

### **Implementation of a multi-friction remote laboratory based on IoT strategies and estimation models**

### **Implementación de un laboratorio remoto multi-fricción basado en estrategias de IoT y modelos de estimación**

Andrés Felipe, CALVO SALCEDO<sup>1\*</sup>, Carlos, HENAO BAENA<sup>1</sup>, Hugo Armando, GALLEGO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerisidad Tecnológica de Pereira. Carrera 27 #10-02 Barrio Álamos, Pereira Risaralda Código postal: 66000, Colombia (0000-0001-9873-8211; 0000-0001-9409-8982; 0000-0003-4470-5611)

Sent date: 30/August/2022 Acceptance date: 22/June/2023

---

#### **Abstract:**

This paper presents the implementation of a multi-friction remote laboratory (RL) in the inclined plane study. We use an IoT and software strategy. For the design we start from the pedagogical objectives of a standardized teaching process, and we propose a mathematical model that has the possibility of generating changes by software, to ensure the reproducibility of a physical phenomenon. Finally, we considered the technical and statistical validation of the experiment. The results show the flexibility of the method to reproduce the friction effect with different types of material, without the need to make physical variations on the device and without generating changes that can be perceived by the user who uses the device.

**Keywords:** Remote laboratory, MQTT, Arduino, Raspberry, Mechanical Physics.

---

#### **Resumen:**

En el estudio de plano inclinado. Este sistema utiliza un dispositivo IoT y una estrategia algorítmica para realizar la ejecución del experimento. Se utiliza como insumo de partida los objetivos pedagógicos de un proceso de enseñanza estandarizado y plantea un modelo matemático que tiene la posibilidad de generar cambios por software, para garantizar la reproducibilidad de un fenómeno físico. Por último, se considera validación técnica y estadística del experimento. Los resultados muestran la flexibilidad que presenta el método para reproducir el efecto de fricción con diferentes tipos material, sin necesidad de realizar variaciones físicas sobre el dispositivo y sin generar cambios que puedan ser percibidos por el usuario que utiliza el dispositivo.

**Palabras clave:** Laboratorio Remoto, MQTT, IoT, Raspberry, Multi-fricción.

---

\* Corresponding author. E-mail: [afcalvo@utp.edu.co](mailto:afcalvo@utp.edu.co)  
Tel. 3148899237, Fax (606) 3137494

# 1. Introducción

Actualmente los laboratorios son infraestructura fundamental en los procesos de enseñanza. Un laboratorio es un local especializado donde se realizan experimentos. El trabajo desarrollado en estos sitios proporciona el conocimiento práctico que ayuda a complementar la formación teórica (IMCYC, 2018). El sector educativo ha tenido que enfrentar problemáticas complejas por la falta de presupuesto para la inversión en infraestructura, haciendo que estos espacios no sean ideales para la enseñanza, resaltando el hacinamiento en los ambientes, la falta de actualización o adquisición de equipos y los cambios de paradigma en la enseñanza producto de la pandemia del SARS-CoV-2 (Balderas *et al.*, 2021; Tiempo, 2022; Abadía, 2022). Estos problemas afectan el proceso académico, al no lograr adquirir de forma efectiva las competencias prácticas.

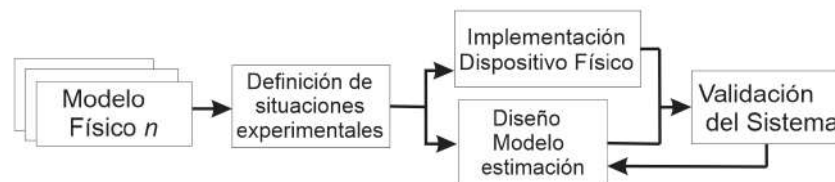
Una alternativa al problema anterior es la construcción de infraestructura tecnológica de bajo costo y que se adapte a métodos de enseñanza moderno. Existen diferentes enfoques en la literatura para el diseño y creación de laboratorios (Bacca *et al.*, 2009; UTP, 2022). Estos pueden ser clasificados en dos grupos como son la operación local y remota. El primer paradigma, se caracteriza por una operación en sitio, en esta aproximación, los estudiantes interactúan con el equipo, documentan y analizan los resultados obtenidos, este enfoque se caracteriza por ofrecer una experiencia real del fenómeno, resaltando errores técnicos y humanos durante la sesión experimentación (Andrés *et al.*, 2006; Meza *et al.*, 2009). El segundo paradigma, se refiere a los laboratorios remotos (LR), en los que se desarrollan experimentos que son controlados a distancia, en muchos casos sin intervención humana, por medio del uso de tecnologías e internet. Este enfoque evita errores subjetivos en la ejecución de la práctica, además que facilita el uso asincrónico del laboratorio.

