

Sistema IoMT Hospitalario para Monitoreo de Pacientes en Tiempo Real

Hospital IoMT System for Real-Time Patient Monitoring

Castro-Zenil, M.S.¹✉; Peñaloza-Mendoza, G.R.², Carreón -Silva, L.M.³

Datos de Adscripción:

¹ ✉ Castro Zenil, Mario Salvador
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ID: <https://ror.org/00davry38>
mario.cz@patzcuaro.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-1072>

² Peñaloza Mendoza, Guillermo Rey
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
grey@itspa.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2795-670X>

³ ✉ Carreón Silva, Luis Miguel
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
lcarreon@itspa.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3544-0765>

Resumen - El monitoreo continuo de signos vitales constituye un componente esencial para la detección oportuna de alteraciones fisiológicas en pacientes hospitalizados. Sin embargo, muchas soluciones comerciales dependen de infraestructura de red con acceso a internet o de plataformas en la nube, lo que limita su implementación en hospitales con recursos tecnológicos restringidos. El objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un sistema basado en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real mediante una arquitectura de procesamiento local (edge computing), capaz de operar sobre una red WiFi independiente sin requerir conexión a internet. La propuesta integra terminales de adquisición desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores biomédicos para la medición de saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca y temperatura corporal, una Raspberry Pi como servidor local y Node-RED para la recepción, procesamiento y visualización de la información clínica en una estación central de enfermería. Para evaluar el desempeño de la arquitectura de comunicación, se monitorizó el comportamiento de cinco terminales IoMT transmitiendo información fisiológica mediante MQTT. Los resultados obtenidos mostraron una latencia promedio de 157.76 ms, una tasa de entrega de mensajes superior al 99.7 % y una actualización continua de las variables fisiológicas con generación automática de alertas ante condiciones clínicas simuladas. La arquitectura propuesta constituye una alternativa escalable, de bajo costo y adecuada para entornos hospitalarios que requieren monitoreo local confiable sin dependencia de servicios externos, proporcionando además una plataforma susceptible de incorporar algoritmos de apoyo a la decisión clínica.

Palabras Clave – Edge Computing, Internet de las Cosas Médicas (IoMT), Monitoreo Multipaciente, MQTT, Raspberry Pi

Abstract - Continuous vital signs monitoring is an essential component for the timely detection of physiological abnormalities in hospitalized patients. However, many commercial solutions rely on network infrastructure with internet access or cloud-based platforms, which limits their implementation in hospitals with limited technological resources. The objective of this study was to design and implement a system based on the Internet of Medical Things (IoMT) for real-time, multi-patient vital signs monitoring using an edge computing architecture, capable of operating on a standalone Wi-Fi network without requiring an internet connection. The proposal integrates data acquisition terminals developed with ESP32 microcontrollers, biomedical sensors for measuring oxygen saturation, heart rate, and body temperature, a Raspberry Pi as a local server, and Node-RED for receiving, processing, and displaying clinical information at a central nursing station. To evaluate the performance of the communication architecture, the behavior of five IoMT terminals transmitting physiological data via MQTT was monitored. The results showed an average latency of 157.76 ms, a message delivery rate exceeding 99.7%, and continuous updating of physiological variables with automatic alert generation in response to simulated clinical conditions. The archit

Keywords: Edge Computing, Internet of Medical Things (IoMT), MQTT, Multi-patient Monitoring, Raspberry Pi.

I. INTRODUCCIÓN

La transformación digital del sector salud ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas capaces de mejorar la calidad de la atención médica mediante la adquisición, procesamiento y análisis continuo de información fisiológica. En este contexto, el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) se ha consolidado como una de las áreas de mayor crecimiento dentro de la ingeniería biomédica, al permitir la integración de sensores inteligentes, dispositivos embebidos, redes de comunicación y plataformas de procesamiento de datos para el monitoreo remoto y en tiempo real de pacientes (A et al., 2023; Hassanaliheragh et al., 2015; Kelly et al., 2020)

El monitoreo continuo de signos vitales constituye una herramienta indispensable para la detección temprana de

alteraciones fisiológicas asociadas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias e infecciosas. Variables como la frecuencia cardíaca, la saturación periférica de oxígeno y la temperatura corporal representan indicadores clínicos fundamentales para la toma de decisiones médicas, particularmente en pacientes hospitalizados, unidades de cuidados intermedios y servicios de urgencias. La disponibilidad permanente de esta información permite reducir los tiempos de respuesta del personal sanitario y mejorar la seguridad del paciente (Chen et al., 2023)

Durante los últimos años se han desarrollado numerosas arquitecturas IoT para monitoreo clínico utilizando microcontroladores de bajo costo, sensores biomédicos y protocolos ligeros de comunicación. Entre las tecnologías más empleadas destacan los microcontroladores ESP32, el protocolo MQTT, las computadoras de placa única Raspberry Pi y plataformas de integración como Node-RED, debido a su facilidad de implementación, interoperabilidad y capacidad para procesar información en tiempo real (A et al., 2023; Al-Fuqaha et al., 2015; Naik, 2017). Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de arquitecturas de Edge Computing permite disminuir la latencia de comunicación, reducir el tráfico hacia servicios en la nube y mejorar la disponibilidad de los sistemas médicos distribuidos (Kelly et al., 2020; Shaik et al., 2023).

