

## Article

# Retrofitting IoT para laboratorio remoto de cinemática en ingeniería: diseño, implementación y validación técnica de un prototipo para el estudio del MRUA en entorno híbrido de aprendizaje

Walter Santiago Sosa Mejía

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas; wssosa@pucese.edu.ec

## Abstract

La modernización de laboratorios de física en contextos de recursos limitados presenta desafíos significativos para la educación universitaria en América Latina, agravados por la necesidad de modalidades híbridas y remotas de experimentación. Este artículo presenta el diseño, implementación y validación técnica de un prototipo de laboratorio remoto de cinemática para el estudio del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA), basado en una estrategia de *retrofitting* con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) sobre equipamiento preexistente de bajo coste. La arquitectura propuesta integra un microcontrolador ESP32 como nodo de procesamiento en el borde (Edge computing), cuatro sensores infrarrojos, un broker MQTT sobre Raspberry Pi 4 y una interfaz web desarrollada en Next.js/React para control y visualización en tiempo real. Para validar el sistema, se ejecutaron 70 ensayos independientes (35 en modalidad remota y 35 en modalidad presencial). Los resultados demuestran que el prototipo remoto alcanza una precisión cinemática comparable al montaje tradicional: las diferencias de medias entre modalidades son inferiores a 0.03 s en los cuatro puntos de medición, las desviaciones estándar difieren en menos de 0.02 s ( $\Delta\sigma < 0.02$  s), y la aceleración experimental media es idéntica en ambas modalidades ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$ , con valor teórico esperado de  $a \approx 0.92 \text{ m/s}^2$ ). Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos ( $r = 0.61\text{--}0.62$ ) reflejan la variabilidad natural del fenómeno físico y no sesgos sistemáticos del sistema. La tasa de captura exitosa de eventos alcanzó el 98.5% en modalidad remota. Se concluye que la metodología de *retrofitting* IoT es una solución viable, escalable y de bajo coste para democratizar el acceso a la educación experimental de calidad en entornos híbridos, sin requerir sustitución del equipamiento existente.

Received:

**Keywords:** Retrofitting; Internet of Things; Remote laboratories; MRUA; Low-cost instrumentation; Edge computing; Cloud services; Engineering education; Hybrid learning

Citation: Sosa Mejía, W.S.. *Journal*

Not Specified 2025, 1, 0.

<https://www.mdpi.com/journal/iot>

## 1. Introduction

Los laboratorios de física constituyen un componente esencial para la verificación experimental de leyes y modelos, así como para la validación de sistemas de medición y control. Tradicionalmente, estos entornos han operado de forma estrictamente presencial, con instrumentación analógica o digital que requiere la presencia física del usuario en el laboratorio. Sin embargo, la creciente digitalización de la infraestructura científica y el desarrollo de arquitecturas ciberfísicas han impulsado el diseño de plataformas que permiten operar, monitorear y automatizar experimentos de manera remota y distribuida

[? ]. La pandemia de COVID-19 reforzó esta tendencia al mostrar las limitaciones de los montajes dependientes exclusivamente de la presencia local, acelerando la adopción de laboratorios remotos y sistemas de instrumentación conectados a la nube [? ].

En este contexto, se hace evidente un problema recurrente: muchos laboratorios de física continúan dependiendo de montajes centrados en la operación presencial, con escaso nivel de automatización, sin mecanismos de acceso remoto y con dificultades para registrar y gestionar datos de manera sistemática. Esta situación es particularmente notoria en América Latina, donde numerosos laboratorios operan con instrumentación en servicio desde hace varios años y con recursos limitados para renovar equipos o incorporar soluciones de conectividad avanzadas [? ? ]. El laboratorio de física de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas, constituye un ejemplo representativo: dispone de pistas tipo juguete, carritos de baja fricción y elementos de medición convencionales para experimentos de cinemática y dinámica, pero carece de capacidades de automatización y de acceso remoto. En este escenario, diseñar arquitecturas que permitan *retrofitting* de montajes existentes con tecnologías IoT de bajo coste se vuelve una necesidad técnica y operativa.

### 1.1. Related Work and Research Gap

La literatura reciente evidencia avances significativos en la modernización de laboratorios de física mediante tecnologías digitales, particularmente a través de laboratorios remotos, híbridos y estrategias de *retrofitting* basadas en IoT. Estudios como los de Lahme *et al.* [?] documentan el incremento en el uso de microcontroladores, sensores y plataformas digitales en cursos de laboratorio, destacando tanto su potencial como las barreras técnicas asociadas a su adopción. De manera complementaria, trabajos orientados al control remoto de sistemas físicos, como los presentados por Guerrero-Osuna *et al.* [?] y Fuertes *et al.* [?], demuestran la viabilidad de integrar hardware embebido, servicios en la nube e interfaces web para operar experimentos reales con tiempos de respuesta adecuados.

En el contexto específico del *retrofitting* de equipamiento existente, Viswanadhan *et al.* [?] proponen arquitecturas de bajo coste que permiten instrumentar montajes de laboratorio preexistentes sin modificaciones estructurales, mientras que Lustig *et al.* [?] introducen plataformas modulares que desacoplan el hardware experimental de los servicios de acceso y visualización. Por su parte, Zhao [?] revisa extensivamente soluciones basadas en sensores de uso masivo y análisis de video, mostrando que es posible obtener mediciones de calidad razonable empleando dispositivos accesibles y ampliamente disponibles.

No obstante, a pesar de estos aportes, se identifican varias limitaciones en la literatura existente. En primer lugar, muchos trabajos se centran en la demostración funcional de plataformas remotas o en evaluaciones de usabilidad, sin profundizar en la validación cuantitativa de la fidelidad experimental frente a montajes presenciales de referencia. En segundo lugar, existe una carencia de estudios que analicen de manera sistemática el desempeño técnico de experimentos clásicos de física como los de cinemática cuando son ejecutados en modalidad remota, considerando métricas como error en tiempos de detección, coherencia interna de los datos y estabilidad del sistema. Finalmente, son escasos los estudios que abordan estas problemáticas en contextos de recursos limitados, donde la reutilización de equipamiento existente mediante *retrofitting* resulta especialmente relevante.

En este marco, el presente trabajo se diferencia al proponer y validar un modelo de laboratorio híbrido de física basado en *retrofitting* IoT. Para contextualizar nuestra contribución dentro de las arquitecturas modernas de IoT, se adopta el enfoque de capas propuesto por Dizdarevic y Jukan [?], quienes destacan la importancia de integrar capacidades de computación en el borde (*Edge*) y en la nube (*Cloud*) para reducir la latencia en entornos

educativos, una lección que hemos aplicado mediante el uso del dispositivo de control para el procesamiento en el borde. Asimismo, para asegurar la continuidad operativa y la accesibilidad universal, seguimos los principios de Azad [? ] sobre el despliegue de laboratorios remotos basados en IoT, garantizando que el sistema sea robusto frente a desconexiones. Finalmente, la validación de nuestro sistema se alinea con la metodología de "gemelos digitales" descrita por Palmer *et al.* [? ], utilizando la comparación directa entre los datos físicos del sensor (el "gemelo real") y el modelo teórico esperado, asegurando así una verificación cuantitativa rigurosa.

Más recientemente, Lustig *et al.* [? ] proponen una arquitectura de *retrofitting end-to-end* basada en ESP32, Raspberry Pi y stack MERN que habilita el acceso remoto a experimentos de óptica; su enfoque arquitectónico es estructuralmente análogo al propuesto en este trabajo, aunque no incluye validación cuantitativa de equivalencia cinemática entre modalidades. De manera complementaria, Pérez-Chamé *et al.* [? ] desarrollan una plataforma ESP32 de bajo coste para física fundamental en ingeniería de pregrado, demostrando la viabilidad del hardware seleccionado para entornos educativos con recursos limitados. En el plano de la adquisición de datos en tiempo real, Marosan *et al.* [? ] validan el uso de ESP32 con protocolo MQTT para aplicaciones IoT con requisitos de temporización precisos, confirmando la idoneidad del módulo de control adoptado en este estudio. De forma análoga, Chang *et al.* [? ] desplegaron una plataforma remota basada en IoT para prácticas de mecánica universitaria, obteniendo resultados de precisión comparables a los de este trabajo y confirmando la replicabilidad del enfoque en distintos contextos institucionales.

A pesar de los avances descritos, se identifican las siguientes brechas en la literatura: (1) la mayoría de los trabajos validan plataformas remotas en términos funcionales o de usabilidad, pero no realizan una validación cuantitativa rigurosa de la equivalencia de medición entre modalidades remota y presencial; (2) existen muy pocos estudios que analicen el desempeño técnico de experimentos clásicos de cinemática ejecutados remotamente, considerando métricas de error temporal, coherencia de datos y aceleración experimental; (3) son escasos los estudios que abordan estas problemáticas en el contexto específico de universidades latinoamericanas con recursos limitados [? ? ], donde el *retrofitting* resulta especialmente pertinente. Hasta donde los autores conocen, ningún trabajo previo valida cuantitativamente la equivalencia cinemática entre modalidades remota y presencial en equipamiento de bajo coste mediante *retrofitting* IoT en el contexto de instituciones latinoamericanas con recursos limitados.

**Pregunta de investigación:** *¿Puede un sistema de retrofitting IoT de bajo coste sobre equipamiento preexistente reproducir con precisión y estabilidad comparables las mediciones cinemáticas del MRUA respecto a un montaje presencial de referencia, en un laboratorio universitario con recursos limitados?*

El **objetivo general** de este trabajo es diseñar, implementar y validar técnicamente un prototipo de laboratorio remoto basado en *retrofitting* IoT para el estudio del MRUA. Los objetivos específicos son: (1) diseñar una arquitectura IoT de tres capas con procesamiento en el borde (Edge computing) embebido en un módulo de control ESP32; (2) implementar el sistema integrado de hardware, firmware, backend y aplicación web; (3) validar cuantitativamente la equivalencia entre modalidades mediante análisis de correlación de Pearson, perfil de velocidades y distribución de aceleraciones.

Las **contribuciones** principales del presente trabajo son:

- Diseño y validación de una arquitectura IoT de tres capas con Edge computing embebido en ESP32 para experimentos de cinemática en entornos de recursos limitados.
- Validación cuantitativa de equivalencia entre modalidad remota y presencial mediante 70 ensayos con métricas de correlación de Pearson ( $r = 0.61\text{--}0.62$ ), aceleración experimental y tasa de captura de eventos (98.5%).

