



## Integrated Strategy for Remote Access to Laboratories as a Complementary Resource for Experimental Learning in Physics

---

Nataly Vidal Realpe, Leonairo Pencue Fierro,  
Carlos Felipe Ordoñez Urbano, Miguel Hugo Corchuelo Mora,  
Juan Fernando Florez Marulanda and Rubiel Vargas-Cañas

EasyChair preprints are intended for rapid  
dissemination of research results and are  
integrated with the rest of EasyChair.

July 13, 2021

# Estrategia integrada para el acceso remoto a laboratorios como recurso complementario para el aprendizaje experimental en física

Nataly Vidal Realpe, estudiante<sup>1</sup>, Leonairo Pencue Fierro, PhD(C)<sup>1</sup>, Carlos Felipe Ordoñez Urbano, MSc<sup>1</sup>, Miguel Hugo Corchuelo Mora, PhD<sup>1</sup>, Juan Fernando Florez Marulanda<sup>1</sup>, MSc and Rubiel Vargas-Cañas, PhD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Cauca, Colombia, natalyvidal@unicauca.edu.co, leonairo@unicauca.edu.co, cfordonez@unicauca.edu.co, micorcho@unicauca.edu.co, jflorez@unicauca.edu.co, rubiel@unicauca.edu.co

**Resumen-** El aprendizaje experimental, indispensable en la formación académica del estudiante afín a las ciencias e ingenierías, se ha visto alterado hoy en día por situaciones adversas como la pandemia por COVID-19 y demás casos que han establecido la educación a distancia como solución alternativa. Por lo anterior, se propone un sistema de laboratorios de mecánica basados en el control remoto para configuración de equipos y recolección de datos de tres plantas, que corresponden a igual número de fenómenos físicos observados en la naturaleza y que, como enfoque de experimentación real, están a la merced del ruido e incertidumbre en las medidas. Con la implementación del enfoque del Internet de las Cosas en consonancia con los dispositivos tecnológicos de hardware y software necesarios, se elaboró un sistema completo de interacción cliente-servidor que se puede establecer como una alternativa de aprendizaje experimental en una modalidad virtual.

**Palabras clave--** Aprendizaje basado en experimentación, Internet de las cosas (IoT), Instrumentación didáctica, Laboratorios remotos.

**Abstract--** Experiential learning, essential in the academic training of students related to science and engineering, has been affected today by adverse situations such as the COVID-19 pandemic and other events that have forced distance education as an alternative solution. Therefore, a system of mechanics laboratories based on remote control for equipment configuration and data collection for three plants is proposed, that experimental set up corresponds to the same number of physical phenomena observed in nature and which, as a real experimentation approach, are susceptible to noise and measurement uncertainty. With the implementation of the Internet of Things approach, complemented with the necessary hardware and software technological devices, a complete client-server interaction system was developed, this system can be established as an alternative of experimental learning in a virtual way.

**Keywords--**Experiential Learning, Internet of things, Iot, Didactic instrumentation, Remote laboratories.

## I. INTRODUCCIÓN

A causa de situaciones extraordinarias, como lo ha sido la pandemia de COVID-19, donde la aglomeración de personas representa un riesgo para la salud humana [1], las entidades

gubernamentales de diferentes países se han visto en la obligación de recomendar e implementar herramientas de educación a distancia. Sin embargo, varias falencias han relucido de un sistema educativo que no estaba preparado para esta situación, entre ellas se encuentra la ausencia de prácticas experimentales que impregnan en el estudiante los saberes teóricos adquiridos.

Algunas soluciones propuestas se basan en la adquisición de datos que provienen de sistemas simulados, cuyo grado de idealización elimina los errores que son imprescindibles para la experimentación integral del estudiante que se enfrentará a datos genuinos en la vida real [2], con las incertidumbres del caso. Es por lo anterior que la implementación de laboratorios remotos, que se definen como un conjunto de tecnologías que permiten al usuario, a través de internet [3], llevar a cabo un experimento, es una solución viable para el aprendizaje experimental de los fenómenos en comparación con las prácticas presenciales que se realizan de manera tradicional.