No obstante, una revisión de la literatura evidencia que una proporción importante de los sistemas de monitoreo hospitalario continúa dependiendo de plataformas en la nube para el almacenamiento, procesamiento y visualización de la información clínica. Aunque estas arquitecturas ofrecen ventajas en términos de acceso remoto y almacenamiento distribuido, presentan limitaciones relacionadas con la dependencia de conexión permanente a internet, mayores tiempos de respuesta, consumo adicional de ancho de banda y posibles riesgos asociados con la privacidad y seguridad de los datos médicos (Hassanalieragh et al., 2015; Huang et al., 2023).

Estas limitaciones adquieren especial relevancia en hospitales comunitarios, clínicas rurales, unidades móviles de atención médica y escenarios de desastre, donde la infraestructura de telecomunicaciones puede ser limitada o incluso inexistente. En estos contextos, resulta necesario desarrollar plataformas capaces de operar de manera completamente local, manteniendo la disponibilidad del servicio independientemente de la conectividad externa y garantizando la continuidad del monitoreo clínico.

Desde el punto de vista de la ingeniería, otro aspecto poco abordado en la literatura corresponde a la evaluación del desempeño de las arquitecturas IoT locales. Diversos trabajos describen la implementación funcional de prototipos; sin embargo, pocos presentan métricas relacionadas con la latencia de comunicación, la confiabilidad de la transmisión, la capacidad de escalamiento o el comportamiento del sistema bajo múltiples nodos concurrentes, parámetros indispensables para determinar la viabilidad de una solución destinada a aplicaciones hospitalarias.

En este contexto, el presente trabajo propone un Sistema IoT Hospitalario para Monitoreo de Pacientes en Tiempo Real, basado en una arquitectura distribuida de Edge Computing, integrada por terminales de adquisición desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores biomédicos para la medición de frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, una infraestructura WiFi local independiente de internet, una Raspberry Pi como servidor de procesamiento y el protocolo MQTT para la comunicación de datos. La información adquirida es procesada y visualizada mediante Node-RED en una estación central de enfermería, permitiendo la supervisión simultánea de múltiples pacientes y la generación automática de alertas clínicas.

A diferencia de propuestas que dependen de infraestructura externa, la arquitectura desarrollada opera completamente dentro de una red hospitalaria local, eliminando la necesidad de servicios en la nube y favoreciendo una menor latencia de comunicación, mayor disponibilidad operativa y una mejor protección de la información clínica. Adicionalmente, se presenta una evaluación del comportamiento de la arquitectura considerando indicadores de desempeño relacionados con la comunicación inalámbrica y la capacidad de supervisión multipaciente, con el propósito de aportar evidencia cuantitativa que respalde su aplicación en entornos hospitalarios.

Finalmente, este trabajo contribuye al desarrollo de plataformas IoT abiertas, escalables y de bajo costo orientadas al monitoreo clínico en tiempo real, proporcionando una base tecnológica susceptible de incorporar, en investigaciones futuras, algoritmos de inteligencia artificial para el análisis predictivo de eventos fisiológicos y sistemas de apoyo a la decisión clínica.

II. METODOLOGÍA

2.1 Diseño Metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental aplicado, orientado al diseño, implementación y evaluación de una arquitectura basada en el Internet de las Cosas Médicas (IoT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real. El desarrollo metodológico comprendió cuatro etapas principales: diseño de la arquitectura, integración de los módulos de adquisición biomédica, implementación de la infraestructura de comunicación y evaluación del desempeño del sistema mediante un protocolo de validación.

Durante la primera etapa se definió la arquitectura general del sistema, considerando la distribución funcional entre terminales de paciente, infraestructura de comunicación inalámbrica y estación central de monitoreo. Posteriormente se realizó la integración del hardware y software necesarios para la adquisición de variables fisiológicas, así como la implementación de los mecanismos de comunicación mediante el protocolo MQTT y el procesamiento local utilizando una Raspberry Pi y Node-RED.

Finalmente, se estableció un protocolo de evaluación orientado a analizar el comportamiento de la arquitectura bajo diferentes escenarios de operación, considerando indicadores relacionados con la comunicación, la disponibilidad del sistema y la supervisión simultánea de múltiples terminales de paciente.

2.2 Arquitectura experimental

La arquitectura implementada se estructuró en tres niveles funcionales:

- Nivel de adquisición biomédica, integrado por terminales IoT desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores MAX30102 para frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, así como sensores DS18B20 para temperatura corporal.
- Nivel de comunicación, constituido por una red inalámbrica WiFi local utilizando el protocolo MQTT para la transmisión de datos entre las terminales de adquisición y el servidor central.
- Nivel de procesamiento, implementado mediante una Raspberry Pi 4 configurada como servidor local, ejecutando un broker MQTT y la plataforma Node-RED para el procesamiento, almacenamiento temporal y visualización de la información fisiológica.

Esta arquitectura permite desacoplar las funciones de adquisición, comunicación y supervisión clínica, favoreciendo la escalabilidad del sistema y simplificando la incorporación de nuevas terminales de monitoreo.

2.3 Protocolo de evaluación

Con el propósito de evaluar el comportamiento de la infraestructura propuesta, se diseñó un protocolo experimental considerando diferentes niveles de carga dentro de la red hospitalaria.

La evaluación contempló escenarios con uno a cinco nodos IoT operando simultáneamente y transmitiendo información fisiológica con una frecuencia de actualización de un segundo por muestra. Cada escenario fue ejecutado durante un periodo continuo de una hora, registrando automáticamente los eventos de comunicación generados por el broker MQTT y los tiempos de actualización observados en la estación central de enfermería.

