

Plataforma integral para seguimiento en tiempo real de un prototipo de bombas de infusión peristáltica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

Keyla Mey Martínez Montes de Oca^{1,a}; Remy Fuentes Telleria^{1,b}; Sergio Elias Hoyos^{1,a}; Eynar Calle Viles^{1,c}; Rommer Alex Ortega Martínez^{1,d}

¹ Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia.

^a Estudiante de Ingeniería Biomédica; ^b docente de Ingeniería de Telecomunicaciones; ^c coordinador del Departamento de Investigación; ^d coordinador del Departamento de Investigación Clínica.

RESUMEN

Objetivo: Diseñar e implementar una plataforma integral de seguimiento, trazabilidad y monitoreo en tiempo real de bombas de infusión, la cual integre un prototipo de bomba de infusión peristáltica, con el objetivo de optimizar el monitoreo de la administración de terapias intravenosas y apoyar la eficiencia del personal médico y de enfermería. **Materiales y métodos:** Se desarrolló un prototipo de bomba de infusión peristáltica fabricado mediante impresión 3D, un método que permite la creación precisa y personalizada de componentes con alta resistencia y funcionalidad. El prototipo integra microcontroladores y sensores capaces de detectar anomalías durante la administración de medicamentos, lo que garantiza un control constante del flujo. Paralelamente, se diseñó una plataforma digital con acceso a través de una interfaz web, que permite el monitoreo continuo y en tiempo real de las bombas. Esta solución propuesta, desarrollada en Bolivia, tiene un enfoque de bajo costo, lo que facilita su adopción en contextos donde las opciones comerciales existentes, aunque avanzadas, son menos accesibles por su elevado precio. La propuesta centraliza la supervisión y optimiza los recursos del personal médico. **Resultados:** Se llevaron a cabo múltiples pruebas experimentales para evaluar la precisión del prototipo en comparación con las bombas comerciales estándar mediante el análisis del error porcentual en las tasas de infusión. El prototipo alcanzó un error porcentual permitido, entre -2,68 % y +2,57 %, lo que evidencia su precisión y funcionalidad. Además, la plataforma digital demostró ser eficaz para optimizar el tiempo de monitoreo, lo que permitió al personal de salud concentrarse en actividades prioritarias. **Conclusiones:** La implementación de la plataforma integral y de este primer prototipo de bomba de infusión peristáltica desarrollado representa un avance en el monitoreo de terapias intravenosas en Bolivia. Su diseño de bajo costo lo convierte en una alternativa viable para ampliar el acceso al monitoreo en tiempo real, promover la innovación tecnológica y optimizar los recursos humanos y materiales en el ámbito hospitalario.

Palabras clave: Bombas de Infusión; Impresión Tridimensional; Innovación Tecnológica; Monitoreo; Sensores (Fuente: DeCS BIREME).

Comprehensive platform for real-time tracking of a prototype of peristaltic infusion pump, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

ABSTRACT

Objective: To design and implement a comprehensive platform for the real-time tracking, traceability, and monitoring of infusion pumps, incorporating a prototype of a peristaltic infusion pump, with the purpose of optimizing intravenous therapy monitoring and enhancing the efficiency of medical and nursing staff. **Materials and methods:** A prototype of a peristaltic infusion pump was developed using 3D printing, a method that enables the precise and customized creation of highly durable and functional components. The prototype integrates microcontrollers and sensors capable of detecting anomalies during drug administration, ensuring constant flow control. In parallel, a digital platform was designed with access through a web interface, allowing continuous real-time monitoring of the pumps. This low-cost solution, developed in Bolivia, aims to facilitate implementation in settings where existing commercial systems—although technologically advanced—are less accessible

Correspondencia:

Rommer Alex Ortega Martínez
rommeralexo@gmail.com

Recibido: 6/1/2025

Evaluado: 21/2/2025

Aprobado: 7/4/2025



Esta obra tiene licencia de Creative Commons. Artículo en acceso abierto. Atribución 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Copyright © 2025, Revista Horizonte Médico (Lima). Publicado por la Universidad de San Martín de Porres, Perú.

due to their high cost. The proposed system centralizes supervision and optimizes medical staff resources. **Results:** A series of experimental tests were conducted to evaluate the prototype's accuracy compared to standard commercial infusion pumps by analyzing the percentage error in infusion rates. The prototype achieved an acceptable error range between -2.68 % and +2.57 %, demonstrating its accuracy and functionality. Furthermore, the digital platform proved effective in optimizing monitoring time, enabling healthcare personnel to focus on higher-priority tasks. **Conclusions:** The implementation of this comprehensive platform and the first prototype of a peristaltic infusion pump marks a significant step forward in intravenous therapy monitoring in Bolivia. Its low-cost design makes it a viable alternative for expanding access to real-time monitoring, promoting technological innovation, and optimizing both human and material resources in hospital settings.

Keywords: Infusion Pumps; Printing, Three-Dimensional; Inventions; Monitoring; Sensors (Source: MeSH NLM).

INTRODUCCIÓN

La terapia intravenosa (TIV) es un procedimiento médico utilizado para administrar líquidos directamente en el torrente sanguíneo, a través de la inserción de una aguja o un catéter en una vena. Este método se utiliza para diversos fines, como la hidratación, la administración de medicamentos o el suministro de nutrientes esenciales para el cuerpo humano ⁽¹⁻⁴⁾. Su objetivo principal es minimizar las complicaciones en los pacientes y maximizar la eficacia terapéutica de los tratamientos ⁽⁵⁾.