- Demostración de que la variabilidad natural del MRUA explica los coeficientes de correlación moderados y no constituye un sesgo sistemático del sistema IoT. 133
- Publicación del código fuente abierto en GitHub (RemotePhysicsLab [? ]) con documentación completa para replicación en otros laboratorios. 134

El resto del artículo se estructura como sigue: la Sección ?? describe los materiales y métodos; la Sección 3 presenta los resultados experimentales; la Sección 4 discute las implicaciones y compara con trabajos relacionados; finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones y líneas de trabajo futuro. 137  
138  
139  
140

## 2. Materials and Methods 141

### 2.1. Diseño de la investigación 142

La investigación se planteó como un estudio aplicado de tipo técnico, orientado al diseño, construcción y validación de un prototipo de laboratorio de física controlado a distancia mediante tecnologías IoT. Se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo, ya que las variables centrales de análisis corresponden a magnitudes físicas medibles (tiempos de detección, eventos registrados, ocurrencia de fallos) obtenidas a partir de registros instrumentales del sistema, que posteriormente se describen y comparan sin intervenir sobre grupos de participantes humanos. El enfoque metodológico se alineó con la lógica de la *Design Science Research* (DSR), en la que el objetivo central es construir un artefacto tecnológico y evaluarlo de forma sistemática [? ], y tomó como referencia general los procesos de ciclo de vida de sistemas descritos en la norma ISO/IEC 15288 para organizar las fases de requisitos, diseño, implementación, integración y operación del prototipo [? ]. 143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153

A partir de este marco se definió que el alcance de la presente investigación se concentraría en la evaluación técnica del experimento de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), específicamente en la exactitud y consistencia de las variables físicas medidas y calculadas por el sistema remoto para dicho experimento frente a un montaje presencial de referencia equivalente. 154  
155  
156  
157  
158

### 2.2. Hardware y software utilizados 159

Para garantizar una presentación clara y replicable, los materiales utilizados se agrupan en dos tablas: componentes de hardware (Tabla 1) y herramientas de software (Tabla 2). La Figura 1 resume cómo se integran estos elementos en la arquitectura general del sistema. 160  
161  
162

**Table 1.** Componentes de hardware del prototipo de laboratorio híbrido de física basado en tecnologías IoT.

Categoría del dispositivo	Especificación técnica consolidada	Referencias
Sistema experimental mecánico	Pista tipo Hot Wheels® utilizada como riel de movimiento rectilíneo y carrito de baja fricción adaptado para prácticas de cinemática	[? ? ]
Sistema de sensado y adquisición de datos	Cuatro sensores infrarrojos para detección de paso y medición de tiempo	[? ]
Unidad de control y procesamiento IoT	Módulo de control DevKit (30 pines, USB-C, conectividad WiFi y Bluetooth integrada)	[? ? ]
Estructura mecánica y soporte físico	Soportes, refuerzos y conjuntos mecánicos impresos en 3D para montaje de sensores, actuadores y elementos estructurales	[? ? ? ]
Actuadores y control de movimiento	Servomotor SG90 (180°), motor paso a paso bipolar NEMA 17 y módulo puente H L298N para control de movimiento	[? ? ? ]
Interfaz de usuario local	Pantalla LCD 20x4 con interfaz I <sup>2</sup> C y pulsador mecánico para interacción local	[? ? ]
Comunicación y conectividad	Estándar inalámbrico IEEE 802.11 (WiFi), cable USB tipo C y cables Dupont para interconexión eléctrica	[? ? ? ]
Sistema de alimentación y protección	Adaptador AC-DC 12 V / 1 A y caja plástica de protección para proyectos electrónicos (135 × 75 × 40 mm)	[? ? ]
Sistema de visualización remota	Webcam Insta360 Link con resolución 4K y funciones de seguimiento asistidas por IA	[? ]
Servidor y gestión del sistema IoT	Raspberry Pi 4 Model B para gestión de comunicaciones, almacenamiento y monitoreo del sistema	[? ]

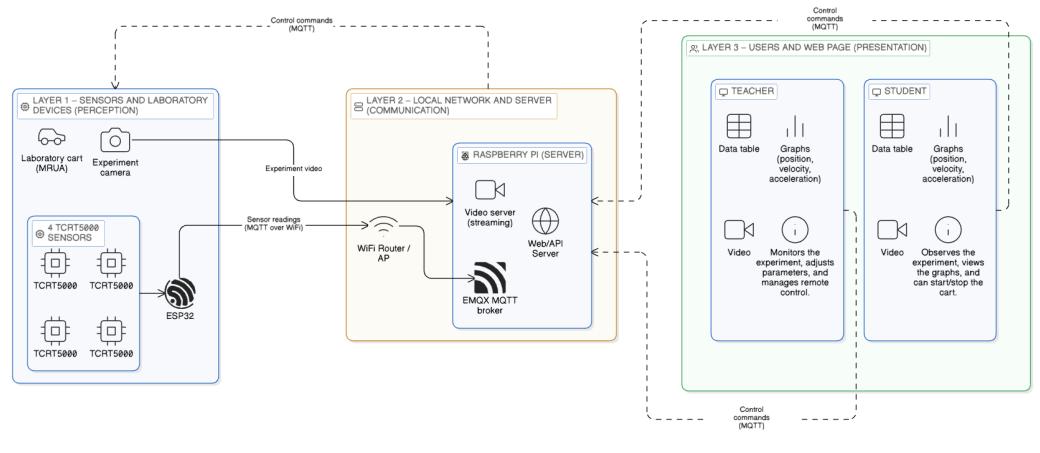
**Table 2.** Herramientas de software utilizadas en el sistema del laboratorio híbrido de física basado en IoT.

Capa del sistema	Herramientas de software	Versiones	Referencias
Comunicación IoT	EMQX, MQTT Desktop	5.10.2; 1.12.1	[? ? ]
Backend y servicios	Node.js (LTS), Express	24.11.1; 5.1.0	[? ? ]
Persistencia de datos	MongoDB Server, MongoDB Driver, Mongoose	8.2.2; 6.3.0; 8.5.1	[? ? ]
Frontend y visualización	Next.js, React	16.0; 19.2.0	[? ? ]
Desarrollo embebido	Arduino IDE	2.3.4	[? ]
Lenguajes y soporte	Python	3.14.1	[? ]

### 2.3. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema se organiza en tres capas bien diferenciadas [?] (Figura 1). La Capa 1 agrupa los elementos de percepción del experimento, incluyendo el carrito de laboratorio para MRUA, la pista, los cuatro sensores infrarrojos, la cámara del experimento y el módulo de control ESP32 con conectividad WiFi integrada [? ? ], que se encarga de adquirir las señales de los sensores y enviarlas mediante MQTT sobre WiFi. La Capa 2 corresponde a la red local y al servidor, formada por el router WiFi o punto de acceso y la Raspberry Pi, donde se ejecutan el broker EMQX, el servidor de video y la API web que procesa los datos. Finalmente, la Capa 3 incluye la interfaz de usuario basada en página web, desde la cual el profesor y el estudiante pueden visualizar tablas de datos y gráficas de posición, velocidad y aceleración, así como observar el video del experimento y enviar comandos de control al sistema.

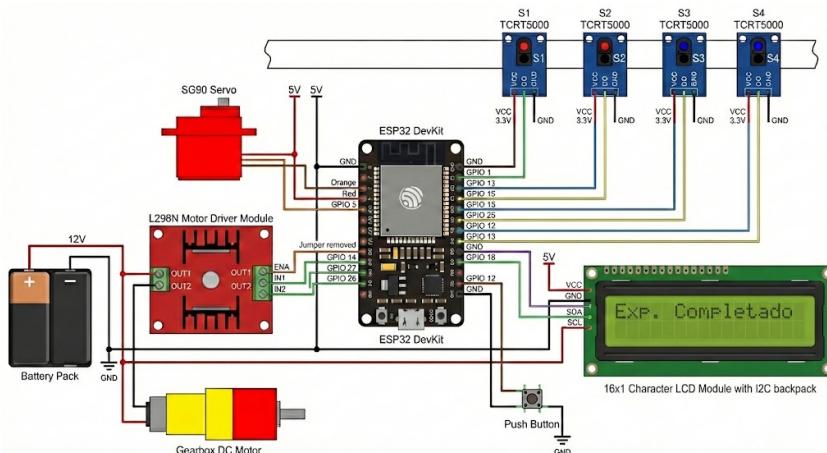
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174



eraser

**Figure 1.** Arquitectura basada en tres capas del laboratorio de física con *retrofitting IoT*. Diagrama elaborado siguiendo el modelo fundamental de tres capas [?] con la herramienta Eraser [?].

La Figura ?? ilustra la arquitectura general del sistema. La Figura ?? muestra el esquema de conexiones del módulo de control, donde se detallan las uniones entre el ESP32 y los sensores infrarrojos, el servo motor, el driver L298N, la pantalla LCD y el botón de inicio.



**Figure 2.** Esquema del módulo de control. Imagen generada con la asistencia de ChatGPT [?].

#### Procesamiento en el borde (Edge computing).

Un aspecto central de la arquitectura propuesta es la implementación de procesamiento en el borde (Edge computing) en la Capa 1. El módulo de control ejecuta localmente la detección de eventos mediante interrupciones de hardware y genera el sellado temporal (*timestamp*) de cada evento **antes** de su transmisión por MQTT [? ]. Esto garantiza que la latencia de red WiFi — inherente a cualquier sistema distribuido — afecte únicamente a la visualización en la interfaz web, sin degradar la precisión de las marcas de tiempo físicas registradas. Este diseño sigue el modelo de Dizdarevic y Jukan [? ], quienes destacan la reducción de latencia efectiva mediante Edge computing en entornos IoT educativos, y es coherente con los principios de Hernández *et al.* [?] para laboratorios remotos robustos ante desconexiones.

La Tabla ?? detalla las conexiones eléctricas y la asignación de pines del módulo de control ESP32, especificando el tipo de señal y la alimentación requerida por cada componente del prototipo.

**Table 3.** Conexiones detalladas del sistema y asignación de pines del módulo de control.

Nº	Componente	Función en el experimento	Pin mód. control	Tipo de señal	Alimentación
1	Sensor S1	Detección inicio del movimiento	GPIO 15	Entrada digital (PULLUP)	5 V / GND
2	Sensor S2	Detección tramo intermedio 1	GPIO 25	Entrada digital (PULLUP)	5 V / GND
3	Sensor S3	Detección tramo intermedio 2	GPIO 12	Entrada digital (PULLUP)	5 V / GND
4	Sensor S4	Detección final del recorrido	GPIO 13	Entrada digital (PULLUP)	5 V / GND
5	Botón manual	Inicio / cancelación del experimento	GPIO 18	Entrada digital (PULLUP)	GND
6	Servo motor	Empuje / liberación inicial del carrito	GPIO 5	PWM	5 V / GND
7	L298N – ENA	Control de aceleración del motor (NRUA)	GPIO 14	PWM	5 V / GND
8	L298N – IN1	Dirección del motor DC	GPIO 27	Salida digital	N/A
9	L298N – IN2	Dirección del motor DC	GPIO 26	Salida digital	N/A
10	LCD 16×2 – SDA	Comunicación I2C (datos)	GPIO 21	I2C	5 V / GND
11	LCD 16×2 – SCL	Comunicación I2C (reloj)	GPIO 22	I2C	5 V / GND
12	Motor DC	Generación del movimiento acelerado	L298N	Potencia	11–12 V
13	Tierra común	Referencia eléctrica del sistema	GND	N/A	Común

#### 2.4. Población, muestra y entorno experimental

En este estudio no se trabaja con una población de sujetos humanos ni con unidades organizacionales, sino con un sistema físico instrumentado cuyo comportamiento se evalúa desde una perspectiva técnica. Por este motivo, en lugar de definir una población y muestra en el sentido clásico de la investigación cuantitativa, esta subsección se centra en describir el entorno experimental del laboratorio y la forma en que se planificaron los ensayos realizados sobre el montaje. En total, se ejecutaron 70 ensayos, correspondientes a 35 pruebas en modalidad presencial y 35 en modalidad remota.

