

**Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey**

Campus Puebla

Escuela de Ingeniería y Ciencias

**Obtención de señal PPG a través de
sensor de pulsos**

Autores:

M. Cid-Espinoza & A. Alvarado-Ortega
fercide.fce@gmail.com & ana.ort28@gmail.com

**Hugo G. González Hernández
Jesús Moreno Moreno
Debbie Crystal Hernández Zárata
Héctor Eduardo De Cos Cholula**

Cuatro veces Heroica Ciudad de Puebla de Zaragoza a 03 de Junio de 2024

Índice

| | |
|---|----------|
| Índice | 1 |
| Índice de figuras | 1 |
| Índice de cuadros | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Marco Teórico | 2 |
| 2.1. Sensor de pulso | 2 |
| 2.2. Convertidor analógico digital ADC | 2 |
| 2.3. Microcontrolador ESP32 | 3 |
| 2.4. Diagrama de circuito del dispositivo | 3 |
| 2.5. Diseño de clip y carcasa en 3D | 3 |
| 2.6. Desarrollo de aplicación | 4 |
| 3. Desarrollo | 4 |
| 3.1. Integración de la ESP32 | 6 |
| 3.2. Resolución de la Señal | 6 |
| 3.3. Desarrollo de una Aplicación | 6 |
| 3.4. Diseño Ergonómico y Transportable | 6 |
| 4. Resultados | 6 |
| 4.1. Pruebas y Mediciones | 6 |
| 4.2. Caracterización de Sensores | 6 |
| 4.3. Evaluación del Prototipo | 7 |
| 4.4. Análisis de Errores | 7 |
| 5. Conclusiones | 8 |
| Referencias | 8 |
| 6. Anexos | 1 |

Resumen

Este proyecto se basa en la tesis original de Samuel Natán Huerta Ruiz, titulada Glucose Measurement Via Noninvasive Methods.

Este artículo describe el desarrollo y la implementación de un dispositivo no invasivo para la obtención de la señal PPG (fotopletismografía), con el propósito de investigar su potencial en la medición de los niveles de glucosa en sangre. Para capturar y procesar la señal PPG, se utilizó un sensor de pulso y un convertidor analógico-digital (ADC) de 16 bits. La incorporación del microcontrolador ESP32, con sus avanzadas capacidades de conectividad WiFi y Bluetooth, permitió el almacenamiento y gestión de datos en la nube. Se diseñaron e imprimieron en 3D un clip y una carcasa para mejorar la usabilidad y portabilidad del dispositivo. Además, se creó una aplicación en App Inventor para facilitar la interacción del usuario y el almacenamiento de datos en Google Sheets. Las pruebas realizadas demostraron la efectividad del dispositivo en la captura y procesamiento de la señal PPG, y se identificaron áreas para futuras mejoras, como la implementación de sensores más robustos y la optimización de la aplicación. Este trabajo establece una base sólida para futuras investigaciones en el monitoreo no invasivo de glucosa, aportando a la lucha contra la diabetes con tecnologías accesibles y efectivas.

Índice de figuras

| | | |
|-----|--|---|
| 1. | Sensor de Pulso. | 2 |
| 2. | Convertidor ADS1115 | 3 |
| 3. | Microcontrolador ESP32 | 3 |
| 4. | Diagrama PCB | 3 |
| 5. | Clip para sensor de pulso. | 3 |
| 6. | Tapa de caja del dispositivo. | 4 |
| 7. | Caja del dispositivo. | 4 |
| 8. | Interfaz de usuario en app inventor. | 4 |
| 9. | Señal PPG obtenida. | 7 |
| 10. | Diseño de Prototipo Final. | 7 |
| 11. | Señal PPG Filtrada. | 1 |

Índice de cuadros

| | | |
|----|---|---|
| 1. | Prototipos realizados previamente | 5 |
|----|---|---|

1. Introducción

En este artículo, se describe la obtención de la señal PPG (fotopleletismografía) utilizando una tecnología óptica no invasiva. Este método se emplea para detectar variaciones en el flujo sanguíneo del tejido microvascular mediante un sensor que monitorea el ritmo o pulso cardíaco.

