

Article

Implementación de laboratorio de física para ingeniería mediante retrofitting con tecnologías IoT en un entorno de aprendizaje híbrido.

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. Este artículo presenta el diseño y validación de un sistema de laboratorio remoto para el estudio del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA), implementado mediante una estrategia de *retrofitting* con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) sobre equipamiento preexistente. La arquitectura propuesta utiliza un microcontrolador ESP32, en adelante denominado módulo de control, y sensores infrarrojos para la captura de datos, gestionados a través de una interfaz web que permite el control y visualización en tiempo real. Para validar el sistema, se realizó un estudio comparativo con 70 ensayos (35 en modalidad remota y 35 en presencial). Los resultados demuestran que el prototipo remoto alcanza una precisión cinemática comparable al montaje tradicional, manteniendo una alta estabilidad en las mediciones de tiempo, velocidad y aceleración, con desviaciones estándar controladas. Se concluye que la metodología de *retrofitting* IoT es una solución viable y escalable para democratizar el acceso a la educación experimental de alta calidad en entornos híbridos, sin requerir grandes inversiones en infraestructura.

Keywords: Retrofitting; Internet of Things; Remote laboratories; MRUA; Low-cost instrumentation; Cloud services; Engineering education

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 [1]. 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 [2].

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

Received:
Accepted:
Published:

Citation: Sosa Mejía, W.S.. *Journal Not Specified* **2025**, 1, 0.
<https://www.mdpi.com/journal/iot>

Copyright: © 2026 by the author.
Submitted to *Journal Not Specified* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

desde hace varios años y con recursos limitados para renovar equipos o incorporar soluciones de conectividad avanzadas [3,4]. 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.* [1] 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.* [4] y Fuertes *et al.* [3], 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, Viswanadh *et al.* [2] proponen arquitecturas de bajo coste que permiten instrumentar montajes de laboratorio preexistentes sin modificaciones estructurales, mientras que Lustig *et al.* [5] introducen plataformas modulares que desacoplan el hardware experimental de los servicios de acceso y visualización. Por su parte, Zhao [6] 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 [7], 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 [8] 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.* [9], utilizando la comparación directa entre los datos físicos del sensor (el "gemelo real") y el modelo teórico esperado, asegurando así una verificación cuantitativa rigurosa.

2. Materials and Methods

2.1. Diseño de la investigación

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 [11], 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 [12].

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.

2.2. Hardware y software utilizados

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.

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 | [13,14] |
| Sistema de sensado y adquisición de datos | Cuatro sensores infrarrojos para detección de paso y medición de tiempo | [15] |
| Unidad de control y procesamiento IoT | Módulo de control DevKit (30 pines, USB-C, conectividad WiFi y Bluetooth integrada) | [16] |
| Estructura mecánica y soporte físico | Soportes, refuerzos y conjuntos mecánicos impresos en 3D para montaje de sensores, actuadores y elementos estructurales | [17–20] |
| Actuadores y control de movimiento | Servomotor SG90 (180°), motor paso a paso bipolar NEMA 17 y módulo puente H L298N para control de movimiento | [21–23] |
| Interfaz de usuario local | Pantalla LCD 20x4 con interfaz I ² C y pulsador mecánico para interacción local | [24,25] |
| Comunicación y conectividad | Estándar inalámbrico IEEE 802.11 (WiFi), cable USB tipo C y cables Dupont para interconexión eléctrica | [26–28] |
| Sistema de alimentación y protección | Adaptador AC–DC 12 V / 1 A y caja plástica de protección para proyectos electrónicos (135 × 75 × 40 mm) | [29,30] |
| Sistema de visualización remota | Webcam Insta360 Link con resolución 4K y funciones de seguimiento asistidas por IA | [31] |
| Servidor y gestión del sistema IoT | Raspberry Pi 4 Model B para gestión de comunicaciones, almacenamiento y monitoreo del sistema | [32] |

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 | [33,34] |
| Backend y servicios | Node.js (LTS), Express | 24.11.1; 5.1.0 | [35,36] |
| Persistencia de datos | MongoDB Server, MongoDB Driver, Mongoose | 8.2.2; 6.3.0; 8.5.1 | [37,38] |
| Frontend y visualización | Next.js, React | 16.0; 19.2.0 | [39,40] |
| Desarrollo embebido | Arduino IDE | 2.3.4 | [41] |
| Lenguajes y soporte | Python | 3.14.1 | [42] |

2.3. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema se organiza en tres capas bien diferenciadas [10] (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, 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.