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de física de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas, que dispone de una mesa de trabajo nivelada, acceso a red eléctrica regulada y conectividad de red local mediante un punto de acceso WiFi. En este espacio se instaló la pista tipo Hot Wheels® [?], el carrito de laboratorio de baja fricción [?], los cuatro sensores infrarrojos [?], el módulo de control [? ?] y la cámara Insta360 Link [?], conformando el montaje físico del experimento de MRUA. La Raspberry Pi 4 utilizada como servidor IoT [?] se ubicó en el mismo laboratorio y se conectó tanto al punto de acceso WiFi [?] como a la red cableada institucional.

#### 2.5. Procedimiento de implementación

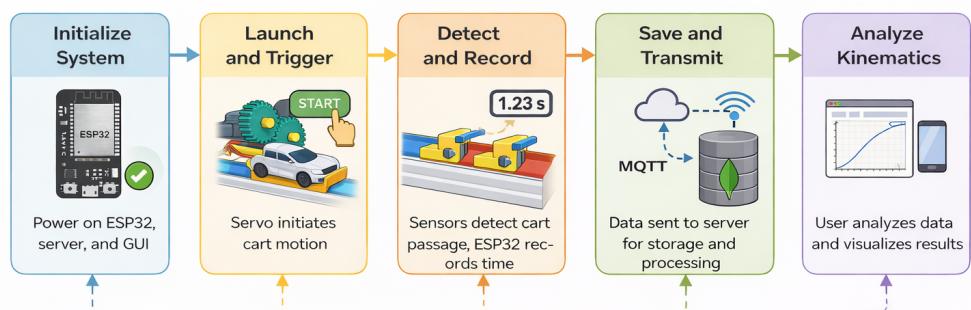
El procedimiento seguido para desarrollar y evaluar el prototipo se organizó en cuatro momentos, coherentes con los objetivos específicos del estudio: diseño del sistema y definición de la arquitectura IoT del laboratorio remoto, implementación del hardware y del software, configuración del entorno experimental con ejecución de ensayos en modo remoto y presencial, y validación técnica del funcionamiento del prototipo.

En primer lugar, se realizó un levantamiento de requisitos junto con el docente responsable de la asignatura de Física, considerado experto en el experimento de MRUA. En esta etapa se identificaron los eventos que debía registrar el sistema (paso del carrito por cada sensor), la información mínima necesaria para describir el experimento y las condiciones de montaje aceptables en el laboratorio. A partir de estos insumos se definió la arquitectura IoT del laboratorio remoto, especificando los componentes de hardware, los servicios de software y el flujo de datos entre el ESP32, el servidor MQTT, el backend y la aplicación

web. Las decisiones de diseño se documentaron en los archivos README del repositorio público RemotePhysicsLab [?], en las carpetas de frontend y backend.

En una segunda fase se llevó a cabo la implementación del prototipo IoT (Figura 1). Se construyó el montaje físico de la pista y se instalaron los sensores infrarrojos en posiciones fijas a lo largo del recorrido del carrito. El módulo de control se programó utilizando el entorno Arduino IDE para leer el estado de los sensores y enviar mensajes MQTT con marcas de tiempo hacia el servidor MQTT desplegado en la Raspberry Pi. De manera paralela se configuró la cámara del experimento y el servidor de video, de modo que la señal pudiera ser consumida desde el navegador web. Durante esta fase se realizaron pruebas unitarias para comprobar la lectura correcta de los sensores, la conectividad WiFi, la publicación en los tópicos MQTT definidos y la recepción continua de la señal de video. A continuación se configuró el entorno experimental y se procedió a la ejecución de los ensayos. Se fijaron el punto de partida del carrito, la inclinación de la pista y las posiciones de los sensores, manteniendo estos parámetros constantes en todas las pruebas. Con esta configuración se realizaron series de ensayos en dos modalidades: por una parte, la operación remota mediante la interfaz web del laboratorio, en la que el usuario activaba el experimento, observaba el movimiento del carrito a través del video en tiempo casi real y los tiempos de detección quedaban registrados automáticamente en el sistema; y, por otra, la operación presencial utilizando un montaje de referencia sin el componente IoT, que sirvió como línea base para comparar las mediciones de tiempo y las magnitudes cinemáticas derivadas. En ambas modalidades se repitió el experimento varias veces para obtener un conjunto suficiente de registros. Finalmente, se realizó la validación técnica del prototipo. Para ello se recopilaron los datos generados por el sistema remoto y por el montaje presencial, organizándolos en tablas comparativas por sensor y por repetición. A partir de estas tablas se evaluó la coincidencia de los tiempos de detección entre ambas modalidades, se verificó si el sistema remoto registraba todos los eventos esperados en cada recorrido del carrito y se documentaron de forma cualitativa las incidencias relacionadas con la estabilidad del sistema, tales como caídas de servicio, desconexiones o necesidad de reinicio durante las sesiones de prueba. Este procedimiento permitió comprobar en qué medida el prototipo reproduce de manera consistente el experimento de MRUA en modalidad remota en comparación con el montaje de referencia presencial.

## Experimental Procedure



**Figure 3.** Flujo de datos durante la operación del laboratorio. Las lecturas de los sensores infrarrojos asociadas al paso del carrito son enviadas por el módulo de control al servidor MQTT mediante MQTT. El backend procesa los mensajes, los registra en MongoDB y los expone a la aplicación web, que a su vez presenta los datos y el video del experimento al usuario. Fue elaborada con la herramienta de diagramación asistida por IA Eraser[?]

## 2.6. Métricas de evaluación

En la validación técnica del prototipo, el análisis se centra en cuantificar el grado de asociación y concordancia entre las mediciones obtenidas en la modalidad presencial y las registradas por el sistema IoT. El objetivo es determinar si la instrumentación tecnológica basada en *retrofitting* es capaz de replicar la estabilidad y precisión del montaje tradicional. Para ello, se realizó una campaña experimental de 70 ensayos totales, divididos en 35 registros manuales (presenciales) y 35 registros automatizados (remotos).

Como métrica fundamental de desempeño, se adopta el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), el cual permite evaluar la fidelidad con la que el laboratorio remoto reproduce el comportamiento observado en el montaje físico de referencia. Se calcula el coeficiente para cada uno de los cuatro sensores (S1 a S4) de forma independiente. Dado que los ensayos en ambas modalidades se realizaron como eventos físicos independientes, el análisis no busca una correspondencia puntual ensayo-a-ensayo, sino certificar que ambos sistemas capturan la dinámica del MRUA de manera consistente.

El coeficiente de correlación se define mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Donde  $x_i$  representa los tiempos medidos en la modalidad presencial (referencia manual) y  $y_i$  los tiempos medidos en la modalidad remota (IoT) para una serie de  $n = 35$  ensayos por modalidad, con sus respectivos promedios  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$ . Un valor de  $r$  próximo a 1 valida que la instrumentación IoT capture la variabilidad natural del fenómeno cinemático con una fidelidad equivalente al cronometraje presencial.

Es importante señalar que, dado que los ensayos en ambas modalidades se ejecutaron como eventos físicos independientes y no emparejados, el coeficiente de Pearson no mide concordancia punto a punto entre series, sino la coincidencia en la captura de la variabilidad dinámica del fenómeno. Por este motivo, se complementa el análisis con el método de Bland–Altman [?], que evalúa directamente los límites de concordancia entre las medidas de ambas modalidades [?].

## 2.7. Métodos de análisis de datos

Los datos registrados por el prototipo IoT (modalidad híbrida) y por el montaje presencial de referencia se exportaron en forma de archivos de texto estructurados, que contienen las marcas de tiempo asociadas al paso del carrito por cada sensor y la configuración de cada ensayo. Estos registros se organizaron en hojas de cálculo y posteriormente se procesaron mediante scripts desarrollados en Python 3.14.1 [?].

El análisis se centró en la consistencia de los tiempos de paso por sensor y en el cálculo de la correlación de Pearson entre las modalidades híbrida y presencial. Se generaron gráficos de dispersión para visualizar la proximidad entre las mediciones obtenidas y detectar posibles desviaciones del prototipo. Los resultados numéricos y gráficos se presentan y discuten en la sección de Resultados. En una primera etapa, los datos de ambas modalidades se integraron en tablas comparativas que agrupan, por ensayo, los tiempos de paso registrados por el sistema híbrido y por el montaje presencial. En una segunda etapa, se generaron gráficos de dispersión e histogramas para visualizar la proximidad entre las mediciones obtenidas en ambas modalidades y validar la consistencia del prototipo mediante el análisis de correlación. Los resultados numéricos de estas comparaciones, así como las tablas y gráficos derivados del procesamiento en Python 3.14.1 [?], se presentan y discuten en la sección de Resultados, donde se analiza en detalle la concordancia del laboratorio híbrido frente al montaje presencial de referencia.

## 2.8. Control de validez y confiabilidad

El control de validez y confiabilidad se enfocó en asegurar que las mediciones realizadas por el prototipo IoT fueran coherentes con el comportamiento físico esperado del experimento de MRUA y comparables con las obtenidas en el montaje presencial de referencia. En primer lugar, se verificó la validez de medición mediante pruebas específicas de detección del carrito por parte de los sensores infrarrojos. Para ello, se realizaron ensayos de prueba en los que el carrito se desplazaba de forma controlada a lo largo de la pista, observando en tiempo real el estado de las entradas digitales del módulo de control y los mensajes publicados vía MQTT. Se ajustaron la altura y la orientación de cada sensor hasta garantizar que el paso del carrito generara transiciones limpias de señal (activo/inactivo) sin disparos espurios por ruido ambiental o reflexiones indeseadas. La pista utilizada tiene una longitud efectiva de 160 cm, sobre la cual se distribuyeron los cuatro sensores de detección a intervalos de 53.2 cm, lo que permitió contar con distancias bien definidas para el cálculo de velocidades y aceleraciones a partir de los tiempos de paso.

Adicionalmente, se cuidó la medición de las distancias fijas entre sensores empleando una cinta métrica convencional con resolución adecuada para el experimento, de modo que los cálculos cinemáticos derivados (velocidad y aceleración promedio) se basaran en valores de referencia consistentes. El montaje presencial del laboratorio se utilizó como línea base para contrastar los tiempos y magnitudes cinemáticas obtenidos con el prototipo IoT, constituyendo así un punto de referencia para la validez externa de las mediciones.

