de algoritmos.



Tomado [14].

Esta investigación facilita una revisión técnica amplia sobre las principales técnicas no invasivas empleadas para la medición de la presión arterial, abordando desde métodos tradicionales como la auscultación manual y la oscilometría, hasta enfoques emergentes como la tonometría, la técnica de descarga vascular (VUT), el análisis morfológico de la onda de pulso (PWA) y el uso de imágenes ópticas transdérmicas (TOI). En particular, se destacan los métodos basados en señales fisiológicas, como el electrocardiograma (ECG) y la fotopletomografía (PPG), que permiten el monitoreo continuo y sin brazalete inflable (métodos cuffless) [14].

Uno de los aspectos centrales del artículo es la explicación detallada de los enfoques basados en el tiempo de tránsito del pulso (PTT) y el tiempo de llegada del pulso (PAT), junto con sus desafíos técnicos como la necesidad de calibraciones, el impacto del retardo electromecánico (PEP), y la precisión limitada ante variabilidad individual. Asimismo, se discute el papel del estándar IEEE 1708-2014 como referencia para la validación de estos dispositivos.

Esta revisión también explora la inclusión de técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo como herramientas complementarias para mejorar la estimación de la presión arterial. Se mencionan modelos de regresión, redes neuronales y algoritmos avanzados que utilizan datos morfológicos extraídos de las ondas de pulso, con aplicaciones orientadas a sistemas portátiles e incluso integrables en smartphones [14].

Este enfoque multidisciplinar se representa en la Figura 6, que muestra tres técnicas principales para la estimación de la presión arterial no invasiva:

A la izquierda, se comparan los conceptos de PTT y PAT, mostrando sus puntos de medición con respecto a las señales fisiológicas.

Al centro, se detalla la extracción de parámetros a partir del contorno de la onda de pulso (PWA), incluyendo pendiente, amplitud y tiempo de subida.

A la derecha, se presenta un esquema de descomposición de onda de pulso (PDA), útil para alimentar modelos computacionales basados en inteligencia artificial.

Además de explicar las bases fisiológicas, el artículo destaca la tendencia hacia la miniaturización de dispositivos, la integración de sensores inteligentes, y la importancia de establecer métodos de validación clínicos estandarizados. Se enfatiza el reto que implica la variabilidad interindividual y la necesidad de métodos robustos que puedan adaptarse sin recalibración constante [14].

En las conclusiones, los autores subrayan que, si bien las tecnologías de monitoreo sin brazalete inflable han mostrado avances notables, aún enfrentan obstáculos importantes en términos de precisión, fiabilidad clínica y aceptación regulatoria. Sin embargo, proponen que la combinación entre fundamentos fisiológicos sólidos y herramientas computacionales modernas —como el aprendizaje automático— ofrece un camino prometedor hacia soluciones más confiables, automáticas y portátiles. Esta visión se alinea con los objetivos de la ingeniería mecatrónica, al integrar sensores biomédicos, procesamiento de señales y tecnologías inteligentes orientadas al monitoreo de la salud [14].

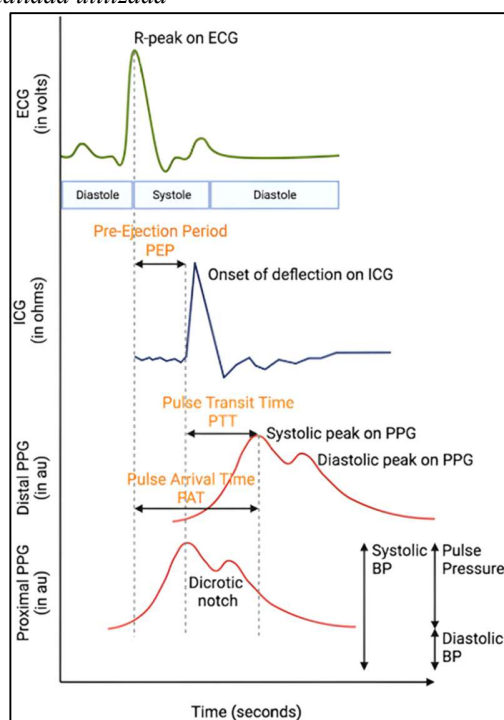
- *Cuffless Blood Pressure in Clinical Practice: Challenges, Opportunities and Current Limits*

Este estudio, publicado en la revista Blood Pressure, ofrece una revisión crítica y actualizada sobre el estado de las tecnologías para la medición de la presión arterial sin brazalete inflable, conocidas como “cuffless”. Se abordan los avances recientes, las tecnologías emergentes y los dispositivos comerciales existentes, destacando su potencial para transformar la monitorización cardiovascular, especialmente en contextos clínicos ambulatorios [15].

El artículo describe distintas técnicas no invasivas como la fotopleto-mografía (PPG), el electrocardiograma (ECG), la bioimpedancia, los sensores de presión y el ultrasonido, que permiten extraer parámetros fisiológicos relacionados con la presión arterial. Estas señales, combinadas con métodos de análisis como el tiempo de llegada del pulso (PAT), el tiempo de tránsito del pulso (PTT), el período de preeyección (PEP) y la velocidad de onda de pulso (PWV), se utilizan en distintos modelos para estimar la presión arterial de forma continua y no invasiva.

