

Desarrollo de un prototipo de monitoreo médico para pacientes a distancia por medio de la implementación del Internet de las cosas médicas

Development of a medical monitoring prototype for remote patients through the implementation of the Internet of medical things

Rodrigo Rodríguez Ramos¹

María del Consuelo Cortés Velázquez²

Aurelio Enrique López Barrón³

Universidad de Guadalajara, México

Resumen

En este proyecto de investigación de desarrollo tecnológico se llevó a cabo el diseño e implementación de un prototipo de un oxímetro de pulso para el monitoreo remoto de pacientes a distancia utilizando las tecnologías del Internet de las Cosas Médicas. En cuanto a la metodología implementada para el desarrollo de este prototipo se tomó como referencia el modelo de ciclo de vida en cascada de Pressman. Se comenzó con el análisis de requerimientos por medio de una entrevista a un profesional de la salud, y con base en los datos obtenidos de la entrevista, se llevó a cabo el diseño de un prototipo de oxímetro utilizando el microcontrolador Espressif ESP32-S y el módulo de oximetría MAX30102. El prototipo fue sometido a una evaluación por medio de la aplicación de una prueba piloto a tres personas, utilizando como medio de validación los datos de un oxímetro comercial Yobekan YBK-303. Los datos obtenidos de la implementación del prototipo con respecto al oxímetro comercial fueron los siguientes: (a) en la medición del ritmo

¹ <https://orcid.org/0000-0002-7926-541X/> rodrigo.rramos@alumnos.udg.mx

² <http://orcid.org/0000-0001-5387-7226/> maria.cortes@academicos.udg.mx

³ <http://orcid.org/0000-0003-4742-5316/> aurelio.lbarron@academicos.udg.mx

cardíaco los datos fueron iguales y (b) en la saturación de oxígeno (SpO₂), se obtuvo una diferencia del 1 %.

Palabras clave: Iot, IoMT, prototipo, oxímetro.

Abstract

In this technological development research project, the design and implementation of a prototype of a pulse oximeter for remote monitoring of patients using Internet of Medical Things technologies was carried out. Regarding the methodology implemented for the development of this prototype, the Pressman waterfall life cycle model was taken as a reference. It began with the analysis of requirements through an interview with a health professional, and based on the data obtained from the interview, the design of an oximeter prototype was carried out using the Espressif ESP32-S microcontroller and the MAX30102 oximetry module. The prototype was subjected to an evaluation through the application of a pilot test to three people, using data from a Yobekan YBK-303 commercial oximeter as a means of validation. The data obtained from the implementation of the prototype with respect to the commercial oximeter were the following: (a) in the measurement of the heart rate the data were the same and (b) in the Oxygen Saturation (SpO₂), a difference of 1 % was obtained.

Keywords: Iot, IoMT, prototype, oximeter.

1. Introducción

En los últimos años se ha visto un aumento considerable en el uso de las tecnologías, convirtiéndose en parte del día a día, innovando la manera de llevar a cabo nuestras labores cotidianas. Gracias a esta necesidad de facilitar la vida de las personas por medio de nuevas tecnologías surge el IoT, cuyas siglas en inglés significan Internet of Things, el cuál es un paradigma que permite la interconexión de diversos dispositivos como sensores o actuadores, de manera que puedan enviar y recibir datos de manera automática a través de una red y de esta manera llevar a cabo tareas del mundo real, sin necesidad de intervención humana. El anterior concepto fue introducido por Kevin Ashton en 1999.

Una de las áreas de oportunidad del IoT son las aplicaciones para el sector médico, las cuales consisten en el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden al monitoreo de pacientes. De acuerdo con lo señalado por Ansys (2018), el IoMT, cuyas siglas en inglés significan Internet of Medical Things se refieren al conjunto de dispositivos médicos inteligentes que se conectan con sistemas informáticos de servicios de salud. En el contexto de la pandemia de COVID-19 iniciada en el año

2020, se ha percibido un aumento en el uso de las tecnologías remotas, debido a la necesidad de permanecer aislados. En este contexto, se podría proyectar que también habrá un aumento de la necesidad del IoMT, tal como lo señaló Onag (2020):

La pandemia de la COVID-19 va a suponer el pistoletazo de salida para la adopción del IoT en muchos sectores y especialmente en algunos como el de la atención sanitaria, ahora que la crisis y la consiguiente situación de desbordamiento asistencial que ha provocado han puesto de relieve lo beneficioso que hubiera sido disponer de sistemas remotos de vigilancia y asistencia sanitaria. A pesar de que se trata de un sector en el que la implantación de tecnologías IoT se ha producido muy lentamente, según diferentes estudios, la pandemia y la necesidad de implantar sistemas de asistencia sanitaria remotos para minimizar las interacciones con el público va a acelerar su adopción.