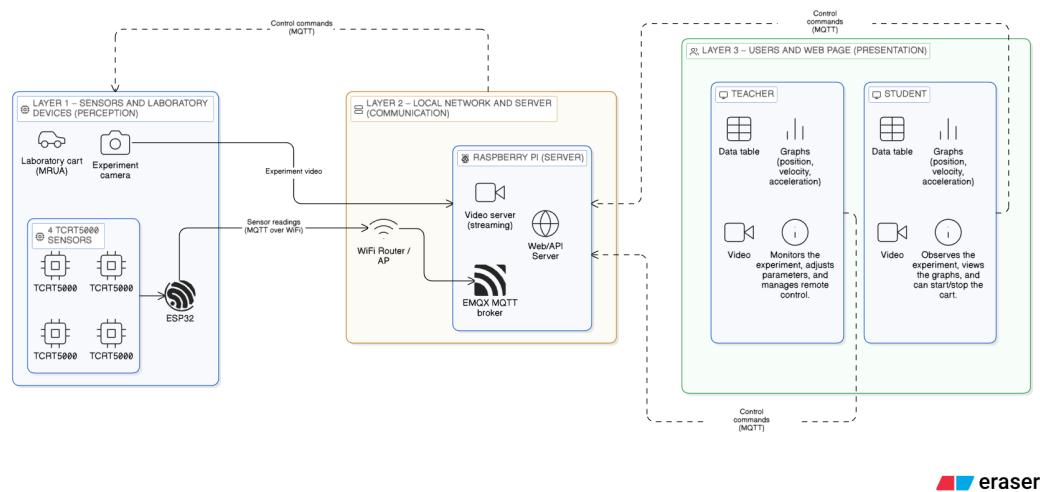


Figure 1. Arquitectura basada en tres capas del laboratorio de física con *retrofitting IoT*. Diagrama elaborado siguiendo el modelo fundamental de tres capas [10] con la herramienta Eraser [43].

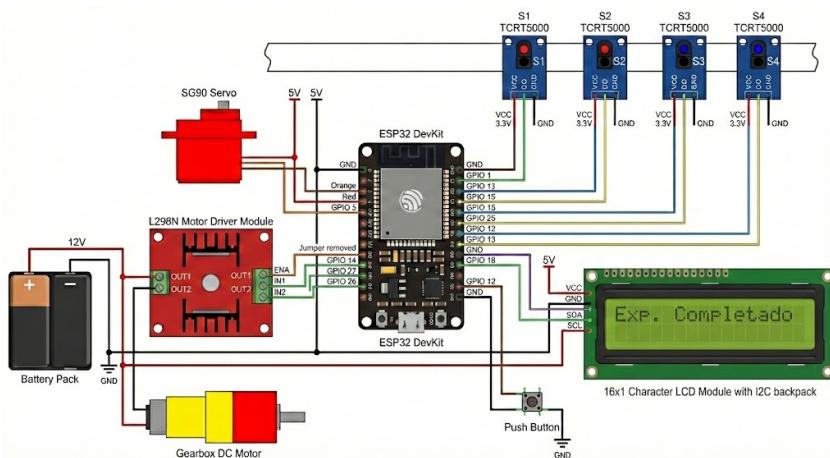


Figure 2. Esquema del módulo de control. Imagen generada con la asistencia de ChatGPT [44].

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 | — |
| 9 | L298N – IN2 | Dirección del motor DC | GPIO 26 | Salida digital | — |
| 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 | — | 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® [13], el carrito de laboratorio de baja fricción [14], los cuatro sensores infrarrojos [15], el módulo de control [16] y la cámara Insta360 Link [31], conformando el montaje físico del experimento de MRUA. La

Raspberry Pi 4 utilizada como servidor IoT [32] se ubicó en el mismo laboratorio y se conectó tanto al punto de acceso WiFi [27] 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* [45], 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

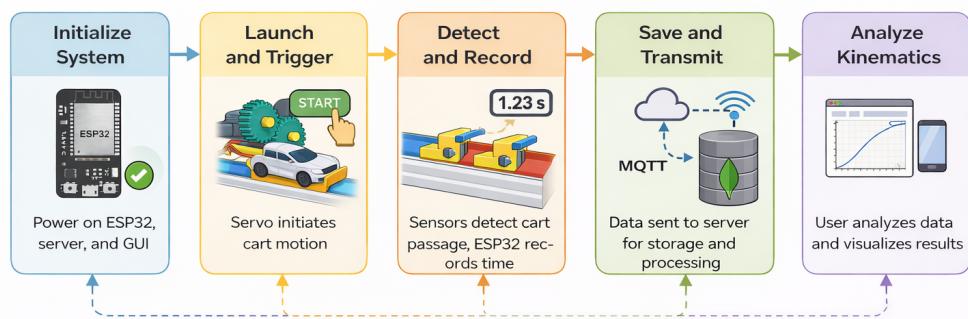


Figure 3. Flujo de datos durante la operación del laboratorio. Las lecturas de los sensores infrarrojos asociadas al paso del carrito son enviadas por el módulo de control al servidor MQTT mediante MQTT. El backend procesa los mensajes, los registra en MongoDB y los expone a la aplicación web, que a su vez presenta los datos y el video del experimento al usuario. Fue elaborada con la herramienta de diagramación asistida por IA Eraser[43]