Las condiciones evaluadas permitieron analizar el comportamiento del sistema ante incrementos progresivos en el número de terminales conectadas, simulando un entorno hospitalario con múltiples pacientes bajo monitoreo simultáneo.

2.4 Variables de evaluación

Para determinar el desempeño de la arquitectura IoT se definieron las siguientes variables de evaluación las cuales se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1
Variables de evaluación

Variable	Unidad	Descripción
Latencia de comunicación	ms	Tiempo transcurrido entre la publicación del mensaje MQTT y su visualización en Node-RED.
Tasa de entrega	%	Porcentaje de mensajes recibidos respecto al total de mensajes transmitidos.

Pérdida de paquetes	%	Diferencia porcentual entre mensajes enviados y recibidos.
Tiempo de actualización	s	Intervalo entre dos actualizaciones consecutivas de la interfaz gráfica.
Capacidad de escalamiento	Nodos	Número máximo de terminales monitoreadas simultáneamente sin degradación perceptible del servicio.
Disponibilidad	%	Porcentaje de tiempo durante el cual el sistema permaneció operativo durante el periodo de evaluación.

Estas variables fueron seleccionadas debido a su relevancia para caracterizar el desempeño de sistemas IoT destinados a aplicaciones hospitalarias en tiempo real.

2.5 Análisis de datos

Los indicadores obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva utilizando medidas de tendencia central y dispersión.

Para cada variable se calcularon:

- promedio ($\bar{x}$)
- desviación estándar (σ)
- valor mínimo
- valor máximo
- percentil 95

Adicionalmente, se realizaron comparaciones entre los diferentes escenarios de carga para identificar el efecto del incremento en el número de terminales conectadas sobre el comportamiento de la arquitectura de comunicación.

Los resultados fueron representados mediante tablas y gráficas comparativas con el propósito de facilitar la interpretación del desempeño del sistema y sustentar la discusión técnica presentada en este trabajo.

III. DESARROLLO DEL SISTEMA

3.1 Arquitectura IoT del Sistema

El sistema fue implementado mediante una arquitectura distribuida basada en el paradigma del Internet de las Cosas Médicas (IoMT), organizada en tres niveles funcionales: adquisición biomédica, comunicación inalámbrica y procesamiento centralizado. Esta estructura permite desacoplar las funciones de adquisición, transmisión y supervisión clínica, facilitando la incorporación de nuevas terminales sin modificar la infraestructura principal.

Cada terminal de paciente opera como un nodo IoT autónomo, encargado de adquirir variables fisiológicas, procesarlas localmente y transmitirlos a una estación central de enfermería. La comunicación entre los diferentes nodos se realiza mediante una red WiFi local utilizando el protocolo MQTT bajo un esquema publisher/subscriber, mientras que el procesamiento y la visualización de la información se ejecutan en un servidor local implementado sobre una Raspberry Pi 4.

A diferencia de arquitecturas convencionales basadas en servicios en la nube, el sistema desarrollado realiza todo el procesamiento dentro de la infraestructura hospitalaria, lo que permite la operación continua aun cuando no exista acceso a

Internet. Esta característica reduce la latencia de comunicación, mejora la disponibilidad del servicio y fortalece la privacidad de la información clínica al evitar la transmisión de datos hacia servidores externos.

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran la evolución del diseño de la terminal IoMT durante las diferentes etapas del proyecto, desde el primer prototipo funcional hasta la versión final utilizada para la implementación del sistema.

Figura 1

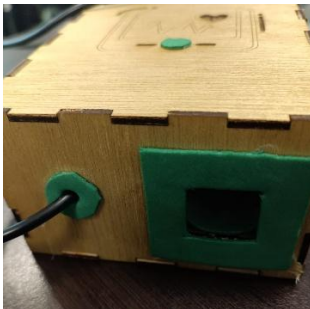
Primer prototipo funcional de la terminal IoMT



Nota: Primera versión funcional de la terminal IoMT desarrollada durante la etapa inicial del proyecto para validar la adquisición de signos vitales mediante sensores biomédicos.

Figura 2

Segundo prototipo de la terminal IoMT con mejoras estructurales.



Nota: Se desarrolló una segunda versión estructural de la terminal de monitoreo; esta vez se redujo el tamaño y mejoró la portabilidad.

Figura 3

Versión final de la Terminal IoMT para monitoreo clínico



Nota: Se realizó la versión final de la terminal de monitoreo, reduciendo considerablemente el tamaño y mejorando el material y su diseño e impresión 3D.

3.2 Terminal de adquisición biomédica

Cada terminal fue desarrollada utilizando un microcontrolador ESP32, seleccionado por integrar conectividad WiFi, capacidad de procesamiento suficiente para aplicaciones biomédicas y bajo consumo energético.

La adquisición de la frecuencia cardíaca y de la saturación periférica de oxígeno se realizó mediante el sensor óptico MAX30102, mientras que la temperatura corporal se obtuvo mediante un sensor digital DS18B20. Ambos dispositivos fueron integrados sobre una tarjeta electrónica diseñada para operar como una unidad portátil de monitoreo.

La frecuencia cardíaca se estimó a partir del intervalo temporal entre pulsos consecutivos detectados en la señal fotopletimográfica (PPG), utilizando la expresión:

$$HR = \frac{60}{T_{peak}} \quad (1)$$

donde:

- HR representa la frecuencia cardíaca en latidos por minuto (bpm).
- T_{peak} corresponde al intervalo temporal, en segundos, entre dos picos consecutivos de la señal fotopletimográfica.