De acuerdo con lo anterior, se puede observar la necesidad de apoyar en los esfuerzos para la creación e implementación del IoMT en el contexto del monitoreo remoto de pacientes durante la pandemia de COVID-19, y después de ésta, con el fin de mejorar la atención y cuidado de los pacientes.

1.1 Problemática

La pandemia por COVID-19 ocurrida durante el año 2020 ha resaltado la importancia de un sistema de salud eficiente, además de presentarnos la realidad del sistema de salud en México, el cual no tiene la capacidad suficiente para cubrir la demanda de toda la población y, por lo tanto, de brindar atención oportuna a cada uno de los enfermos en un momento adecuado, lo que lleva a que algunos pacientes que presentaban síntomas leves terminen empeorando por recibir atención médica demasiado tarde. Dentro de la sintomatología del COVID-19 se ha mencionado en algunas publicaciones la "hipoxemia silenciosa", tal como lo describen Ottestad, Seim & Mæhlen (2020). Este término se ha usado para referirse a pacientes que se sienten confortables y no se quejan de dificultad respiratoria, pero se ven cianóticos y se documenta hipoxemia. O bien, se documenta hipoxemia grave o muy grave en personas que a la exploración no se ven disneicas o con dificultad respiratoria, o que acudieron por diversas molestias que no incluían la dificultad para respirar y en los cuales se encontró neumonía con hipoxemia.

Es indispensable identificar y tratar la hipoxemia, ya que, como lo indicaron Xie, Covassin & Fan (2020), esta se asocia a un incremento en la mortalidad por COVID-19 así como por otras neumonías, y probablemente explica la mayor letalidad y hospitalización de la influenza

con la altitud, como lo señalado por Pérez-Padilla, García-Sancho, Fernández, Franco-Marina, López-Gatell & Bojórquez (2013).

Por lo anterior, en este proyecto de investigación se centró en el diseño e implementación del IoTM en un oxímetro de pulso para monitorear a distancia en los pacientes los niveles de oxígeno, sangre y ritmo cardiaco. De acuerdo con López (2011), un oxímetro es un dispositivo que lleva a cabo la medida no invasiva de la saturación de oxígeno (SpO₂). La saturación de oxígeno se define como la medida de la cantidad de oxígeno disuelto en la sangre, basada en la detección de hemoglobina y desoxihemoglobina (López, 2011). El diseño e implementación de IoMT en un oxímetro de pulso se justifica porque permitirá a los médicos monitorear de manera virtual a sus pacientes sin necesidad de tenerlos presencialmente. Lo anterior, permitirá detectar en tiempo, aquellos pacientes que requieren atención inmediata evitando que retrasen la búsqueda de atención médica, y a la vez evitando la visita innecesaria de pacientes no graves a los hospitales.

Además, este tipo de tecnologías no solo son aplicables al contexto de pacientes con COVID-19, de manera que pueden ser aplicadas para mantener registros en tiempo real a distancia de pacientes con otras afecciones, como podría ser el caso del monitoreo ambulatorio de la presión arterial para el diagnóstico de la hipertensión, el monitoreo glucémico de pacientes diabéticos. Incluso, este tipo de implementaciones puede servir como apoyo para la telemedicina, permitiendo que un médico pueda ver los signos vitales del paciente en tiempo real, desde una unidad médica diferente a la que se encuentra el paciente, como podría ser el caso de una consulta con un especialista que se encuentra a cientos o miles de kilómetros de distancia

1.2 Propósito del estudio

El objetivo principal de este proyecto de investigación es desarrollar un sistema de monitoreo especializado de oxigenación y ritmo cardiaco para pacientes con COVID-19 por medio de tecnologías IoMT. Lo anterior permitirá el registro automático de los valores con el propósito de vigilar el estado de salud de cada uno de los pacientes de manera remota por parte de los médicos, y notificar a aquellos que requieran atención médica de forma inmediata.

1.3 Objetivos del estudio

- 1.** Analizar los requerimientos para implementar la tecnología de IoMT en un oxímetro de pulso.
- 2.** Diseñar la implementación de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso.