La integración de distintos elementos tecnológicos para una aplicación específica como lo son las prácticas remotas de laboratorio, brindan facilidad para desarrollar una pedagogía clara y didáctica en una modalidad virtual [4]. En este documento se presenta la incorporación de hardware y software para dar pie a tres laboratorios de mecánica con funcionamiento en tiempo real y un sistema de control por plataforma Web. Además, se hace uso de dispositivos de grabación para generar en el estudiante un alto grado de inmersión en la planta seleccionada, resaltando el acceso a un monitoreo constante que permite la retroalimentación e incluye un procesamiento de imágenes para la toma de datos.

Las tres plantas físicas seleccionadas para conformar este sistema de laboratorios remotos, se basan en los fenómenos de mecánica: movimiento parabólico de proyectiles, caída libre de cuerpos y sistema masa - resorte.

El presente documento consta de cuatro secciones; en la sección II se describe de manera general la arquitectura del sistema, posteriormente en la sección III se exponen las especificaciones requeridas para la construcción y conexión de cada una de la tres plantas físicas con el servidor, en la sección IV se detalla la prueba piloto de la propuesta con uno de los

montajes experimentales, y en la sección V se presentan la discusión y resultados.

## II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La estructura diseñada de los laboratorios remotos, se basa en una arquitectura cliente-servidor donde dos computadores se conectan a una misma red; el primero o local se ubica próximo a la planta física, teniendo conexión con todos los sensores y actuadores de la misma mediante una tarjeta integrada. El segundo computador permite controlar el sistema real de manera remota. Las diferentes plantas se conectan a un servidor en común que permite la interacción del cliente mediante una interfaz web (Figura 1 y 2). La información que se adquiere de la planta, es almacenada en una base de datos no relacional.

Dividiendo el sistema en dos zonas, se tienen dos capas, una física comprendida por las tres plantas de laboratorio, y otra de interacción donde el usuario trabaja y manipula las características de las plantas. De forma más detallada:

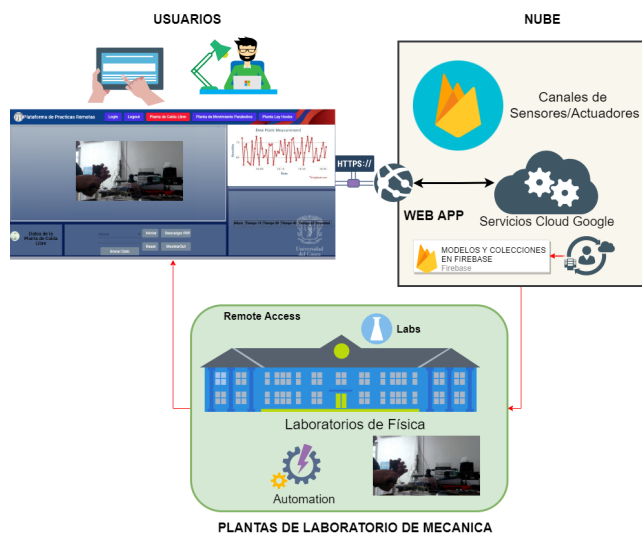


Fig 1. Esquema general de los componente Cliente-Servidor del laboratorio remoto de mecánica

### A. Capa Física

- Cada planta de laboratorio cuenta con una tarjeta integrada ESP32 que se enlaza de forma serial a un computador con conexión a internet. Este tipo de tarjeta es de bajo costo y permite la escalabilidad del proceso.
- La comunicación entre las tarjetas integradas ESP32 y el computador local se realiza mediante lenguaje de programación Python.
- Para captar la información pertinente a cada práctica, se cuenta con distintos tipos de sensores que están

conectados a la tarjeta ESP32 (Figura 2). Variables como desplazamiento, ángulos de inclinación o percepción de movimiento, son datos que se extraen de la planta para que el sistema genere retroalimentación y presente resultados. Entre los elementos se encuentran dispositivos de grabación que mediante un posterior procesamiento de imágenes, arrojan datos de posicionamiento en el tiempo del cuerpo analizado.

