

Prototipo de sistema embebido para monitorear la oxigenación en sangre y el pulso cardiaco de pacientes infectados con COVID-19 usando IoT *Trabajo Terminal No. - - - - -*

Alumnos: *García García Cano Ivan, **Castillo Rodríguez David Israel

Directores: García Ortega Victor Hugo, Hernández Tovar Rubén

e-mail: *cgarcia1603@alumno.ipn.mx, **dcastillor1301@alumno.ipn.mx

Resumen - Con base en el surgimiento del virus SARS-CoV-2, causante de la enfermedad COVID-19, se propone desarrollar un sistema embebido que realice el monitoreo de dos signos vitales, oxigenación en sangre y pulso cardiaco, haciendo uso de los sensores apropiados, así como de algoritmos que notifiquen al paciente, y contactos de emergencia, acerca de anomalías en sus signos, a fin de tomar acciones preventivas. Dicho sistema embebido realiza una aplicación de Internet de las cosas (IoT).

Palabras Clave - Academia de sistemas digitales¹, Aplicación móvil, IoT, Signos vitales, Sistemas embebidos.

1. Introducción

Uno de los roles tradicionales de las enfermeras incluye la vigilancia. Esta podría incluir observar pacientes en espera de cambios en su condición, reconocer deterioro clínico temprano y proteger a los pacientes de daños. Por más de cien años, las enfermeras han realizado la vigilancia a través de los mismos signos vitales: temperatura, pulso, presión arterial, ritmo respiratorio y en años recientes, la saturación de oxígeno en sangre [1]. Una pronta detección y reporte de cambios en tales signos vitales son esenciales, ya que los retrasos en el inicio de un tratamiento apropiado pueden afectar perjudicialmente al paciente. Por lo cual, para detectar cambios fisiológicos tempranamente, una evaluación precisa de los signos vitales es de suma importancia [2].

El virus de COVID-19 ha sido, probablemente, uno de los eventos más transformadores en la historia de la humanidad. El impacto multisistémico de la enfermedad y la necesidad de aislamiento físico son los puntos más característicos acerca del virus de COVID-19. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), al 2 de febrero de 2021, la Organización Mundial de la Salud (OMS) fue notificada de 37 millones de casos de COVID-19 entre trabajadores de la salud (TS) de 183 países, lo cual representó el 36 % del total de casos en el mundo, hasta esa fecha [3]. Según datos proporcionados por la Secretaría de Salud de México, al 15 de febrero de 2021, se reportaron 224,898 casos acumulados de COVID-19 entre trabajadores de la salud [4]. Se reportaron, además, 3,284 defunciones entre los trabajadores de la salud en México [4].

Un informe de Amnistía Internacional de inicios de septiembre de 2020 encontró que México tenía el número más alto de muertes por COVID-19 de los trabajadores de la salud, entre los países con información disponible, con 7,000 muertes reportadas[5]. Según las cifras publicadas por la OPS, México representó el 45.08 % del total de muerte entre trabajadores de la salud de 17 países [3]. La información oficial de la Secretaría de Salud indica que las enfermeras representaron el 40 % de los contagios por COVID-19, los médicos el 26 % y otros trabajadores de la salud el 30 % [4].

Con base en la información presentada en párrafos anteriores, podemos observar el gran impacto que tuvo el virus de COVID-19 ha sido un punto de inflexión para los trabajadores de la salud. Pues, al ser un virus desconocido, las medidas de seguridad y prevención no fueron las más adecuadas para evitar las lamentables defunciones del personal. Sin embargo, aun cuando se dispone de más información y la propagación del virus ha sido medianamente controlada, el riesgo de contagio aún persiste. Por lo cual, a través del prototipo que se presenta, buscamos proporcionar al personal de la salud una herramienta que les permita mantener a salvo su salud física, reduciendo el riesgo de contagio en la vigilancia de los pacientes, así como una forma más sencilla de monitorear el estado de salud de un paciente, mediante el envío de mensajes en caso de anomalías en sus signos vitales. Sin embargo, aunque el prototipo tiene como principal objetivo ser un apoyo para los trabajadores de la salud, este puede ser utilizado por aquellos pacientes que han sido confiados en sus hogares para ser tratados por COVID-19, o bien, por personas que se encuentren cuidando de algún paciente.