La Figura 7 del artículo ilustra las diferencias entre estos métodos al mostrar la relación entre PAT y PTT a partir de señales de ECG, PPG e ICG. Esta representación ayuda a entender la importancia de combinar múltiples modalidades de señal para una estimación más precisa y robusta de la presión arterial sin necesidad de brazalete inflable [15].

**Figura 7.** Determinación de PAT y PTT a partir de diferentes combinaciones de señales fisiológicas (ECG, PPG, ICG), mostrando cómo varía la estimación de presión arterial según la modalidad utilizada



Tomado [15].

El análisis también discute los principales desafíos de estas tecnologías, como los artefactos por movimiento, factores ambientales, problemas de calibración, falta de estandarización en los protocolos de validación y dificultades en el posicionamiento de sensores. También se señala que, aunque algunas soluciones comerciales ya están disponibles (smartphones, smartwatches, anillos inteligentes), muchas aún requieren calibración con dispositivos tradicionales y no logran resultados precisos en todas las condiciones.

Además, se reconoce el rol creciente de la inteligencia artificial, en especial del aprendizaje automático (machine learning) y el aprendizaje profundo (deep learning), para mejorar los modelos predictivos. No obstante, se enfatiza que estas técnicas requieren bases de datos amplias y estandarizadas, cuya escasez actual limita el desarrollo de soluciones generalizables. Machine learning se enfoca en patrones extraídos a partir de parámetros fisiológicos y demográficos, mientras que deep learning emplea redes neuronales complejas que aprenden directamente de señales crudas como el PPG o el ECG, ofreciendo mayor precisión en contextos dinámicos [15].

Finalmente, en sus conclusiones, el artículo señala que el paradigma cuffless es viable y altamente prometedor, pero aún no está listo para reemplazar los métodos convencionales debido a múltiples retos técnicos y normativos. El futuro de estas tecnologías dependerá del avance en la recolección de datos, el desarrollo de modelos de calibración más robustos, la mejora del diseño de sensores y la aprobación de estándares de validación universales. En el contexto de la ingeniería mecatrónica, este trabajo destaca la importancia de integrar sensores biomédicos, procesamiento de señales y algoritmos inteligentes para el desarrollo de soluciones clínicas precisas y accesibles [15].

Los estudios revisados en esta sección proporcionan una base sólida para comprender los principios sobre los que se sustentan las técnicas de monitoreo no invasivo de la presión arterial. Se analizaron conceptos clave como el tiempo de tránsito del pulso (PTT), el tiempo de llegada del pulso (PAT) y su relación con las señales ECG y PPG, destacando tanto su aplicabilidad técnica como sus implicaciones clínicas. Estos fundamentos resultan esenciales para el desarrollo de soluciones confiables, precisas y trazables dentro del campo de la ingeniería mecatrónica.

## 2. DISPOSITIVOS PORTÁTILES PARA MONITOREO

Las investigaciones agrupadas en esta categoría se centran en el diseño, desarrollo y validación de sistemas físicos para la medición continua de la presión arterial sin recurrir a métodos invasivos. Se incluyen propuestas basadas en sensores embebidos, plataformas móviles y microcontroladores, con aplicaciones orientadas a la adquisición de datos en condiciones reales. Estas tecnologías representan alternativas prácticas para el monitoreo ambulatorio, al ofrecer soluciones compactas,

accesibles y adaptables a distintos entornos clínicos o personales. Su integración resulta especialmente relevante en el contexto de la ingeniería mecatrónica, donde confluyen el desarrollo de hardware biomédico y el procesamiento digital en tiempo real.

- *Blood Pressure Continuous Measurement through a Wearable Device: Development and Validation of a Cuffless Method*

En respuesta a la necesidad de soluciones portátiles, precisas y no invasivas para el monitoreo continuo de la presión arterial, se presenta el desarrollo y validación de un dispositivo vestible capaz de realizar estimaciones sin la utilización de un brazalete inflable. El estudio, publicado en la revista *Sensors*, describe de forma detallada el diseño, implementación y validación de un sistema de adquisición que combina sensores biomédicos con procesamiento embebido, orientado a aplicaciones personales y ambulatorias.

El modelo de adquisición utilizado en el dispositivo se basa en el sensor MAX86150, un componente integrado que permite la recolección simultánea de señales de fotopletismografía (PPG) y electrocardiograma (ECG). Estas señales se capturan desde el dedo y la muñeca del usuario, y permiten obtener tanto la morfología del pulso como la actividad eléctrica cardíaca con precisión. Para procesar y transmitir los datos, se utilizó un microcontrolador ESP32, que gestiona la adquisición, filtrado, almacenamiento y envío de datos en tiempo real, gracias a su conectividad Bluetooth/Wi-Fi. El sistema incluye además una batería recargable, un módulo de carga TP4056 y un diseño físico compacto y ergonómico [16].