Un LR está constituido por una etapa de instrumentación y control de sensores, actuadores, controladores y comandos de interfaz de usuario. Otra etapa es el sistema físico o banco que modela el fenómeno a estudiar, el cual se comunica a la red facilitando el control a distancia (Márquez *et al.*, 2010). Algunos ejemplos representativos de LR son VISIR, CIT, EH-WSN-Lab, Gieva y ECAD estudiantes (Contreras-Mendieta *et al.*, 2019; Albert *et al.*, 2016). El diseño de este tipo de laboratorios funciona bajo un paradigma cliente servidor, con gestor de base de datos, servicio streaming, interfaz de usuario, transferencia de información y conexión de sensores a la nube (Márquez *et al.*, 2010; Samuelsen *et al.*, 2016). Aunque estas soluciones han sido documentadas ampliamente, la comunicación es la etapa con mayores retos en este tipo de problemas. Es por lo anterior que se han propuesto diferentes técnicas para la comunicación entre dispositivos como Get, Post, TCP-IP, JavaScript Object Notation-JSON y MQ Telemetry Transport-MQTT (Domínguez *et al.*, 2020; Vargas *et al.*, 2020; Hayashi *et al.*, 2021). Estos protocolos tienen como objetivo la automatización y estructuración de información entre dispositivos conectados a la red. Gracias a estos enfoques, actualmente es posible comunicar cualquier dispositivo a la internet facilitando la construcción de estos módulos.

Aunque esta aproximación puede ayudar a disminuir los costos de implementación, la mayoría de los diseños son pensados para modelar únicamente un fenómeno físico, dificultando la adquisición de estos dispositivos para instituciones con bajos montos presupuestales. Por otro lado, estos diseños no presentan un único enfoque de construcción, generando múltiples aproximaciones para el mismo objetivo y en muchos casos estas aproximaciones son pensadas para un caso de estudio, dificultando extrapolar esta solución a otro tipo de fenómenos. Otro factor de importancia es que los módulos construidos no son aprovechados en su totalidad y se descartan cuando se deben reproducir nuevas situaciones experimentales, debido a que no se genera una estrategia de software que permita adaptar el dispositivo. Lo anterior lleva a desechar estos sistemas para ampliar la gama de situaciones experimentales que desean enseñar, generando la necesidad de adquirir nuevo equipamiento. En este trabajo se desarrolla una estrategia algorítmica que permite recrear diferentes situaciones fricción en el experimento de plano inclinado. En el marco metodológico se describe el funcionamiento del módulo construido y se plantean cada una de sus etapas para garantizar un control remoto del sistema. También se plantea un modelo matemático que describe la física del fenómeno y se adiciona una variable temporal, que permite aumentar o reducir la fricción del dispositivo. Esta variable es imperceptible para el usuario y facilita el estudio físico, sin necesidad de cambiar el material por el cual se desplaza el móvil. Por último, se considera instrumentos para la validación técnica y estadística del LR. Adicionalmente se presenta un caso de estudio en que se plantean múltiples fenómenos físicos que son posibles de reproducir en el banco. Esta aproximación reduce considerablemente el costo de implementación del equipo y deja las cargas en el software del equipo. Los principales aportes de esta investigación son los siguientes: Desarrollo de una estrategia algorítmica que permite emular diferentes situaciones físicas de un fenómeno (cambios de fricción y material). Generación de un método para el control remoto de un banco y un caso de estudio aplicado al desarrollo de LR para la física mecánica.

## 2. Materiales y Métodos

En la figura 1 se presenta un diagrama de bloques con el enfoque para la implementación del laboratorio remoto LR multi-fricción, el cual, está conformado principalmente por un módulo físico, que es el sistema encargado procesar información de sensores, controladores y comandos de interfaz de usuario. Una plataforma de prueba IoT que facilita el control remoto y un algoritmo encargado de computar las variables físicas del fenómeno.



**Figura 1.** Metodología para el diseño de un LR

## 2.1 Definición del modelo físico

El modelo utilizado es el plano inclinado, este explica el desplazamiento de un móvil en un material a un ángulo de inclinación definido. En la figura 2, se observa el diagrama de cuerpo libre y marco de referencia para el fenómeno estudiado.