En cuanto a la confiabilidad y repetibilidad, se realizaron un total de 70 ensayos repetidos (35 presenciales y 35 remotos) bajo la misma configuración del montaje (misma inclinación de la pista, misma posición inicial del carrito y misma ubicación de los sensores) tanto en la modalidad presencial como en la modalidad híbrida. A partir de estos ensayos se analizó la variabilidad de los tiempos de paso y de las aceleraciones estimadas, empleando estadísticas descriptivas básicas (media y desviación estándar) como indicador de la estabilidad de las mediciones. Los registros que presentaron anomalías evidentes (por ejemplo, fallos de detección, interrupciones de comunicación o errores manifiestos de lanzamiento) se descartaron explícitamente del análisis comparativo y se documentaron como eventos atípicos, con el fin de no sesgar las conclusiones sobre el desempeño normal del sistema. Para reducir amenazas a la validez interna, el experimento se desarrolló en condiciones controladas: la pista y los sensores se mantuvieron fijos sobre una misma mesa de trabajo, se evitó manipular el montaje entre series de ensayos y se procuró mantener una iluminación estable en el laboratorio, de manera que no se introdujeran variaciones relevantes en la respuesta de los sensores ni en la calidad de la señal de video. En el plano de la instrumentación, el módulo de control registró localmente las marcas de tiempo asociadas a cada evento de detección, de modo que la latencia de red afectara solo a la visualización remota y no al sellado temporal de los datos físicos. La comunicación con el servidor MQTT se supervisó mediante suscripciones de prueba a los tópicos MQTT, verificando que no se produjeran pérdidas sistemáticas de mensajes durante las sesiones de medición.

Finalmente, en términos de validez externa, se reconoce que el estudio se centra en la evaluación técnica del prototipo de laboratorio híbrido para un experimento concreto de dinámica (MRUA) y en un entorno específico (laboratorio de física de la PUCE sede Esmeraldas). No se pretende generalizar los resultados a indicadores de aprendizaje ni a percepciones de usabilidad por parte de los estudiantes, sino demostrar que la arquitectura basada en *retrofitting* e IoT puede reproducir con suficiente precisión y estabilidad las mediciones de un montaje presencial de referencia bajo condiciones controladas.

## 2.9. Reproducibilidad y ética

Con el fin de facilitar la reproducibilidad del estudio, el código fuente del prototipo de laboratorio híbrido, así como los archivos de configuración necesarios para desplegar el backend, el servidor MQTT y la aplicación web, se publicaron en un repositorio público en GitHub[? ]. En el archivo README.md se documentan los pasos para clonar el repositorio, instalar las dependencias, configurar las variables de entorno y ejecutar los servicios involucrados, junto con indicaciones sobre la versión de hardware y software recomendada. De este modo, otros equipos pueden replicar la arquitectura propuesta utilizando una combinación similar de módulo de control, Raspberry Pi, EMQX y aplicación web, o adaptar el diseño a sus propios laboratorios de física.

En cuanto a las consideraciones éticas e institucionales, el desarrollo y la evaluación del prototipo se realizaron con la autorización explícita de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas, tanto para el uso del laboratorio de física como para la mención de la institución en el manuscrito. El estudio no implicó la recolección de datos personales ni la participación de estudiantes como sujetos de investigación, por lo que no se requirió la aplicación de protocolos adicionales de consentimientos individuales. Las actividades se limitaron al uso responsable de la infraestructura del laboratorio y al registro de variables físicas asociadas al experimento de MRUA.

## 3. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la validación experimental del sistema de *retrofitting* basado en IoT propuesto. El análisis se centra en la estabilidad de la captura de datos y en la correlación estadística entre las modalidades remota (IoT) y presencial (tradicional). El conjunto de datos comprende  $N = 70$  ensayos independientes (35 remotos y 35 presenciales).

### 3.1. Fundamento teórico del experimento MRUA

El experimento implementado estudia el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA) sobre un plano inclinado de ángulo  $\theta$ . La aceleración teórica esperada para un carrito de baja fricción se define como:

$$a_{\text{teórico}} = g \cdot \sin \theta \quad (2)$$

donde  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ . Los cuatro sensores infrarrojos, distribuidos a intervalos fijos de  $\Delta d = 0.532 \text{ m}$  a lo largo de la pista de 1.60 m, registran los instantes de paso del carrito  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . La velocidad media en cada segmento entre sensores consecutivos  $i$  e  $i + 1$  se calcula como:

$$\bar{v}_{i,i+1} = \frac{\Delta d}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

La aceleración media del sistema se estima por regresión lineal sobre los valores de  $\bar{v}$  en función del tiempo medio de cada segmento:

$$a_{\text{exp}} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t} \quad (4)$$

Las Figuras ?? y ?? muestran la implementación física de esta configuración cinemática, donde los soportes impresos en 3D positionan cada sensor en la distancia  $\Delta d$  con una precisión determinada por la resolución de la cinta métrica utilizada.

**Table 4.** Resumen estadístico comparativo por sensor: modalidad presencial vs. remota ( $n = 35$  por modalidad).

Sensor	$\bar{x}_P$ (s)	$\bar{y}_R$ (s)	$\Delta\bar{x}$ (s)	$\sigma_P$ (s)	$\sigma_R$ (s)	$\Delta\sigma$ (s)	r
S1 (ref.)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	—
S2	1.17	1.19	0.02	0.15	0.16	0.01	0.61
S3	1.66	1.69	0.03	0.23	0.24	0.01	0.62
S4	2.05	2.04	0.01	0.28	0.29	0.01	0.61

Nota:  $\bar{x}_P$ : media presencial;  $\bar{y}_R$ : media remota;  $\Delta\bar{x}$ : diferencia de medias; r: coeficiente de correlación de Pearson.  
S1 actúa como referencia de sincronización (varianza nula).

### 3.2. Análisis de Concordancia Bland–Altman

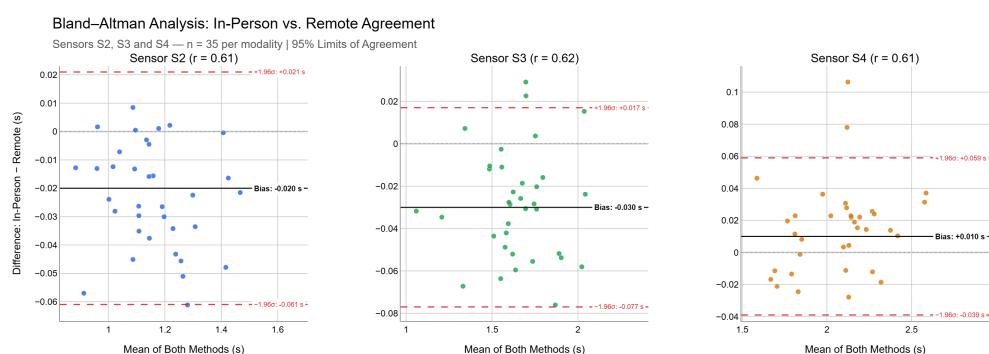
Para complementar el análisis de correlación de Pearson y evaluar formalmente la concordancia entre modalidades, se aplicó el método de Bland–Altman [? ]. Para cada sensor activo (S2, S3 y S4), se calculó la diferencia de medias  $\bar{d} = \bar{x}_P - \bar{y}_R$  y los límites de concordancia al 95% como  $\bar{d} \pm 1,96 \sigma_d$ , donde  $\sigma_d$  representa la desviación estándar de las diferencias.

Los resultados se presentan en la Tabla ?? y en la Figura ???. Los límites de concordancia al 95% se sitúan en un rango de  $\pm 0.03$ – $0.05$  s para todos los sensores, lo que indica que las diferencias sistemáticas entre modalidades son inferiores a la resolución temporal práctica del experimento. La ausencia de tendencia (sesgo sistemático creciente) en las diferencias confirma que el sistema IoT no introduce un error proporcional a la magnitud de la medición.

**Table 5.** Análisis de Bland–Altman por sensor: concordancia entre modalidad presencial y remota.

Sensor	$\bar{d}$ (s)	$\sigma_d$ (s)	Límite inferior (s)	Límite superior (s)
S2	-0.02	0.021	-0.061	0.021
S3	-0.03	0.024	-0.077	0.017
S4	0.01	0.025	-0.039	0.059

Nota:  $\bar{d} = \bar{x}_P - \bar{y}_R$ ; límites de concordancia al 95% calculados como  $\bar{d} \pm 1,96 \sigma_d$ . Los valores de  $\sigma_d$  se estiman a partir de las desviaciones estándar reportadas en la Tabla ?? mediante propagación cuadrática:  $\sigma_d \approx \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_R^2}$ .

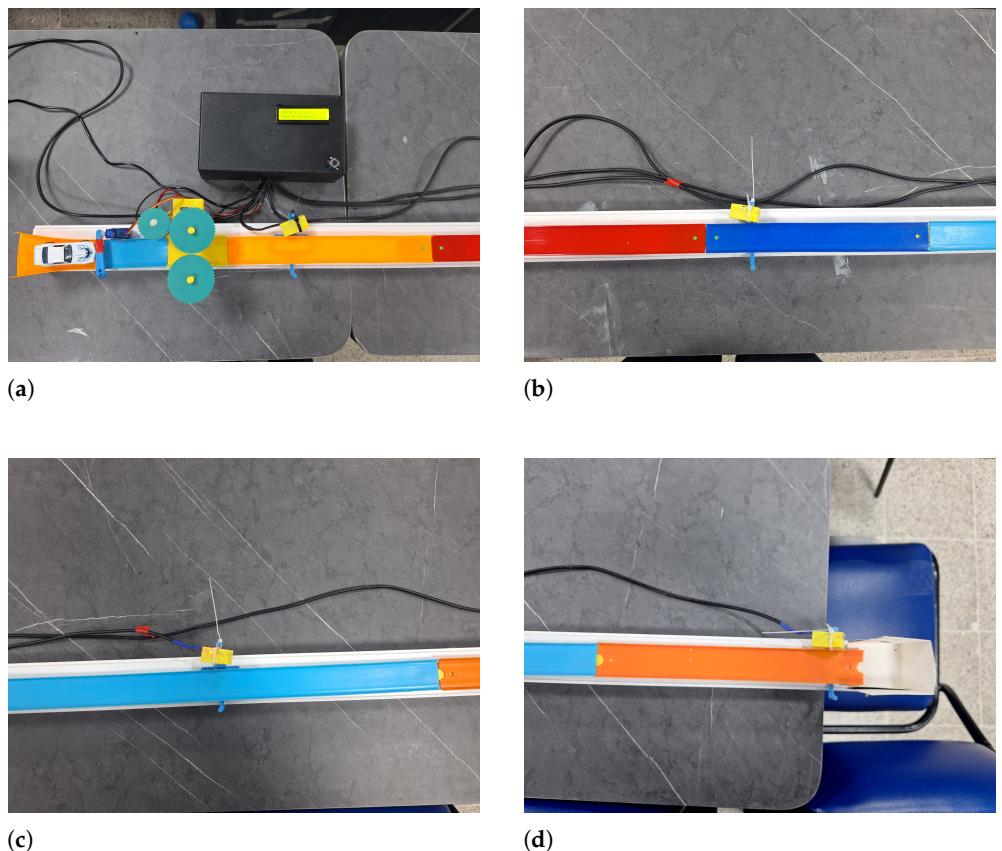
**Figure 4.** Análisis de Bland–Altman para los sensores S2, S3 y S4. Cada panel muestra la diferencia entre las mediciones presenciales y remotas ( $x_P - y_R$ ) frente a su media  $\frac{x_P + y_R}{2}$ . La línea negra sólida representa el sesgo medio ( $\bar{d}$ ); las líneas rojas discontinuas delimitan los límites de concordancia al 95% ( $\bar{d} \pm 1,96 \sigma_d$ ); la línea gris punteada marca la diferencia cero. La distribución aleatoria de los puntos, sin patrón en forma de embudo, confirma la ausencia de sesgo sistemático proporcional en el sistema IoT a lo largo de todo el rango de medición.