¹ Academia de sistemas digitales no es una palabra clave, sin embargo, se coloca para clasificar correctamente el protocolo.

1.1. Estado del arte

1.1.1. Trabajos externos al país

En [6] se presenta un oxímetro de pulso económico y portátil, el cual utiliza un sensor de oxímetro Sparkfun y un SoC Raspberry Pi 2 modelo B. Tales que, en conjunto, ofrecen un sistema con una precisión del 90 % en la medición de oxigenación en sangre y pulso cardíaco. Este sistema captura los datos de los signos a través del sensor conectado a una tarjeta de desarrollo Arduino UNO usando el protocolo de comunicación I2C, posteriormente, los datos se envían al SoC Raspberry Pi usando el protocolo de comunicación serie para visualizar los datos haciendo uso de un programa desarrollado en lenguaje Python.

Por otra parte, en [7] se presenta un sistema capaz de medir la frecuencia cardíaca y la oxigenación en sangre de forma remota desde cualquier parte de las instalaciones de un hospital. El sistema utiliza un sensor de frecuencia cardíaca MAX30100 y un SoC ESP32 con Wi-Fi incluido. En conjunto, estos son capaces de realizar una medición en tiempo real de los signos y mostrar las mediciones en los teléfonos celulares con sistema operativo Android.

De la misma manera, en [8] se presenta un prototipo compacto de oxímetro de pulso reflexivo que utiliza un circuito integrado de bajo costo como un dispositivo de atención médica portátil para monitorear de forma prolongada la frecuencia cardíaca y oxigenación en sangre. El sistema se conforma de un microcontrolador ATmega328p, un módulo Bluetooth y una unidad SoC MAX30102, que en conjunto forman dicho sistema.

1.1.2. Trabajos dentro del Instituto Politécnico Nacional

De forma similar, [9] propone un prototipo que hace uso de un microcontrolador PIC30F4013, un sensor de temperatura MAX30205 y un sensor de pulso cardíaco XD-58C. El sistema ofrece la medición de la temperatura corporal y pulso cardíaco. Dentro de la aplicación móvil desarrollada es posible crear perfiles para los usuarios, es decir, además de contener datos generales acerca del usuario, es posible asociar las mediciones realizadas con cada usuario particular, para así obtener un monitoreo personalizado.

Por otro lado, [10] ofrece una propuesta de prototipo basado en un SoC Raspberry Pi Zero y un sensor oxímetro de pulso MAX3101. El sistema ofrece la medición de la oxigenación en sangre. A diferencia de ambos prototipos presentados anteriormente, en la aplicación móvil, es posible determinar la frecuencia con la que se realiza medición, la posición geográfica en donde fue realizada una medición y observar una gráfica que describe el comportamiento de las mediciones que han sido realizadas en un determinado periodo de tiempo.

Proyecto	Signo vital	Procesador	Módulo de comunicación	Despliegue de información
Economical and wearable pulse oximeter using IoT [6]	Oxigenación en sangre y pulso cardiaco	Raspberry Pi 2 modelo B y Arduino UNO	-	Consola utilizando SSH
IoT based pulse oximeter system [7]	Oxigenación en sangre y frecuencia cardiaca	ESP32	-	Aplicación "BLYNK APP"
Compact pulse oximeter designed for blood oxygen saturation and heart rate monitoring [8]	Oxigenación en sangre y frecuencia cardiaca	Microcontrolador ATmega328p	Módulo Bluetooth	Aplicación móvil Android
Sistema de monitoreo de signos vitales utilizando IoT [9]	Temperatura y pulso cardiaco	Microcontrolador PIC30F4013	4G LTE-AT&T CLICK	Aplicación móvil Android
Sistema embebido para el monitoreo remoto de la saturación de oxígeno en la sangre usando IoT [10]	Oxigenación en sangre	Raspberry Pi Zero	Módulo de comunicación 4G	Aplicación móvil Android
Sistema propio	Oxigenación en sangre y pulso cardiaco	Raspberry Pi 3 modelo B+	Módulo de comunicación 4G	Aplicación móvil Android