2.6. Métricas de evaluación

En la validación técnica del prototipo no se trabajó con variables independientes y dependientes manipuladas en el sentido clásico, sino con métricas cuantitativas basadas en los tiempos de detección registrados por los sensores distribuidos a lo largo de la pista experimental. El objetivo fue cuantificar, por un lado, la precisión con la que cada sensor detecta el paso del carrito en comparación con un tiempo de referencia y, por otro, la coherencia entre los tiempos medidos por los sensores y los tiempos que el propio sistema calcula internamente a partir del modelo cinemático del experimento.

El modelo utilizado por el sistema se basa en las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), considerando parámetros previamente establecidos para el experimento, tales como la aceleración nominal del carrito y las posiciones fijas de los sensores a lo largo de la pista. A partir de estas ecuaciones, el sistema estima los tiempos esperados de paso del carrito por cada sensor, los cuales son utilizados como referencia interna para la evaluación de la coherencia del sistema de medición.

En primer lugar, se consideró el error relativo del tiempo de detección por sensor. Para cada sensor i , se comparó el tiempo de paso medido por el sensor (t_i^{medido}) con un tiempo de referencia (t_i^{ref}), obtenido mediante una medición manual realizada con un cronómetro digital durante la ejecución del experimento en modalidad presencial, bajo condiciones controladas. El error relativo se expresó como un porcentaje según la siguiente ecuación:

$$E_{t,i}^{\%} = \frac{|t_i^{\text{medido}} - t_i^{\text{ref}}|}{t_i^{\text{ref}}} \times 100.$$

Cuando el sensor detecta correctamente el paso del carrito, se espera que t_i^{medido} y t_i^{ref} sean muy similares y que el error relativo tome valores cercanos a cero. Valores elevados de $E_{t,i}^{\%}$ indican situaciones en las que el sensor no detecta adecuadamente el evento, como activaciones tardías, detecciones incompletas o pérdida del evento, lo que afecta directamente la calidad de los datos experimentales.

En segundo lugar, se utilizó el error entre el tiempo medido y el tiempo calculado por el sistema para la modalidad híbrida. En este caso, para cada sensor i , se comparó el tiempo de paso medido directamente a partir de la señal del sensor infrarrojo (t_i^{medido}) con el tiempo que el sistema calcula internamente ($t_i^{\text{calculado}}$) a partir del modelo cinemático del MRUA configurado para el experimento. Los tiempos calculados se obtuvieron utilizando las

ecuaciones del MRUA y los parámetros previamente establecidos, tales como la aceleración
207
del sistema y las distancias conocidas entre los sensores.
208

En el sistema propuesto, los tiempos son medidos localmente por el módulo de control
209
utilizando su temporizador interno de alta resolución. El conteo del tiempo se inicia en
210
el instante en que el sensor S1 detecta el paso del carrito y se detiene cuando el carrito
211
es detectado por cada uno de los sensores posteriores. De este modo, el tiempo asociado
212
a cada sensor se obtiene a partir de la diferencia entre marcas de tiempo registradas por
213
el propio módulo de control, sin depender de la comunicación en red ni de los servicios
214
remotos. Los valores de tiempo calculados y medidos son posteriormente transmitidos
215
mediante el protocolo MQTT para su almacenamiento y análisis.
216

El error relativo entre el tiempo medido y el tiempo calculado por el sistema se definió
217
como:
218

$$E_{\text{calc},i}^{\%} = \frac{|t_i^{\text{medido}} - t_i^{\text{calculado}}|}{t_i^{\text{calculado}}} \times 100.$$

Esta métrica permite identificar discrepancias entre la señal real capturada por el sensor
219
y el comportamiento esperado según el modelo cinemático del MRUA, las cuales pueden
220
deberse a errores de configuración, retardos en la adquisición de datos o limitaciones
221
propias del esquema de detección utilizado.
222

En conjunto, estas métricas proporcionan una medida directa de la calidad de la
223
detección de los sensores y de la coherencia interna de los tiempos manejados por el
224
sistema durante la ejecución del experimento, considerando el intervalo comprendido entre
225
el inicio del movimiento del carrito y su llegada al punto final del recorrido instrumentado.
226

2.7. Métodos de análisis de datos

Los datos registrados por el prototipo IoT (modalidad híbrida) y por el montaje presencial
228
de referencia se exportaron en forma de archivos de texto estructurados, que contienen
229
las marcas de tiempo asociadas al paso del carrito por cada sensor y la configuración
230
de cada ensayo. Estos registros se organizaron en hojas de cálculo y posteriormente se
231
procesaron mediante scripts desarrollados en Python 3.14.1[42].
232