En este contexto, las bombas de infusión intravenosa se han convertido en tecnologías esenciales dentro de la atención médica ⁽⁶⁾. Estas herramientas proporcionan infusiones al organismo del paciente en volúmenes y presiones controladas ⁽⁷⁾, lo que mejora de manera significativa la eficiencia de los procedimientos de terapia intravenosa. Su uso ha demostrado ser superior en una amplia gama de situaciones clínicas, como la administración de inotrópicos intravenosos, soluciones parenterales y enterales, quimioterapia, analgésicos epidurales continuos, insulina subcutánea y autotransfusión ^(8,9). Este producto sanitario activo está diseñado para regular el flujo de líquidos dentro del paciente mediante un mecanismo eléctrico que genera una presión positiva, lo que asegura un suministro constante y preciso ⁽¹⁰⁻¹²⁾.

A pesar de sus ventajas, en diversos entornos clínicos persisten procedimientos manuales que han derivado en un aumento de errores en la administración de medicamentos intravenosos. Estos errores incluyen dosis incorrectas, volúmenes inadecuados, selección errónea de medicamentos e incompatibilidades farmacológicas, lo que genera efectos adversos en los pacientes ⁽¹³⁻¹⁵⁾. Aunque las bombas de infusión son herramientas clave para garantizar una terapia intravenosa precisa, la falta de seguimiento y trazabilidad, así como la necesidad de monitorear y actualizar parámetros en tiempo real, continúan siendo un desafío que limita la eficiencia operativa del personal médico y de enfermería.

En el ámbito médico, las bombas de infusión desempeñan un papel fundamental. Entre ellas destacan las bombas de infusión peristálticas, que son dispositivos de desplazamiento positivo utilizados para bombear una amplia gama de fluidos ⁽¹⁶⁾. Estos dispositivos permiten administrar líquidos y soluciones de manera constante y precisa ⁽¹⁷⁾. Su funcionamiento se basa en la compresión de una bolsa flexible o un tubo, lo que genera el movimiento del líquido almacenado en un recipiente. Dentro

de esta categoría, se diferencian dos tipos principales: las bombas peristálticas lineales, que comprimen el tubo en línea recta, y las rotatorias, que utilizan un movimiento circular para generar el flujo ⁽¹⁸⁾.

El desarrollo de un prototipo de bomba peristáltica tiene como objetivo optimizar la eficiencia operativa en los hospitales, así como garantizar la calidad y seguridad en la administración de medicamentos y soluciones intravenosas. Este prototipo se complementa con una plataforma de monitoreo en tiempo real, diseñada específicamente para supervisar parámetros clave, como el flujo de infusión y las alarmas generadas ante posibles irregularidades. Aunque esta plataforma no depende exclusivamente del Internet de las cosas médicas (IoMT, por sus siglas en inglés), incorpora sus principios al integrar dispositivos médicos, sensores y redes digitales, lo que facilita la recolección, análisis y transmisión de información en tiempo real ⁽¹⁹⁻²¹⁾. Esta combinación no solo aborda las necesidades clínicas dentro del hospital, sino que también responde a los desafíos cotidianos de los pacientes, como el monitoreo continuo de terapias, lo que contribuye al cuidado y gestión de la salud personal ⁽²²⁾. Además, el IoMT permite ampliar la conectividad y mejorar la eficiencia en los entornos clínicos mediante dispositivos avanzados que recolectan y transmiten datos médicos de forma remota ^(23,24).

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y población de estudio

El diseño del prototipo de bomba de infusión peristáltica se centró en construir un chasis estructural fabricado mediante impresión 3D, que utilizó ácido poliláctico (PLA) como material principal. Este material fue seleccionado debido a su sostenibilidad, durabilidad y adaptabilidad, lo que permitió la creación precisa de componentes personalizados. Para garantizar un diseño eficiente, durante el desarrollo se consideraron factores como resistencia estructural, ergonomía y durabilidad. Asimismo, se realizaron múltiples pruebas y ajustes para validar la precisión dimensional y la compatibilidad con los procesos de impresión 3D. De esta manera, se logró garantizar la estabilidad y funcionalidad del dispositivo.

El prototipo está compuesto por dos módulos principales, cada uno diseñado para cumplir funciones específicas. En primer lugar, el módulo de interfaz de usuario incorpora una pantalla, un teclado y ledes de alarma, lo que facilita una

Plataforma integral para seguimiento en tiempo real de un prototipo de bombas de infusión peristáltica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

interacción intuitiva y permite al personal médico monitorear y gestionar parámetros críticos del sistema. En segundo lugar, el módulo de la bomba peristáltica incluye un sensor magnético de efecto Hall, responsable de monitorear el flujo del líquido con precisión, así como un sistema de detección de burbujas implementado mediante una fotorresistencia (LDR, por sus siglas en inglés) y un módulo láser. Este módulo también integra ranuras y seguros diseñados para garantizar la fijación adecuada del set de infusión, además de un tren de engranajes con una relación de reducción de 9:1, lo que permite optimizar la velocidad y el torque del motor con el fin de mantener un flujo constante y seguro.