3. Implementar las tecnologías IoMT en un oxímetro de pulso.
4. Probar la implementación de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso.
5. Dar mantenimiento a la implementación de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso.

2. Metodología

Esta investigación es un desarrollo tecnológico con un diseño no experimental que tendrá en una fase de su procedimiento un enfoque cualitativo debido a que se enfocará en las características que debe de tener el sistema de monitoreo de pacientes, gracias a la información obtenida a través de las fuentes citadas, y de los instrumentos utilizados como la entrevista al personal de salud, y la prueba piloto para probar los prototipos. La investigación se realizó con base en las cinco fases del modelo de vida de cascada de Pressman (2010): (a) análisis de requerimientos, (b) diseño, (c) implementación, (d) prueba y (e) mantenimiento. A continuación, se menciona en la Tabla 1 los procedimientos que incluye las etapas, participantes, técnicas, instrumentos y preguntas de investigación que permitirán dar seguimiento a este proyecto de investigación.

Tabla 1. *Procedimientos del proyecto de desarrollo tecnológico*

| Etapa | Participantes/ Informantes | Técnicas de investigación | Instrumentos | Preguntas de investigación |
|--|---|------------------------------|--------------|---|
| Primera etapa – Análisis de requerimientos | Personal médico | Entrevista | Entrevista | ¿Cuáles son los requerimientos para implementar la tecnología de IoMT en un oxímetro de pulso? |
| Segunda etapa - Diseño | No aplica | No aplica | No aplica | ¿Cuál sería el diseño de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso? |
| Tercera etapa - Implementación | No aplica | No aplica | No aplica | ¿Cómo se pueden implementar las tecnologías IoMT en un oxímetro de pulso? |
| Cuarta etapa - Prueba | Personal médico / 3 (tres) personas | Encuesta | Cuestionario | ¿Cómo se comprueba el correcto funcionamiento de la implementación de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso? |

| | | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|---|
| Quinta etapa - Mantenimiento | No aplica | No aplica | No aplica | ¿Cuál es el mantenimiento que se debe de realizar para la implementación de la tecnología IoMT en un oxímetro de pulso? |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|---|