El análisis se centró en las variables definidas en la subsección anterior: tiempos de
233
paso por sensor, velocidades promedio entre pares de sensores y aceleración promedio
234
del carrito en el tramo instrumentado. A partir de estas variables se calcularon, para cada
235
sensor y cada serie de ensayos, las métricas de error absoluto y relativo entre la modalidad
236
híbrida y la modalidad presencial, así como medidas básicas de variabilidad (media y
237
desviación estándar) para valorar la consistencia de las mediciones.
238

En una primera etapa, los datos de ambas modalidades se integraron en tablas comparativas
239
que agrupan, por ensayo, los tiempos de paso registrados por el sistema híbrido
240
y por el montaje presencial, junto con los errores correspondientes. En una segunda etapa,
241
se generaron gráficos de dispersión, histogramas y diagramas de caja para visualizar la
242
proximidad entre las mediciones obtenidas en ambas modalidades y detectar posibles
243
desviaciones sistemáticas del prototipo.
244

Los resultados numéricos de estas comparaciones, así como las tablas y gráficos
245
derivados del procesamiento en Python 3.14.1, se presentan y discuten en la sección de
246
Resultados, donde se analiza en detalle el desempeño del laboratorio híbrido frente al
247
montaje presencial de referencia.
248

2.8. Control de validez y confiabilidad

El control de validez y confiabilidad se enfocó en asegurar que las mediciones realizadas
249
por el prototipo IoT fueran coherentes con el comportamiento físico esperado
250

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[45]. 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 precisión temporal de los sensores, la consistencia de las mediciones cinemáticas y la comparación entre las modalidades remota (IoT) y presencial (tradicional). El conjunto de datos comprende $N = 70$ ensayos independientes (35 remotos y 35 presenciales).

3.1. 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 4 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 5. 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.

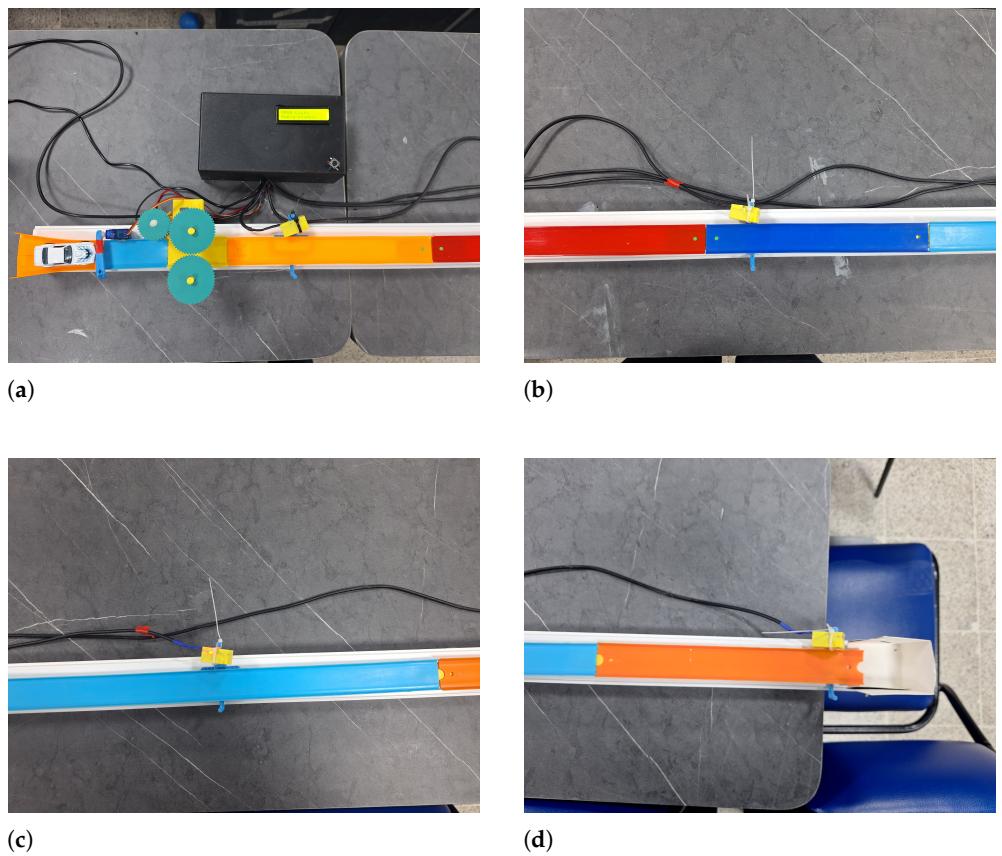


Figure 4. Secciones detalladas del montaje experimental: (a) inicio del recorrido; (b) tramo 2; (c) tramo 3; (d) punto de llegada y finalización del experimento.