De acuerdo con el gobierno de México, según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) 2021, aproximadamente 12 millones 400 mil personas padecen diabetes, una enfermedad crónica que tiende a desencadenar otras enfermedades o daño en tejidos.[1]. La diabetes en México es la tercera causa de muerte, y dentro de estas estadísticas, las personas mayores de 65 años ocupan el primer lugar en mortalidad.[2]. En respuesta a este desafío de salud pública, se han implementado programas y políticas para la prevención, detección temprana y manejo de la diabetes.

En función de estudios revisados previamente, se ha determinado que existen formas de medir la glucosa utilizando la señal PPG, ECG y espectroscopia, lo que amplía el panorama para realizar una correcta medición de los niveles de glucosa en sangre. Cada estudio empleó diferentes medios de medición y referencias, contribuyendo así al entendimiento sobre cómo estas señales pueden ser aprovechadas para el monitoreo no invasivo de glucosa. [3] [4] [5] [6] [7]

Por ejemplo, diversos investigadores han explorado la utilización de la señal PPG, una medida indirecta de la actividad cardíaca, para inferir los niveles de glucosa en sangre. Otros han investigado la combinación de señales PPG y ECG, aprovechando las características únicas de ambas señales para mejorar la precisión de las medicio-

nes de glucosa. Además, se ha utilizado la espectroscopia para analizar las propiedades de absorción de la luz en diferentes longitudes de onda, lo que proporciona información sobre la concentración de glucosa en la sangre.

Estos enfoques han abierto nuevas posibilidades en el campo del monitoreo no invasivo de glucosa, pero también plantean desafíos en términos de validación clínica y estandarización. Es fundamental continuar investigando y desarrollando métodos que sean precisos, confiables y accesibles para todos los pacientes con diabetes.

El objetivo principal de esta investigación es encontrar una relación entre algunas bioseñales y su relación en una futura aplicación para encontrar los niveles de glucosa en sangre asociados.

Las señales PPG pueden obtenerse mediante un dispositivo que consta de diodos emisores de luz para iluminar el tejido y un fotodiodo para capturar la luz no absorbida por este mismo. Este funcionamiento se basa en el principio de que los vasos sanguíneos de una persona pulsan debido a la potencia de bombeo fluctuante del corazón, lo que provoca que la luz capturada por el fotodiodo también fluctúe. [8]

Puesto que una señal PPG puede obtenerse mediante métodos no invasivos, existe la posibilidad de desarrollar un dispositivo económico y no invasivo para en una aplicación futura, medir los niveles de glucosa en sangre.

El resto del artículo incluye un

marco teórico en el cual se aborda el circuito implementado y su descripción, así como el funcionamiento de la señal, la limpieza de la misma (tipo de filtro), el correcto empleo del dispositivo desarrollado y las posibles afectaciones que podría tener la señal. Además, en la sección 3 del desarrollo, se describe el proyecto y su diseño, considerando los prototipos realizados basándose en trabajos de alumnos del Tecnológico de Monterrey Campus Puebla. La cuarta sección del artículo explica los resultados obtenidos de acuerdo a los valores de la señal de fotopletiografía (PPG). Finalmente, las conclusiones abordan el funcionamiento del prototipo con la señal filtrada y las futuras aplicaciones.

2. Marco Teórico

En esta sección, se describirá en profundidad el fundamento teórico utilizado para el desarrollo del dispositivo, así como el proceso de envío de datos para su almacenamiento correspondiente. Los componentes implementados se basaron en trabajos realizados con anterioridad, de los cuales se seleccionaron los componentes que mejor cumplieran con el objetivo del proyecto realizado.

Componentes y descripción

A continuación, se describirán los componentes electrónicos implementados para el desarrollo del proyecto, así como una breve descripción sobre su implementación.

2.1. Sensor de pulso

De acuerdo con Huerta [8], este sensor corresponde a un sensor de frecuencia cardíaca óptico analógico de bajo costo (Figura 1.). Con este dispositivo, es posible obtener la señal de interés PPG utilizando una luz LED verde. Dicho sensor debe alimentarse con 3.3V y se eligió por su ventaja al emplear una longitud de onda de 565 nm para la obtención de la señal, además de ser considerado el sensor más óptimo para el desarrollo del proyecto.