3. Discusión y resultados

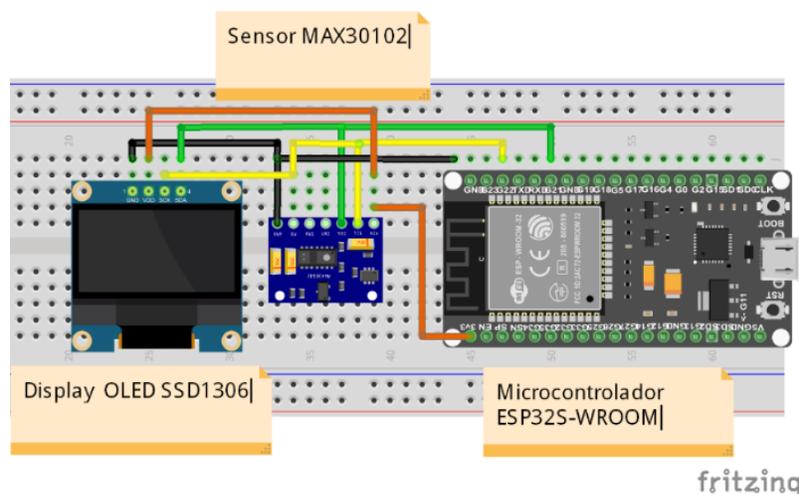
3.1 Etapa 1. Análisis de requerimientos

Debido a que este trabajo de investigación se trata de un desarrollo tecnológico orientado al área de las ciencias de la salud, se procedió a realizar una entrevista a un profesional de la salud especialista en neumología, con el fin de obtener información confiable sobre los requerimientos para este proyecto desde el punto de vista del personal del sector salud de la región. De acuerdo con las declaraciones del personal de la salud, la implementación de un sistema de monitoreo remoto de pacientes aceleraría la adopción de la telemedicina en el contexto actual de salud de México, aunque por el momento solo ocasionaría un impacto significativo en los sectores de la población con mejor nivel económico, debido a que es una limitante la dificultad que tiene una buena parte de la población mexicana para acceder a servicios de salud de calidad, así como la adquisición del equipo necesario para estos fines, como lo son teléfonos inteligentes o equipamiento médico. Además, señaló que un sistema de monitoreo de pacientes a distancia ayudaría a diagnosticar a tiempo la hipoxemia ocasionada por el COVID-19, de manera que mejoraría el panorama de recuperación de estas personas, en comparación con aquellas que no pueden acceder al equipo de monitoreo de oximetría remoto, gracias a que la búsqueda de atención en el momento adecuado ayudaría a controlar el daño ocasionado por la enfermedad. También se mencionó el hecho de que el sistema de monitoreo es una herramienta útil no solo para los médicos, sino también para el sistema de salud en general, y debería permitir el monitoreo en tiempo real de los pacientes, además del almacenamiento de estos datos de manera histórica, permitiendo al personal de salud analizar el comportamiento de los signos vitales del paciente a lo largo del tiempo, además de contar con registros confiables que pudieran usarse con fines legales en caso de requerirse, así como servir como fuente de información para futuras investigaciones sobre COVID-19 que utilicen estadísticas de los pacientes como datos de entrada (Saavedra, comunicación personal, 30 de septiembre, 2021).

3.2 Etapa 2. Diseño

De acuerdo con los requerimientos obtenidos de la entrevista de la etapa anterior, se procedió a crear un prototipo de oxímetro de pulso basado en el sensor MAX30102 del fabricante Maxim Integrated. Cabe aclarar que se utilizó un sensor de bajo costo no orientado para fines estrictamente médicos, por lo que, al momento de tener un prototipo funcional listo para la implementación en servicios de salud, se procederá a reemplazar este sensor por uno de grado médico, como el sensor DS100A, ofrecido por el fabricante Nellcor. Para desplegar los datos al usuario en tiempo real, se utilizó un display OLED SSD1306 del fabricante Adafruit, el cual ofrece una resolución de 124 x 64 píxeles, suficiente para mostrar de manera clara nuestros datos, y graficar la onda pletismográfica de pulsioximetría obtenida a partir de los datos. Como microcontrolador se utilizó la placa Espressif ESP32-S, la cual además de soportar el protocolo I2C para comunicarse con el sensor de oximetría y con el display, nos brinda conectividad Bluetooth, necesaria para la implementación de tecnología IoMT en el prototipo del oxímetro de pulso. Para llevar a cabo las conexiones de los elementos de este oxímetro, se diseñó el diagrama electrónico que se muestra en la Ilustración 1.

Ilustración 1. Diagrama electrónico del prototipo de oxímetro de pulso



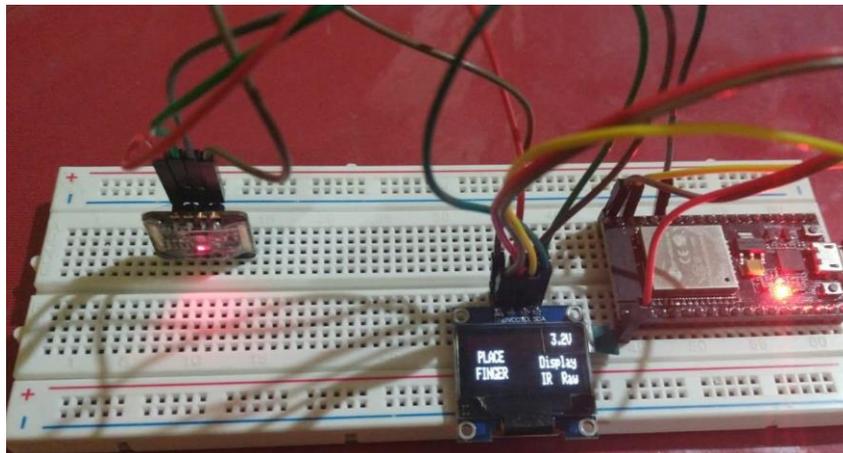
En cuanto al software utilizado para la programación de este oxímetro, se utilizó el IDE Arduino, el cual brinda una manera sencilla de realizar la programación de una gran variedad de microcontroladores, entre ellos el ESP32-S utilizado para este prototipo. Para llevar a cabo la programación del microcontrolador, este proyecto se desarrolló con base en un proyecto de oxímetro, el cual lleva por nombre "nanoPulsePPG", previamente desarrollado para el microcontrolador Arduino Nano (Jeffmer, 2019). Debido a que el proyecto está construido para un microcontrolador distinto, se procedió a realizar diversas adecuaciones en el software, con el fin de que funcione en el Espressif ESP32-S. Además,