- El funcionamiento inicial de cada planta conlleva activar dispositivos que generen una interacción con el entorno para posteriormente obtener la lectura de la variable deseada. En cada planta se disponen de motores, servomotores, sistemas de engranaje, o actuadores lineales que hacen posible el inicio de la medición. Estos actuadores están también conectados a la tarjeta ESP32, la cual al recibir órdenes del computador remoto, enciende o apaga cada actuador (Figura 2).

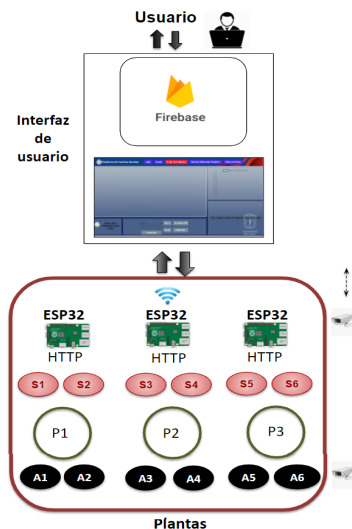


Fig 2. Arquitectura cliente-servidor integrada a las tres plantas físicas (P1 a P3) seleccionadas, con actuadores (A1 a A6) y sensores incorporados (S1 a S6).

- El monitoreo constante de cada planta es necesario para que el estudiante (usuario desde la plataforma) sienta que es parte de la práctica y reconozca los elementos que la conforman, es por ello que cada una de las plantas tiene incorporada una cámara IP AXIS, que mediante una conexión a la red local y apertura de puertos de la misma, permite la visualización del entorno en la plataforma web mediante protocolos HTTP o RTSP.

### B. Capa de interacción

- El ingreso por parte del usuario al entorno de las tres plantas remotas, se realiza mediante un computador

remoto con conexión a Internet. El usuario interactúa con la interfaz HMI de la plataforma web construida, donde se le exige una cuenta de registro que le permite almacenar adecuadamente los datos adquiridos. La interfaz es simple, está organizada por una arquitectura con botones y entradas necesarias para dar inicio a las prácticas. Cada práctica tiene su área específica en la interfaz que se subdivide para mostrar el video en *streaming* de la planta, gráficas de variables, tablas de datos resultantes de la medida y su descarga en un archivo PDF. Cabe resaltar, que el usuario tiene la opción de pausar la práctica en cualquier momento mediante un botón diseñado para tal fin.

- Firebase de google es la capa interna o *Backend* que se utiliza como base de datos para soportar toda la información que ingresa el usuario y entrega cada una de las plantas. Esta herramienta está en constante uso ya que su repetitiva actualización permite la correcta retroalimentación del sistema, dados sus servicios en tiempo real. En la figura 3 se muestra la interfaz donde se construyen los modelos de bases de datos de las tres plantas remotas.



Fig. 3 Interfaz para la gestión de Modelos de Base de datos en las tres plantas remotas.

### III. ESPECIFICACIONES DE LAS PLANTAS

Cada una de las tres plantas de mecánica seleccionadas, plantea un objetivo principal que debe ser cumplido en las prácticas remotas correspondientes. Lo anterior implica el conocimiento de una serie de características que en conjunto complementan al sistema para alcanzar la meta trazada. A continuación, se presentan las variables y particularidades que cada una de las plantas presenta y ejecuta para un óptimo desarrollo del laboratorio remoto de mecánica.

#### A. Planta de Caída Libre

El objetivo de esta planta es reforzar en el estudiante los conocimientos sobre el movimiento uniformemente acelerado

de un proyectil para una sola dimensión espacial (Figura 4 y 5).