Figura 1: Sensor de Pulso.

Asimismo, el sensor de pulso cuenta con un filtro activo que permite amplificar la señal emitida y puede ser leído mediante un convertidor analógico a digital (ADC).

2.2. Convertidor analógico digital ADC

El ADS1115 es un convertidor analógico-digital (ADC) de 16 bits que permite convertir la salida analógica del sensor de pulso en una señal digital para su procesamiento (Figura 2.). Al implementar un microcontrolador ESP32, se considera una resolución de 12 bits, mientras que el ADC proporciona una precisión de 16 bits. De esta resolución, 15 bits se destinan a la magnitud de la señal y 1 bit al signo de la señal recibida, lo que permite obtener una lectura clara que puede procesarse

y clasificarse de manera más óptima. [8]

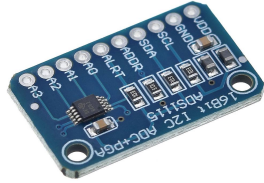


Figura 2: Convertidor ADS1115

2.3. Microcontrolador ESP32

El ESP32 se considera un dispositivo ideal para proyectos de IoT, gracias a su conectividad integrada de Bluetooth y WiFi, lo que permite el constante intercambio de información con la red (Figura 3.). Además, este microcontrolador se elige por su mayor velocidad de CPU, mayor memoria y conectividad avanzada mediante WiFi y Bluetooth [9] para el desarrollo de este proyecto.

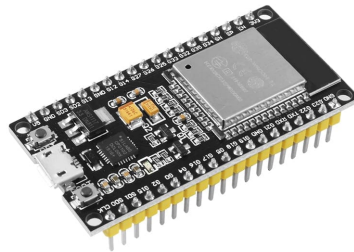


Figura 3: Microcontrolador ESP32

2.4. Diagrama de circuito del dispositivo

En la figura () se observa el diagrama del circuito correspondiente al dispositivo desarrollado (Figura 4.). Se consideró la impresión de una placa de circuito impreso (PCB) que integra el sensor, el módulo ADC y el MCU implementados en el proyecto, con el fin de crear un dispositivo práctico y de tamaño adecuado para su transporte.

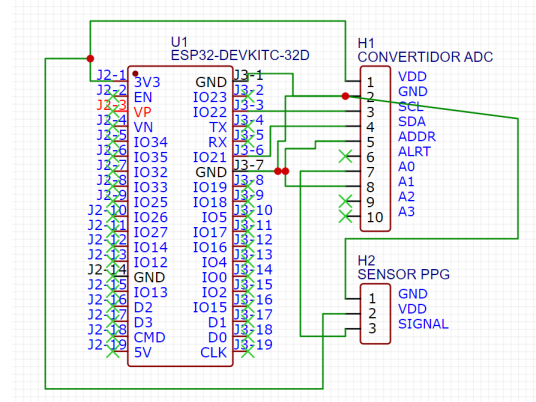


Figura 4: Diagrama PCB

2.5. Diseño de clip y carcasa en 3D

Se diseñó e imprimió en 3D un clip como se muestra en la figura (5) capaz de transportar el sensor de pulso, considerando la presión necesaria que este clip ejercerá, la cual influirá en la toma de datos.

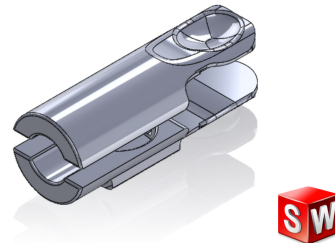


Figura 5: Clip para sensor de pulso.

Asimismo, se diseñó e implementó en 3D un dispositivo capaz de alojar el circuito eléctrico, además de poder utilizarse como un brazalete fácil de transportar para fines de practicidad mostradas en las figuras (5 y 6).

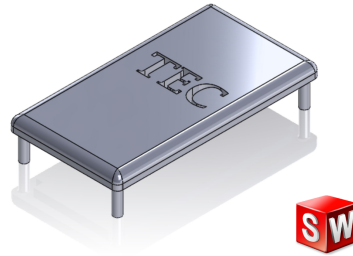


Figura 6: Tapa de caja del dispositivo.