para brindarle conectividad Bluetooth al proyecto e implementar el IoMT en este oxímetro de pulso, se utilizó la librería "ESP32 BLE for Arduino" (Nkolban, 2018). Para cumplir con el requisito de la recolección de datos a distancia, se diseñó una aplicación Android para la recolección de datos del lado del paciente utilizando tecnologías de Bluetooth Low Energy, utilizando como base la librería "Android-BLE-Library" del fabricante Nordic Semiconductor (Nordic Semiconductor, 2021). Por último, para llevar a cabo el almacenamiento y presentación de los datos del lado del personal médico, se desarrolló una aplicación web, basado en el stack MERN (MongoDB, ExpressJS, ReactJS y NodeJS), ya que este stack de tecnología permite el desarrollo rápido de productos de software utilizando un solo lenguaje de programación, Javascript, el cual es ampliamente utilizado en la actualidad, y cuenta con una extensa documentación y un buen apoyo de parte de la comunidad de desarrolladores.

3.3 Etapa 3. Implementación

Para la implementación del prototipo, primero se conectó físicamente el oxímetro con la placa de Arduino de acuerdo con el diagrama electrónico la cual se muestra en la Ilustración 2. Posteriormente, se realizó la programación del microcontrolador.

Ilustración 2. *Implementación de oxímetro de pulso*



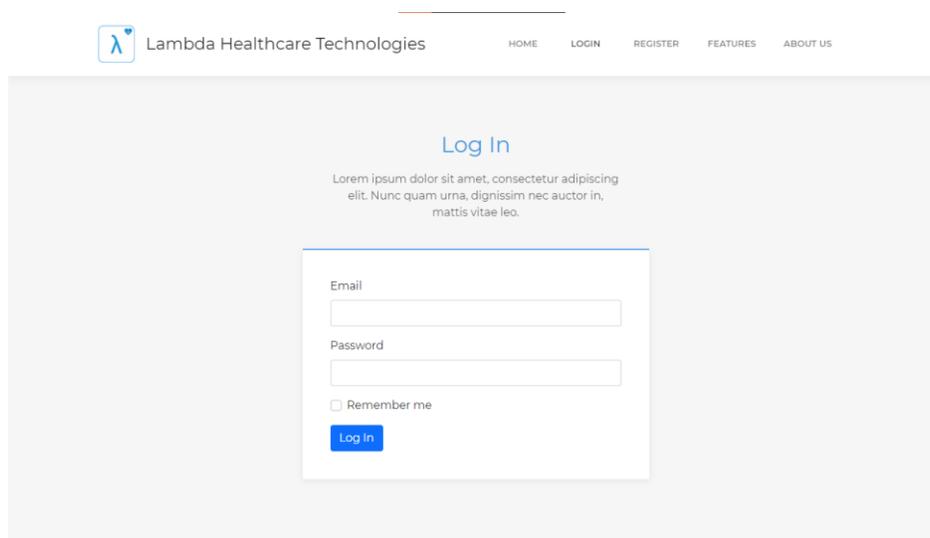
En cuanto a la página web para el almacenamiento y visualización de la información por parte del médico, se implementó la programación y el diseño descrito en la etapa anterior. En la Ilustración 3, se puede observar la interfaz gráfica de la pantalla principal del panel de control que usará el personal de salud.

Ilustración 3. *Pantalla de principal de la página web*



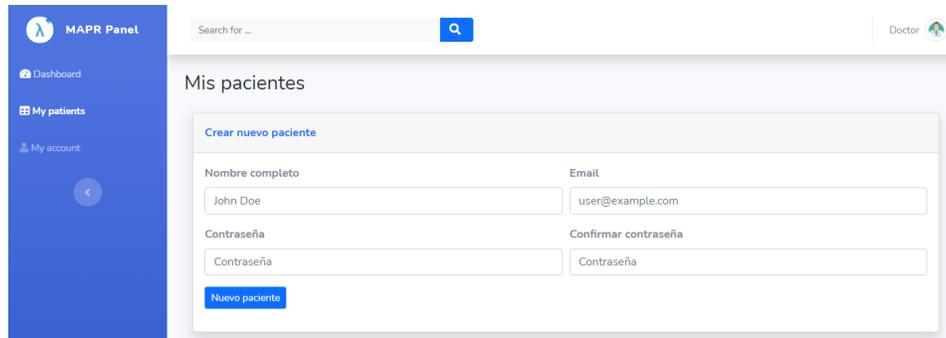
En la Ilustración 4, se observa la interfaz gráfica de la página web en la cual el personal médico ingresará con su cuenta de correo y password correspondiente.