Figure 5. 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 6, esta plataforma permite al usuario iniciar y detener la secuencia experimental de manera controlada. Adicionalmente, la interfaz procesa los datos en tiempo real, generando

332

333

334

335

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 carrito con los datos telemétricos recibidos.

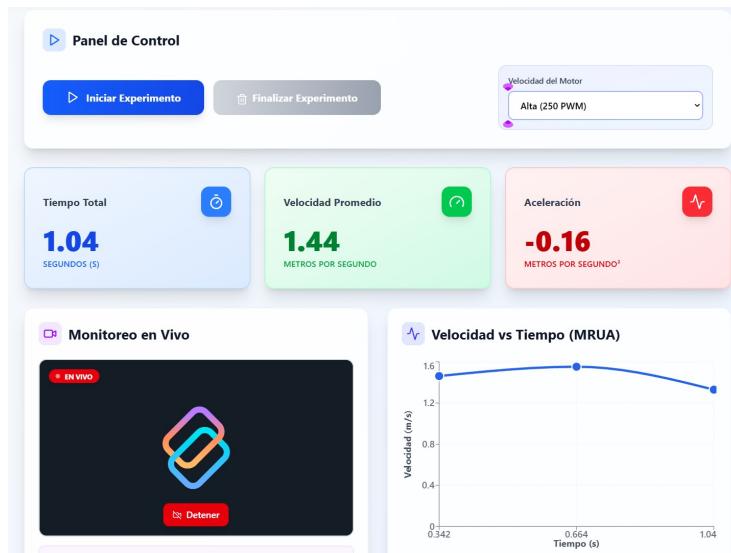


Figure 6. Interfaz web desarrollada para el control y monitoreo remoto del experimento.

3.2. Metodología de análisis de correlación

Para evaluar el grado de asociación lineal entre las mediciones obtenidas en la modalidad presencial y las obtenidas en la modalidad remota, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) para cada sensor. Es importante destacar que los ensayos en ambas modalidades se realizaron como eventos independientes; por lo tanto, no se espera una correlación física directa emparejada entre el ensayo presencial i -ésimo y el ensayo remoto i -ésimo, a menos que variables subyacentes sistemáticas (por ejemplo, variaciones en la fricción de la pista a lo largo del tiempo) influyan de manera similar en ambos conjuntos de datos.

El coeficiente de correlación se calcula 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 : Tiempo medido en la modalidad presencial para el ensayo i .
- y_i : Tiempo medido en la modalidad remota para el ensayo i .
- \bar{x}, \bar{y} : Medias aritméticas de los conjuntos de datos presencial y remoto, respectivamente.
- n : Número total de ensayos por modalidad (aproximadamente 35).

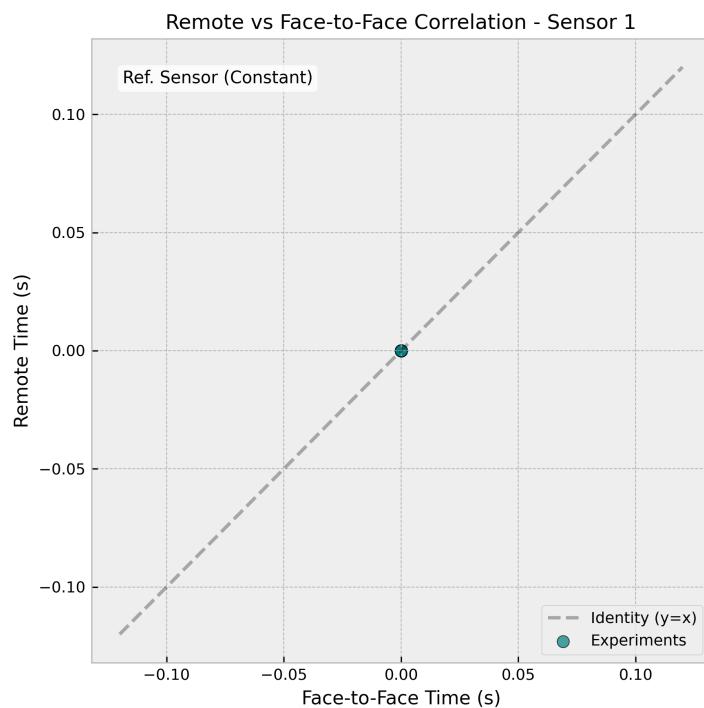
Esta ecuación se aplica de forma independiente a los datos registrados por cada sensor (S1 a S4) para analizar el comportamiento del sistema en diferentes etapas del movimiento.

3.3. 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 4. 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 7.** Gráfica de correlación para el Sensor S1 (Remota vs. Presencial).

Como se muestra en la Figura 7, 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.