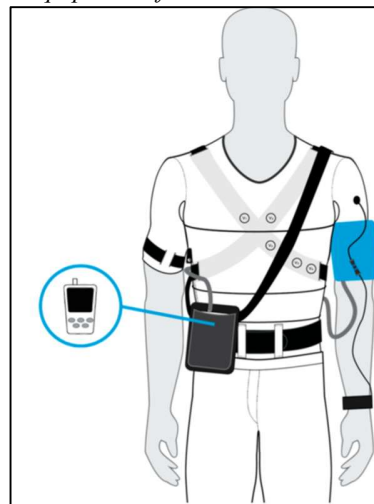
Con estas señales, el sistema calcula el Pulse Arrival Time (PAT) —es decir, el intervalo entre el inicio de la señal ECG y el pico correspondiente en la señal PPG—, junto con otras características temporales y morfológicas que alimentan un algoritmo de estimación de la presión sistólica y diastólica. La calibración se realiza inicialmente con un esfigmomanómetro de referencia, y a partir de allí el sistema estima los valores de presión de forma continua.

La validación experimental se llevó a cabo con diez voluntarios, comparando los resultados del dispositivo con los obtenidos por un esfigmomanómetro clínico (Omron HEM-7600T). Se observó un error medio absoluto (MAE) de aproximadamente 4.6 mmHg para presión sistólica y 3.9 mmHg para la diastólica, valores dentro del rango aceptable para aplicaciones de monitoreo no crítico. El sistema también demostró estabilidad en mediciones repetidas y un uso confortable durante las sesiones de prueba [16].

La figura 8 del artículo ofrece una representación clara del diseño del dispositivo, su colocación en el cuerpo y el procedimiento experimental utilizado para su validación. Esta

ilustración permite comprender de manera visual cómo se integran los sensores, el sistema de adquisición y el proceso de comparación con el equipo de referencia clínico. Su inclusión en el estudio facilita la interpretación del entorno experimental y resalta la practicidad del sistema en condiciones reales de uso.

**Figura 8.** Dispositivo portátil ECG-PPG y procedimiento de validación con equipo de referencia



Tomado [16].

En sus conclusiones, se destaca que el sistema tiene un gran potencial para aplicaciones ambulatorias, autocuidado y monitoreo domiciliario, gracias a su capacidad de estimar la presión arterial de manera continua, sin intervención clínica y sin necesidad de brazalete. También se reconoce la importancia de validar su rendimiento en condiciones dinámicas y en poblaciones más diversas, con el fin de mejorar su aplicabilidad en escenarios reales.

Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, este trabajo representa un caso ejemplar de integración de sensores fisiológicos, diseño electrónico portátil y algoritmos de procesamiento de señales. La propuesta combina de forma efectiva elementos de hardware, programación embebida y análisis fisiológico, lo que la convierte en una referencia útil para el diseño de futuras tecnologías de monitoreo inteligente en salud.

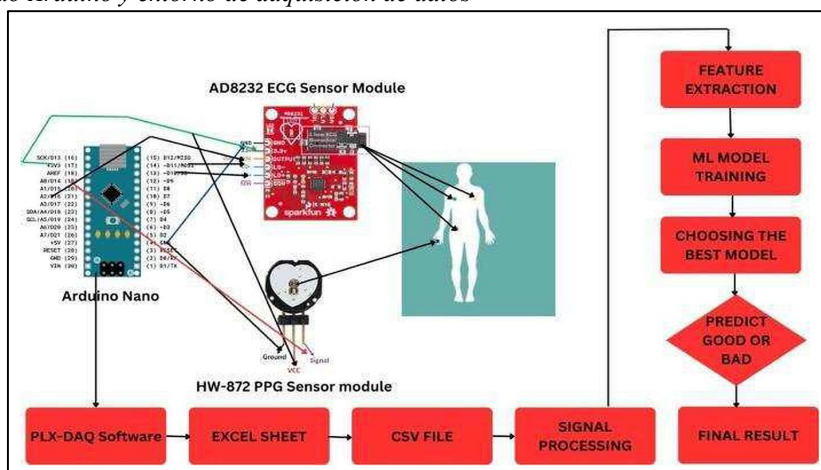
- *Deriving ECG Features from PPG Signals Using Machine Learning Approaches*

Este artículo presenta un enfoque innovador para estimar características clave de señales electrocardiográficas (ECG) a partir de señales fotopletismográficas (PPG), utilizando un sistema de bajo costo implementado sobre hardware embebido. La propuesta busca superar las limitaciones de accesibilidad y portabilidad de los sistemas ECG tradicionales, mediante el uso de sensores ópticos y microcontroladores accesibles, lo que la hace especialmente relevante en el contexto del monitoreo cardiovascular portátil y no invasivo.

El sistema diseñado emplea un sensor PPG HW-827, un módulo ECG AD8232 y una placa Arduino Nano, con procesamiento en tiempo real y transmisión de datos vía PLX-DAQ. Tras la adquisición de señales, se aplican técnicas de

limpieza, normalización y selección de características, seguidas de un entrenamiento con distintos modelos de aprendizaje automático: regresión lineal (LR), random forest (RF) y redes neuronales artificiales (ANN) [17].

**Figura 9.** Representación del sistema físico propuesto para estimar características de ECG a partir de PPG usando sensores ópticos, módulo embebido Arduino y entorno de adquisición de datos



Tomado [17].

El punto central del estudio es la reconstrucción de parámetros ECG —como el intervalo PR, duración QRS y el intervalo QT— a partir de datos PPG en tiempo real. Los resultados muestran que el modelo basado en ANN alcanza una precisión del 98.85%, superando a los demás métodos evaluados, lo que valida la viabilidad técnica del enfoque propuesto para dispositivos portátiles [17].