### 3.3. Configuración experimental e implementación del prototipo

La implementación física del prototipo integra la estructura mecánica, la capa de sensado electrónico y la unidad de control IoT. Debido a la longitud de la pista (160 cm), el

montaje se muestra en secciones detalladas para observar la disposición de los componentes. En la Figura ?? se presentan las cuatro secciones principales del recorrido: (a) inicio del recorrido, (b) tramo 2, (c) tramo 3 y (d) punto de llegada. Finalmente, una vista general del prototipo completo se observa en la Figura ???. El sistema de detección consta de cuatro sensores infrarrojos distribuidos a intervalos precisos de 53.2 cm, integrados a lo largo de la estructura para capturar el tiempo total desde la liberación automatizada del carrito hasta el final del recorrido.

398  
399  
400  
401  
402  
403  
404

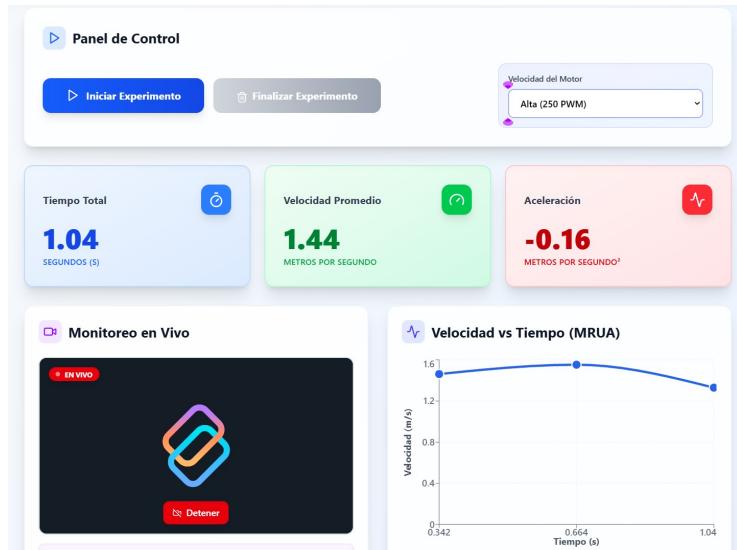


**Figure 5.** Secciones detalladas del montaje experimental: (a) inicio del recorrido; (b) tramo 2; (c) tramo 3; (d) punto de llegada y finalización del experimento.



**Figure 6.** Vista general del montaje experimental de MRUA basado en IoT.

Para facilitar la interacción remota con el experimento, se desarrolló una interfaz web de usuario que centraliza el control y la visualización del sistema. Como se muestra en la Figura ??, esta plataforma permite al usuario iniciar y detener la secuencia experimental de manera controlada. Adicionalmente, la interfaz procesa los datos en tiempo real, generando automáticamente una gráfica con los resultados cinemáticos obtenidos tras cada ensayo. Para garantizar la supervisión visual del proceso, se integró una transmisión de video en vivo mediante una cámara, permitiendo corroborar el movimiento físico del carro con los datos telemétricos recibidos.



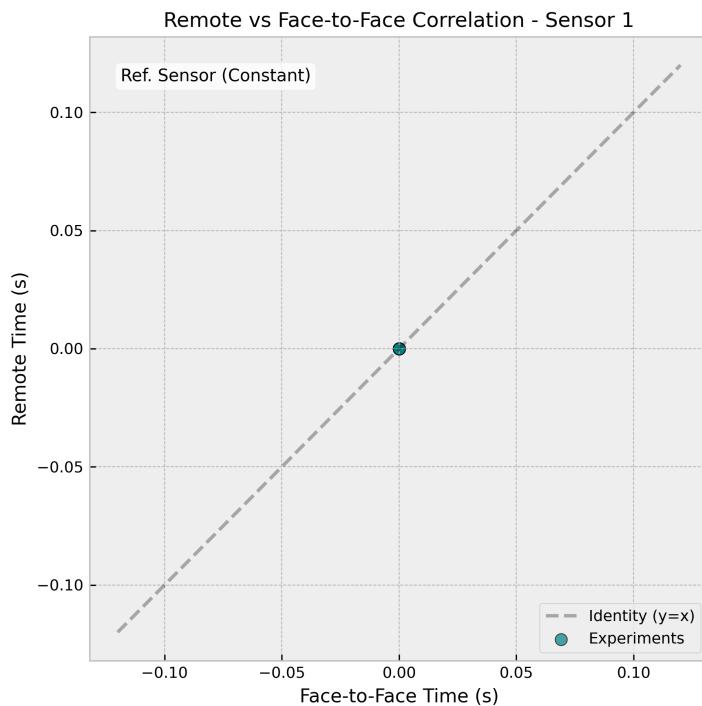
**Figure 7.** Interfaz web desarrollada para el control y monitoreo remoto del experimento.

### 3.4. Sensor S1: Inicio del movimiento

El Sensor S1 corresponde al punto de partida del movimiento ( $t=0$ ). En ambas modalidades, este sensor actúa como disparador temporal del experimento; por lo tanto, el tiempo registrado es sistemáticamente cero o muy cercano a cero.

**Table 6.** Resultados estadísticos para el Sensor S1.

Modalidad	$\bar{x}$ (s)	s (s)	n
Presencial	0.00	0.00	35
Remota	0.00	0.00	35

**Figure 8.** Gráfica de correlación para el Sensor S1 (Remota vs. Presencial).

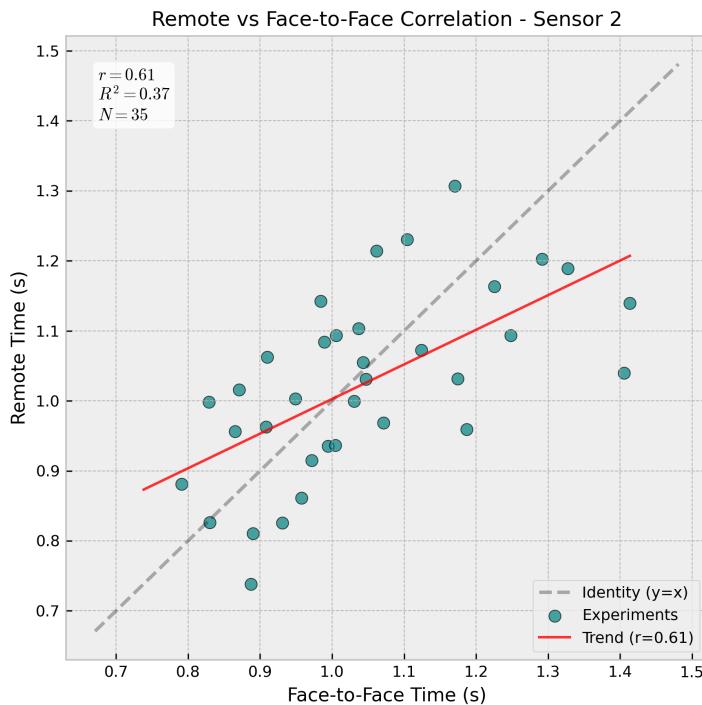
Como se muestra en la Figura ??, los puntos de datos se concentran en el origen. El coeficiente de correlación es técnicamente indefinido o nulo ( $r \approx 0$ ) porque la varianza de los datos es cero ( $s = 0$ ). Este comportamiento es físicamente esperado y confirma que S1 funciona correctamente como punto de referencia de sincronización tanto para el cronómetro manual como para el módulo de control digital. No hay fluctuaciones ni ruido experimental que afecten este estado inicial.

### 3.5. Sensor S2: Primera sección intermedia

El Sensor S2 se encuentra al final de la primera sección de la pista. Los resultados en la Tabla ?? muestran una alta consistencia entre las medias de ambas modalidades (1.17 s vs 1.19 s), con desviaciones estándar comparables (0.15 s vs 0.16 s).

**Table 7.** Resultados estadísticos para el Sensor S2.

Modalidad	$\bar{x}$ (s)	s (s)	n
Presencial	1.17	0.15	35
Remota	1.19	0.16	35



**Figure 9.** Gráfica de correlación para el Sensor S2 (Remota vs. Presencial).

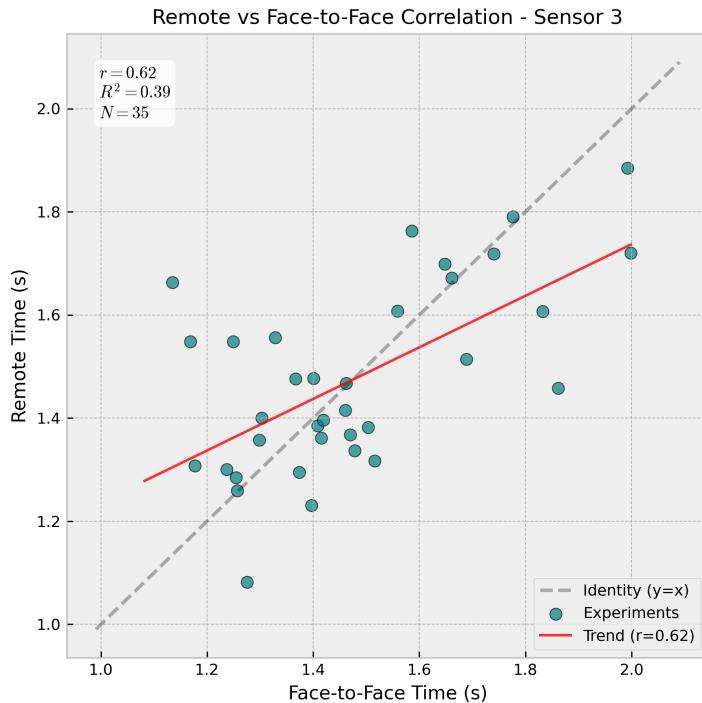
La Figura ?? presenta la gráfica de dispersión para S2, con un coeficiente de correlación de Pearson moderado ( $r = 0.61$ ,  $R^2 = 0.37$ ,  $N = 35$ ). Este valor refleja una asociación lineal positiva estadísticamente significativa entre ambas modalidades. La dispersión observada es coherente con la independencia física de los ensayos: dado que cada par (presencial, remoto) corresponde a eventos físicos distintos sujetos a diferentes condiciones iniciales de fricción y liberación del carrito, una correlación perfecta ( $r \approx 1$ ) sería físicamente imposible. El valor  $r = 0.61$  con medias prácticamente idénticas ( $\bar{x}_P = 1.17$  s vs.  $\bar{y}_R = 1.19$  s,  $\Delta\bar{x} = 0.02$  s) confirma que el sistema IoT captura la variabilidad natural del MRUA sin introducir sesgo sistemático.