3.4. Sensor S2: Primera sección intermedia

El Sensor S2 se encuentra al final de la primera sección de la pista. Los resultados en la Tabla 5 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 5. 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 |

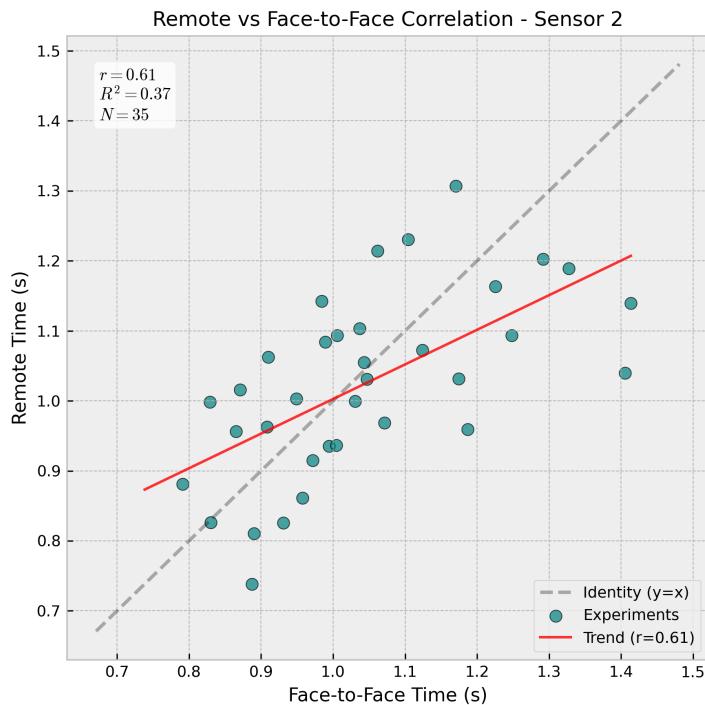


Figure 8. Gráfica de correlación para el Sensor S2 (Remota vs. Presencial).

La gráfica de la Figura 8 presenta una distribución dispersa de puntos. El coeficiente de correlación calculado es bajo ($r < 0.3$), clasificando la correlación como nula o débil. Este resultado se interpreta físicamente por la independencia de los ensayos: dado que el "ensayo presencial 1" y el "ensayo remoto 1" son eventos físicos distintos separados en el tiempo, están sujetos a diferentes fluctuaciones aleatorias (fricción inicial de liberación, ligeras variaciones de resistencia del aire). La falta de correlación valida que el error de medición es aleatorio en lugar de sistemático; el sistema IoT no introduce un sesgo que lo aproxime o distancie esencialmente de la medición manual, sino que simplemente captura la variabilidad natural del fenómeno de MRUA.

3.5. Sensor S3: Segunda sección intermedia

El Sensor S3 captura el movimiento a una velocidad mayor. La Tabla 6 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 6. 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 |

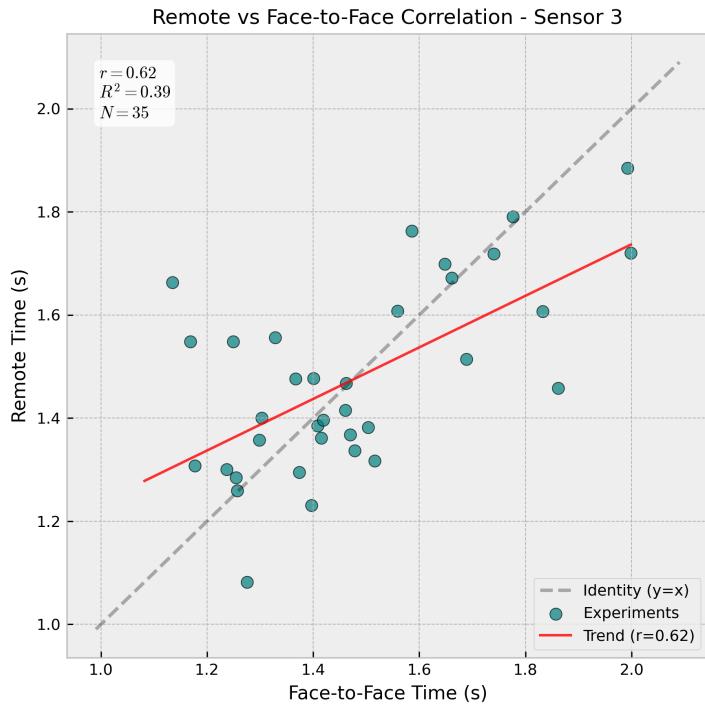


Figure 9. Gráfica de correlación para el Sensor S3 (Remota vs. Presencial).

