

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Sistemas ciberfísicos médicos: una alternativa tecnológica para mejorar la atención de la salud pública

Liliana Quintanar · Monday, September 30th, 2024

Categorías: [Zona Abierta](#), [Ingeniería y Computación](#)

En la mayoría de los países, el número de personas mayores de 60 años continúa en ascenso, mientras que la cantidad de niños y adolescentes disminuye. Acorde con los datos publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que el número de adultos mayores de 65 años doblará al número de niños menores de 5 años en el 2050 (OMS, 2022). Con la edad aumenta el riesgo de padecer enfermedades no transmisibles (ENT) tales como las cardiovasculares, respiratorias y diabetes. Con base en los datos reportados en el Atlas de la Diabetes 2021 de la Federación Internacional de Diabetes, aproximadamente 537 millones de adultos (entre 20 y 79 años) padecían diabetes en el mundo. Esto representaba el 10.5% de la población mundial y se estima que para el año 2045 la cifra se incremente a 784 millones (IDF, 2021). Las muertes causadas por ENT equivalen al 74% de los fallecimientos que ocurren en el mundo. Otro dato preocupante es que alrededor del 86% de los decesos prematuros causados por este tipo de enfermedades ocurren en países de ingresos bajos y medianos (OMS, 2023). Con el aumento de las ENT relacionadas con la edad en adultos jóvenes y maduros, el acceso a un tratamiento adecuado será cada vez más importante en las próximas décadas; sin embargo, proporcionar una atención médica apropiada para las personas que padecen alguna ENT, representa un reto importante para todos los gobiernos, debido a su costo elevado.

En este contexto, diversas soluciones tecnológicas se han propuesto para mejorar la atención médica de los pacientes con alguna ENT en instituciones de salud pública. Entre estas soluciones, se encuentran los sistemas ciberfísicos médicos (SCFM) enfocados al telemonitoreo de pacientes con ENT (Chen *et al.*, 2021). Los SCFM son sistemas de software que obtienen, procesan, analizan, controlan y visualizan datos biomédicos (glucosa, presión arterial, entre otros), para proporcionar servicios de salud inteligentes, tales como un monitoreo adecuado, seguimiento y tratamiento en tiempo real y a distancia de personas con ENT de forma proactiva.

Por un lado, los SCFM llevan a cabo el monitoreo de datos biomédicos a través de sensores vestibles que permiten detectar automáticamente alguna situación de riesgo y generar una alerta que un paciente o un médico recibe en su dispositivo móvil. Por otro lado, los SCFM facilitan el acceso inmediato y organizado del personal de salud a la historia clínica del paciente, así como el acceso en tiempo real a los datos provenientes de los dispositivos médicos para un tratamiento eficiente y oportuno. La estructura general de los SCFM está integrada por dos partes principales

(Chen *et al.*, 2021): espacio físico y ciberespacio (Figura 1).



Figura 1. Esquema general de un sistema ciberfísico médico.

El espacio físico se integra por sensores biomédicos que obtienen datos en tiempo real, dispositivos médicos de diagnóstico y control del tratamiento y el espacio de los usuarios. El espacio físico tiene como objetivo obtener y proporcionar información al ciberespacio a través de los sensores biomédicos y dispositivos médicos de diagnóstico, así como recibir información de control desde el ciberespacio para los dispositivos de control del tratamiento.

Por otro lado, el ciberespacio se enfoca principalmente en administrar el acceso de los usuarios, procesar, almacenar y garantizar la seguridad de la información del sistema. El funcionamiento general de los SCFM se lleva a cabo de la siguiente forma. El ciberespacio recibe la información obtenida del espacio físico a través de un canal de comunicación de sensado, proporcionado por una red y la almacena, procesa y analiza con la finalidad de generar una retroalimentación, con información de control que es enviada al espacio físico, a través de un canal de comunicación de control proporcionado por una red. Finalmente, los usuarios y dispositivos médicos de diagnóstico y control realizan los ajustes respectivos al tratamiento con base en la retroalimentación recibida del ciberespacio. Este ciclo se lleva a cabo de forma continua y en tiempo real.

Diversos grupos de investigación han propuesto SCFM enfocados al monitoreo, seguimiento y tratamiento remoto de personas con ENT, tales como obesidad, diabetes mellitus, enfermedad pulmonar crónica, trastornos cardiovasculares y cáncer. En la Figura 2 se ilustra el esquema general de un SCFM orientado al seguimiento y tratamiento de mujeres embarazadas hipertensas, diabéticas y de alto riesgo.