Tabla 1: Cuadro comparativo de trabajos externos y dentro del Instituto Politécnico Nacional.

Fuente: Elaboración propia.

2. Objetivo

2.1. General

Desarrollar un prototipo para monitorear la oxigenación en sangre y el pulso cardiaco de un paciente infectado de COVID-19 a través de un sistema embebido que transmita los datos medidos a un dispositivo móvil y de esta forma realizar el seguimiento del estado de salud del paciente.

2.2. Particulares

1. Configurar un sensor capaz de determinar los niveles de oxígeno presentes en la sangre y el pulso cardiaco, mediante la interfaz de comunicación dispuesta para el sensor.
2. Diseñar un sistema embebido encargado de la adquisición de los datos medidos por el sensor, haciendo uso de un Sistema en Chip (SoC, por sus siglas en inglés, System-on-Chip).
3. Configurar un módulo de comunicación utilizado para la transmisión de los datos, adquiridos por el sistema, hacia un dispositivo móvil.
4. Desarrollar una aplicación móvil para la adquisición y visualización de los datos transmitidos por el módulo de comunicación, en un dispositivo operado por el sistema operativo Android.

3. Justificación

A través de los años, la tecnología se ha visto involucrada en buena parte de nuestras actividades, sin embargo, también se ha inmiscuido en diversas áreas de la actividad humana, como es el área de la salud. En dicha área, el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han permitido la integración de dispositivos capaces de realizar la medición, registro y monitoreo de los signos vitales de un paciente, los cuales proporcionan una medida del estado fisiológico del mismo. Estos sistemas que realizan el monitoreo lo hacen a través de una tecnología de comunicación para el envío remoto de datos, a dichos sistemas se les considera como una aplicación de Internet de las cosas (IoT), el cual se desarrolla mediante un sistema embebido. Los sistemas embebidos son sistemas computacionales compuestos de hardware y software para una aplicación específica usando recursos dedicados.

En los últimos dos años, con la llegada del virus de COVID-19, ha cobrado especial importancia el monitoreo de los signos vitales de un paciente contagiado con este virus. En particular hablamos de la saturación de oxígeno en sangre y del pulso cardíaco. Considerando el impacto multisistémico provocado por este virus, la vigilancia de estos signos han mostrado ser un indicador de gran importancia en la detección del deterioro en la salud del paciente contagiado [11].

A consecuencia del gran impacto que representa el virus en la salud del paciente contagiado, se requieren de cuidados hospitalarios para el tratamiento de los síntomas. Por lo cual, debemos notar el riesgo que corre el personal de salud, al exponerse continuamente a ser contagiados. Esto sin tomar en cuenta las defunciones entre el personal de la salud, que tan solo en México alcanzaron las 7,000 muertes reportadas en septiembre de 2020. Bajo este contexto, podemos constatar la importancia de salvaguardar la salud física del personal de la salud, así como brindarles apoyo en la atención y vigilancia de los pacientes. Pero, además, debemos hacer notar que no solo los trabajadores de la salud han estado expuestos, también aquellas personas que han sido confinadas en sus hogares para cuidar de pacientes infectados en sus hogares.

Nuestro prototipo de sistema embebido pretende realizar el monitoreo de signos vitales para pacientes infectados con COVID-19, con ayuda de sensores que permitan la medición de la oxigenación en sangre y pulso cardíaco del paciente. De tal forma que, con base en el registro de múltiples mediciones, sea posible realizar un seguimiento de la evolución de los síntomas de un paciente, conocer su estado de salud a lo largo del tiempo y, de ser necesario, notificar alguna anomalía en sus síntomas.