Por otra parte, la distribución de los componentes eléctricos dentro del dispositivo fue cuidadosamente planificada para maximizar la accesibilidad, el rendimiento y la seguridad. Cada componente fue ubicado estratégicamente con el fin de optimizar el espacio interno, lo que facilitó tanto el mantenimiento como posibles actualizaciones futuras. La tecnología de impresión 3D permitió crear módulos personalizados y duraderos, que se ajustaron perfectamente a los requerimientos específicos del sistema. De manera complementaria, el diseño incluyó una carcasa protectora destinada a alojar los rodamientos esenciales para el movimiento fluido del líquido, lo que garantizó un funcionamiento eficiente y seguro del dispositivo (Figura 1).

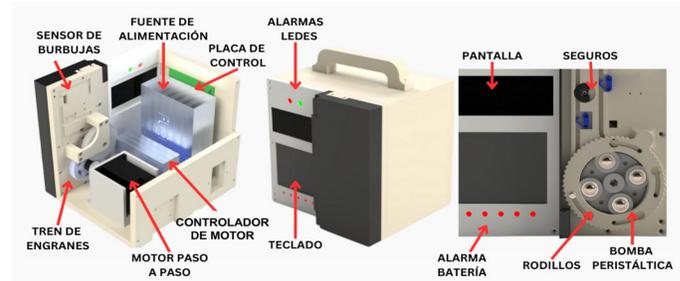


Figura 1. Modelo 3D renderizado de prototipo de bomba de infusión peristáltica con sus componentes externos e internos

Adicionalmente, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario dentro de la plataforma digital Infusense, diseñada para optimizar la gestión y el monitoreo de las bombas de infusión. Este diseño ofrece una experiencia intuitiva y responsiva, lo que permite un acceso rápido y seguro a las funcionalidades del sistema. La interfaz inicia con una página de bienvenida, seguida por un proceso de inicio de sesión que restringe el acceso exclusivamente al personal autorizado. Una vez que los usuarios inician sesión, acceden a un panel de control principal que consolida información clave en un tablero visual. Este panel permite monitorear el estado en tiempo real de los dispositivos, consultar el historial operativo y registrar eventos críticos (Figura 2).

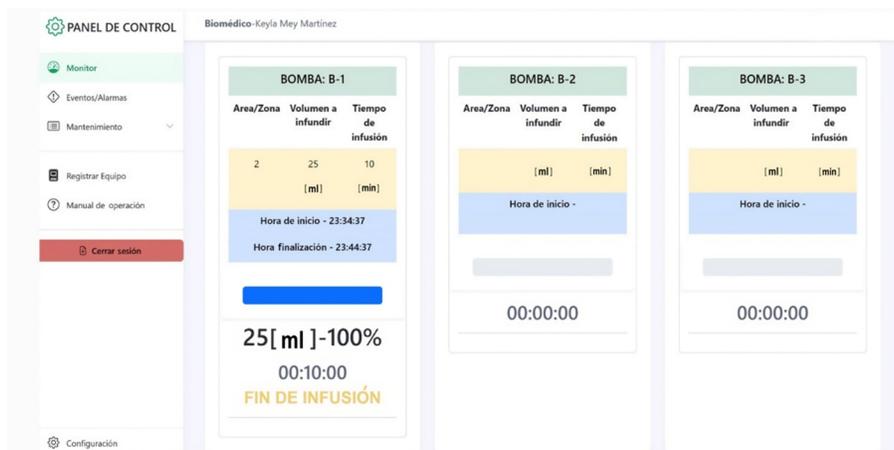


Figura 2. Interfaz gráfica de plataforma digital Infusense: vista del panel de control

Además, la plataforma incluye una sección en la que se visualiza la ficha técnica de la infusión realizada como se puede observar en la Figura 3, donde se visualiza la información correspondiente a la infusión, como el volumen, tiempo, área donde se realizó la infusión, etc. Por otro lado, dentro de los módulos se puede visualizar los eventos y alarmas para gestionar incidencias, lo que facilitará las respuestas rápidas ante situaciones críticas. Asimismo, cuenta con un módulo de mantenimiento que permite programar y

registrar actividades preventivas y correctivas para garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos. La interfaz es escalable y permite gestionar la información de pacientes y usuarios, asignar roles y privilegios, así como registrar nuevos dispositivos al sistema. Por último, incluye manuales de operación, opciones de configuración avanzadas, como el ajuste del servicio Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes (MQTT, por sus siglas en inglés) y una función de cierre de sesión segura para proteger la integridad del sistema.

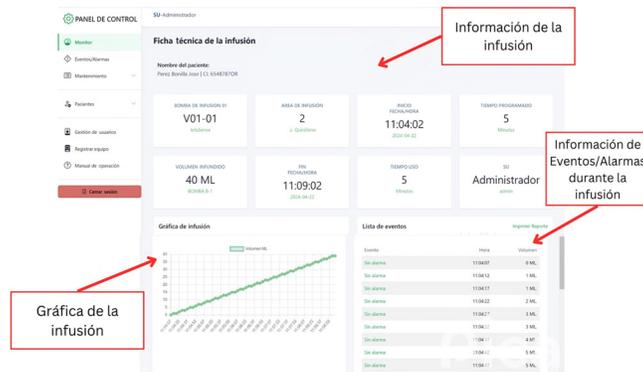


Figura 3. Vista de ficha técnica de una infusión dentro de la plataforma Infusense