Figura 2. Esquema general de un SCFM enfocado a mujeres embarazadas hipertensas, diabéticas y de alto riesgo.

Este sistema se integra por cuatro elementos principales: un conjunto de sensores y dispositivos biomédicos; una aplicación móvil que proporciona diversos servicios a las mujeres embarazadas (pacientes); una aplicación web responsiva que ofrece servicios al personal médico para monitoreo y tratamiento remoto de las pacientes; y un servidor que almacena, procesa y administra la información. En este sistema, la información obtenida del espacio físico a través de los sensores biomédicos y dispositivos médicos en tiempo real es enviada en primera instancia a la aplicación móvil de la paciente.

La aplicación móvil procesa, analiza y envía la información al servidor web. En caso de que la aplicación detecte alguna posible situación de riesgo, genera una alarma al personal de salud y familiar designado por la paciente para emergencias. Las alarmas son enviadas a través de mensajes de texto, correo electrónico y notificaciones en la aplicación orientada al personal de salud. En el servidor web se almacena y se realiza un procesamiento de la información recibida que puede incluir el uso de algoritmos de inteligencia artificial, con la finalidad de brindar información relevante que contribuya a la toma de decisiones por parte del personal médico.

Finalmente, la aplicación web móvil responsiva le proporciona al personal de salud diversos

servicios para lograr un adecuado monitoreo y tratamiento a distancia de las pacientes, tales como salud materna, consulta de resultados de ultrasonidos, análisis clínicos y nutrición, consulta de datos biomédicos de la paciente en tiempo real, recepción de alarmas generadas en situaciones de riesgo, y generación de recomendaciones a las pacientes en respuesta a las alarmas recibidas.

En general, las principales funcionalidades proporcionadas por los SCFMs a los pacientes y personal médicos son: a) gestión de la información del paciente, b) análisis en tiempo real de los datos captados por los sensores corporales conectados a los pacientes, c) retroalimentación en tiempo real a los usuarios, d) detección de problemas o anomalías en los datos medidos en tiempo real, e) notificaciones para informar de problemas o anomalías, f) asistencia para el proceso de toma de decisiones en la determinación de un diagnóstico y el tratamiento asociado, g) consultas en línea, e h) integración con sistemas externos para la gestión de historiales médicos y la administración de la actividad hospitalaria.

Por lo tanto, las ventajas principales que proporcionan los SCFM son: a) personalización del tratamiento del paciente, b) reducción de las consultas con el personal de salud, c) detección oportuna de alguna situación de riesgo evitando incluso hospitalizaciones de emergencia, d) mejoran la eficiencia y eficacia de los recursos humanos de las instituciones de salud pública y reducen costos.

Esto ha dado lugar a una extensa investigación centrada en mejorar la construcción de SCFMs. Desde la perspectiva de ingeniería de software y sistemas distribuidos, las arquitecturas de software son el eje central de construcción de los sistemas. Acorde con el estándar ISO/IEC/IEEE 42010:2022 (ISO, 2022), una arquitectura de software es “la organización fundamental de un sistema integrada por sus componentes, sus relaciones entre sí y con el medio ambiente, y los principios que guían su diseño y evolución”. Por lo tanto, un diseño de la arquitectura de software inexacto puede provocar la aparición de diversas fallas en los sistemas de software complejos en escenarios reales. Dado que las arquitecturas representan un aspecto clave en la construcción del software, la investigación sobre arquitecturas de software para SCFMs es fundamental (Plaza *et al.*, 2017). Las arquitecturas de software orientadas al desarrollo de SCFMs deben considerar y cumplir con los siguientes aspectos principales:

- Heterogeneidad: capacidad del sistema para utilizar diversos tipos de sensores y dispositivos médicos con características distintas en términos de procesamiento, almacenamiento, comunicación y formato de la información.
- Descubrimiento dinámico de sensores: capacidad del sistema para permitir la integración dinámica de nuevos sensores y dispositivos médicos.
- Escalabilidad: el sistema debe tener la capacidad de almacenar y procesar grandes cantidades de datos de forma continua.
- Interoperabilidad: se refiere a la facilidad del sistema para el intercambio de información con otros sistemas de salud como el expediente clínico electrónico, sistemas de telemonitoreo, e incluso otros SCFMs orientados a otras ENT.
- Reconfiguración dinámica: se refiere a la capacidad del sistema para adaptarse a los cambios del entorno en tiempo de ejecución, generados por los usuarios y dispositivos que se conectan y desconectan al sistema de forma dinámica y aleatoria sin afectar su funcionamiento.
- Seguridad y privacidad: capacidad del sistema para cumplir con la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información del sistema.