4. Productos o resultados esperados

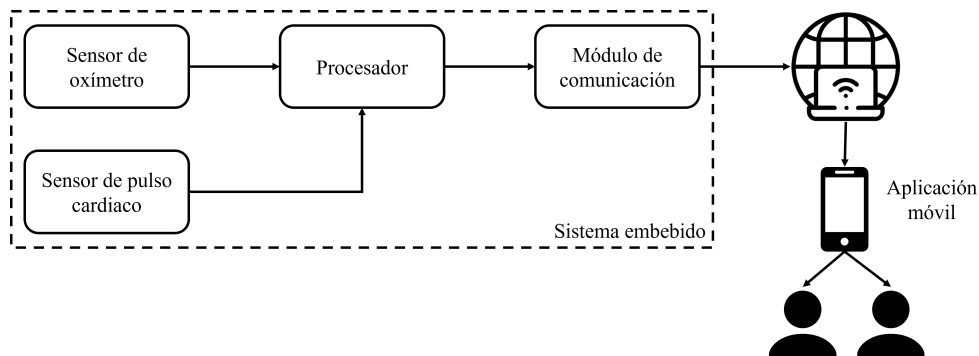


Figura 1: Diagrama a bloques del producto esperado.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1 mostramos el diagrama a bloques del producto esperado, el cual contempla los siguientes módulos:

1. Módulo para la medición de oxigenación en sangre y pulso cardíaco; signos vitales que serán monitoreados utilizando un SoC (System on Chip).
2. Módulo procesador, el cual se encarga de monitorear y registrar las mediciones realizadas por el módulo de medición. Posteriormente, los valores medidos son tratados, tal que puedan ser transmitidos hacia una aplicación móvil.
3. Módulo de comunicación, necesario para el envío de las mediciones realizadas de los signos vitales, hacia una aplicación móvil, con el propósito de asegurar un medio de comunicación entre el SoC y que las mediciones puedan ser utilizadas por los usuarios.
4. Aplicación para un dispositivo móvil, operado por el sistema Android, que sirva como medio de comunicación entre el módulo de medición y los usuarios del sistema, pero, además, permitirá consultar el registro histórico de las mediciones realizadas a lo largo de un periodo de tiempo.

5. Metodología

Considerando que nuestro prototipo requiere elementos de hardware (por ser un sistema embebido) y de software (se requiere una aplicación móvil), por lo cual necesitamos una metodología capaz de combinar ambos elementos, de tal forma que sea posible brindar la mayor confiabilidad posible al sistema. Por tal razón, se utilizará el modelo en V enfocado en sistemas embebidos, mostrado en la Figura 2. A continuación describiremos brevemente las fases que componen al modelo seleccionado.