En cuanto a la comunicación con la plataforma digital, se implementó un esquema basado en los protocolos MQTT y Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP, por sus siglas en inglés), lo cual permitió optimizar la eficiencia y la funcionalidad del sistema. El protocolo MQTT, conocido por su ligereza y rapidez, opera bajo un modelo de publicación-suscripción gestionado por un intermediario, el bróker Mosquitto, que facilita la interacción entre los dispositivos. Este protocolo es ideal para redes con alta latencia o ancho de banda limitado y es capaz de gestionar hasta 10 000 clientes, con soporte tanto para comunicación unidireccional como para multidifusión, lo que lo convierte en una solución altamente flexible y confiable (25-28). El MQTT fue utilizado para transmitir en tiempo real los datos operativos y alertas generadas por la bomba hacia la plataforma digital, mientras que el protocolo HTTP se empleó para la interacción con la interfaz web, lo que permite a los usuarios visualizar datos, gestionar configuraciones y realizar actualizaciones de *firmware* de manera segura.

El flujo de información inicia cuando la bomba de infusión envía datos mediante el MQTT al bróker Mosquitto, que actúa como núcleo central de las comunicaciones. A continuación, el bróker reenvía la información al sistema central Core Python, encargado de procesar y analizar los datos recibidos mediante algoritmos especializados. Estos datos se almacenan en una base de datos MySQL para registrar eventos y permitir un análisis detallado. De forma paralela, la plataforma digital Infusense, diseñada con una interfaz gráfica intuitiva, permite al usuario monitorear en tiempo real el estado de los dispositivos, gestionar alarmas y realizar mantenimiento preventivo y correctivo, lo que facilita la administración de las bombas de infusión en entornos hospitalarios.

Finalmente, para garantizar la seguridad y la eficiencia en la comunicación de datos, se implementó una infraestructura de telecomunicaciones que incluye un servidor DNS dedicado, configuraciones específicas de IPv4 y una red wifi exclusiva protegida mediante el protocolo WPA2. Esta infraestructura fue diseñada para soportar las interacciones entre dispositivos, lo que asegura una conexión confiable y segura. Adicionalmente, se integró un servidor Apache para manejar aplicaciones web, el cual fue instalado en un equipo con sistema operativo Windows, 16 GB de RAM, procesador i7 de octava generación y

1 TB de almacenamiento, lo que permite optimizar los recursos disponibles dentro de las limitaciones presupuestarias (Figura 4).

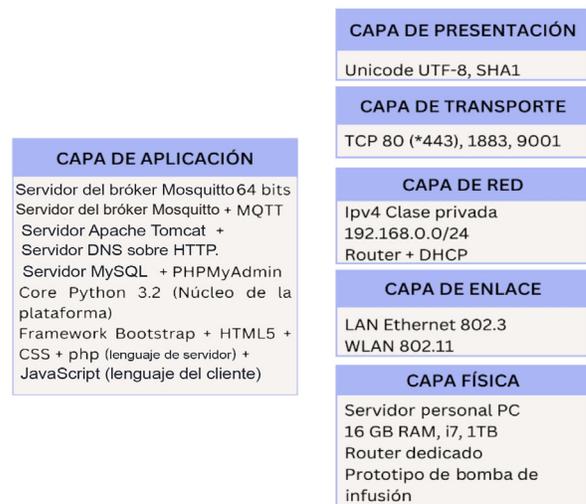


Figura 4. Infraestructura de telecomunicaciones

Cabe mencionar que, en este caso, no se requiere una población de estudio, ya que las pruebas consistieron en comparar el flujo con una bomba de infusión B. Braun, mediante simulaciones de múltiples infusiones para evaluar la precisión y el desempeño del prototipo en condiciones controladas.

Variables y mediciones

Para evaluar el desempeño del prototipo de bomba de infusión peristáltica, se analizaron diferentes aspectos relacionados con su precisión, funcionalidad y conectividad. En primer lugar, la precisión del flujo de infusión se midió utilizando una balanza analítica calibrada, lo que permitió obtener mediciones exactas del líquido administrado por el prototipo. Estas mediciones se compararon con los valores teóricos esperados y con los resultados obtenidos de una bomba comercial B. Braun, mediante simulaciones de múltiples infusiones. Las pruebas se realizaron bajo diferentes condiciones operativas para garantizar la estabilidad y consistencia del flujo. Adicionalmente, se evaluó el desempeño del sistema de detección de burbujas y oclusión,

que emplea una fotorresistencia (LDR) y un módulo láser, con el fin de verificar su capacidad para identificar burbujas en el líquido infundido, por medio de la simulación de irregularidades en la línea de infusión y la presencia del flujo en la cámara de goteo.