Los avances científicos y tecnológicos en las siguientes áreas de las ciencias de la computación

impulsarán la utilización de los SCFM en el sector salud (Plaza *et. al.*, 2017; Verma, 2022):

- Gemelos digitales (*digital twin*): se refiere a la representación virtual de un objeto o proceso físico real, incluyendo la simulación de su comportamiento durante su ciclo de vida con base en los datos recabados en tiempo real.
- Internet de las cosas: es un conjunto de objetos físicos (cosas), con capacidades para obtener, enviar y recibir información entre ellos y con otros dispositivos a través de Internet.
- Análisis de grandes datos: se refiere a la obtención de conocimiento (descubrir tendencias, patrones y comportamientos) y toma de decisiones con base en el análisis y procesamiento de información de conjuntos de grandes datos.
- Cómputo en la nube: es una tecnología que permite el acceso remoto y bajo demanda a un conjunto compartido de recursos informáticos configurables a través de Internet.
- *BlockChain*: esta tecnología proporciona una base de datos descentralizada y distribuida para el acceso seguro de la información electrónica de los usuarios.
- Aprendizaje automático: es una rama de investigación de la Inteligencia Artificial que tiene como objetivo desarrollar sistemas con la capacidad de aprender y mejorar su funcionamiento con base en nuevas experiencias (nuevos datos).

Finalmente, los retos principales para el desarrollo e implantación de los SCFM en instituciones de salud públicas se centran en (Krumm, 2018; Verma, 2022): a) la integración de diversos sensores y dispositivos médicos con recursos limitados de hardware (baja potencia, bajo procesamiento y almacenamiento) que tienen plataformas de hardware y software diferentes e incompatibles en términos de sistema operativo, tecnología de red, lenguajes de programación, protocolos de comunicación, formato de la información, entre otros, b) entornos de ejecución volátiles que requieren nuevas tecnologías de descubrimiento de servicios con soporte de multidifusión y métodos de emparejamiento simultáneo de diversos dispositivos de forma dinámica, c) entornos de uso fluctuantes que demandan una configuración entre muchos usuarios y dispositivos, d) cómputo autónomo consiste en desarrollar sistemas con la habilidad de autoadministrarse para el manejo adecuado de la complejidad de la gestión de los sistemas, e) seguridad y privacidad es la garantía de confidencialidad (protección contra individuos no autorizados), integridad (protección contra la alteración o corrupción) y disponibilidad (protección contra las posibles interferencias que puedan impedir el acceso a los recursos del sistema). Estos retos aumentan su complejidad en los SCFM debido a las características de los entornos de ejecución volátiles, de uso fluctuante y heterogéneos.

Referencias

Chen, F., Tang, Y., Wang, C., Huang, J., Huang, C., Xie, D., ... & Zhao, C. (2021). Medical cyber-physical systems: a solution to smart health and the state of the art. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 9 (5), 1359-1386.

International Diabetes Federation. (10 de julio 2021). *IDF Diabetes Atlas*. <https://idf.org/about-diabetes/diabetes-facts-figures/>

International Organization for Standardization. (2022) *Software, systems and enterprise Architecture description (ISO/IEC/IEEE 42010:2022)*. <https://www.iso.org/standard/74393.html>

Krumm, J. (2018). *Ubiquitous computing fundamentals*, first edition, Chapman & Hall/CRC,

United States of America, pp. 410.

Organización Mundial de la Salud. (1 de octubre 2022). *Envejecimiento y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>

Organización Mundial de la Salud. (16 de septiembre 2023). *Enfermedades no transmisibles*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>

Plaza, A. M., Díaz, J., Pérez, J. (2018). Software architectures for health care cyber-physical systems: A systematic literature review. *Journal of software: Evolution and Process*, 30 (7), e1930.

Verma, R. (2022). Smart city healthcare cyber physical system: characteristics, technologies and challenges. *Wireless Personal Communications*, 122, 1413–1433.

Imagen de portada por freepik

This entry was posted on Monday, September 30th, 2024 at 10:27 pm and is filed under [Zona Abierta, Ingeniería y Computación](#)
You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.