- La variable principal de entrada es la posición de un balín a lo largo del eje vertical 'Y' que es marcado con una regla de apoyo. Esta es la altura inicial desde la cual se suelta el cuerpo, y es un valor predeterminado por el usuario.
- La variable principal de salida es el tiempo que demora el proyectil en caer en la posición de referencia cero. Esta medida también es tomada al pasar el proyectil por ciertas alturas determinadas, en las cuales se han dispuesto sensores de movimiento para captar el instante.
- Al ser una práctica remota, es necesario que la planta sea autosuficiente, por lo tanto, se implementa una unidad de recolección y elevación del balín.

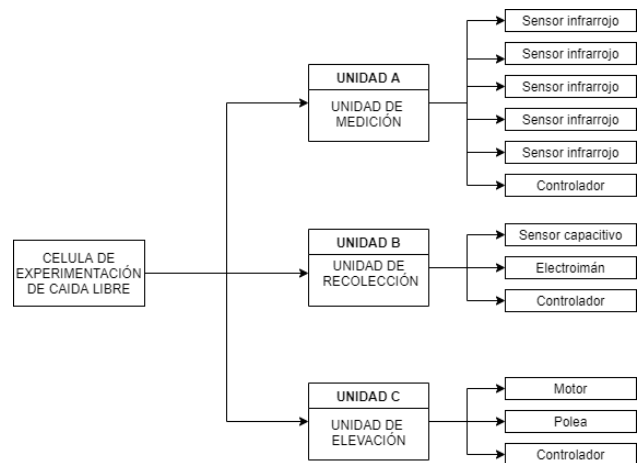


Fig. 4 Arquitectura de la planta remota de caída libre



Fig 5. Montaje experimental para la planta remota de caída libre

## B. Planta de Movimiento Parabólico

El objetivo de esta planta es reforzar en el estudiante los conocimientos sobre el movimiento uniformemente acelerado de un proyectil para dos dimensiones espaciales (Figura 6 y 7).

- ❑ La variable principal de entrada es el ángulo de inclinación del cañón con respecto al eje horizontal 'X', que el usuario ingresa de acuerdo a un rango de ángulos predefinidos.
- ❑ Las variables principales de salida son las posiciones X e Y del proyectil durante determinados instantes de tiempo hasta que el proyectil cae en la posición de referencia cero para el eje Y. El tiempo de vuelo también es entregado al usuario.
- ❑ Al ser una práctica remota, es necesario que la planta sea autosuficiente, por lo tanto, se implementa un unidad de retroalimentación que recolecta el balón y lo inserta nuevamente en el cañón.

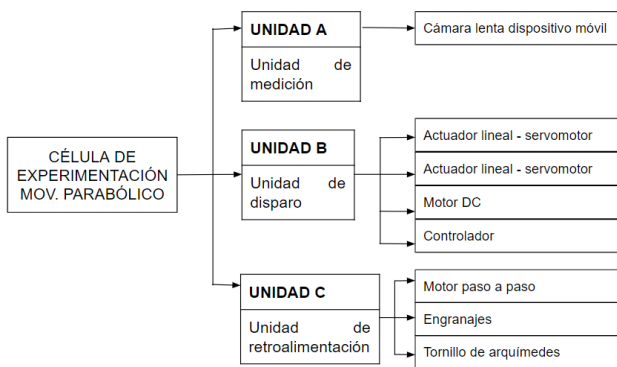


Fig. 6 Arquitectura de la planta remota de movimiento parabólico



Fig. 7 Montaje experimental para la planta de movimiento parabólico

## C. Planta de Sistema Masa-Resorte

El objetivo de esta planta es reforzar en el estudiante los conocimientos sobre la Ley de Hooke y la constante de elasticidad presente en un sistema masa-resorte, sin embargo debido a la complejidad de la práctica, en esta planta se realiza

la corroboración de la ley de Hooke en lugar de hallar el valor de la constante de elasticidad de cada resorte (Figura 8 y 9).