Por otro lado, se analizó la conectividad y transmisión de datos, con una evaluación de parámetros clave como la latencia, la estabilidad de la conexión y la pérdida de datos. Estas pruebas se realizaron para validar el correcto funcionamiento de los protocolos MQTT y HTTP, los cuales son responsables de garantizar una comunicación constante y en tiempo real entre el dispositivo y la plataforma digital Infusense. Además, se verificó la fiabilidad del tren de engranajes con una relación de reducción de 9:1, para analizar su capacidad de mantener un torque y velocidad consistentes durante operaciones prolongadas. De esta manera, se aseguró un flujo continuo y uniforme del líquido infundido. Finalmente, se comprobó la compatibilidad dimensional de los componentes impresos en 3D con los módulos electrónicos y mecánicos, lo que garantizó su correcto ensamblaje y funcionalidad conjunta.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales se analizaron mediante herramientas de análisis descriptivo y pruebas de hipótesis. Para evaluar la precisión del flujo de infusión, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95 %, que permitió comparar las tasas de flujo del prototipo con las de una bomba comercial estándar. Se consideró que la precisión del prototipo debía cumplir con un

error porcentual máximo de ± 3 %, según lo establecido en la norma IEC 60601-2-24, que regula la seguridad y el desempeño de equipos de infusión intravenosa.

Consideraciones éticas

El desarrollo y las pruebas del prototipo se llevaron a cabo respetando los principios éticos aplicables al diseño de dispositivos médicos. Todas las pruebas se realizaron en entornos controlados y simulados, sin involucrar a pacientes humanos ni emplear material biológico.

Se implementaron medidas para garantizar la seguridad de los datos generados durante las pruebas, y se incluyeron protocolos de confidencialidad para el manejo de la información almacenada en la plataforma digital. Este proyecto fue aprobado por la Dirección General del Hospital Univalle Norte, en coordinación con el Servicio de Enfermería y de Ingeniería Biomédica, con fecha 8 de abril de 2024. El objetivo principal consiste en contribuir al avance tecnológico en el ámbito de la salud, con la finalidad de que su implementación futura se alinee con las normativas éticas y regulatorias vigentes para dispositivos médicos.

RESULTADOS

Protocolo de prueba de aceptación

Los protocolos de pruebas de aceptación (ATP) son esenciales para asegurar la calidad y validar tanto la plataforma digital como el prototipo de bomba de infusión en este proyecto. Los ATP verifican que el sistema integrado cumpla con las especificaciones técnicas y satisfaga las necesidades operativas previstas (Tabla 1).

Tabla 1. Pruebas protocolo de prueba de aceptación (ATP)

Componente	Prueba realizada	Pruebas ATP	
		Resultado esperado	Resultado obtenido
Prototipo bomba de infusión peristáltica	Verificación de ensamblaje	Todos los componentes están correctamente montados	Correctamente montados
Prototipo bomba de infusión peristáltica	Funcionalidad básica	Operación correcta según las especificaciones	Operación correctamente realizada
Plataforma digital	Instalación del software	Software y base de datos correctamente instalados	Instalación exitosa
Plataforma digital	Funciones de usuario	Funcionamiento sin errores de registro y configuración	Funcionamiento correcto y fluido
Comunicaciones	Conectividad MQTT y HTTP	Comunicaciones estables y sin interrupciones	Comunicación estable
Comunicaciones	Pruebas de transmisión de datos	Transmisión de datos fiable y segura	Transmisión segura confirmada
Simulación de fallos	Evaluación de la recuperación de errores	Recuperación adecuada y registro de fallos	Recuperó rápidamente los fallos simulados, con activación de alarmas y registro de eventos en menos de 5 s
Interfaz y Usabilidad	Evaluación de la interfaz de usuario	Facilidad de uso y respuesta adecuada	Los usuarios reportaron una alta satisfacción con la interfaz

Evaluación de pruebas de laboratorio

En las pruebas de laboratorio, se realizaron múltiples infusiones con diversos volúmenes y tiempos para evaluar el porcentaje de error del sistema. Los resultados demostraron que el error se mantenía dentro del rango de tolerancia permitido por la

norma IEC 60601-2-24 para bombas de infusión. A continuación, se muestra la Figura 5, que ilustra estos resultados y destaca la precisión y la fiabilidad del dispositivo en condiciones de prueba controladas.

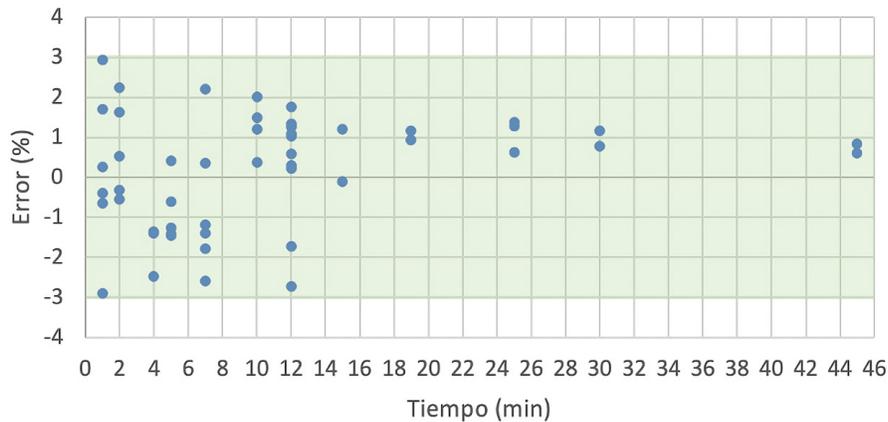


Figura 5. Gráfica de error porcentual en pruebas realizadas por el prototipo

Por otro lado, en la evaluación del prototipo de bomba de infusión conforme a la norma IEC 60601-2-24, se estableció un protocolo de prueba que consistió en administrar 5 ml por minuto durante 60 minutos. Se definieron intervalos específicos para analizar la precisión de dosificación; se midió el volumen infundido en intervalos de 2, 5, 11, 19 y 31 minutos, y se calcularon los errores acumulativos con el fin de verificar la conformidad con el umbral de tolerancia de error del 3 %.