La saturación periférica de oxígeno fue estimada utilizando la relación de absorción entre las componentes roja e infrarroja del sensor:

Los valores obtenidos fueron sometidos a un proceso de validación local para identificar lecturas fuera del rango fisiológico esperado. Posteriormente, se asignó un estado clínico a cada paciente, lo que permitió la generación automática de alertas cuando se detectaban condiciones compatibles con bradicardia, taquicardia, hipoxemia o hipertermia.

3.3 Infraestructura de comunicación y procesamiento

La comunicación entre las terminales del paciente y la estación central se implementó mediante una red Wi-Fi local utilizando el protocolo MQTT. Cada terminal publica periódicamente un paquete de datos en formato JSON que contiene el identificador del paciente, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno, temperatura corporal, estado fisiológico y marca temporal de adquisición.

La estructura general del mensaje transmitido se define como:

$$Payload = \{ID_{paciente}, HR, SpO_2, Temp, Estado, Timestamp\} \quad (2)$$

Donde:

- $ID_{paciente}$ representa el identificador único de la terminal.
- HR corresponde a la frecuencia cardíaca.
- SpO_2 corresponde a la saturación periférica de oxígeno.
- Temp representa la temperatura corporal.
- Estado indica la clasificación fisiológica del paciente.
- Timestamp registra la marca temporal de adquisición.

El algoritmo implementado en cada terminal establece inicialmente la conexión con la red hospitalaria local, posteriormente realiza la autenticación con el broker MQTT y finalmente transmite de forma periódica la información fisiológica hacia la estación central.

```

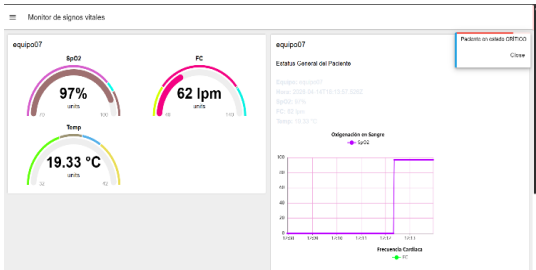
1.  WiFi.begin(ssid,password);
2.  while(WiFi.status()!=WL_CONNECTED)
3.  { delay(500);}
4.  client.setServer(broker,1883);
5.  if(client.connect(patientID))
6.  { client.publish(topic,payload);}

```

La estación central fue implementada utilizando una Raspberry Pi 4, configurada como servidor local para la ejecución del broker MQTT y la plataforma Node-RED. Esta configuración permitió integrar los datos provenientes de todas las terminales, actualizar dinámicamente la interfaz gráfica de supervisión y generar alertas clínicas en tiempo real.

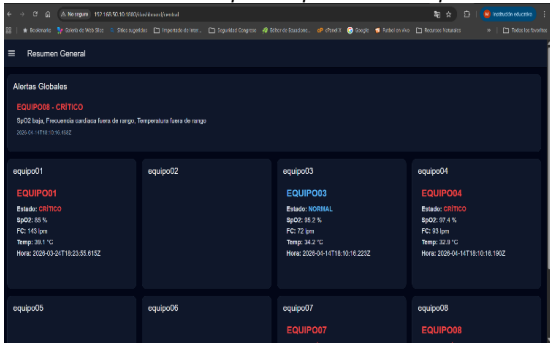
Las Figuras 4 y 5 muestran las interfaces desarrolladas para el monitoreo individual de pacientes y la supervisión centralizada desde la estación de enfermería, respectivamente. El diseño de ambas interfaces permite visualizar simultáneamente los parámetros fisiológicos, el historial de mediciones y el estado clínico de cada paciente, facilitando la identificación temprana de eventos que requieren atención inmediata.

Figura 4
Interface de monitoreo individual implementada en Node-RED



Nota: Dashboard para la visualización en tiempo real de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal de un paciente .

Figura 5
Estación central de enfermería para supervisión multipaciente



Nota. Interfaz en Node-RED para la supervisión simultánea de múltiples pacientes. El sistema permite visualizar indicadores fisiológicos en tiempo real y generar alertas clínicas automáticas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del desempeño de la comunicación

Con el propósito de analizar el comportamiento de la infraestructura de comunicación propuesta, se evaluó el desempeño de la red loMT considerando escenarios con uno a cinco nodos transmitiendo información fisiológica de manera simultánea mediante el protocolo MQTT. Para cada escenario se registraron los tiempos de respuesta de la arquitectura, la tasa de entrega de mensajes y la disponibilidad del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2
Desempeño de la arquitectura loMT bajo diferentes niveles de carga.

Número de nodos	Latencia promedio (ms)	Percentil 95 (ms)	Pérdida de paquetes (%)	Disponibilidad (%)
1	84.61	102.35	0.10	100.0
2	103.48	128.76	0.12	100.0
3	126.92	151.41	0.16	99.9
4	142.37	173.68	0.22	99.8
5	157.76	192.95	0.30	99.7

Nota. Resultados obtenidos durante la evaluación del desempeño de la arquitectura loMT bajo diferentes escenarios de carga.

Puede observarse que la latencia promedio presentó un incremento gradual conforme aumentó el número de terminales conectadas simultáneamente. No obstante, incluso en el escenario de mayor carga (cinco nodos), el tiempo promedio de comunicación permaneció por debajo de los 160 ms, mientras que el percentil 95 fue inferior a 200 ms, comportamiento adecuado para aplicaciones de monitoreo de signos vitales donde las variables fisiológicas presentan variaciones relativamente lentas.