- ❑ La variable principal de entrada dada por el cliente es la distancia a la cual se desea alargar el resorte del dinamómetro.
- ❑ La variable principal de salida es la lectura de fuerza que arroja el dinamómetro al momento de elongarse el resorte, teniendo en cuenta que esta lectura se realiza con procesamiento de imágenes.
- ❑ El sistema vuelve a su posición original al recibir la señal que la información tomada, por procesamiento de imágenes, ha sido almacenada en la base de datos.

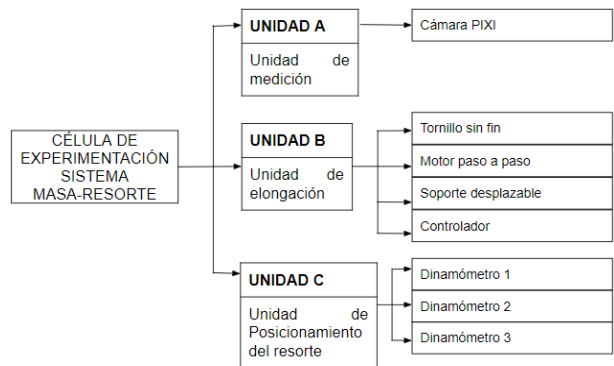


Fig. 8 Arquitectura de la planta remota Sistema masa-resorte

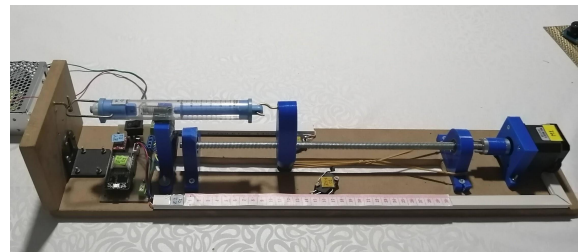


Fig. 9 Montaje experimental para la planta remota en ley de Hooke

## IV. PRUEBA PILOTO

En la presente sección se presentan y discuten los resultados de la experiencia generada principalmente con la planta de caída libre. Para esto se verifican ciertos aspectos:

### A. Comunicación Cliente-Servidor

Desde el lado del servidor, se cuenta con un modelo de base de datos no relacional para cada planta que está en función de las variables, sensores, y actuadores que se implementaron sobre Google Firebase empleando la Real Time Data Base. Este servicio garantiza una recepción remota de información, así como la lectura desde el lado del cliente de forma rápida,

garantizando lo que se denomina *tiempo real* que brinda una percepción de simultaneidad al usuario o estudiante.

El modelo de base de datos para la planta de caída libre almacena de forma independiente los datos de entrada (provenientes de los sensores) y los datos de salida hacia el montaje experimental (enviado a los actuadores) (ver figura 10).

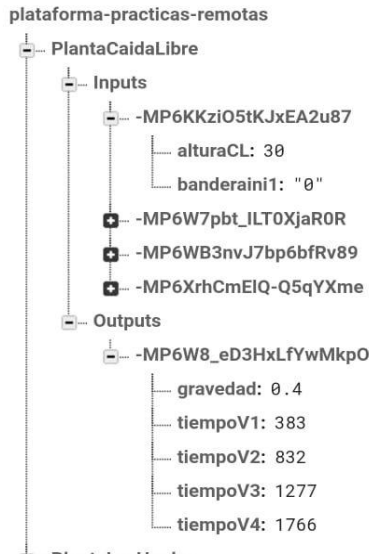


Fig. 10 Modelo de base de datos para planta remota de caída libre

Se realizaron pruebas de acceso a la plataforma web a través de las cuentas institucionales (figura 11) donde se hace uso del servicio de autenticación de google Firebase, que permite heredar los atributos de seguridad y garantizar un usuario por planta.