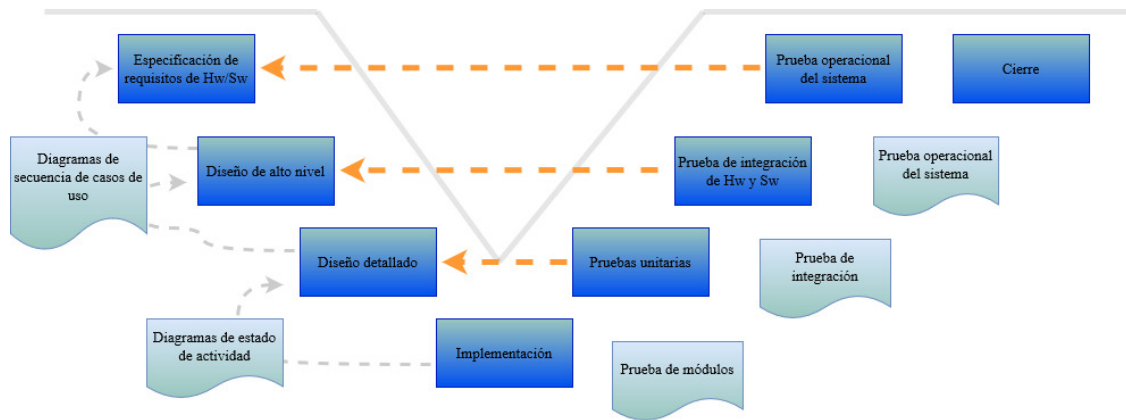


Figura 2: Modelo en V para sistemas embebidos [12].

- **Especificación de requisitos de hardware/software:** Definición y documentación de requisitos del sistema, tales como variables (digitales y analógicas) del sistema, interfaces que requieren dichas variables, tipos de algoritmos que el sistema utilizará, requisitos funcionales, no funcionales y selección de componentes.
- **Diseño de alto nivel:** Obtención de diagramas esquemáticos para el hardware, así como diagramas de descripción del sistema para el software (tales como casos de uso, actividades, componentes, entre otros) a fin de tener una visión general del sistema.
- **Diseño detallado:** Consiste en agregar información específica de las partes del sistema, descritas en el diagrama esquemático y diagramas de descripción del sistema, con el objetivo de tener una comprensión mayor acerca del sistema.

- **Implementación:** Esta es la fase de realización del diseño detallado (armado de circuito, programación de módulos en sistema embebido y en software de alto nivel).
- **Pruebas unitarias:** En esta fase se verifican los módulos hardware y software de forma independiente, comprobando su adecuado funcionamiento de acuerdo a los requerimientos establecidos, debe reportarse el resultado de cada prueba.
- **Prueba de integración hardware/software:** Se trata de la fase de integración de los módulos independientes que forman el sistema. Al igual que en el caso anterior, debe reportarse la prueba general; por una parte se debe comprobar el funcionamiento correcto de todo el sistema y por otra, en caso de tratarse con un sistema tolerante a fallos, debe verificarse que ante la presencia de un fallo persiste el funcionamiento correcto. También se debe comprobar el cumplimiento de los requisitos establecidos.
- **Prueba operacional del sistema:** Realización de las últimas pruebas (escenario de prueba definido en el trabajo), anotando una vez más las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

6. Cronograma

6.1. Sensores para signos vitales

Alumno: Castillo Rodríguez David Israel

Actividad	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Investigación de sensores											
Análisis de sensores											
Diseño de alto nivel de sensores											
Diseño detallado de sensores											
Evaluación de TT1											
Implementación de sensores											
Pruebas unitarias de sensores											
Pruebas de integración											
Pruebas operacionales											
Evaluación de TT2											
Documentación											

6.2. Sistema embebido

Alumno: García García Cano Ivan

Actividad	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Investigación sistemas embebidos											
Análisis del sistema embebido											
Diseño del sistema embebido y sus periféricos											
Diseño de aplicación móvil											
Evaluación de TT1											
Implementación de sensores con el sistema embebido											
Pruebas unitarias de sensores y sistema embebido											
Pruebas de integración											
Pruebas operacionales											
Evaluación de TT2											
Documentación											