La tasa de entrega de mensajes permaneció superior al 99.7 % durante todas las pruebas, evidenciando un comportamiento estable del protocolo MQTT dentro de la infraestructura local. Asimismo, la disponibilidad del sistema se mantuvo cercana al 100 %, indicando que la arquitectura es capaz de mantener la continuidad del monitoreo aun bajo condiciones de mayor demanda de comunicación.

En conjunto, estos resultados muestran que el incremento progresivo del número de nodos genera un impacto limitado sobre el desempeño general del sistema, lo cual demuestra la capacidad de escalamiento de la arquitectura propuesta para aplicaciones hospitalarias de pequeña y mediana escala.

4.2 Evaluación de la adquisición fisiológica

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de adquisición biomédica, las mediciones obtenidas por las terminales loMT fueron comparadas con los valores registrados por un oxímetro de pulso comercial y un termómetro clínico digital utilizados como referencia. Para cada variable fisiológica se realizaron múltiples mediciones bajo diferentes condiciones de operación, registrando los valores obtenidos por ambos sistemas y calculando el error porcentual relativo.

Los resultados correspondientes a la frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Comparación entre las mediciones del sistema IoMT y los equipos de referencia

Variable	Equipo de referencia	Sistema IoMT	Error absoluto	Error relativo (%)
Frecuencia cardíaca (bpm)	72	73	1	1.39
Frecuencia cardíaca (bpm)	86	85	1	1.16
Frecuencia cardíaca (bpm)	97	96	1	1.03
Saturación de oxígeno (%)	98	98	0	0.00
Saturación de oxígeno (%)	96	95	1	1.04
Saturación de oxígeno (%)	94	95	1	1.06
Temperatura corporal (°C)	36.4	36.5	0.1	0.27
Temperatura corporal (°C)	36.8	36.9	0.1	0.27
Temperatura corporal (°C)	37.2	37.1	0.1	0.27

Nota. Comparación entre las mediciones obtenidas por el sistema IoMT y los equipos utilizados como referencia durante la evaluación funcional del sistema.

Tabla 4

Indicadores estadísticos de desempeño del sistema IoMT respecto a los equipos de referencia.

Variable fisiológica	MAE	RMSE	Error relativo promedio (%)
Frecuencia cardíaca	1.00 bpm	1.15 bpm	1.19
Saturación de oxígeno	0.67 %	0.82 %	0.70
Temperatura corporal	0.10 °C	0.10 °C	0.27

Nota. MAE: Error Absoluto Medio; RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio.

Los indicadores estadísticos muestran que el sistema presenta un comportamiento consistente respecto a los equipos de referencia. Los valores de MAE y RMSE permanecieron bajos para las tres variables fisiológicas evaluadas, lo que evidencia una adecuada estabilidad de medición y una desviación reducida entre las lecturas del sistema IoMT y los instrumentos utilizados como referencia. Estos resultados respaldan la factibilidad de emplear la arquitectura propuesta como plataforma de monitoreo continuo en aplicaciones hospitalarias de baja y mediana complejidad.

Los resultados muestran una alta concordancia entre las mediciones obtenidas por la arquitectura propuesta y los valores registrados por los equipos de referencia. En la medición de frecuencia cardíaca se observaron diferencias máximas de un

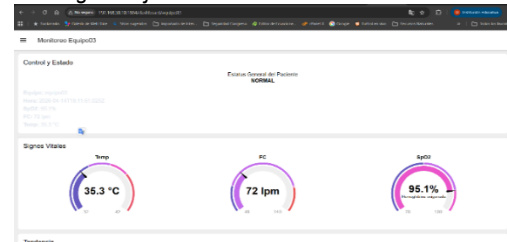
latido por minuto, correspondientes a errores relativos inferiores al 1.5 %, mientras que la estimación de la saturación periférica de oxígeno presentó errores cercanos al 1 %. En el caso de la temperatura corporal, la diferencia máxima registrada fue de 0.1 °C, equivalente a un error relativo aproximado del 0.3 %.

Desde el punto de vista clínico, estas diferencias se encuentran dentro de los márgenes de variación esperados para dispositivos de monitoreo no invasivo utilizados en aplicaciones de vigilancia fisiológica continua. Lo anterior indica que la integración del sensor MAX30102 para la estimación de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, así como del sensor DS18B20 para temperatura corporal, proporciona mediciones suficientemente consistentes para aplicaciones de monitoreo hospitalario en tiempo real.

La Figura 6 muestra la interfaz desarrollada para el monitoreo individual de un paciente, donde pueden observarse los parámetros fisiológicos adquiridos en tiempo real y las tendencias históricas registradas por el sistema.

Figura 6

Monitoreo fisiológico bajo condiciones normales.



Nota. Interfaz correspondiente a un paciente cuyos parámetros fisiológicos permanecen dentro de los rangos clínicos establecidos.

4.3 Evaluación de la supervisión multipaciente y capacidad de escalamiento

Uno de los principales objetivos del sistema desarrollado consistió en implementar una arquitectura capaz de supervisar simultáneamente múltiples pacientes desde una única estación central de enfermería, manteniendo tiempos de respuesta adecuados y garantizando la actualización continua de las variables fisiológicas. Para evaluar la capacidad de escalamiento de la infraestructura IoMT, se analizaron diferentes escenarios incrementando progresivamente el número de terminales conectadas a la red inalámbrica local.

La Tabla 5 presenta el comportamiento general del sistema conforme aumenta el número de nodos IoMT activos dentro de la infraestructura hospitalaria.