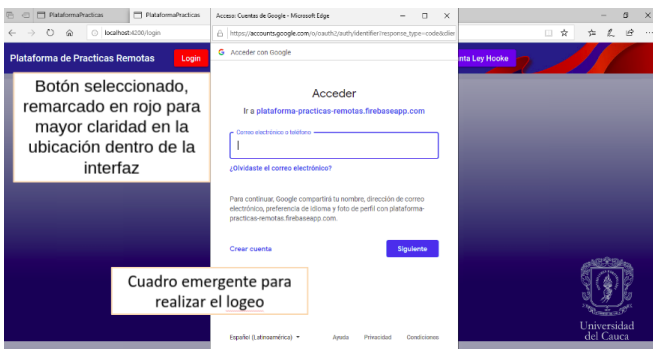


Fig. 11 Interfaz para accesos con permisos de trabajo plataforma web de laboratorio remoto de mecánica.

Posteriormente, se selecciona a través del menú, la planta con la cual se va a experimentar. En este caso, se presenta la interfaz para la planta de caída libre (Figura 12), donde se hace el previo registro de usuario para ingresar a la base de datos. No obstante, se cuenta con otras interfaces como en la figura 13, que corresponde a la planta de ley de hooke.



Fig. 12 Interfaz de usuario para la planta remota de caída libre.

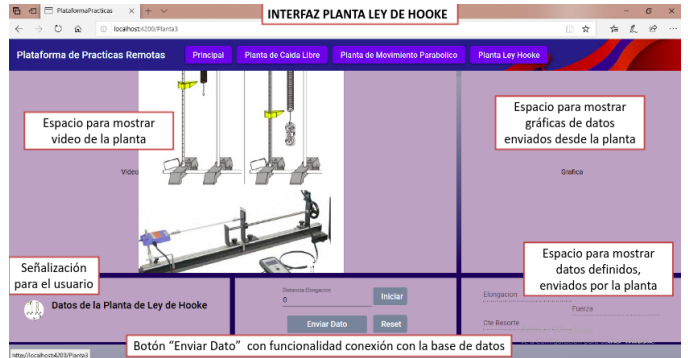


Fig. 13 Interfaz de usuario para la planta remota de Ley de Hooke

Para el caso de prueba sobre la planta de caída libre, la interfaz de la plataforma permite que el usuario seleccione el valor de altura desde la cual será lanzado el proyectil, teniendo en cuenta un cierto intervalo y valores que ya han sido predeterminados y cuyos valores están entre 5 cm a 100 cm de altura.

## B. Unidad Elevación, medición y visualización de la planta.

A través de la conexión en red local de la cámara IP con sus respectivas configuraciones de operación, se logró el monitoreo en tiempo real del sistema como se observa en la Figura 14, así como la visualización del fenómeno desde la plataforma web mediante protocolos HTTP o RTSP.

Las alertas de inicio para la práctica se envían a la tarjeta ESP32 desde el servidor, poniendo en marcha al motor DC que da comienzo al sistema de piñones y correas. La elevación del balón se realiza hasta la altura elegida, momento en el cual el motor y el electroimán se apagan, entonces el balón adherido es liberado para que experimente la caída.

De forma inmediata, cada uno de los sensores infrarrojos ubicados a distintas alturas, detectan la presencia del balón en dicha posición durante su caída, donde la pareja de datos posición y tiempo detectados son enviadas al servidor y visualizados en la tabla de la interfaz de usuario. Las variables

de tiempo recibidas son tiempoV1, tiempoV2, tiempoV3, tiempoV4 que corresponden a los sensores en la etapa hardware.



Fig 14. Monitoreo del montaje experimental de la planta de caída libre.

### C. Unidad de recolección.

Al momento de caer el balín en la posición de referencia cero, el sistema está diseñado para amortiguar el golpe con una estructura MDF cubierta de hule para no desviar el proyectil. El electroimán recolecta nuevamente el balín para volver al proceso de elevación según la orden de usuario. Este proceso permite el trabajo del sistema en lazo cerrado.