La Figura 9 del artículo es clave dentro del contexto de esta categoría, ya que muestra el diseño físico completo del sistema de monitoreo portátil propuesto por los autores. En ella se ilustran los módulos de sensores, la placa embebida y el entorno de adquisición, destacando la simplicidad y el bajo costo de implementación. Este diseño ejemplifica cómo integrar sensores biomédicos con procesamiento digital y machine learning en un dispositivo funcional y compacto.

Este trabajo destaca también el uso de bibliotecas especializadas como biosppy para el procesamiento de señales y Boruta para la selección de características, lo que potencia la capacidad del sistema para funcionar de manera precisa incluso con señales afectadas por ruido o artefactos. El diseño físico, ilustrado en el artículo, refleja un esquema de monitoreo simple, compacto y replicable, con aplicaciones potenciales en telemedicina y monitoreo remoto.

En sus conclusiones, los autores afirman que la metodología propuesta logra una correlación muy alta entre las señales PPG y los parámetros clave del ECG, lo que respalda su implementación en dispositivos portátiles inteligentes para el monitoreo cardíaco continuo. Este desarrollo aporta significativamente al campo de la ingeniería mecatrónica al

integrar adquisición de señales, procesamiento digital y modelos predictivos embebidos en una solución accesible y adaptable a contextos clínicos o personales.

- *Survey: smartphone-based assessment of cardiovascular diseases using ECG and PPG analysis*

El documento presenta una revisión exhaustiva de las soluciones móviles para el monitoreo de enfermedades cardiovasculares mediante el uso de señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletimografía (PPG). Publicado en la revista Sensors, el estudio reúne investigaciones recientes que exploran cómo los teléfonos inteligentes, junto con sensores embebidos y periféricos, se han convertido en plataformas accesibles para el monitoreo fisiológico portátil y en tiempo real.

La revisión se centra en tres ejes principales:

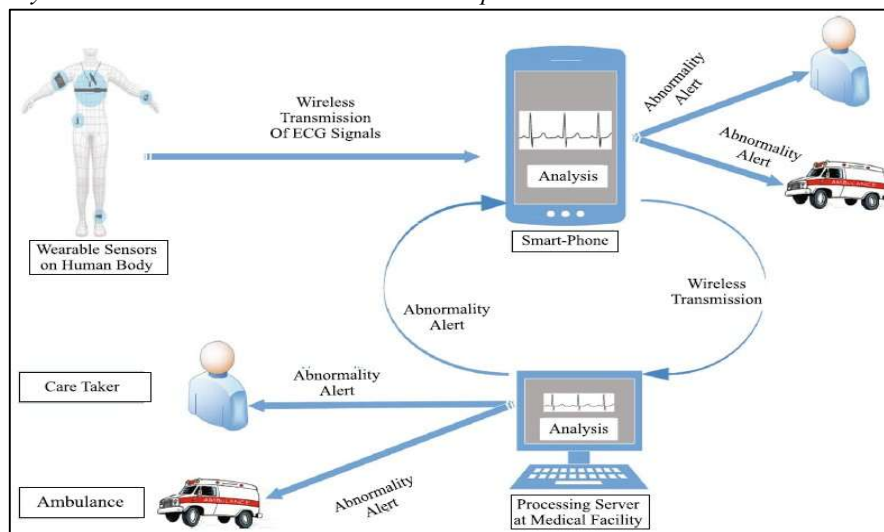
1. Métodos de adquisición de señales ECG y PPG utilizando smartphones, ya sea mediante sensores externos conectados por Bluetooth o a través del uso de la cámara del teléfono para capturar PPG.
2. Técnicas de procesamiento y análisis de señales, muchas de las cuales se ejecutan en la nube o directamente en el dispositivo, incluyendo detección de arritmias, análisis de intervalos cardíacos y evaluación de la presión arterial.

3. Aplicaciones clínicas y comerciales, desde sistemas para el diagnóstico temprano hasta plataformas de telemedicina integradas con IA.

resultados y alertas al paciente o médico. Esta arquitectura resume de manera efectiva los componentes clave de los sistemas de monitoreo inteligente [18].

La Figura 10 del artículo ofrece una visualización clara del flujo de funcionamiento de los sistemas móviles: desde la captura de señales por sensores, el procesamiento en el dispositivo o en servidores externos, hasta la entrega de

**Figura 10.** Diagrama conceptual del funcionamiento de sistemas móviles de monitoreo cardíaco, mostrando adquisición, procesamiento, análisis y retroalimentación clínica mediante smartphones



Tomado [18].

Uno de los puntos fuertes del artículo es el análisis comparativo de distintos enfoques de implementación. Por ejemplo, se describen soluciones que utilizan solo PPG mediante la cámara, versus aquellas que integran sensores ECG externos. También se discuten los beneficios de usar modelos híbridos y cómo la conectividad 4G/5G ha potenciado el desarrollo de servicios de salud móviles [18].

En cuanto al soporte técnico, se mencionan marcos de desarrollo utilizados para el procesamiento de datos como MATLAB, Python, TensorFlow Lite y herramientas específicas para aplicaciones móviles. El uso de aprendizaje automático también es abordado, destacando algoritmos que permiten identificar patrones anómalos en señales ECG y PPG para predecir eventos cardiovasculares con mayor precisión [18].