Los resultados indicaron una mejora en la precisión conforme aumentaba la duración del intervalo observado. Los errores máximo y mínimo se aproximaron a cero en intervalos más largos, lo que evidenció una mayor estabilidad y precisión del dispositivo. Esta tendencia se visualizó efectivamente en una gráfica de trompeta, que destacó la disminución de la variabilidad y el aumento de la consistencia del rendimiento a medida que se extendían los periodos de observación (Figura 6).

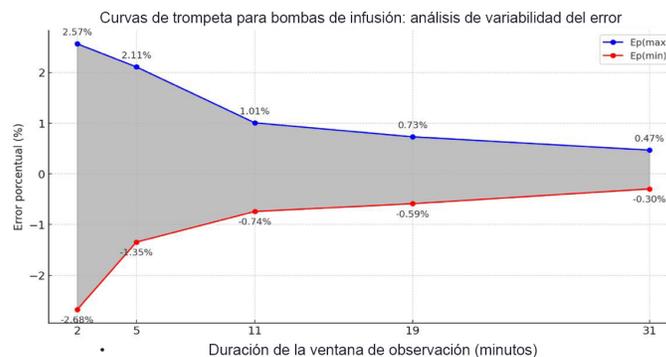


Figura 6. Curva de trompeta, análisis de variabilidad del error

Evaluación de pruebas de campo

La evaluación se llevó a cabo en el Hospital Univalle Norte de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. Se desarrollaron pruebas de campo para evaluar el funcionamiento del prototipo de bomba de infusión peristáltica, con el objetivo de verificar su cumplimiento con el rango de tolerancia aceptado. Se emplearon una bomba volumétrica peristáltica B. Braun (Infusomat® Compact 100) y suero fisiológico al 0,9 %. Las

pruebas se realizaron en presencia de personal médico especializado en cuidados intensivos, ingenieros delegados y la jefa de enfermería, quien participó como observadora crítica. Los resultados confirmaron que el prototipo entregaba volúmenes dentro del rango de tolerancia de error de $\pm 3\%$ (Figura 7). Los datos registrados en la Tabla 2 y la Tabla 3 detallan los volúmenes y porcentaje de error, lo que permitió evaluar la viabilidad y fiabilidad del dispositivo.

Tabla 2. Valores obtenidos entre ambos dispositivos

Volumen establecido (ml)	Tiempo (min)	Volumen de bomba de infusión estándar (ml)	Volumen de bomba de infusión prototipo (ml)
20	2	19,770	19,419
20	2	19,761	19,489
40	5	39,449	39,261
40	5	39,649	39,363
60	11	59,419	58,974
60	11	59,003	58,993

Tabla 3. Porcentajes de error de ambas bombas de infusión

Error porcentual de bomba estándar (%)	Error porcentual de bomba prototipo (%)
1,15	2,91
1,69	2,56
1,38	1,84
0,88	1,59
0,96	1,71
1,66	1,67



Figura 7. Pruebas de validación realizadas en el Hospital Univalle Norte

DISCUSIÓN

La implementación del IoMT y el uso del protocolo MQTT han sido elementos clave en la conceptualización y el desarrollo del prototipo de bomba de infusión peristáltica. El objetivo principal de esta tecnología radica en su capacidad de monitoreo en tiempo real, aspecto crucial para la administración eficiente y segura de terapias intravenosas en entornos clínicos. La integración de la IoMT en el prototipo ha mejorado el seguimiento y el control de las funciones del dispositivo, lo que ha permitido una mayor adaptación a las necesidades específicas de los pacientes, y ha optimizado la capacidad del personal médico para responder rápidamente ante cualquier eventualidad. Sin embargo, la incorporación de estas tecnologías ha presentado desafíos, especialmente en términos de seguridad de los datos y la integración con sistemas existentes. La protección de la información del paciente ha sido una prioridad. Se implementaron medidas estrictas para garantizar la seguridad de todas las transmisiones de datos, en cumplimiento con las normativas de privacidad y seguridad, mediante el uso de cifrado y autenticación en las comunicaciones basadas en el protocolo MQTT.

En comparación con otros prototipos desarrollados previamente, se destacan avances significativos. Por ejemplo, en Medellín, Colombia, se diseñó un prototipo de bomba de infusión que dosificaba caudales con tasas de administración máxima y mínima de 3,4 mL/min y 1,1 mL/min, respectivamente, y que alcanzó una precisión del 10 %. En contraste, el presente trabajo logró mantener un error porcentual permitido entre -2,68 % y +2,57 %, lo que mejoró considerablemente la precisión en la administración de fluidos ⁽²⁹⁾.

Se estima que aproximadamente el 90 % de los pacientes hospitalizados reciben medicamentos intravenosos a través de bombas de infusión, las cuales son tecnologías esenciales en la atención médica. Por ello, resulta fundamental evaluar su utilidad clínica, el riesgo de errores en la administración de medicamentos intravenosos y la seguridad del paciente asociado a estos dispositivos, especialmente en el caso de bombas inteligentes o con monitoreo remoto. Se requiere atender estos desafíos mediante la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías que prioricen los factores humanos en su diseño y operación ⁽²⁹⁾.