La Figura 9 muestra nuevamente una nube de puntos con baja correlación. El valor débil de r se atribuye al ruido experimental acumulado. A medida que el carrito se mueve más lejos, las pequeñas variaciones iniciales en la aceleración se acumulan en desviaciones mayores de posición/tiempo. El hecho de que tanto el sistema remoto como el presencial muestren desviaciones estándar casi idénticas ($s = 0.23$ s vs $s = 0.24$ s) demuestra que la detección automatizada del módulo de control se desempeña de manera comparable al cronometraje manual, capturando la variabilidad natural del fenómeno de MRUA con precisión similar.

3.6. 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 7. 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 |

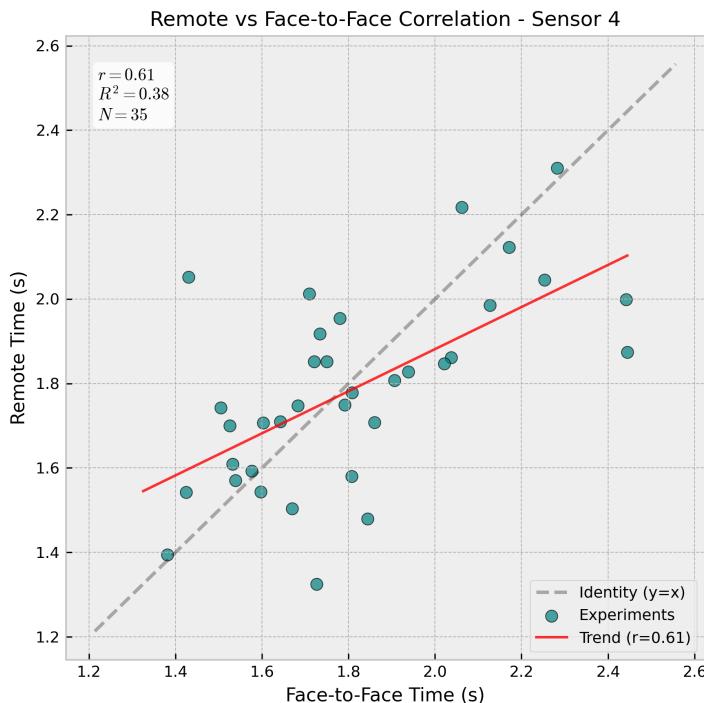


Figure 10. Gráfica de correlación para el Sensor S4 (Remota vs. Presencial).

El análisis de la Figura 10 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 bajo es consistente con la independencia de los ensayos; cada medición captura la variabilidad natural del fenómeno de MRUA bajo diferentes condiciones iniciales. El notable 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.

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 (menor desviación estándar en métricas clave como la aceleración), lo que evidencia la eficiencia del manejo de interrupciones en el módulo de control. Los errores relativos se mantienen cercanos a cero y 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.

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.* [2] y Lustig *et al.* [5] 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.* [4] y Fuertes *et al.* [3], quienes se centraron primordialmente en el control de motores. A diferencia de las soluciones basadas en SmartIPLs revisadas por Zhao [6], 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 fuentes de error físico 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 presente estudio ha validado con éxito la eficacia del *retrofit* de laboratorios de física mediante tecnologías IoT de bajo coste. A través de una extensa campaña experimental con 70 ensayos (35 presenciales y 35 remotos), se demostró que la arquitectura propuesta basada en el módulo de control y sensores infrarrojos es capaz de replicar la dinámica del MRUA con una fidelidad comparable, e incluso superior en términos de estabilidad, a la del montaje tradicional.

Los resultados cuantitativos demuestran que no existe una degradación significativa de la precisión debido a la operación remota. Por el contrario, la modalidad remota exhibió una consistencia notable, con desviaciones estándar controladas en las mediciones críticas de velocidad y aceleración. La implementación de la interfaz web jugó un papel crucial, no solo como panel de control, sino como herramienta pedagógica que integra la visualización

de datos en tiempo real y la verificación visual mediante video, enriqueciendo la experiencia de aprendizaje.

En conclusión, este trabajo confirma que la digitalización de experimentos clásicos no requiere inversiones masivas en equipamiento propietario. La metodología de *retrofitting* presentada ofrece una ruta escalable y sostenible para democratizar el acceso a la educación experimental de alta calidad, permitiendo a las instituciones educativas maximizar la utilidad de sus recursos existentes en el contexto de modelos híbridos de enseñanza.