El artículo reconoce limitaciones actuales, como la variabilidad en la calidad de los sensores, la sensibilidad a interferencias ambientales, y la necesidad de calibración personalizada en algunos modelos. A pesar de ello, se destaca el progreso logrado en el desarrollo de dispositivos compactos, no invasivos, de bajo costo y fáciles de integrar en la vida diaria.

En su conclusión, los autores subrayan que los smartphones están posicionados como herramientas clave en la evolución de los sistemas de monitoreo cardiovascular, al ofrecer una

plataforma robusta, accesible y personalizable. Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, este tipo de revisiones es fundamental para orientar el diseño de soluciones portátiles, integrando sensores biomédicos, procesamiento embebido y conectividad inteligente para una atención médica más cercana y preventiva.

Los artículos analizados evidencian el avance hacia soluciones portátiles y embebidas para el monitoreo no invasivo de la presión arterial mediante señales ECG y PPG. Por un lado, se demostró la viabilidad de reconstruir parámetros ECG a partir de PPG en tiempo real con hardware de bajo costo, mientras que, por otro, se revisaron arquitecturas móviles que integran sensores y procesamiento local o remoto a través de smartphones. Ambos enfoques reflejan cómo la ingeniería mecatrónica permite desarrollar sistemas compactos, accesibles y funcionales, adecuados para entornos clínicos y personales.

### 3. MODELOS COMPUTACIONALES Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

En los artículos incluidos en esta sección aplican técnicas de inteligencia artificial para estimar la presión arterial a partir de señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletimografía (PPG). Se analizan modelos basados en redes neuronales artificiales, algoritmos de aprendizaje supervisado y métodos de aprendizaje profundo, entrenados con datos reales obtenidos

de bases como MIMIC. Estas investigaciones no solo demuestran avances en la precisión de la estimación, sino que también proponen arquitecturas computacionales adaptables a dispositivos de bajo consumo energético. Su análisis permite comprender el papel cada vez más relevante de los modelos computacionales en el diseño de sistemas inteligentes de monitoreo, lo que fortalece el desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de la ingeniería biomédica y mecatrónica.

- *Applied machine learning for blood pressure estimation using a small, real-world electrocardiogram and photoplethysmogram dataset*

El estudio analiza la viabilidad de utilizar modelos de aprendizaje automático para estimar la presión arterial de forma continua y no invasiva, a partir de señales fisiológicas reales de electrocardiograma (ECG) y fotoplethysmografía (PPG). A diferencia de otros trabajos que se apoyan en grandes bases de datos clínicos como MIMIC (Medical Information Mart for Intensive Care), esta investigación emplea un conjunto de datos reducido, recolectado mediante sensores portátiles en condiciones reales. Esto permite evaluar el desempeño de los modelos en contextos más cercanos al uso cotidiano, con presencia de ruido, movimiento y variabilidad fisiológica.

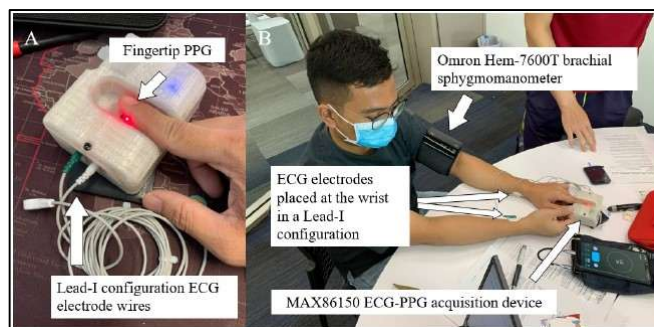
Para el procesamiento de datos, se extrajeron características como el tiempo de tránsito del pulso (PTT), el intervalo entre ondas, amplitudes, pendientes y otras métricas derivadas de las señales ECG y PPG. Se entrenaron y compararon distintos algoritmos de aprendizaje automático, entre ellos Support Vector Regression (SVR) y redes neuronales artificiales simples. A diferencia de técnicas más complejas de aprendizaje profundo (deep learning), como redes convolucionales o recurrentes, los modelos utilizados en este estudio son de baja complejidad computacional, lo cual permite su implementación en dispositivos portátiles sin necesidad de alto poder de procesamiento [19].

Los modelos fueron evaluados mediante validación cruzada, utilizando métricas como el error absoluto medio (MAE). El algoritmo SVR logró el mejor rendimiento, con errores menores a 7 mmHg en presión sistólica, cumpliendo con los requisitos de precisión definidos por la AAMI (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) para sistemas de estimación indirecta. El estudio destaca que, a diferencia de enfoques entrenados con bases como MIMIC —una base de datos pública que contiene registros clínicos y señales fisiológicas de pacientes en unidades de cuidados intensivos—, esta investigación utiliza datos adquiridos con un prototipo real en condiciones no controladas. Esto refuerza la aplicabilidad de los modelos de aprendizaje automático en entornos ambulatorios reales [19].

La adquisición de señales se realizó mediante un sistema compacto desarrollado por los autores, basado en el sensor

MAX86150, que combina canales ECG y PPG en un único módulo. La figura 11 muestra el dispositivo en uso, incluyendo la disposición de los electrodos, el sensor óptico en el dedo y el uso simultáneo de un brazalete inflable como referencia para la medición convencional.