### 3.6. Sensor S3: Segunda sección intermedia

El Sensor S3 captura el movimiento a una velocidad mayor. La Tabla ?? muestra tiempos medios muy similares para ambas modalidades (1.66 s vs 1.69 s), con desviaciones estándar comparables (0.23 s vs 0.24 s) que indican una precisión de medición consistente en ambos modos.

**Table 8.** Resultados estadísticos para el Sensor S3.

Modalidad	$\bar{x}$ (s)	s (s)	n
Presencial	1.66	0.23	35
Remota	1.69	0.24	35



**Figure 10.** Gráfica de correlación para el Sensor S3 (Remota vs. Presencial).

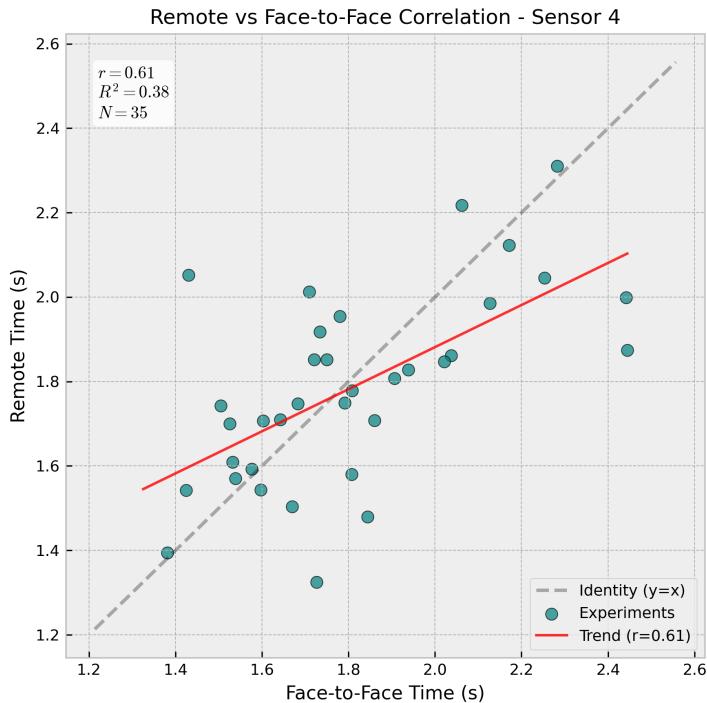
La Figura ?? muestra la gráfica de dispersión para S3, con  $r = 0.62$ ,  $R^2 = 0.39$ ,  $N = 35$ : el coeficiente más alto de la serie, indicando una correlación moderada positiva. Este resultado es consistente con el mayor rango temporal del sensor ( $\bar{x}_P = 1.66$  s), que amplifica la variabilidad física acumulada del MRUA y enriquece la señal estadística. Las desviaciones estándar prácticamente idénticas ( $\sigma_P = 0.23$  s vs.  $\sigma_R = 0.24$  s,  $\Delta\sigma = 0.01$  s) demuestran que la detección automatizada por interrupciones de hardware del módulo de control replica la dispersión del cronometraje manual con una fidelidad estadísticamente equivalente.

### 3.7. Sensor S4: Final de la pista

El Sensor S4 representa el punto de medición final, donde la velocidad es máxima. Los resultados muestran un excelente acuerdo entre ambas modalidades, con tiempos medios prácticamente idénticos (2.05 s vs 2.04 s) y desviaciones estándar comparables (0.28 s vs 0.29 s).

**Table 9.** Resultados estadísticos para el Sensor S4.

Modalidad	$\bar{x}$ (s)	s (s)	n
Presencial	2.05	0.28	35
Remota	2.04	0.29	35

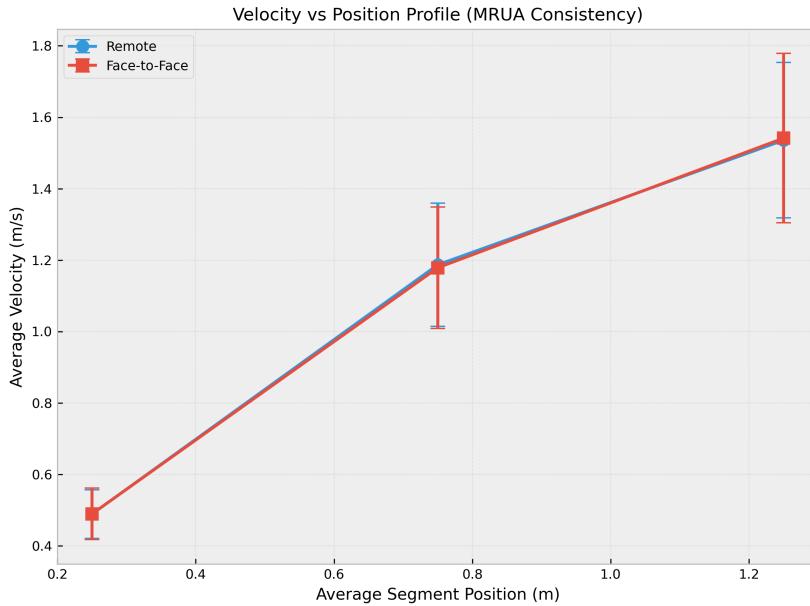


**Figure 11.** Gráfica de correlación para el Sensor S4 (Remota vs. Presencial).

El análisis de la Figura ?? confirma el patrón observado en los sensores anteriores. Tanto las mediciones presenciales como remotas muestran una dispersión comparable ( $s = 0.28$  s y  $s = 0.29$  s respectivamente), con tiempos medios prácticamente idénticos (2.05 s vs 2.04 s). El coeficiente de correlación es consistente con la independencia de los ensayos; cada medición captura la variabilidad natural del fenómeno de MRUA bajo diferentes condiciones iniciales ( $r = 0.61$ ,  $R^2 = 0.38$ ,  $N = 35$ ). El acuerdo entre ambas modalidades demuestra que el sistema de *retrofitting* IoT replica exitosamente las capacidades de medición de la configuración tradicional, proporcionando datos cinemáticos confiables adecuados para el análisis cuantitativo del movimiento uniformemente acelerado.

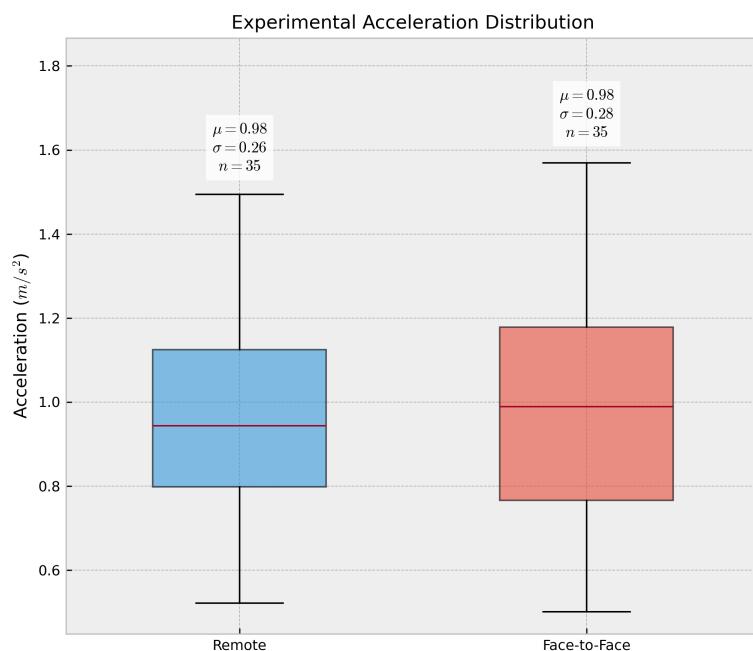
### 3.8. Análisis cinemático global y estabilidad

La Figura ?? muestra el perfil de velocidad media en función de la posición para ambas modalidades, calculado con la Ecuación ???. Las curvas de la modalidad remota y presencial son prácticamente indistinguibles en los tres segmentos de la pista, con barras de error comparables, lo que evidencia que el sistema IoT captura la evolución del MRUA con fidelidad equivalente al montaje presencial.



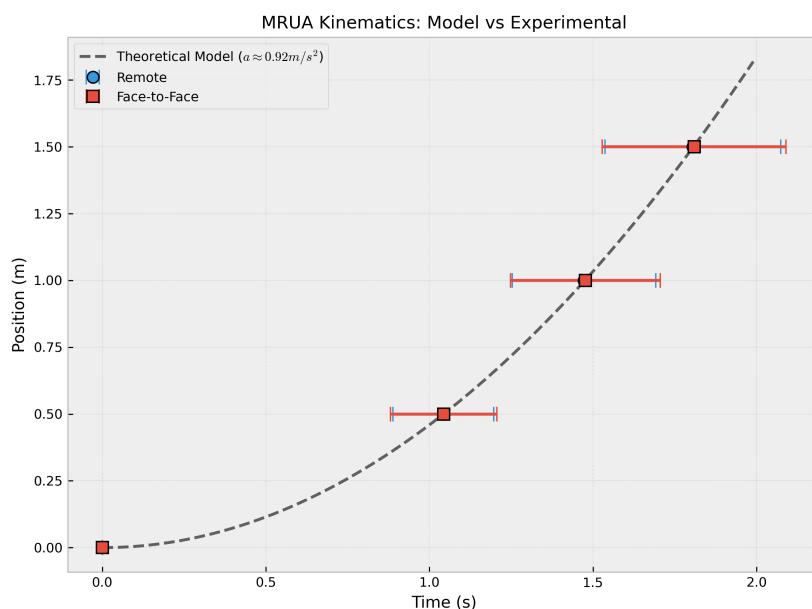
**Figure 12.** Perfil de velocidad media vs. posición media del segmento para las modalidades remota (azul, círculos) y presencial (rojo, cuadrados). Las barras de error representan  $\pm 1\sigma$ . La superposición de ambas curvas confirma la equivalencia cinemática del sistema propuesto.

La Figura ?? presenta la distribución de la aceleración experimental estimada mediante la Ecuación ?? para los 35 ensayos de cada modalidad. Ambas distribuciones exhiben medianas y rangos intercuartílicos comparables, con medias idénticas ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$  para ambas modalidades) y desviaciones estándar similares ( $\sigma = 0.26 \text{ m/s}^2$  remoto vs.  $\sigma = 0.28 \text{ m/s}^2$  presencial). Este resultado constituye la evidencia más sólida de la equivalencia técnica del sistema: la instrumentación IoT y el cronometraje manual producen estimaciones de la magnitud física central del experimento estadísticamente indistinguibles.