7. Bibliografía

- [1] M. Elliott and A. Coventry, "Critical care: the eight vital signs of patient monitoring," *British Journal of Nursing*, vol. 21, no. 10, pp. 621–625, 2012.
- [2] S. P. Haranath and M. Meeta, "Covid-19: The vital sign," *Journal of Mid-life Health*, vol. 11, no. 4, p. 199, 2020.
- [3] M. Sánchez-Talanquer, E. González-Pier, J. Sepúlveda, L. Abascal-Miguel, F. Jane, C. d. Río, and S. Gallalee, "La respuesta de México al covid-19: Estudio de caso," *Inst. Glob. Heal. Sci*, 2021.
- [4] S. de Salud, "Covid-19_personal_de_salud_2021.02.15," Feb 2021. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/638063/COVID-19_Personal_de_Salud_2021.02.15.pdf
- [5] A. internacional, "Un nuevo estudio de amnistía revela que 7000 profesionales de la salud han muerto a causa de la covid-19," Aug 2021. [Online]. Available: <https://www.amnesty.org/es/latest/news/2020/09/amnesty-analysis-7000-health-workers-have-died-from-covid19/>
- [6] R. Shinde, M. S. Alam, M. Choi, and N. Kim, "Economical and wearable pulse oximeter using IoT," in *2021 16th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)*, 2021, pp. 168–171, doi: 10.1109/ICCSE51940.2021.9569303.
- [7] A. Chatterjee, S. C. Kolay, M. Bandyopadhyay, and S. Chattopadhyay, "Iot based pulse oximeter system," in *2021 International Conference on Industrial Electronics Research and Applications (ICI ERA)*, 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICI ERA53202.2021.9726732.

- [8] M. A. Motin, P. P. Das, C. K. Karmakar, and M. Palaniswami, “Compact pulse oximeter designed for blood oxygen saturation and heart rate monitoring,” in *2021 3rd International Conference on Electrical Electronic Engineering (ICEEE)*, 2021, pp. 125–128, doi: 10.1109/ICEEE54059.2021.9718773.
- [9] M. Bernabé and C. Granados, “Sistema de monitoreo de signos vitales utilizando IoT (TT2018-A038),” May 2019.
- [10] A. Juárez and M. Quiroz, “Sistema embebido para el monitoreo remoto de la saturación de oxígeno en la sangre usando IoT (TT2020-A041),” Dec 2021.
- [11] H. Rohmetra, N. Raghunath, P. Narang, V. Chamola, M. Guizani, and N. R. Lakkaniga, “Ai-enabled remote monitoring of vital signs for covid-19: methods, prospects and challenges,” *Computing*, pp. 1–27, 2021, doi:10.1007/s00607-021-00937-7.
- [12] A. Pérez, O. Berreteaga, I. Coop, J. Pérez, A. Ruíz de Olano, and A. Urkidi, “Una metodología para el desarrollo de hardware y software embebidos en sistemas críticos de seguridad,” *Mundo electrónico*, vol. 3, no. 2, pp. 42–48, 2006.

8. Alumnos y directores

García García Cano Ivan.- Alumno de la carrera Ing. en Sistemas Computacionales en ESCOM, Especialidad Sistemas, Boleta 2019630573, Tel. 5522648429, email: cgarciag1603@alumno.ipn.mx.

Firma: _____

Castillo Rodríguez David Israel.- Alumno de la carrera Ing. en Sistemas Computacionales en ESCOM, Especialidad Sistemas, Boleta 2014030232, Tel. 5568004664, email: dcastillor1301@alumno.ipn.mx.

Firma: _____

García Ortega Víctor Hugo.- Ing. en Sistemas Computacionales egresado de la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional (IPN-1999). Maestría en Ingeniería de Cómputo con especialidad en Sistemas Digitales en el Centro de Investigación en Computación del IPN (2006). Actualmente es profesor Titular en la Escuela Superior de Cómputo del IPN trabajando en el área de Sistemas embebidos, Arquitectura de Computadoras y Procesamiento Digital de Imágenes y Señales. Email: vgarciao@ipn.mx, vgarciaortega@yahoo.com.mx.

Firma: _____

Hernández Tovar Rubén.- Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en la ESIME-IPN, Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, especialidad en Ingeniería Eléctrica, opción Comunicaciones en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Comunicaciones de 1993 a 1995. Email: rhtovar@ipn.mx.

Firma: _____

CARÁCTER: Confidencial
FUNDAMENTO LEGAL: Artículo 11 Fracc. V y Artículos 108, 113 y 117 de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.
PARTES CONFIDENCIALES: Número de boleta y teléfono.