**Figura 11.** *Dispositivo portátil ECG-PPG MAX86150 utilizado para la adquisición de señales*



Tomado [19].

En sus conclusiones, los autores demuestran que es posible lograr una estimación precisa de la presión arterial utilizando modelos de aprendizaje automático, incluso con un volumen limitado de datos, siempre que se empleen algoritmos robustos y características fisiológicas adecuadas. Este resultado refuerza la viabilidad de soluciones computacionales aplicadas al monitoreo ambulatorio y en tiempo real. Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, el artículo valida la posibilidad de desarrollar sistemas embebidos que integren sensores biomédicos, adquisición de datos y procesamiento inteligente, todo en un dispositivo portátil, compacto y de bajo costo, orientado al cuidado continuo de la salud [19].

- *PPG2ABP: Translating Photoplethysmogram (PPG) Signals to Arterial Blood Pressure (ABP) Waveforms Using Fully Convolutional Neural Networks*

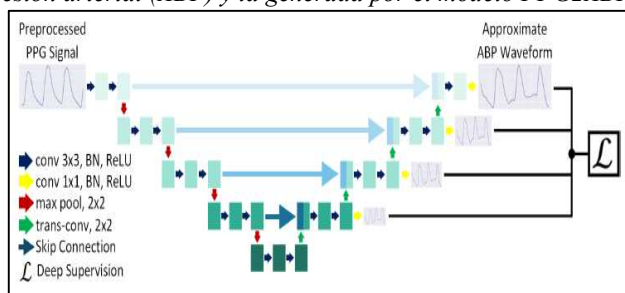
En este estudio, los autores tocan el problema de estimar la presión arterial de forma continua a partir de una única fuente de señal fisiológica: la fotoplethysmografía (PPG). A través de un modelo denominado PPG2ABP, se propone una solución que no solo estima valores puntuales, sino que reconstruye la forma de onda completa de la presión arterial (ABP- arterial blood pressure), lo que permite un análisis cardiovascular más detallado y útil para seguimiento clínico.

PPG2ABP es una red neuronal convolucional profunda diseñada para aprender la relación entre la configuración de la señal PPG y la forma de onda ABP. Su principal innovación radica en que utiliza únicamente la señal PPG como entrada, prescindiendo de ECG u otros sensores auxiliares. Esto simplifica su implementación en dispositivos portátiles y vestibles. Al generar la señal ABP completa, ofrece mayor riqueza diagnóstica en comparación con estimaciones puntuales, siendo ideal para el monitoreo continuo y no invasivo [20].

El modelo fue entrenado con registros de la base de datos MIMIC (Medical Information Mart for Intensive Care), utilizando segmentos de señal de 256 muestras y se evaluó con métricas como el error cuadrático medio (RMSE) y la similitud estructural (SSIM). El uso de una Fully Convolutional Neural Network (FCN) permite que el modelo aprenda directamente patrones temporales complejos, eliminando la necesidad de extracción manual de características [20].

La figura 12 muestra la comparación entre la forma de onda ABP real y la generada por el modelo, destacando visualmente la precisión alcanzada.

**Figura 12.** Comparación entre la forma de onda real de presión arterial (ABP) y la generada por el modelo PPG2ABP



Tomado [20].

Los autores concluyen que es posible reconstruir con alta fidelidad la señal de presión arterial utilizando únicamente señales PPG, lo cual representa un avance significativo hacia sistemas de monitoreo sin brazalete inflable. El modelo mostró alto rendimiento y estabilidad frente a variaciones individuales.

Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, este enfoque demuestra cómo es posible integrar sensores ópticos con modelos de procesamiento profundo en sistemas embebidos, permitiendo el desarrollo de soluciones portátiles, precisas y cómodas para el monitoreo cardiovascular en tiempo real.

- *Continuous Cuffless Non-Invasive Blood Pressure Detection from ECG and PPG Signals Using Artificial Neural Network*

Este artículo propone un sistema de monitoreo continuo de la presión arterial que no requiere brazalete inflable, utilizando señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletimografía (PPG) como entrada para una red neuronal artificial (ANN).

El desarrollo apunta a una solución portátil, práctica y no invasiva, capaz de operar en tiempo real mediante un diseño embebido.

El sistema se construyó sobre una plataforma STM32, conectada a sensores ECG y PPG que permiten calcular el tiempo de tránsito del pulso (PTT), una variable que guarda relación con los cambios en la presión arterial. A partir de la base de datos MIMIC, se extrajeron 16 características fisiológicas para alimentar el modelo predictivo. La ANN fue entrenada para estimar los valores de presión sistólica (SBP) y diastólica (DBP), obteniendo un error medio de  $\pm 13.89$  mmHg para SBP y  $\pm 5.5$  mmHg para DBP, resultados considerados adecuados para monitoreo ambulatorio [21].