Tras múltiples pruebas realizadas al prototipo desarrollado, se verificó que este opera dentro de la tolerancia permitida de ± 3 %, y que cumple con la norma IEC 60601-2-24. Además, la implementación de una plataforma digital de seguimiento y monitoreo en tiempo real ha demostrado ser una solución viable, ya que mejora la eficiencia operativa y reduce la necesidad de supervisión constante por parte del personal médico. Los componentes seleccionados y el diseño tridimensional del chasis aseguraron tanto la funcionalidad como la rentabilidad del dispositivo.

A pesar de los avances alcanzados, se identificó la necesidad de mejorar ciertos aspectos, como la portabilidad del dispositivo para su uso en situaciones de emergencia, el tamaño y el nivel de ruido generado. Las pruebas de calibración se realizaron utilizando agua destilada, conforme a las recomendaciones de la norma, así como suero fisiológico. Los resultados confirmaron la precisión y consistencia del sistema en diversas condiciones. Este prototipo ha demostrado beneficios evidentes, particularmente en términos de costos y facilidad de adaptación a la interfaz, en comparación con dispositivos comerciales. Sin embargo, se recomienda realizar más pruebas de validación para concretar una eventual comercialización local y perfeccionar detalles técnicos identificados durante las pruebas iniciales.

En consecuencia, la implementación de estos prototipos en prueba exige una evaluación prolija por parte del personal de salud. Además, como parte de su validación, es pertinente el contraste con otros dispositivos ya validados y, sobre todo, con aquellos que se encuentran en uso dentro del ámbito sanitario. Desafortunadamente, al ser un equipo en prueba, presenta la limitación de su aplicación en pacientes reales en comparación con los dispositivos estándar. Sin duda, esta constituye una de las aspiraciones para continuar con su legitimación y, de este modo, demostrar más beneficios tanto en el aspecto médico como en el económico de este dispositivo innovador.

En conclusión, este prototipo representa un avance significativo en la innovación tecnológica aplicada a la salud, al ofrecer una alternativa viable y accesible frente a los dispositivos comerciales existentes. Sus características de diseño y su bajo costo lo convierten en una opción ideal para su implementación en regiones con recursos limitados. Las futuras investigaciones deben enfocarse en validar clínicamente el dispositivo y

mejorar sus características, con el objetivo de facilitar su comercialización local y expansión en el ámbito médico.

Contribución de autoría: KMMMO y RAOM participaron en la recolección de datos, el análisis de resultados, la discusión, la metodología y la revisión final del artículo. Además, RFT y ECV colaboraron en la discusión, la metodología y la revisión final del artículo. Asimismo, SEH desarrolló el análisis de resultados, la discusión, la metodología y la revisión final del artículo.

Fuentes de financiamiento: Los autores financiaron este artículo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amarilla-Tostado Y, Gomà-Freixes E, Gastelo-Anhuamán M, Fernández-Bombin A, Llauro-González MA, Sampedro-Sanchis B. Implementación de un programa de terapia intravenosa en pacientes nefrológicos: análisis de los resultados. *Enferm Nefrol* [Internet]. 2024;27(1):56-61. Disponible en: <https://doi.org/10.37551/S2254-28842024007>
2. Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de Andalucía. Guía de Práctica Clínica sobre Terapia Intravenosa con Dispositivos no Permanentes en Adultos [Internet]. Sevilla: AETSA; 2018. Disponible en: https://portal.guiasalud.es/wp-content/uploads/2018/12/GPC_541_Terapia_intravenosa_AETSA_compl.pdf
3. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. Guía de Práctica Clínica sobre Terapia Intravenosa con Dispositivos no Permanentes en Adultos. Versión resumida [Internet]. Sevilla: AETSA; 2014. Disponible en: https://www.aetsa.org/download/publicaciones/AETSA_2011-3_GPCTIV-resumida_final_8_03_20151.pdf
4. Resendiz M, Muñoz TJ. Nivel de conocimientos y práctica adquiridos durante un curso-taller de terapia intravenosa. *Enferm Glob* [Internet]. 2012;11(26):237-45. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4321/S1695-61412012000200015>
5. Instituto de Efectividad Clínica y Sanitaria. Bombas de infusión parenteral en internación general [Internet]. Buenos Aires: IECS; 2020. Disponible en: <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2021/12/1349042/iecs-irr-756.pdf>
6. Tobón C, Higueta N, Torres RA. Diseño y construcción del prototipo de una bomba de infusión tipo PCA para la administración de medicamentos. *CES Med* [Internet]. 2003;17(2):31-5. Disponible en: <https://revistas.ces.edu.co/index.php/medicina/article/view/555/0>
7. García Álvarez MB, Pillajo Pillajo S. Protocolo de manejo correcto de bombas de infusión [Internet]. Santo Domingo: Ministerio de Salud Pública, Hospital Dr. Gustavo Domínguez Zambrano; 2023. Disponible en: https://www.hgdz.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/MANEJO_BOMBAS_INFUSION-final.-signed-signed-signed-signed-signed-signed-signed.pdf
8. Toribio R. Bombas de infusión externas [Internet]. Plasencia: Área de Salud Plasencia; 2008. Disponible en: <http://areasaludplasencia.es/wasp/pdfs/7/717004.pdf>
9. Alvia K. Entrenamiento en bombas de infusión [Internet]. Chone: Hospital General Napoleón Dávila Córdova; 2015. Disponible en: <https://hospitalgeneralchone.gob.ec/wp-content/uploads/2015/10/si-ENTRENAMIENTO-EN-BOMBAS-DE-INFUSI%C3%93N.pdf>
10. Manrique-Rodríguez S, Fernández-Llamazares C, Herranz-Alonso A, Sanjurjo-Sáez M. Bombas de infusión inteligentes: luces y sombras de una tecnología en desarrollo. *Med Clin (Barc)* [Internet]. 2011;137(8):361-5. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.016>
11. Martins Wilson AMM, Peterlini MA, Pedreira M. Bombas de infusión y