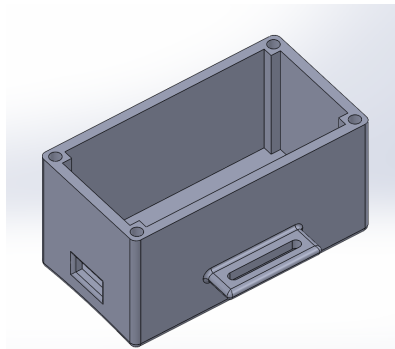


Figura 7: Caja del dispositivo.

2.6. Desarrollo de aplicación

Con el objetivo de desarrollar una interfaz de usuario que facilite la toma de datos y el uso del dispositivo, así como mantener un monitoreo de los datos mediante Bluetooth, se diseñó una aplicación en App Inventor mediante programación en bloques. En la pantalla principal, la aplicación incluye un botón para establecer la conexión Bluetooth y otro botón para iniciar el almacenamiento de datos, los cuales posteriormente se guardan

en un documento en Google Sheets.



Figura 8: Interfaz de usuario en app inventor.

3. Desarrollo

En esta sección se detalla la evolución y las mejoras realizadas en el desarrollo del proyecto, aprovechando versiones anteriores como base y fusionando elementos para alcanzar una versión mejorada y más eficiente. En la Tabla 1, se presenta una descripción resumida de cada una de las versiones del proyecto, detallando los aspectos principales abordados en cada iteración.

Cuadro 1: Prototipos realizados previamente

| Prototipos realizados previamente | |
|-----------------------------------|---|
| Autor/es | Descripción |
| Alberto Hugo Delo- ya | Se centró en el desarrollo e implementación de un sistema no invasivo para la clasificación de niveles de glucosa. Se recolectaron muestras de bioseñales y niveles de glucosa de 30 sujetos por medio de la cámara de un celular, y posteriormente se enviaron a la nube de Amazon. Aplicaron algoritmos de teoría del Caos para obtener descriptores caóticos. |
| Samuel Natán Huerta Ruiz | En este proyecto se centraron en la clasificación de niveles de glucosa por medio de machine learning y descriptores de la teoría del caos con el fin de poder clasificar los niveles de glucosa en 3 categorías (bajo, medio y alto), logrando un modelo de Máquina de Vectores de Soporte satisfactorio. |
| Jhonatan Yael Martínez Vargas | En esta instancia, se llevó a cabo el procesamiento de la señal mediante la utilización de un sensor diferente al utilizado en etapas anteriores. Como parte de este proceso, se decidió incorporar el uso de una ESP32 para ampliar las capacidades de adquisición y procesamiento de datos. |
| Fernanda Cid y Ana Alvarado | Se llevaron a cabo pruebas con varios sensores conectados a una ESP32 para reducir el tamaño del dispositivo, aprovechando el módulo Bluetooth para la transmisión de datos. Inicialmente, se desarrolló un programa en Python para el almacenamiento local de los datos recibidos a través del puerto serial. Sin embargo, posteriormente se logró establecer una exitosa conexión Bluetooth, permitiendo el almacenamiento de datos en "Google Sheets". |

3.1. Integración de la ESP32

En esta iteración del proyecto, se decidió integrar el microcontrolador ESP32 debido a sus capacidades avanzadas y la presencia del módulo Bluetooth, lo que proporcionó una mejor opción para la transmisión de datos. Esta elección permitió una comunicación inalámbrica eficiente con dispositivos externos, facilitando la integración del sistema en entornos móviles y la transferencia de datos a plataformas de almacenamiento en la nube.

3.2. Resolución de la Señal

Para mejorar la calidad de la señal obtenida, se optó por utilizar un sensor de pulsos junto con un ADC de 16 bits. Esta combinación permitió una mayor resolución en la adquisición de datos, lo que resultó en una señal caótica más precisa y detallada. Esta mejora contribuyó significativamente a la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos durante el procesamiento de la señal.