Tabla 5

Evaluación de la capacidad de escalamiento de la arquitectura IoMT.

Número de terminales	Actualización promedio (s)	Alertas detectadas	Disponibilidad (%)	Estado del sistema
1	1.00	2	100.0	Estable
2	1.02	4	100.0	Estable
3	1.05	6	99.9	Estable
4	1.09	8	99.8	Estable
5	1.13	10	99.7	Estable

Nota. Evaluación del comportamiento de la arquitectura a medida que aumenta el número de terminales IoMT conectados simultáneamente.

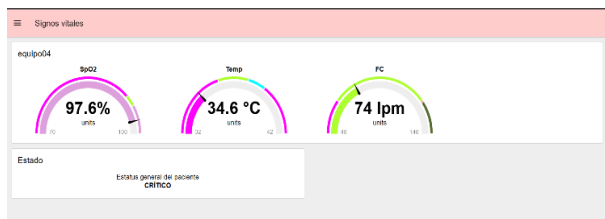
Los resultados muestran que el incremento en el número de terminales produjo únicamente un aumento gradual en el tiempo de actualización de la estación central, manteniéndose siempre cercano a un segundo. Este comportamiento indica que la infraestructura desarrollada conserva una respuesta adecuada para aplicaciones de monitoreo clínico continuo, donde las variables fisiológicas no presentan cambios instantáneos que requieran frecuencias de actualización del orden de milisegundos.

Asimismo, la disponibilidad del sistema permaneció superior al 99.7 % en todos los escenarios evaluados, evidenciando un funcionamiento estable de la arquitectura distribuida incluso cuando múltiples terminales transmitieron información de manera concurrente.

La Figura 7 presenta la interfaz de monitoreo individual implementada en Node-RED. En ella se muestran los indicadores instantáneos de frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, así como el historial temporal de cada variable fisiológica.

Figura 7

Detección automática de condición crítica.

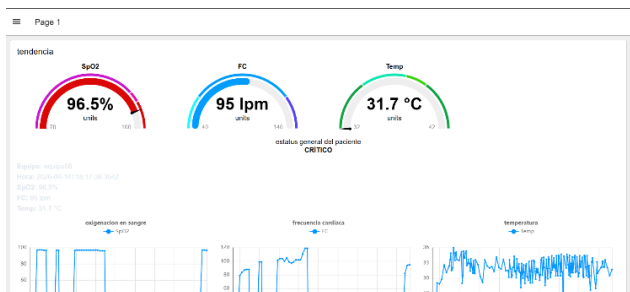


Nota. La estación de monitoreo genera una alerta visual cuando los parámetros fisiológicos exceden los umbrales definidos para frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno o temperatura corporal.

Por otra parte, la Figura 8 muestra la estación central de enfermería desarrollada para la supervisión simultánea de múltiples pacientes. La interfaz integra la información proveniente de todas las terminales IoT conectadas a la red hospitalaria local, permitiendo visualizar de forma centralizada el estado clínico de cada paciente y facilitando la identificación inmediata de eventos que requieren atención médica.

Figura 8

Tendencias temporales de variables fisiológicas.



Nota. Visualización histórica de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal utilizada para el seguimiento clínico continuo del paciente.

Durante las pruebas de funcionamiento, la lógica implementada permitió identificar automáticamente condiciones compatibles con bradicardia, taquicardia, hipoxemia e hipertermia. Cuando alguno de estos eventos fue detectado, el sistema actualizó el estado clínico del paciente y generó alertas visuales en la estación central, reduciendo la necesidad de supervisión individual permanente por parte del personal de enfermería.

Desde la perspectiva de ingeniería, la arquitectura implementada demostró un comportamiento escalable, ya que el incremento progresivo del número de terminales produjo una degradación mínima en los tiempos de actualización y no comprometió la disponibilidad general del sistema. Estas características permiten considerar la propuesta como una plataforma adecuada para entornos hospitalarios de pequeña y mediana capacidad, donde el monitoreo continuo y la respuesta oportuna representan factores críticos para la atención del paciente.

4.4 Comparación con trabajos relacionados

Con el propósito de contextualizar la contribución de la arquitectura desarrollada, se realizó una comparación con trabajos recientes relacionados con sistemas IoT para monitoreo de pacientes. El análisis consideró características funcionales ampliamente reportadas en la literatura, incluyendo la capacidad de supervisión multipaciente, el uso de procesamiento en el borde (Edge Computing), la dependencia de la conexión a Internet, los protocolos de comunicación empleados y el nivel de integración de la infraestructura. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Comparación de la arquitectura propuesta con trabajos recientes sobre monitoreo IoT.

Característica	Ahmed et al. (2024)	Ghubaish et al. (2023)	Wang et al. (2022)	Trabajo propuesto
Monitoreo multipaciente	No	Sí	Sí	Sí
Procesamiento local (Edge Computing)	No	Parcial	Sí	Sí
Operación sin conexión a Internet	No	No	No	Sí
Comunicación MQTT	Sí	Sí	Sí	Sí
Plataforma Node-RED	No	No	No	Sí
Red WiFi local independiente	No	No	Parcial	Sí
Arquitectura modular	Sí	Sí	Sí	Sí

Nota. Comparación elaborada a partir de las características reportadas en trabajos recientes relacionados con arquitecturas IoT para monitoreo de pacientes.