Plataforma integral para seguimiento en tiempo real de un prototipo de bombas de infusión peristáltica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

- lesión celular en glóbulos rojos en la terapia transfusional: revisión integradora de la literatura. *Rev Latino-Am Enfermagem* [Internet]. 2016;24:e2763. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1518-8345.1155.2763>
12. Macías M, Solís L. Errores en la administración de medicación en un servicio de urgencias: conocer para disminuir el riesgo. *Rev Esp Salud Publica* [Internet]. 2018;92:e201806038. Disponible en: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272018000100210
 13. Rojas-Marín MZ, Castillo-Penagos CD, Orduz-Díaz YD, Segura-Suárez MA. Estrategias para la prevención de errores en la administración de medicamentos intravenosos. *Investig Enferm Imagen Desarro* [Internet]. 2021;23. Disponible en: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ie23.epea>
 14. Saucedo-Becerra A, Serrano-Flores FE, Flores-Arcos V, Morales-Olarte E, Santos-García A. Errores frecuentes en la administración de medicamentos intravenosos en pediatría. *Rev Enferm Inst Mex Seguro Soc* [Internet]. 2008;16(1):19-26. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/enfermeriaimss/eim-2008/eim081e.pdf>
 15. López C. Diseño y fabricación de bomba peristáltica basada en motores paso a paso [tesis de pregrado]. Sevilla: Universidad de Sevilla; 2015. Disponible en: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/20911b63-628c-44f4-9f80-56ec4f879b2c/content>
 16. Ochoa Y. Bombas de infusión [tesis de pregrado]. Cuenca: Universidad del Azuay; 2013. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/2194/1/09656.pdf>
 17. Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. Guía tecnológica No. 1: Sistemas de infusión [Internet]. México: CENETEC; 2004. Disponible en: http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/biomedica/guias_tecnologicas/1gt_bombas.pdf
 18. Tunç MA, Gures E, Shayea I. A survey on IoT smart healthcare: emerging technologies, applications, challenges, and future trends [Internet]. arXiv preprint arXiv:2109.02042; 2021. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2109.02042>
 19. Chango W, Olivares T, Delicado F. Topologías en el internet de las cosas médicas (IoMT), revisión bibliográfica. *Rev Tecnol ESPOL* [Internet]. 2022;34(4):120-36. Disponible en: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.960>
 20. Gonzales JC. IoMT: presente y futuro para la medicina del Internet de las Cosas [Internet]. Madrid: Inrobics; 2023. Disponible en: <https://inrobics.com/iomt-presente-futuro-medicina-internet-de-las-cosas/>
 21. Danel OO. Internet de las cosas en salud IoMT-octubre 2020 [preprint]. ResearchGate [Internet]. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23348.27520>
 22. Huang C, Wang J, Wang S, Zhang Y. Internet of medical things: a systematic review. *Neurocomputing* [Internet]. 2023;557:126719. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126719>
 23. Rodríguez Rodríguez I, Campo Valera M, Rodríguez JV. El internet de las cosas médicas (IoMT): una revolución tecnológica aplicable a la gestión de la diabetes mellitus tipo 1 [Internet]. 1.ª ed. Málaga: UMA Editorial; 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.24310/mumaedmumaed.5>
 24. de la Cal J. Control domótico basado en el protocolo MQTT [tesis de pregrado]. Valladolid: Universidad de Valladolid; 2019. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/37826/TFG-I-1319.pdf?sequence=1>
 25. Chambers L. Arquitectura orientada a eventos sobre protocolo MQTT [tesina de licenciatura]. La Plata: Universidad Nacional de La Plata; 2021. Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/130301/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 26. Moreno R. Desarrollo de una aplicación IoT para la gestión de un hogar inteligente mediante el protocolo MQTT y sistemas en chip (SoC) ESP32 [tesis de Pregrado]. Valencia: Universitat Politècnica de València; 2020. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/152402>
 27. Pitarch J. Seguridad en redes de ámbito médico con dispositivos IoMT [tesis de pregrado]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; 2023. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/394171>
 28. Saldarriaga C, Rodríguez SE, Velásquez AA. Diseño y construcción de un prototipo funcional de una bomba de infusión peristáltica circular. *Rev Colomb Fis* [Internet]. 2011;43(2):354-9. Disponible en: <https://goo.su/NXD5>
 29. Giuliano KK. Intravenous smart pumps: usability issues, intravenous medication administration error, and patient safety. *Crit Care Nurs Clin North Am* [Internet]. 2018;30(2):215-24. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cnc.2018.02.004>