Ilustración 4. *Pantalla de ingreso de la página web*



En la Ilustración 5 se observa la interfaz gráfica de la página web para la captura de los datos de los pacientes. Los datos que deberán de registrarse son los siguientes: (a) nombre completo, (b) contraseña, (c) email y (d) contraseña.

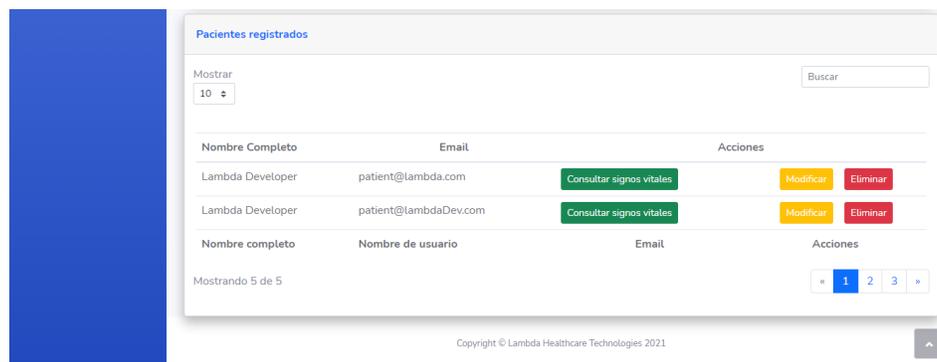
Ilustración 5. *Pantalla de captura de los datos de pacientes en la página web*



En la Ilustración 6 se observa la interfaz gráfica de la página web para la consulta, modificación o eliminación de los datos registrados de los pacientes.

Ilustración 6.

Pantalla de pacientes de registrados para su consulta, modificación o eliminación de datos en la página web



En cuanto a la implementación de la aplicación Android diseñada del lado del paciente, se instaló en un dispositivo y se explicará en la siguiente etapa.