3.3. Desarrollo de una Aplicación

Con el objetivo de simplificar y optimizar el proceso de almacenamiento de datos, se desarrolló una aplicación utilizando ".app inventor". Esta aplicación permitió la integración directa con "Google Sheets", facilitando el almacenamiento y la gestión de la señal capturada en tiempo real. Esta solución proporcionó una interfaz intuitiva y accesible para los usuarios, mejorando la experiencia general de uso del dispositivo. (Anexo 1)

3.4. Diseño Ergonómico y Transportable

Para mejorar la usabilidad y la portabilidad del dispositivo, se diseñó un sistema ergonómico y transportable. Este diseño consideró aspectos como la comodidad del usuario y la facilidad de transporte, garantizando que el dispositivo fuera fácil de manejar en diferentes entornos y situaciones. Esta característica contribuyó a aumentar la practicidad y la versatilidad del sistema en su aplicación práctica.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo y las pruebas del proyecto, abarcando datos experimentales, análisis de señales y evaluaciones del prototipo.

4.1. Pruebas y Mediciones

Inicialmente, se procedió con la conexión de los componentes siguiendo las especificaciones de sus hojas de datos respectivas. Se realizaron pruebas de lectura para determinar la sensibilidad del sensor a la luz y al movimiento, factores que potencialmente podrían afectar la integridad de la señal, induciendo un ruido considerable. Para mitigar estos errores, se implementaron técnicas de limpieza de señales y se diseñó un clip especializado.

4.2. Caracterización de Sensores

Para la limpieza de la señal PPG, se evaluaron dos filtros distintos basados en investigaciones previas. Aunque el ingeniero Huerta recomendó un

filtro Chebyshev de primer orden con una frecuencia de muestreo de 10 Hz [8], la ingeniera Peralta propuso un filtro IIR paso alto de tipo Butterworth con una frecuencia de corte de 0.35 Hz y orden 3 [10]. Con el fin de considerar ambas perspectivas, se implementaron ambos filtros y se compararon los resultados. La figura [1] ilustra esta comparación, evidenciando que el filtro Chebyshev exhibe una mayor resolución y menor nivel de ruido. Posteriormente, se integró un clip para mantener una presión constante y reducir aún más el ruido causado por movimientos y variaciones en la iluminación ambiente. Los resultados de esta integración se muestran en la figura [9]. Vease también en el anexo 1.



Figura 9: Señal PPG obtenida.

4.3. Evaluación del Prototipo

En el marco de la evaluación del prototipo, se muestra el dispositivo final para destacar su correcta utilización y su portabilidad. Las imágenes proporcionadas ofrecen una visión general del diseño ergonómico y transportable del dispositivo, resaltando su apariencia física y su capacidad de adaptarse a diversos entornos.

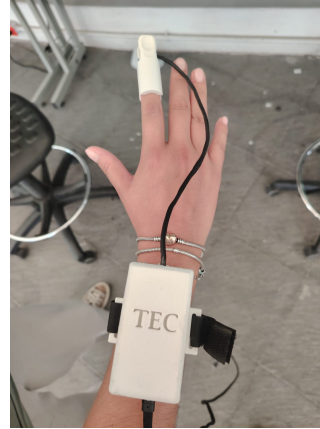


Figura 10: Diseño de Prototipo Final.

4.4. Análisis de Errores

Tras la adecuada filtración de la señal, se observó que el sensor exhibía una discrepancia inicial durante el primer minuto, atribuida al proceso de calibración y a la adaptación del paciente al dispositivo. En respuesta, se determinó que el período de muestreo debía extenderse a un mínimo de 3 minutos para asegurar la obtención de un conjunto de datos suficiente y fiable, garantizando al menos 2 minutos de lecturas estables, sin verse afectadas por los errores iniciales.

Además de estas observaciones, se contempló la posibilidad de modificar el tipo de sensor, o al menos revisar el cableado empleado, debido a la alta incidencia de inestabilidad en las conexiones. Esta consideración surgió durante el montaje del circuito físico, donde se evidenció la fragilidad del cable ante movimientos ligeros o bruscos, ocasionando rupturas recurrentes.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos se consideran prometedores, ya que se demuestra la posibilidad de nuevas aplicaciones a partir de bioseñales mediante el desarrollo de dispositivos no invasivos y su aplicación futura para la obtención de glucosa. El trabajo realizado muestra futuras mejoras y desarrollo como la implementación de un sensor más resistente, además de la mejora de la aplicación para poder hacer de la interacción mucho más amable con el usuario, esto podría cumplirse realizando la demostración de los datos de manera gráfica. Por otro lado, se espera que en avances futuros se pueda utilizar este mismo prototipo en pruebas mucho más exhaustivas, realizadas en diferentes personas, diferentes ambientes con el fin de determinar la variación entre las muestras y poder determinar con mayor conocimiento si el sistema empleado es el adecuado.