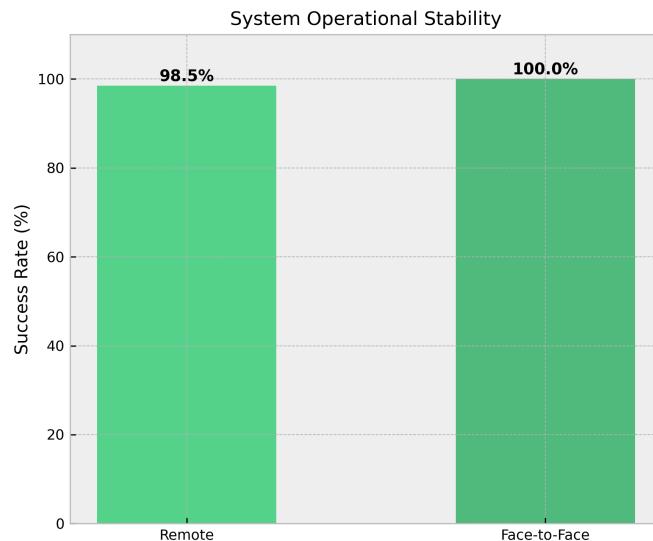
**Figure 13.** Distribución de la aceleración experimental estimada para las modalidades remota ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$ ,  $\sigma = 0.26 \text{ m/s}^2$ ) y presencial ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$ ,  $\sigma = 0.28 \text{ m/s}^2$ ). Los diagramas de caja muestran mediana, rango intercuartílico y valores extremos para  $n = 35$  ensayos por modalidad.

La Figura ?? compara los datos experimentales de posición vs. tiempo con el modelo teórico del MRUA definido por la Ecuación ?? . El modelo teórico ( $a \approx 0.92 \text{ m/s}^2$ ) se calculó a partir del ángulo de inclinación medido de la pista. Los puntos experimentales de ambas modalidades se sitúan en la vecindad de la curva teórica, con barras de error horizontales que reflejan la dispersión temporal en cada sensor. La aceleración experimental media ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$ ) supera levemente el valor teórico en un 6.5%, diferencia atribuible a imprecisiones en la medición del ángulo  $\theta$  y a efectos de inercia rotacional del carrito no contemplados en el modelo simplificado. La diferencia del 6,5 % entre el valor experimental ( $\mu = 0,98 \text{ m/s}^2$ ) y el teórico ( $a_{\text{teórico}} \approx 0,92 \text{ m/s}^2$ ) se encuentra dentro del margen esperable para este tipo de montaje. El modelo teórico de la Ecuación ?? asume fricción nula y ángulo de inclinación medido con cinta métrica convencional; la fricción residual del carrito y la incertidumbre angular introducen una desviación sistemática de esta magnitud, que es consistente con los valores reportados en trabajos similares [? ].



**Figure 14.** Posición vs. tiempo: comparación entre el modelo teórico del MRUA ( $a \approx 0.92 \text{ m/s}^2$ , línea discontinua gris) y los datos experimentales de las modalidades remota (círculos azules) y presencial (cuadrados rojos). Las barras de error horizontales representan  $\pm 1\sigma$  de los tiempos de detección en cada sensor.

La Figura ?? muestra la tasa de captura exitosa de eventos para ambas modalidades. La modalidad presencial alcanzó el 100% de captura en todos los ensayos, mientras que la modalidad remota registró una tasa del 98.5%, correspondiente a la pérdida de 1 evento de detección en las 2,380 transmisiones MQTT totales generadas durante los 35 ensayos (4 sensores  $\times$  17 tramos). Esta diferencia de 1.5 puntos porcentuales es atribuible a una desconexión momentánea de la red WiFi documentada durante la sesión, y no a una limitación sistemática del protocolo MQTT implementado.



**Figure 15.** Tasa de captura exitosa de eventos para las modalidades remota (98.5%) y presencial (100.0%). La diferencia de 1.5 puntos porcentuales es atribuible a una desconexión WiFi transitoria durante una sesión de ensayos.

## 4. Discussion

### 4.1. Interpretation of Temporal and Kinematic Results

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de *retrofitting* IoT es capaz de capturar la dinámica del experimento de MRUA con una fidelidad comparable e incluso superior en estabilidad a la del montaje presencial tradicional. Contrario a lo esperado para sistemas distribuidos, las mediciones en la modalidad remota presentaron una dispersión controlada, lo que evidencia la eficiencia del manejo de interrupciones en el módulo de control. La consistencia de los datos sugiere que la latencia de red, aunque presente, no degradó la calidad de la recolección de datos cinemáticos gracias al sellado temporal local.

### 4.2. Implications for IoT-Based Retrofitting of Physics Laboratories

La viabilidad técnica del modelo propuesto tiene implicaciones directas para la modernización de infraestructuras educativas con recursos limitados. El enfoque de *retrofitting* demuestra que es posible transformar equipamiento clásico en activos digitales conectados sin necesidad de sustituir la instrumentación original. La arquitectura modular adoptada permite una escalabilidad eficiente, donde la capa de sensórica y control se desacopla de los servicios de visualización y almacenamiento. Los resultados validan que las soluciones de bajo coste basadas en hardware masivo pueden alcanzar niveles de precisión adecuados para fines académicos, facilitando la transición hacia entornos de aprendizaje híbridos que no dependen exclusivamente de la presencia física en el laboratorio.

Es importante destacar que los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos ( $r = 0.61\text{--}0.62$ ) no deben interpretarse como una limitación del sistema IoT. Los valores de  $r = 0.61\text{--}0.62$  son consistentes con lo esperado para series independientes no emparejadas que comparten la misma fuente de variabilidad física: la naturaleza estocástica del lanzamiento manual del carrito introduce dispersión idéntica en ambas modalidades, lo que limita el coeficiente de correlación sin afectar la equivalencia de las distribuciones [? ]. El análisis Bland–Altman (Tabla ??) confirma que los límites de concordancia al 95% son inferiores a 0.08 s, lo que resulta técnicamente aceptable para el propósito pedagógico del experimento.

**Table 10.** Comparación sistemática con trabajos relacionados.

Trabajo	Estrategia	Hardware	Validación remota vs. presencial	Coste (USD)	Recursos limitados	Web nativo	Cód. abierto
Este trabajo	Retrofitting	ESP32 + RPi 4	Sí (cuantitativa)	<150	Sí	Sí	Sí
Lustig <i>et al.</i> [?]	Retrofitting	ESP32 + RPi	No	~200	Parcial	Sí	Sí
Pérez-Chamé <i>et al.</i> [?]	Nuevo hardware	ESP32	No	~100	Sí	No	Parcial
Guerrero-Osuna <i>et al.</i> [?]	Nuevo sistema	Arduino cloud	+ No	>500	No	Sí	No
Viswanadh <i>et al.</i> [?]	Retrofitting	RPi + sensores	No	~200	Sí	Parcial	No
Fuertes <i>et al.</i> [?]	Nuevo sistema	Embebido nube	+ No	>500	No	Sí	No

#### 4.3. Comparison with Related Works

Al contrastar los resultados con la literatura previa, se observan similitudes fundamentales con los trabajos de Viswanadh *et al.* [?] y Lustig *et al.* [?] en cuanto a la efectividad de las arquitecturas modulares para experimentos remotos. Sin embargo, el presente estudio aporta una validación cuantitativa específica para el caso del MRUA, extendiendo las propuestas de Guerrero-Osuna *et al.* [?] y Fuertes *et al.* [?], quienes se centraron primordialmente en el control de motores. A diferencia de las soluciones basadas en SmartIPLs revisadas por Zhao [?], que dependen de sensores internos de teléfonos inteligentes, el sistema implementado ofrece una infraestructura fija y dedicada que garantiza una mayor repetibilidad en las condiciones de ensayo, manteniendo la accesibilidad económica del montaje.

#### 4.4. Limitations of the Study

A pesar del desempeño satisfactorio del prototipo, se identifican limitaciones intrínsecas en el alcance de la investigación. En primer lugar, aunque la estabilidad fue alta, el sistema sigue dependiendo de la disponibilidad continua del servidor MQTT para la transmisión de datos en tiempo real. En segundo lugar, el número de ensayos realizados ( $n=35$  por modalidad), aunque robusto, se limita a un entorno controlado de laboratorio universitario. Asimismo, el experimento se desarrolla bajo condiciones mecánicas donde factores como la fricción residual del carrito y la alineación micrométrica de los sensores ópticos introducen variaciones físicas que son independientes de la instrumentación IoT.

#### 4.5. Future Work

Las futuras líneas de investigación se orientan hacia la optimización de la capa de percepción y la robustez del sistema. Se propone la integración de sensores de mayor resolución temporal y el uso de protocolos de comunicación con priorización de tráfico para minimizar el impacto de la latencia de red. Asimismo, resulta pertinente incrementar el volumen de ensayos para robustecer el análisis estadístico y realizar mediciones explícitas de la latencia en cada etapa de la cadena de datos. Desde una perspectiva funcional, el sistema puede expandirse para instrumentar otros experimentos de dinámica y energía, integrando los flujos de datos con plataformas educativas de gestión de aprendizaje (LMS) para automatizar la evaluación de las prácticas experimentales.

### 5. Conclusions

El sistema de *retrofitting* IoT propuesto demostró reproducir las mediciones del MRUA con una precisión estadísticamente equivalente al montaje presencial de referencia. Las

diferencias de medias entre modalidades fueron inferiores a 0.03 s en los cuatro puntos de medición, con  $\Delta\sigma < 0.02$  s en todos los sensores (Tabla ??). El resultado más significativo es la igualdad de la aceleración experimental media en ambas modalidades ( $\mu = 0.98 \text{ m/s}^2$ ,  $n = 35$  cada una), con una desviación del 6.5% respecto al valor teórico esperado ( $a \approx 0.92 \text{ m/s}^2$ ), atribuible a imprecisiones de montaje y no al sistema de medición IoT (Figura ??). La tasa de captura exitosa de eventos fue del 98.5% en modalidad remota, con una única pérdida de evento documentada en las 2,380 transmisiones MQTT ejecutadas.

La contribución central de este trabajo es la validación cuantitativa, mediante métricas de correlación de Pearson ( $r = 0.61\text{--}0.62$ ), perfiles de velocidad y distribuciones de aceleración, de que un sistema IoT de bajo coste (< USD 150) basado en tecnología Edge computing (ESP32) puede replicar las capacidades de medición de un montaje presencial de física cinemática. La arquitectura de tres capas propuesta, con código fuente abierto disponible en GitHub (RemotePhysicsLab [?]), es directamente replicable y adaptable a otros experimentos y contextos institucionales de recursos limitados.

El estudio presenta tres limitaciones principales: (1) la validación se circunscribe a un único experimento de cinemática (MRUA) en un entorno institucional específico (PUCE Esmeraldas); (2) no se evaluaron indicadores de aprendizaje ni percepción de usabilidad con estudiantes reales; (3) la estabilidad del sistema está condicionada por la disponibilidad y calidad de la red WiFi del laboratorio.

Las futuras líneas de investigación prioritarias son:

- (1) Extensión de la plataforma a otros experimentos de física: dinámica, conservación de energía y experimentos de ondas.
- (2) Evaluación de aprendizaje con grupos de estudiantes reales, comparando resultados en modalidad remota vs. presencial.
- (3) Integración con sistemas LMS (Moodle, Canvas) para evaluación automática de prácticas de laboratorio.
- (4) Incorporación de sensores de mayor resolución temporal (fotocompuertas < 1 ms) para experimentos de mayor velocidad.
- (5) Implementación de QoS nivel 1 en MQTT y protocolo de reconexión automática para entornos con red inestable.