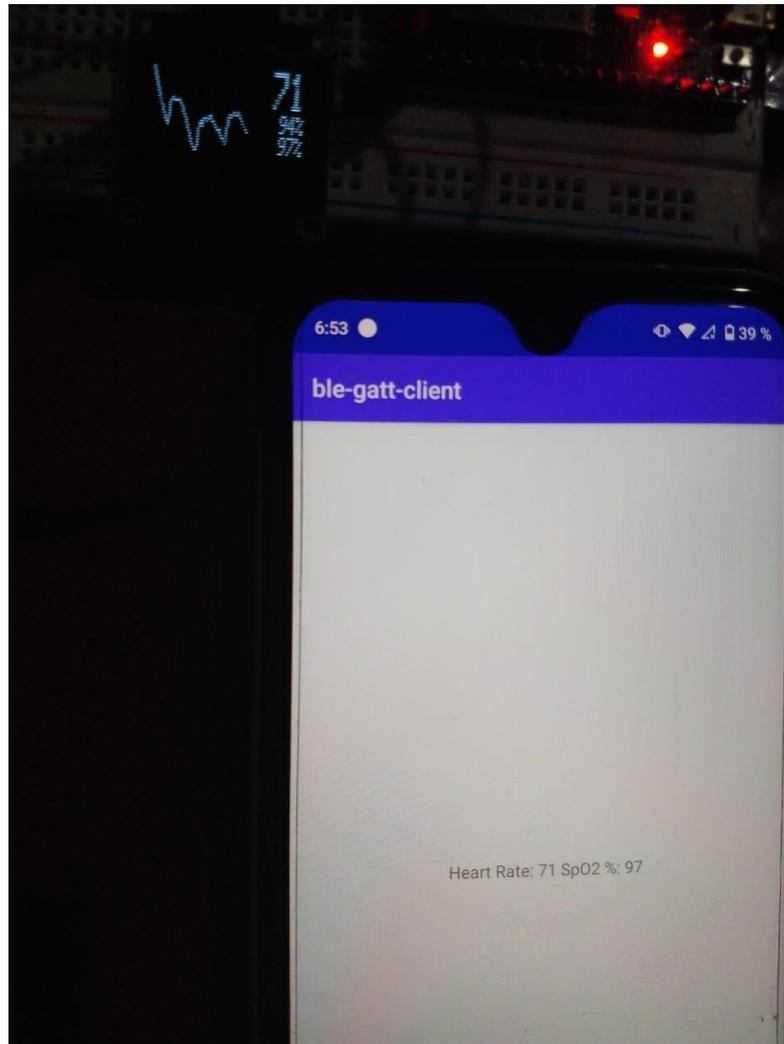
3.4 Etapa 4. Prueba

En esta etapa se llevó a cabo la verificación del funcionamiento de cada uno de los componentes del proyecto, tales como el oxímetro de pulso, la conectividad del oxímetro por medio de Bluetooth hacia el dispositivo móvil con la aplicación Android, y la plataforma web que almacena y presenta los datos al personal de salud. A continuación, se describen las pruebas realizadas en cada uno de los dispositivos:

La prueba del oxímetro muestra que funciona de manera correcta, obteniendo datos coherentes y graficándolos en la pantalla del dispositivo. En lo que respecta a la prueba de la conectividad Bluetooth con la aplicación móvil Android se observa que, una vez obtenidos los valores de ritmo cardíaco y oximetría, estos datos se reciben en tiempo real en el

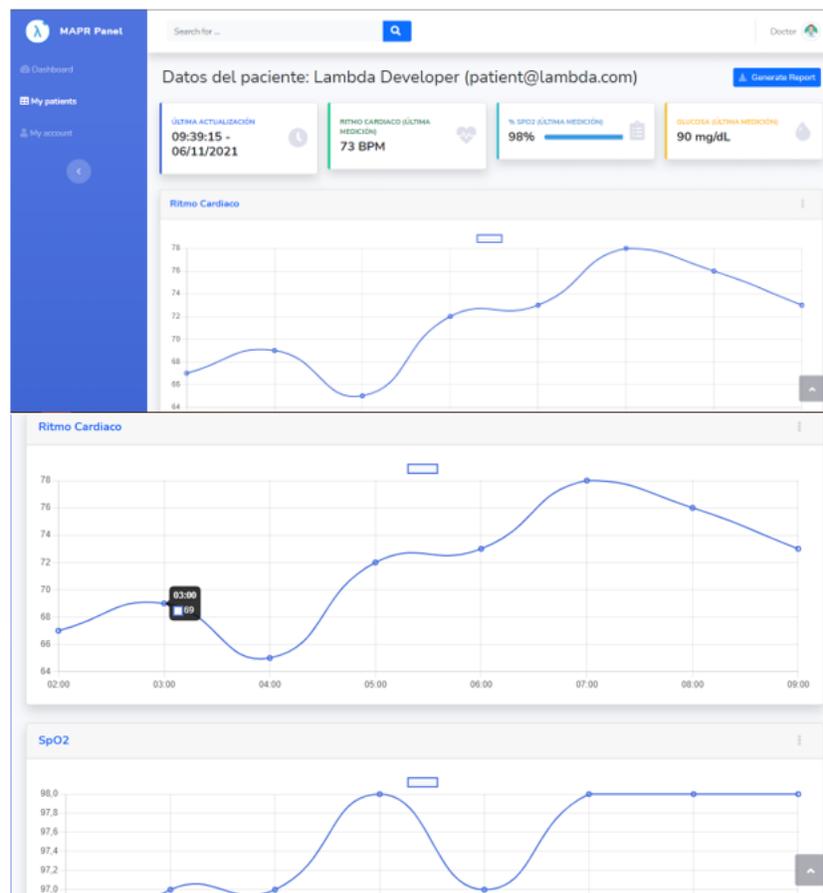
dispositivo Android para su posterior almacenamiento en la nube. En la Ilustración 7 se muestra el funcionamiento del oxímetro y la aplicación Android desarrollada.

Ilustración 7. Prueba de funcionamiento del oxímetro con la aplicación Android



Para la prueba de la página web desarrollada para el control del personal de salud se puede observar en la Ilustración 8 los datos graficados exitosamente del paciente con base a las mediciones realizadas por el oxímetro.