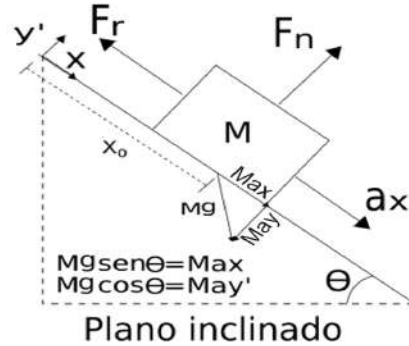


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre y marco de referencia

Donde  $M$  es la masa del cuerpo en kg,  $F_n$  es la fuerza normal o de reacción entre el suelo y la masa en N,  $F_r$  es la fuerza de fricción en N,  $a_x$  es el vector de aceleración de traslación en  $x$ ,  $g$  es el vector de aceleración universal en  $m/s^2$ ,  $Mg_x$  es el componente vectorial del peso efectivo en  $x$ ,  $Mg_y$  es el componente vectorial del peso efectivo en  $y$ ,  $x$  es el vector de desplazamiento en dirección horizontal,  $y$  es el vector de desplazamiento en dirección vertical,  $\theta$  es el ángulo de inclinación respecto a  $x$  en grados. Las ecuaciones del modelo son presentadas en 2 y 3. El término  $x_0$  hace referencia al estado energético inicial en posición del sistema respecto de la referencia adoptada. En las ecuaciones 2 y 3 se observa una relación de segundo orden entre posición ( $x$ ) y la variable temporal ( $t$ ). Una característica importante en el modelo dinámico presentado en la ecuación 2, consiste en considerar el efecto de fricción que viene dado por la componente  $g \cdot \mu \cos \theta$ , la cual juega un papel importante a la hora de acelerar el móvil durante su desplazamiento. Por otra parte, los parámetros  $K = (v_0, a_x, g, x_0, \mu \text{ y } \theta)$  se asumen invariantes en el tiempo y se sintonizan con una representación lineal en los parámetros (Serway *et al.*, 2015, Ponce, 2020)

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (1)$$

$$a_x = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (2)$$

El coeficiente  $\mu$  juega un papel importante, ya que al variar su valor se pueden representar diferentes tipos materiales. Lo anterior se debe a que el parámetro de fricción ( $\mu$ ) está determinado por la superficie de contacto. Entre más rugosa o lisa esta parámetro será cercano a la unidad o por el contrario muy cerca de 0. Para superficies altamente rugosas la aceleración será inversamente proporcional a este, es decir, el móvil experimentará un menor cambio en la velocidad, mientras que para superficies lisas el móvil se trasladará a un mayor cambio en la velocidad, es decir, el cuerpo recorrerá la misma distancia a un menor tiempo, que el alcanzado para una superficie de contacto altamente rugosa. Lo anterior permitiría

tener un instrumento virtual que puede variar su material y así estudiar este fenómeno. Para el desarrollo pedagógico del fenómeno físico, se plantean los objetivos y alcances de la guía propuesta en UTP (2022), la cual es modificada para introducir el paradigma de laboratorios remotos utilizando el módulo diseñado. Se elige esta guía, ya que es la utilizada por la Universidad Tecnológica para la enseñanza de este fenómeno.

## 2.2 Laboratorio remoto para el estudio de plano inclinado

Este sistema consta de las etapas definidas en el diagrama de la figura 3, las cuales permiten la ejecución física del sistema y el registro electrónico de las diferentes medidas asociadas al mismo. El sistema de control y comunicación se encarga de ordenes a los actuadores y sensores de los sistemas mecánico y electrónico. Este sistema además se encarga de almacenar los tiempos medido en una base de datos, que posteriormente es consultada por el algoritmo de estimación de parámetros, para posteriormente calcular métricas de error y simulación del fenómeno.

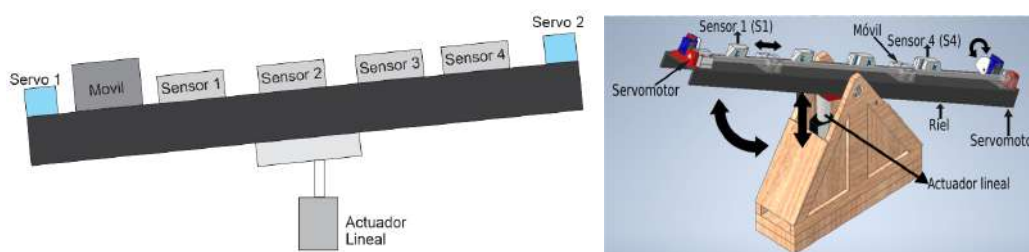


Figura 3. Metodología de diseño para el módulo LR.