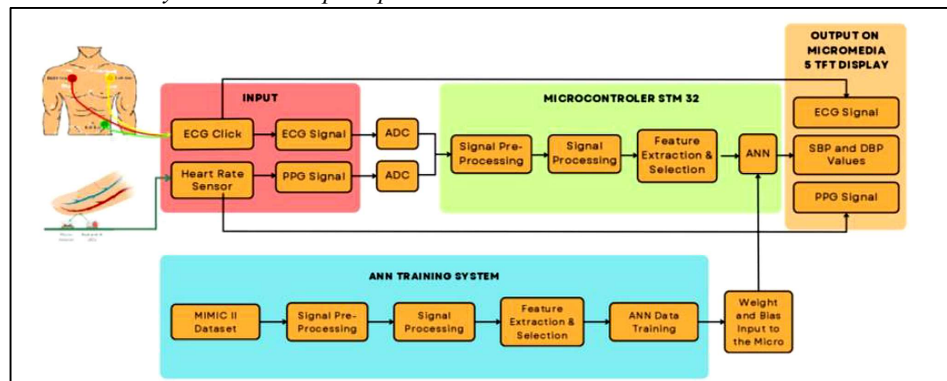
Además del entrenamiento con datos clínicos, se realizaron pruebas experimentales con personas en reposo y luego de actividad física. La comparación frente a un esfigmomanómetro comercial mostró diferencias promedio de  $\pm 11.2$  mmHg (SBP) y  $\pm 9.75$  mmHg (DBP), lo cual valida el desempeño del sistema en condiciones reales.

A diferencia de modelos más complejos de deep learning, la ANN seleccionada ofrece buen equilibrio entre precisión y eficiencia computacional, lo que facilita su implementación directa en dispositivos de bajo consumo.

La Figura 13 del artículo muestra la arquitectura general del sistema, desde los sensores biomédicos hasta el procesamiento y salida de resultados, representando de manera clara cómo se integran los componentes de adquisición, procesamiento embebido y predicción [21].

El artículo que destaca que el sistema propuesto es funcional, preciso y replicable, abriendo posibilidades para desarrollar dispositivos médicos más accesibles y autónomos. Su enfoque refuerza el papel de la ingeniería mecatrónica en la integración de sensores biomédicos, electrónica embebida y algoritmos de inteligencia artificial para mejorar el seguimiento de la salud en entornos clínicos o personales.

**Figura 13.** Diagrama del sistema embebido propuesto para la estimación continua de presión arterial, empleando señales ECG y PPG, procesamiento con STM32 y red neuronal para predicción



Tomado [21].

Los estudios incluidos ponen de manifiesto el desarrollo de modelos computacionales aplicados al control no invasivo de la presión arterial, donde se destacan el uso de señales ECG y PPG para la estimación de los parámetros hemodinámicos de alta precisión. Las redes neuronales artificiales se convierten en una muy buena alternativa que se adapta a este tipo de aplicaciones.

Por lo que respecta a las investigaciones analizadas, ofrecen una concepción global de la situación actual de los métodos de implementación, desde los fundamentos fisiológicos hasta el desarrollo del dispositivo portátil y los sistemas inteligentes, y van más allá porque no solamente mejoran la visión técnica del tema, sino que abren la puerta al diseño de soluciones que sean compactas y, en consecuencia, de un bajo coste, alineadas con los retos que presentan la ingeniería mecatrónica y, además, el control de la salud en tiempo real.

## V. CONCLUSIONES

La presente monografía permitió realizar una revisión sistemática sobre las técnicas empleadas para el monitoreo no invasivo de la presión arterial utilizando señales de electrocardiograma (ECG) y fotopletismografía (PPG), con un enfoque especial en su aplicación dentro del contexto académico de la ingeniería mecatrónica. A través del análisis de literatura científica relevante, se identificaron los principales fundamentos fisiológicos, métodos de adquisición y procesamiento de señales, así como enfoques recientes que incorporan dispositivos portátiles y modelos computacionales para mejorar la precisión del monitoreo.

Se evidenció que la combinación de señales ECG y PPG representa una alternativa viable, continua y no invasiva frente a los métodos tradicionales, aprovechando parámetros clave como el tiempo de tránsito del pulso (PTT) y el tiempo de llegada del pulso (PAT). Además, se observó una tendencia creciente hacia el desarrollo de soluciones portátiles y de bajo costo, integrando modelos predictivos basados en inteligencia artificial entrenados con bases de datos médicas reales, lo que refuerza su aplicabilidad en escenarios clínicos y ambulatorios.

Esta exploración permitió no solo construir una base

conceptual sólida, sino también visibilizar oportunidades para la innovación tecnológica en el monitoreo de la salud. Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, los hallazgos de esta revisión aportan una guía valiosa sobre cómo integrar sensores biomédicos, procesamiento digital y algoritmos de estimación en sistemas funcionales, compactos y accesibles.

Finalmente, este trabajo establece un punto de partida para futuras investigaciones que busquen diseñar soluciones inteligentes, confiables y centradas en el bienestar humano, contribuyendo desde la ingeniería a mejorar la calidad de vida y facilitar el acceso a tecnologías médicas avanzadas.