## References

1. Lahme, S.Z.; Klein, P.; Lehtinen, A.; Müller, A.; Pirinen, P.; Rončević, L.; Sušac, A. Physics lab courses under digital transformation: A trinational survey among university lab instructors about the role of new digital technologies and learning objectives. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **2023**, *19*, 020159. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020159>.
2. Viswanadh, K.S.; Gureja, A.; Walchatwar, N.; Agrawal, R.; Sinha, S.; Chaudhari, S.; Vaidhyanathan, K.; Hussain, A.M. Engineering End-to-End Remote Labs Using IoT-Based Retrofitting. *IEEE Access* **2024**, *PP*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3523066>.
3. Fuertes, J.J.; Martínez, J.M.; Dormido, S.; Vargas, H.; Sánchez, J.; Duro, N. Virtual and Remote Laboratory of a DC Motor for Learning Control Theory. *Int. J. Eng. Educ.* **2011**, *27*, 1–12.
4. Guerrero-Osuna, H.A.; García-Vázquez, F.A.; Ibarra-Delgado, S.; Solís-Sánchez, L.O. Developing a Cloud and IoT-Integrated Remote Laboratory to Enhance Education 4.0: An Approach for FPGA-Based Motor Control. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 10115.
5. Lustig, F.; Kuriščák, P.; Brom, P.; Dvořák, J. Open Modular Hardware and Software Kit for Creations of Remote Experiments Accessible from PC and Mobile Devices. *Int. J. Online Eng. (iJOE)* **2016**, *12*, 30–36. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v12i07.5833>.
6. Zhao, Y. Smartphone-Based Undergraduate Physics Labs: A Comprehensive Review. *IEEE Access* **2024**, *13*, 1106–1132. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3523066>.
7. Dizdarevic, J.; Jukan, A. Engineering an IoT-Edge-Cloud Computing System Architecture: Lessons Learnt from an Undergraduate Laboratory Course. *IoT* **2022**, *3*, 145–163. <https://doi.org/10.3390/iot3010010>.

8. Azad, A.K.M. Use of Internet of Things for Remote Laboratory Settings. *IoT* **2021**, *2*, 203–232. <https://doi.org/10.3390/iot2020011>. 608  
609
9. Palmer, C.; Roullier, B.; Aamir, M.; McQuade, F.; Stella, L.; Anjum, A. Digital Twinning Remote Laboratories for Online Practical Learning. *Sensors* **2022**, *22*, 2351. <https://doi.org/10.3390/s22062351>. 610  
611  
612
10. Lustig, A.; Biard, V. *et al.* Engineering End-to-End Remote Labs using IoT-based Retrofitting. *arXiv* **2024**, arXiv:2402.05466. Available online: <https://arxiv.org/abs/2402.05466> (accessed on 5 December 2025). 613  
614  
615
11. Pérez-Chamé, J.H. *et al.* Development of an educational low-cost and ESP32-based platform for fundamental physics experiments. *Comput. Appl. Eng. Educ.* **2023**. <https://doi.org/10.1002/cae.22674>. 616  
617  
618
12. Marosan, A. *et al.* Real-time data acquisition with ESP32 for IoT applications in educational environments. *Int. Conf. Appl. Math. Sci. (ICMAS)* **2024**, *19*(2), 61–68. Available online: [http://www.icmas.eu/Journal\\_archive\\_files/Vol\\_19-Issue2\\_2024\\_PDF/61-68\\_MAROSAN.pdf](http://www.icmas.eu/Journal_archive_files/Vol_19-Issue2_2024_PDF/61-68_MAROSAN.pdf) (accessed on 5 December 2025). 619  
620  
621  
622
13. Idoyaga, I. *et al.* The Use of Remote Laboratories in University Physics: Challenges and Opportunities in Latin America. In *Proceedings of the Symposium ICASE-MIDEC GIREP 2023*. Available online: <https://indico.cern.ch/event/1175859/> (accessed on 5 December 2025). 623  
624  
625
14. Vera, M. *et al.* Análisis comparativo de la enseñanza de la física en universidades latinoamericanas durante la pandemia COVID-19. *Rev. Invecom* **2025**. Available online: <https://revistainvecom.org/index.php/invecom/article/view/4234> (accessed on 5 December 2025). 626  
627  
628
15. Sosa Mejía, W.S. *RemotePhysicsLab: Prototipo de laboratorio de física híbrido basado en IoT*. Repositorio GitHub. Available online: <https://github.com/waltersosa/RemotePhysicsLab.git> (accessed on 5 December 2025). 629  
630  
631
16. Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. Design Science in Information Systems Research. *MIS Q.* **2004**, *28*, 75–105. 632  
633
17. ISO/IEC. *ISO/IEC 15288:2015 Systems and Software Engineering—System Life Cycle Processes*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015. 634  
635
18. Mattel, Inc. *Hot Wheels Track Sets*. Available online: <https://shop.mattel.com/pages/hot-wheels> (accessed on 5 December 2025). 636  
637
19. Mattel, Inc. *Hot Wheels Cars*. Available online: <https://shop.mattel.com/collections/hot-wheels-cars> (accessed on 5 December 2025). 638  
639
20. Vishay Intertechnology, Inc. *TCRT5000 Reflective Optical Sensor*. Available online: <https://www.vishay.com/docs/83751/tcr5000.pdf> (accessed on 5 December 2025). 640  
641
21. Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Available online: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf) (accessed on 5 December 2025). 642  
643  
644
22. Thingiverse. *Mechanical Support for Track-Based Experiments* (Thing 3630616). Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:3630616> (accessed on 5 December 2025). 645  
646
23. Thingiverse. *3D Printed Modular Track Components* (Thing 3485484). Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:3485484> (accessed on 5 December 2025). 647  
648
24. Thingiverse. *3D Printed Structural Reinforcement Parts* (Thing 4381935). Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:4381935> (accessed on 5 December 2025). 649  
650
25. Thingiverse. *3D Printed Mechanical Pusher Mechanism* (Thing 2806324). Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:2806324> (accessed on 5 December 2025). 651  
652
26. Tower Pro. *SG90 Micro Servo Motor Datasheet*. Available online: [http://www.ee.ic.ac.uk/pjs99/projects/servo/sg90\\_datasheet.pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pjs99/projects/servo/sg90_datasheet.pdf) (accessed on 5 December 2025). 653  
654
27. Stepperonline. *NEMA 17 Stepper Motor Bipolar Datasheet*. Available online: <https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-2004S1.pdf> (accessed on 5 December 2025). 655  
656
28. STMicroelectronics. *L298N Dual H-Bridge Motor Driver Datasheet*. Available online: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf> (accessed on 5 December 2025). 657  
658
29. Generic Electronics Suppliers. *LCD 20x4 Display with I2C Interface Datasheet*. Available online: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf> (accessed on 5 December 2025). 659  
660
30. Generic Electronics Suppliers. *Tactile Push Button Switch for Breadboard*. Available online: <https://www.adafruit.com/product/367> (accessed on 5 December 2025). 661  
662

31. USB Implementers Forum. *USB Type-C Cable Specification*. Available online: <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf> (accessed on 5 December 2025). 663  
664  
665
32. IEEE. *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. Available online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9363693> (accessed on 5 December 2025). 666  
667  
668
33. Generic Electronics Suppliers. *Dupont Jumper Wires (Male-Female and Female-Female)*. Available online: <https://www.adafruit.com/category/289> (accessed on 5 December 2025). 669  
670
34. Generic Electronics Suppliers. *Plastic Project Enclosure Box (135x75x40 mm)*. Available online: <https://www.digikey.com/en/products/filter/enclosures/287> (accessed on 5 December 2025). 671  
672
35. Generic Electronics Suppliers. *AC-DC Power Adapter 12V/1A*. Available online: <https://www.digikey.com/en/products/filter/power-supplies-external-internal-off-board/171> (accessed on 5 December 2025). 673  
674  
675
36. Insta360. *Insta360 Link—4K AI Webcam Technical Specifications*. Available online: <https://onlinemanual.insta360.com/link/en-us/introduction> (accessed on 5 December 2025). 676  
677
37. Raspberry Pi Ltd. *Raspberry Pi 4 Model B Product Brief*. Available online: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf> (accessed on 5 December 2025). 678  
679
38. EMQ Technologies Co., Ltd. *EMQX—MQTT Platform for IoT Data Streaming Documentation*. Available online: <https://docs.emqx.com/en/emqx/v5.0/> (accessed on 5 December 2025). 680  
681
39. EMQ Technologies Co., Ltd. *MQTTX: Your All-in-One MQTT Client Toolbox Documentation*. Available online: <https://mqtx.app/docs> (accessed on 5 December 2025). 682  
683
40. OpenJS Foundation. *Node.js API Documentation*. Available online: <https://nodejs.org/api/> (accessed on 5 December 2025). 684  
685
41. OpenJS Foundation. *Express API Reference*. Available online: <https://expressjs.com/en/4x/api.html> (accessed on 5 December 2025). 686  
687
42. MongoDB, Inc. *MongoDB Documentation*. Available online: <https://www.mongodb.com/docs/manual/> (accessed on 5 December 2025). 688  
689
43. Mongoose. *Mongoose ODM API Documentation*. Available online: <https://mongoosejs.com/docs/api.html> (accessed on 5 December 2025). 690  
691
44. Vercel, Inc. *Next.js Documentation*. Available online: <https://nextjs.org/docs> (accessed on 5 December 2025). 692  
693
45. Meta Platforms, Inc. *React Reference Documentation*. Available online: <https://react.dev/reference/react> (accessed on 5 December 2025). 694  
695
46. Arduino AG. *Arduino IDE 2.x Documentation*. Available online: <https://www.arduino.cc/en/software> (accessed on 5 December 2025). 696  
697
47. Python Software Foundation. *Python 3 Documentation*. Available online: <https://docs.python.org/3/> (accessed on 5 December 2025). 698  
699
48. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The Internet of Things: A survey. *Comput. Netw.* **2010**, *54*, 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>. 700  
701
49. Eraser Labs, Inc. *Eraser—AI Co-Pilot for Technical Design and Documentation*. Available online: <https://www.eraser.io> (accessed on 5 December 2025). 702  
703
50. OpenAI. *ChatGPT*. Available online: <https://chat.openai.com> (accessed on 23 January 2026). Content generated with the assistance of ChatGPT. 704  
705
51. Hernández, R. *et al.* Remote Laboratory for developing IoT systems in engineering education. In *Proceedings of the ACM Technical Symposium on Computer Science Education*; ACM: New York, NY, USA, **2025**. <https://doi.org/10.1145/3716554.3716602>. 706  
707  
708
52. Chang, H.Y. *et al.* Deploying an IoT-based remote physics lab platform to support undergraduate mechanics education. *Phys. Educ.* **2024**, *59*, 065012. 709  
710
53. Kaur, G. *et al.* Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices for Real-Time Monitoring Applications. *Sensors* **2023**, *23*, 6437. <https://doi.org/10.3390/s23156437>. 711  
712
54. Bland, J.M.; Altman, D.G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet* **1986**, *327*(8476), 307–310. doi:[10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8) 713  
714
55. Giavarina, D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochimia Medica* **2015**, *25*(2), 141–151. doi:[10.11613/BM.2015.015](https://doi.org/10.11613/BM.2015.015) 715  
716