### D. Evaluación en ambiente controlado

Para evaluar el sistema aquí propuesto, se llevaron a cabo experimentos que permitieron medir su desempeño en tres niveles: inicialmente a nivel de componentes individuales, esto es, se llevaron a cabo pruebas de transmisión y recepción de datos entre la base de datos con la plataforma web y el módulo de control: tarjeta ESP32, y la base de datos. Igualmente se llevaron a cabo pruebas de transmisión y recepción de video.

Pruebas ESP32 - Plataforma web : El desempeño de inserción y lectura de la información desde y hacia google Firebase, muestra un excelente comportamiento dado que no se presentan pérdidas de datos entre planta-servidor y además los tiempos en que ocurren los procesos son inferiores a 0.3 s. De igual manera en la interacción de cliente (plataforma web)-servidor, se evidencian cambios en las lecturas en tiempos similares o por debajo de 0.3 s, donde se aprecia que la información enviada hacia o desde el sistema físico, se transmite de forma confiable, sin pérdidas y brinda el beneficio de tener una experiencia como si se estuviera en el lugar generando la toma de datos presencial.

Pruebas de procesamiento óptico de imágenes (PODI): los datos de posición vertical y horizontal del proyectil en la planta de movimiento parabólico para un instante de tiempo

determinado, se tomaron a través del procesamiento óptico de imágenes del recorrido del balín, que fue grabado a 60 fps. El código que se desarrolló en Python, resalta la cinta métrica adherida al sistema para identificar su escala correspondiente en píxeles, también determina un punto central en el proyectil que permite ubicarlo de acuerdo a las coordenadas establecidas. Como se observa en la figura 15 se hace una segmentación de cada frame, teniendo en cuenta: las franjas de color rojo y blanco que indican intervalos de 10 cm de distancia, y el origen que se ubica justo después de la boca del cañón (en el extremo derecho). Con lo anterior, se logra posicionar el proyectil sin que haya interferencia alguna con los objetos de fondo. La medida tiene una precisión de 0.01 cm, y un error aproximado de  $\pm 1.5\text{cm}$  con respecto al valor real.

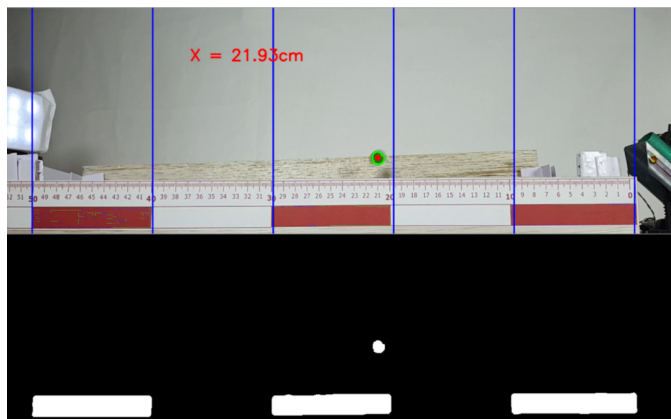


Figura 15. Procesamiento óptico de imágenes del recorrido del proyectil en la planta de movimiento parabólico, para ubicarlo de acuerdo al eje X.

Pruebas Tx-Rx video : La respuesta de la transmisión de video sobre las cámaras de protocolo IP empleadas para estar embebidas en la plataforma web, evidencian un esquema ajustable en tamaño y video de óptima calidad debido a la resolución de la misma (1280x800 pixels), dado que son HD sobre 720p o 1080p. Por otro lado, al desarrollar pruebas en transmisión y latencia de la señal en vivo se presentan retardos significativos entre 3 a 8 segundos en la imagen. Sin embargo, son valores que están en función de la capacidad de subida de la red local empleada que oscila entre 0.5 Mbps a 2 Mbps, así como de la conexión del cliente que se encuentre en sesión. Lo anterior es un aspecto por ahondar con mayor detalle, donde se pueda establecer una relación entre calidad de video, tamaño de imagen y velocidades de las conectividades de internet.