Ilustración 8. Presentación gráfica de los datos medidos del paciente en la página Web



Para llevar a cabo la comprobación del correcto funcionamiento del prototipo de oxímetro, se utilizó como instrumento la implementación de una prueba piloto aplicada a tres personas. Lo anterior, con el fin de recolectar los datos obtenidos y compararlos con las lecturas de un oxímetro comercial, modelo YBK-303 del fabricante Yobekan. En la Tabla 2, se puede observar que los datos obtenidos con la implementación del prototipo con respecto al ritmo cardíaco son los mismos en comparación con los datos arrojados por el oxímetro comercial. En lo que respecta al SpO2 se observa que hubo una diferencia en descenso de 1 %. Finalmente, cabe mencionar que en esta prueba fue validada por la observación y validación de su funcionamiento por parte del personal médico experto quien participó en este proyecto de investigación de desarrollo tecnológico.

Tabla 2. Resultados de la prueba piloto en comparación con los obtenidos en el oxímetro comercial

| Sujeto de prueba | Ritmo cardiaco (Prototipo) | SpO2% (Prototipo) | Ritmo cardiaco (YBK-303) | SpO2% (YBK-303) |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|
| Sujeto #1 - Masculino de 17 años | 72 BPM | 97 - 100 % | 72 BPM | 98 % |
| Sujeto #2 - Masculino de 21 años | 83 BPM | 95 - 99 % | 83 BPM | 97 % |
| Sujeto #3 - Masculino de 50 años | 86 BPM | 95 - 99 % | 86 BPM | 96 % |

3.5 Etapa 5. Mantenimiento

Para la etapa de mantenimiento, se consideró la implementación a futuro de sensores más precisos y de grado médico, tales como el sensor Nellcor DS100A, los cuales ayudarían a obtener datos más precisos, y cumplir con las especificaciones necesarias para ser un dispositivo de grado médico. Además, se considera que podrían obtenerse implementaciones más precisas de los algoritmos utilizados para el procesamiento de los datos del oxímetro, por lo que se consideró programar actualizaciones de software que ayuden a mejorar el funcionamiento del proyecto.

4. Conclusiones

Con base en los datos obtenidos de las pruebas de funcionamiento de los diferentes componentes del sistema de monitoreo de pacientes a distancia, así como los datos recolectados por medio de la prueba piloto del oxímetro de pulso, se pudo concluir que se cumplieron los objetivos de diseño y funcionalidad planteados en el desarrollo de este trabajo de investigación, dando como resultado un avance tecnológico que permitirá el monitoreo en tiempo real de pacientes en diferentes contextos y ubicaciones. Además, resalta el hecho de que el prototipo de oxímetro de pulso logró obtener datos con una precisión igual al oxímetro comercial con relación al ritmo cardiaco y una pequeña diferencia de 1 % con relación al SpO2.

Referencias

- Ansys. (2018). Engineering the Internet of Things: Wearables and Medical Devices. <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/public-leapaust/resources/Engineering+The+Internet+of+Things+Wearables+and+Medical+Devices+++Industry+Brief.pdf>
- Ashton, K. (22 de junio de 2009). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*. <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>
- Jeffmer. (2019). *Github*. <https://github.com/jeffmer/tinyPulsePPG/tree/master/nanoPulsePPG>
- López, S. (2011). Pulse Oximeter Fundamentals. *Freescale Semiconductor*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.359.5826&rep=rep1&type=pdf>
- Nkolban. (2018). *Github*. *nkolban - ESP32 BLE for ARDUINO*. https://github.com/nkolban/ESP32_BLE_Arduino
- Nordic Semiconductor. (2021). *Github*. *Nordic Semiconductor - Android BLE library*. <https://github.com/NordicSemiconductor/Android-BLE-Library/>
- Onag, G. (8 de mayo de 2020). Analysts say COVID-19 pandemic will spur IoT adoption. *FutureIoT*. <https://futureiot.tech/analysts-say-covid-19-pandemic-will-spur-iot-adoption/>
- Ottestad, W., Seim, M. & Mæhlen, J. O. (2020). COVID-19 with silent hypoxemia. *Tidsskr Nor Laegeforen*, 140(7). <https://doi.org/10.4045/tidsskr.20.0299>.
- Pérez-Padilla, R., García-Sancho, C., Fernández, R., Franco-Marina, F., López-Gatell, H. & Bojórquez, I. (2013). The impact of altitude on hospitalization and hospital mortality from pandemic 2009 influenza A (H1N1) virus pneumonia in Mexico. *Salud Publica de México*, 55(1), 92-95. <https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/7192>
- Pressman, R. S. (2010). *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. New Jersey: McGraw-Hill Education.