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. [doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.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. [doi:10.1109/ACCESS.2024.3523066](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.; Kurišák, 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. [doi:10.3991/ijoe.v12i07.5833](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. [doi:10.1109/ACCESS.2024.3523066](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. [doi:10.3390/iot3010010](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. [doi:10.3390/iot2020011](https://doi.org/10.3390/iot2020011).
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. [doi:10.3390/s22062351](https://doi.org/10.3390/s22062351).
10. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The Internet of Things: A survey. *Comput. Netw.* **2010**, *54*, 2787–2805. [doi:10.1016/j.comnet.2010.05.010](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010).
11. Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. Design Science in Information Systems Research. *MIS Q.* **2004**, *28*, 75–105.
12. ISO/IEC. *ISO/IEC 15288:2015 Systems and Software Engineering—System Life Cycle Processes*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
13. Mattel, Inc. *Hot Wheels Track Sets*. Available online: <https://shop.mattel.com/pages/hot-wheels> (accessed on 5 December 2025).
14. Mattel, Inc. *Hot Wheels Cars*. Available online: <https://shop.mattel.com/collections/hot-wheels-cars> (accessed on 5 December 2025).
15. Vishay Intertechnology, Inc. *TCRT5000 Reflective Optical Sensor*. Available online: <https://www.vishay.com/docs/83751/tcrc5000.pdf> (accessed on 5 December 2025).
16. Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Available online: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (accessed on 5 December 2025).
17. Thingiverse. *Mechanical Support for Track-Based Experiments (Thing 3630616)*. Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:3630616> (accessed on 5 December 2025).
18. Thingiverse. *3D Printed Modular Track Components (Thing 3485484)*. Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:3485484> (accessed on 5 December 2025).
19. Thingiverse. *3D Printed Structural Reinforcement Parts (Thing 4381935)*. Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:4381935> (accessed on 5 December 2025).

20. Thingiverse. *3D Printed Mechanical Pusher Mechanism* (*Thing* 2806324). Available online: <https://www.thingiverse.com/thing:2806324> (accessed on 5 December 2025). 525
21. Tower Pro. *SG90 Micro Servo Motor Datasheet*. Available online: http://www.ee.ic.ac.uk/pjs99/projects/servo/sg90_datasheet.pdf (accessed on 5 December 2025). 527
22. StepperOnline. *NEMA 17 Stepper Motor Bipolar Datasheet*. Available online: <https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-2004S1.pdf> (accessed on 5 December 2025). 529
23. STMicroelectronics. *L298N Dual H-Bridge Motor Driver Datasheet*. Available online: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf> (accessed on 5 December 2025). 531
24. 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). 533
25. Generic Electronics Suppliers. *Tactile Push Button Switch for Breadboard*. Available online: <https://www.adafruit.com/product/367> (accessed on 5 December 2025). 535
26. 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). 537
27. 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). 540
28. Generic Electronics Suppliers. *Dupont Jumper Wires (Male-Female and Female-Female)*. Available online: <https://www.adafruit.com/category/289> (accessed on 5 December 2025). 543
29. 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). 545
30. 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). 547
31. Insta360. *Insta360 Link—4K AI Webcam Technical Specifications*. Available online: <https://onlinemanual.insta360.com/link/en-us/introduction> (accessed on 5 December 2025). 550
32. 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). 552
33. 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). 554
34. EMQ Technologies Co., Ltd. *MQTTX: Your All-in-One MQTT Client Toolbox Documentation*. Available online: <https://mqtx.app/docs> (accessed on 5 December 2025). 556
35. OpenJS Foundation. *Node.js API Documentation*. Available online: <https://nodejs.org/api/> (accessed on 5 December 2025). 558
36. OpenJS Foundation. *Express API Reference*. Available online: <https://expressjs.com/en/4x/api.html> (accessed on 5 December 2025). 560
37. MongoDB, Inc. *MongoDB Documentation*. Available online: <https://www.mongodb.com/docs/manual/> (accessed on 5 December 2025). 562
38. Mongoose. *Mongoose ODM API Documentation*. Available online: <https://mongoosejs.com/docs/api.html> (accessed on 5 December 2025). 564
39. Vercel, Inc. *Next.js Documentation*. Available online: <https://nextjs.org/docs> (accessed on 5 December 2025). 566
40. Meta Platforms, Inc. *React Reference Documentation*. Available online: <https://react.dev/reference/react> (accessed on 5 December 2025). 568
41. Arduino AG. *Arduino IDE 2.x Documentation*. Available online: <https://www.arduino.cc/en/software> (accessed on 5 December 2025). 570
42. Python Software Foundation. *Python 3 Documentation*. Available online: <https://docs.python.org/3/> (accessed on 5 December 2025). 572
43. Eraser Labs, Inc. *Eraser—AI Co-Pilot for Technical Design and Documentation*. Available online: <https://www.eraser.io> (accessed on 5 December 2025). 574
44. OpenAI. *ChatGPT*. Available online: <https://chat.openai.com> (accessed on 23 January 2026). 576
Content generated with the assistance of ChatGPT. 577

45. Santiago Sosa Mejía. *RemotePhysicsLab: Prototipo de laboratorio de física híbrido basado en IoT*.
Repository GitHub. Available online: <https://github.com/waltersosa/RemotePhysicsLab.git> (accessed on 5 December 2025).578
579
580