## REFERENCIAS

- [1] L. Veloza, C. Jiménez, D. Quiñones, F. Polanía, L. C. Pachón-Valero, and C. Y. Rodríguez-Triviño, "Variabilidad de la frecuencia cardiaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares," *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 26, no. 4, pp. 205–210, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.RCCAR.2019.01.006.
- [2] T. Tamura and W. Chen, *Seamless healthcare monitoring: Advancements in wearable, attachable, and invisible devices*. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-69362-0.
- [3] D. E. Casey *et al.*, "2017 ACC/AHA/AAPA/ABC/ACPM/AGS/APhA/ASH/ASPC/NMA/PCNA Guideline for the Prevention, Detection, Evaluation, and Management of High Blood Pressure in Adults: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines," *J Am Coll Cardiol*, vol. 71, no. 19, pp. e127–e248, May 2018, doi: 10.1016/J.JACC.2017.11.006.
- [4] N. V. Thakor, "Biopotentials and electrophysiology measurement," in *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*, 2nd ed., J. G. Webster and H. Eren, Eds. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014, ch. 64, pp. 64–1–64–18.

- [5] T. Tamura, Y. Maeda, M. Sekine, and M. Yoshida, "Wearable Photoplethysmographic Sensors—Past and Present," *Electronics (Basel)*, vol. 3, no. 2, pp. 282–302, Apr. 2014, doi: 10.3390/electronics3020282.
- [6] M. Singla, S. Azeemuddin, and P. Sistla, "Learning-Based Model for Central Blood Pressure Estimation using Feature Extracted from ECG and PPG signals," *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, vol. 2020, pp. 855–858, Jul. 2020, doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176593.
- [7] K. E. Mathewson, T. J. L. Harrison, and S. A. D. Kizuk, "High and dry? Comparing active dry EEG electrodes to active and passive wet electrodes," in *Psychophysiology*, Blackwell Publishing Inc., Jan. 2017, pp. 74–82. doi: 10.1111/psyp.12536.
- [8] N. Pilz, A. Patzak, and T. L. Bothe, "Continuous cuffless and non-invasive measurement of arterial blood pressure-concepts and future perspectives," *Blood Press*, vol. 31, no. 1, pp. 254–269, 2022, doi: 10.1080/08037051.2022.2128716.
- [9] H. Topi and W. Lucas, "Mix and match: combining terms and operators for successful Web searches," *Inf Process Manag*, vol. 41, no. 4, pp. 801–817, Jul. 2005, doi: 10.1016/J.IPM.2004.03.007.
- [10] J. F. Guerrero Martínez, "INGENIERÍA BIOMÉDICA Tema 3 Procesado Analógico 3.1. Introducción," 2010.
- [11] W. Uribe, M. Duque, L. E. Medina, J. Marín, J. E. Velásquez, and J. Aristizábal, "Electrocardiografía básica," *Soporte vital básico y avanzado*, pp. 85–92, 2016.
- [12] A. A. R. Kamal, J. B. Harness, G. Irving, and A. J. Mearns, "Skin photoplethysmography - a review," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 28, no. 4, pp. 257–269, Apr. 1989, doi: 10.1016/0169-2607(89)90159-4.
- [13] Q. Lin and N. Van Helleputte, "PPG Sensors for The New Normal: A Review," in *Proc. 18th Int. SoC Design Conf. (ISOCC)*, 2021, pp. 276–277. doi: 10.1109/ISOCC53507.2021.9613962.
- [14] A. Mukkamala, J. O. M. M. Steptoe, N. V. Choudhury, C. Hahn, and J. Allen, "Advances in Non-Invasive Blood Pressure Measurement Techniques," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 14, pp. 221–240, 2021, doi: 10.1109/RBME.2020.2992113.
- [15] R. Henry, M. Castiglioni, A. Fazelnia, G. Polidori, and G. Parati, "Cuffless Blood Pressure in Clinical Practice: Challenges, Opportunities and Current Limits," *Blood Pressure*, vol. 33, no. 1, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1080/08037051.2024.2290027.
- [16] B. De Marchi, M. Frigerio, S. De Nadai, G. Longinotti-Buitoni, and A. Aliverti, "Blood pressure continuous measurement through a wearable device: Development and validation of a cuffless method," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9879, Dec. 2022. doi: 10.3390/s22249879.
- [17] S. Sahani, S. Deval, and S. Kumar, "Deriving ECG Features from PPG Signals Using Machine Learning Approaches," in *Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, Madurai, India, May 2022, pp. 1367–1374, doi: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788290.
- [18] M. Shabaan, F. Alsolami, M. A. Elhosseini, A. E. Hassanien, and S. M. Shamseldin, "Survey: Smartphone-Based Assessment of Cardiovascular Diseases Using ECG and PPG Analysis," *Sensors*, vol. 20, no. 21, pp. 1–28, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20216007.
- [19] M. K. F. Wong, H. Hei, S. Z. Lim, and E. Y.-K. Ng, "Applied machine learning for blood pressure estimation using a small, real-world electrocardiogram and photoplethysmogram dataset," *Math. Biosci. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 975–997, Oct. 2022. doi: 10.3934/mbe.2023045
- [20] N. Ibtehaz et al., "PPG2ABP: Translating Photoplethysmogram (PPG) Signals to Arterial Blood Pressure (ABP) Waveforms," *Bioengineering*, vol. 9, no. 12, p. 761, Dec. 2022. doi: 10.3390/bioengineering9120761.
- [21] A. C. Wanda, M. Yazid, and R. Setiawan, "Continuous cuffless non-invasive blood pressure detection from ECG and PPG signals using artificial neural network," in *2024 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM)*, Surabaya, Indonesia, 2024, doi: 10.1109/CENIM64038.2024.10882777.