Luego, se evaluó el nivel funcional, esto es, el funcionamiento de los diferentes módulos y la capa de interacción; login, comando fijar valores, comando iniciar experimento, comando graficar y comando restaurar valores iniciales. Logrando así un cumplimiento en lo consignado en las historias de usuario.

#### E. Evaluación del nivel aplicativo:

Esto es, el rendimiento y funcionalidad del sistema, lo cual fue validado por un panel conformado por el jefe de departamento de Física y el jefe del Centro de Gestión de la Calidad y la Acreditación Institucional en un ambiente controlado; allí, se recopilaron las impresiones en cuanto a: las interfaces, la rigurosidad del método científico y la experiencia de usuario.

#### V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El conjunto de unidades de medición y accionar mecánico de cada planta, han cumplido con los requerimientos básicos que se especificaron anteriormente para llevar a cabo la toma e interpretación de datos que se efectúa en el aprendizaje experimental de los distintos fenómenos físicos seleccionados para evaluar, emulando los procesos de medida presenciales en el modelo tradicional.

De acuerdo a la arquitectura de cada una de las plantas, el sistema es escalable a lo que se desee adicionar, reemplazar o eliminar. La versatilidad del Internet de las cosas permite incorporar distintas herramientas tecnológicas que son capaces de brindar una medición o proceso mecánico idóneo y de mínimo error, para así mejorar la estabilidad y funcionalidad de los laboratorios remotos.

Cabe destacar que las ventajas de desarrollar este tipo de prácticas remotas en física, son extensas. Como parte de ellas se puede mencionar la posibilidad que el estudiante las repita en cualquier momento, debido a algún tipo de interrupción en la comunicación con el servidor, o por falta de comprensión del fenómeno físico que está observando en el monitoreo del sistema. Es así, que en el ámbito pedagógico, repetir y brindar el tiempo suficiente a una práctica experimental, permite que el aprendizaje sea más duradero y consistente [5].

Se ha planteado y desarrollado una propuesta escalable de un sistema hardware y software genérico fácilmente modificable con las interfaces necesarias para cada herramienta tecnológica en las distintas plantas brindando una estrategia para coadyuvar en el aprendizaje por experiencia.

#### VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad del Cauca por el apoyo recibido para el desarrollo de este proyecto, especialmente al Centro de Gestión de la Calidad y la Acreditación Institucional, que proporcionaron los recursos financieros para el desarrollo e implementación de las fases aquí descritas.

Igualmente es necesario reconocer el trabajo de los estudiantes de los cursos de Instrumentación Virtual y Metodología de Proyecto de Ingeniería en Automática, de los programas de Ingeniería Física e Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, quienes desarrollaron

los prototipos aquí presentados por medio de un trabajo interdisciplinario durante el segundo semestre del año 2020.

#### VII. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Salud y Protección Social, "Evitando aglomeraciones prevenimos propagación del covid-19", Boletín de Prensa No 818 de 2020, Bogotá, 2020.
- [2] R. Parra, D. Zambrano, E. Valera and I. García, "Laboratorios virtuales y. Laboratorios reales, caso de estudio: Materia Redes Eléctricas", Memorias de la Décima Sexta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática (CISCI 2017), 2017.
- [3] U. Hernández-Jayo and J. García-Zubia, "Los laboratorios remotos revolucionan el aprendizaje desde casa", The conversation, 2020.
- [4] M. Canu and M. Duque, "Laboratorios remotos: ¿Cuál es el interés pedagógico?" ENCuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2015 Cartagena de Indias, 2015.
- [5] E. Moran, "La práctica y la repetición como base del aprendizaje", Smartick. [Online]. Available: <https://www.smartick.es/blog/educacion/psico/practica-repeticion-aprendizaj>