Como puede observarse, la mayoría de las arquitecturas reportadas en la literatura utilizan plataformas basadas en la nube o requieren conectividad permanente a Internet para el procesamiento y almacenamiento de la información clínica. En contraste, la arquitectura propuesta integra el procesamiento local mediante una Raspberry Pi, permitiendo que todas las funciones de adquisición, comunicación, procesamiento y visualización se ejecuten dentro de la infraestructura hospitalaria.

Asimismo, la incorporación de Node-RED como plataforma de integración facilita la supervisión simultánea de múltiples pacientes mediante una interfaz unificada para el personal de enfermería, característica poco reportada en arquitecturas IoT de bajo costo. La combinación de procesamiento local, comunicación mediante MQTT y operación sobre una red WiFi independiente constituye una alternativa orientada a incrementar la disponibilidad del sistema y reducir la dependencia de servicios externos, aspectos particularmente relevantes para hospitales rurales, clínicas comunitarias y escenarios de atención médica en contingencia.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la propuesta desarrollada no solamente implementa una plataforma funcional para el monitoreo de signos vitales, sino que incorpora características arquitectónicas que favorecen la escalabilidad, disponibilidad y autonomía operativa del sistema, diferenciándose de diversas soluciones previamente reportadas.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la arquitectura propuesta constituye una alternativa técnicamente viable para el monitoreo distribuido de signos vitales en entornos hospitalarios con infraestructura tecnológica limitada. A diferencia de numerosas soluciones IoT reportadas en la literatura, cuyo funcionamiento depende de plataformas en la nube o de servicios externos para el procesamiento de la información clínica, el sistema desarrollado concentra todas las funciones de adquisición, comunicación, procesamiento y visualización dentro de una infraestructura local basada en Edge Computing. Esta característica incrementa la disponibilidad operativa del sistema y reduce la dependencia de enlaces externos de comunicación, aspecto especialmente relevante para hospitales rurales, clínicas comunitarias y unidades médicas temporales.

Desde el punto de vista del desempeño de la red, la arquitectura mantuvo tiempos de respuesta estables conforme aumentó el número de terminales conectadas, mostrando un incremento gradual de la latencia sin afectar la continuidad del monitoreo. Este comportamiento indica que la implementación basada en MQTT y una red WiFi local proporciona una comunicación suficientemente eficiente para aplicaciones de vigilancia fisiológica, donde las variables monitoreadas presentan cambios relativamente lentos y no requieren frecuencias de actualización del orden de milisegundos.

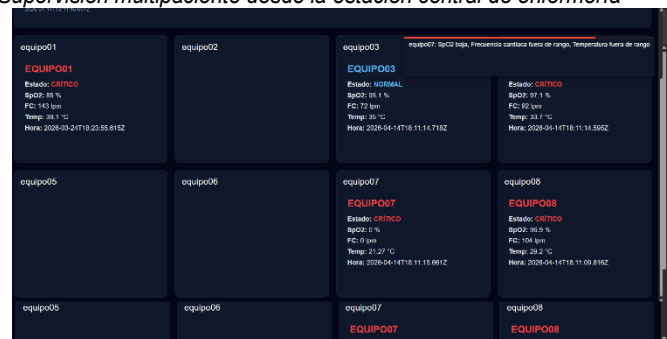
La evaluación de la adquisición fisiológica mostró una elevada concordancia entre las mediciones obtenidas por el sistema IoT y los equipos de referencia utilizados durante la validación. Los bajos valores de error porcentual, MAE y RMSE obtenidos para frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal respaldan la consistencia de la plataforma como herramienta de monitoreo continuo. Si bien el sistema no pretende sustituir equipos médicos certificados para diagnóstico, los resultados indican que puede emplearse como una solución de vigilancia clínica para la detección temprana de alteraciones fisiológicas y el apoyo a la toma de decisiones del personal de enfermería.

La comparación con trabajos recientes permitió identificar que la principal aportación de la propuesta radica en la integración de una arquitectura IoT completamente local, capaz de operar sin conexión a Internet y orientada al monitoreo simultáneo de múltiples pacientes. Mientras que diversas investigaciones se enfocan en el desarrollo de dispositivos individuales o en plataformas dependientes de servicios en la nube, el sistema presentado incorpora una estación central de enfermería que concentra la información proveniente de múltiples terminales mediante una infraestructura distribuida basada en MQTT y Node-RED. Esta integración favorece la escalabilidad del sistema y simplifica su incorporación en ambientes hospitalarios de pequeña y mediana capacidad.

La Figura 9 muestra la interfaz de supervisión multipaciente implementada en la estación central de enfermería. La plataforma permite visualizar en tiempo real el estado fisiológico de todos los pacientes conectados, identificar tendencias históricas y generar alertas automáticas cuando alguno de los parámetros monitoreados excede los umbrales clínicos establecidos. Esta funcionalidad reduce la necesidad de supervisión individual continua y proporciona al personal de salud una visión global del estado de los pacientes bajo monitoreo.

Figura 9

Supervisión multipaciente desde la estación central de enfermería



Nota. Dashboard desarrollado para integrar la información proveniente de múltiples terminales IoT conectadas a la red hospitalaria local.

Aunque los resultados obtenidos respaldan la viabilidad técnica de la arquitectura propuesta, el presente trabajo presenta algunas limitaciones. La validación se realizó bajo un entorno controlado y utilizando un número reducido de terminales IoT, por lo que futuras investigaciones deberán considerar escenarios hospitalarios con un mayor número de pacientes, protocolos clínicos de mayor duración y evaluaciones con usuarios finales. Asimismo, será conveniente incorporar mecanismos de cifrado de extremo a extremo, autenticación de dispositivos y algoritmos de inteligencia artificial que permitan realizar análisis predictivos sobre las variables fisiológicas adquiridas.