Referencias

- [1] Secretaría de Salud. (13 de noviembre de 2022). En México, 12.4 millones de personas viven con diabetes [Comunicado de prensa].
- [2] Hablemos de Salud. (5 de octubre 2021). Diabetes en México.
- [3] Li, Jingzhen, Jingjing Ma, Olatunji Mumini Omisore, Yuhang Liu, Huajie Tang, Pengfei Ao, Yan Yan, Lei Wang, y Zedong Nie. "Noninvasive Blood Glucose Monitoring Using Spatiotemporal ECG and PPG Feature Fusion and Weight-Based Choquet Integral Multimodel Approach. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (2023).
- [4] Zanelli, Serena, Mehdi Ammi, Magid Hallab, y Mounim A. El Yacoubi. "Diabetes Detection and Management through Photoplethysmographic and Electrocardiographic Signals Analysis: A Systematic Review." *Sensors* (2022).
- [5] Shamim, Mohammed Zubair M., Sattam Alotaibi, Hany S. Hussein, Mohammed Farrag, y Mohammad Shiblee. "Diagnostic Accuracy of Smartphone-Connected Electrophysiological Biosensors for Prediction of Blood Glucose Level in a Type-2 Diabetic Patient Using Machine Learning: A Pilot Study. *IEEE Embedded Systems Letters* (2022).
- [6] Yang, Yucen, Jie Chen, Jie Wei, Zhikang Wang, Jiangning Song, Yuanting Zhang, Yuan Zhang y Jichao Zhao. "Non-invasive Blood Glucose Detection System with Infrared Pulse Sensor and Hybrid Feature Neural Network. *IEEE Sensor Journal* (2024).
- [7] Limpiti, Tulaya, Mayravee Seemavijai, Narutchai Pongmee, Pannita Kanayat, Jeerasuda Koseeyaporn y Nattakan Puttarak. "Non-Invasive Optical Blood Glucose Measuring System using Regression Models." *BMEICON 2023 - 15th Biomedical Engineering International Conference*
- [8] Huerta, Samuel. "Glucose Measurement Via Noninvasive Methods" Submitted to the School of Engineering and Sciences in partial fulfillment of the

- requirements for the degree of Master in Engineering Science. (2022).
- [9] Martínez, Jhonatan. "Aplicación de teoría de caos a bioseñales para detección de glucosa en sangre". Reporte de investigación Tecnológico de Monterrey Campus Puebla. (2023).
- [10] Peralta, Elena. "Detección robusta de pulsos en la señal fotopletismográfica de reflexión y transmisión en entornos ruidosos y no estacionarios". Trabajo Fin de Grado. (2015).

6. Anexos

Repositorios de código: Haz clic en este [ENLACE](#) para visitar GitHub.

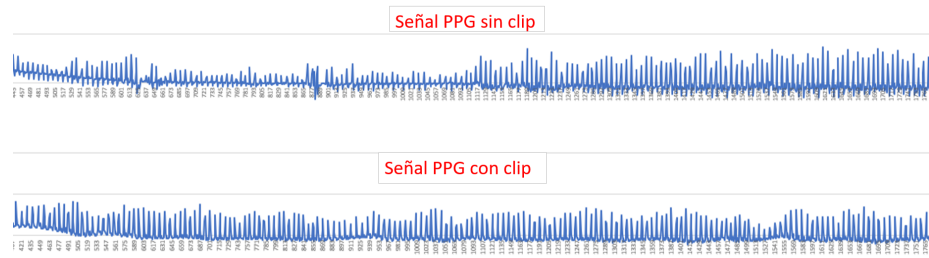


Figura 11: Señal PPG Filtrada.