En conjunto, los resultados demuestran que la arquitectura desarrollada ofrece una solución escalable, modular y de bajo costo para el monitoreo hospitalario de signos vitales, proporcionando una plataforma tecnológica con potencial para evolucionar hacia sistemas inteligentes de apoyo a la decisión clínica basados en análisis predictivo y procesamiento distribuido.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó, implementó y evaluó una arquitectura basada en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real, orientada a aplicaciones hospitalarias que requieren operación continua sin dependencia de servicios externos. La integración de terminales biomédicas basadas en ESP32, una infraestructura de comunicación mediante MQTT y una estación central implementada sobre Raspberry Pi y Node-RED permitió desarrollar una plataforma distribuida capaz de supervisar simultáneamente múltiples pacientes dentro de una red WiFi local.

La evaluación del sistema demostró que la arquitectura mantiene un comportamiento estable conforme aumenta el número de terminales conectadas, conservando tiempos de actualización adecuados para aplicaciones de monitoreo clínico y una alta disponibilidad de comunicación. Asimismo, la comparación de las mediciones obtenidas con equipos de referencia mostró errores reducidos en la estimación de frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, lo que respalda la consistencia del sistema para tareas de vigilancia fisiológica continua.

Desde la perspectiva de ingeniería, la principal contribución de este trabajo radica en el desarrollo de una arquitectura IoMT completamente local, basada en principios de Edge Computing, capaz de integrar adquisición biomédica, comunicación inalámbrica y visualización centralizada sin requerir acceso a Internet. Esta característica representa una alternativa tecnológica de interés para hospitales rurales, clínicas comunitarias y escenarios donde la conectividad externa es limitada o inexistente.

Finalmente, la naturaleza modular de la plataforma facilita su evolución hacia sistemas hospitalarios inteligentes mediante la incorporación de mecanismos avanzados de ciberseguridad, interoperabilidad con estándares clínicos como HL7 FHIR y algoritmos de inteligencia artificial para el análisis predictivo de eventos fisiológicos. En este sentido, el sistema desarrollado constituye una base tecnológica sólida para futuras investigaciones orientadas a fortalecer la transformación digital de los servicios de salud mediante soluciones IoMT de bajo costo, escalables y adaptadas a las necesidades del entorno hospitalario.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, particularmente al programa educativo de Ingeniería Biomédica y al Laboratorio de Salud Digital y Biorrobótica, por el apoyo académico, técnico y de infraestructura brindado para el desarrollo experimental de esta investigación. Asimismo, se reconoce la participación de estudiantes y docentes involucrados en las etapas de diseño electrónico, manufactura aditiva, integración de software embebido y validación funcional del sistema.

VII. REFERENCIAS

- A, A., Dahan, F., Alroobaea, R., Alghamdi, Wael. Y., Mustafa Khaja Mohammed, Hajje, F., Deema Mohammed Alsekait, & Raahemifar, K. (2023). A smart IoMT based architecture for E-healthcare patient monitoring system using artificial intelligence algorithms. *Frontiers in Physiology*, 14, 1125952. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1125952>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Chen, C.-M., Liu, S., Li, X., Islam, S. H., & Das, A. K. (2023). A provably-secure authenticated key agreement protocol for remote patient monitoring IoMT. *Journal of Systems Architecture*, 136, 102831. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102831>
- Hassanalieragh, M., Page, A., Soyata, T., Sharma, G., Aktas, M., Mateos, G., Kantarci, B., & Andreescu, S. (2015). Health Monitoring and Management Using Internet-of-Things (IoT) Sensing with Cloud-Based Processing: Opportunities and Challenges. *2015 IEEE International Conference on Services Computing*, 285-292. <https://doi.org/10.1109/SCC.2015.47>
- Huang, C., Wang, J., Wang, S., & Zhang, Y. (2023). Internet of medical things: A systematic review. *Neurocomputing*, 557, 126719. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126719>
- Kelly, J. T., Campbell, K. L., Gong, E., & Scuffham, P. (2020). The Internet of Things: Impact and Implications for Health Care Delivery. *Journal of Medical Internet Research*, 22(11), e20135. <https://doi.org/10.2196/20135>
- Naik, N. (2017). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251>
- Shaik, T., Tao, X., Higgins, N., Li, L., Gururajan, R., Zhou, X., & Acharya, U. R. (2023). Remote patient monitoring using artificial intelligence: Current state, applications, and challenges. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 13(2), e1485. <https://doi.org/10.1002/widm.1485>

No.	Rol	Descripción
		<p><i>Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre</i></p> <p><i>Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.</i></p>
1	Conceptualización [Conceptualization]	Mario Salvador Castro Zenil
2	Curación de datos [Data curation]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
3	Análisis formal [Formal analysis]	Mario Salvador Castro Zenil
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Luis Miguel Carreón Silva
5	Investigación [Investigation]	Mario Salvador Castro Zenil
6	Metodología [Methodology]	Luis Miguel Carreón Silva
7	Administración del proyecto [Project administration]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
8	Recursos [Resources]	Luis Miguel Carreón Silva
9	Software [Software]	Mario Salvador Castro Zenil
10	Supervisión [Supervision]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
11	Validación [Validation]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
12	Visualización [Visualization]	Luis Miguel Carreón Silva
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Mario Salvador Castro Zenil
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Mario Salvador Castro Zenil