## 2.3 Sistema Mecánico y Electrónico del laboratorio

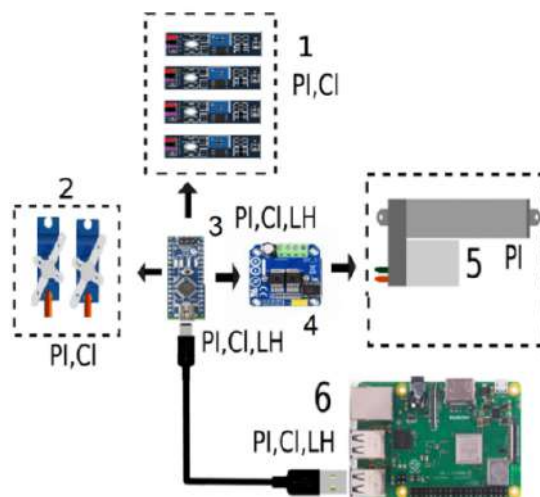
El sistema mecánico tiene como objetivo proveer el movimiento inclinado del móvil, sin la necesidad de intervención humana. En esta etapa se realiza el diseño de un electro-mecanismo, ver figura 4. Este sistema cuenta con una estructura la cual sostiene una barra de aleación de acero-plata que tiene objetivo guiar al móvil durante el recorrido. El móvil fue modelado con un rodamiento lineal con camisa de aluminio para reducir la fricción. Por otro lado, la estructura cuenta con dos servomotores que tiene como objetivo aprisionar al móvil cuando se encuentre en sus extremos. Para lograr una adecuada inclinación de la estructura se utiliza un actuador lineal el cual empuja el eje realizando un movimiento de rotación al extender el vástago logrado un ángulo  $\theta$  de inclinación. Por otro lado, el sistema electrónico para medir, almacenar, transmitir y gestionar ordenes al usuario, durante el procedimiento. En la figura 5 se presenta el diagrama de conexiones electrónico para el LR desarrollado. Para este diseño, se tienen dispositivos de control como son el Arduino Nano y

la Raspberry Pi. El Arduino se encarga de controlar los actuadores (motores), tomar lecturas de los sensores ópticos y finalmente procesar las ordenes notificadas por la Raspberry.



**Figura 4.** Diseño Mecánico del LR

Se utilizan de actuadores dos servomotores que sostienen o liberan el móvil. También se utiliza un motor lineal de alto torque que permite inclinar el LR de plano inclinado hacia la izquierda o derecha un ángulo  $\theta$ . Por otro lado, se consideran sensores ópticos de obstáculo que detectan el paso del móvil por una posición de referencia fija (S1, S2, S3, S4).



**Figura 5.** Diseño Electrónico del LR.

En la figura 5 se puede observar las partes del diseño electrónico, donde: 1- Sensores de obstáculo FC-51, 2- Servomotores, 3-Arduino Nano, 4-Puente H, 5-Actuador lineal y 6- Raspberry.

## 2.4 Sistema de control y comunicación remota

En esta etapa se realiza la conexión cliente servidor que permite ejecutar las ordenes de funcionamiento de la práctica de laboratorio. El dispositivo encargado de esta tarea es una Raspberry pi, la cual tiene una conexión MQTT con el servidor para la ejecución del algoritmo y utiliza la codificación UTF-8, para entender los datos. Por otro lado, este dispositivo realiza una conexión serial a 9600 baudios con el Arduino, que está encargado leer las señales de los sensores y controlar los actuadores del sistema. En la figura 6 y 7 se presentan los algoritmos que tienen estos dispositivos para el control y comunicación del LR.

En la figura 6 se observa que la Raspberry pi recibe una orden de funcionamiento por parte del usuario y envía un carácter por conexión serial al Arduino con el objetivo de ejecutar la máquina de estado encargada de realizar el experimento. Por otro lado, en la figura 7 se presenta la máquina de estados nombrada anteriormente. En esta secuencia se lleva el sistema a una posición de inicio en la que se garantiza que el móvil está fijo, lo anterior se logra con la activación del servomotor izquierdo. Luego se libera el móvil y se procede a temporizar el tiempo en que se demora el móvil en activar los sensores s1, s2, s3, s4. Estos tiempos son enviados a la Raspberry para ser almacenados en una base de datos. Finalmente se vuelve a aprisionar la masa con el otro servomotor para una segunda ejecución del experimento. Por otro lado, la Raspberry realiza una inserción a una base de datos para almacenar los tiempos medidos por el Arduino y con esta información procede a calcular los valores  $v_0$  y  $a_x$ .

```
1  Entrada: recibir mensaje mqtt()
2  Salida: Datos, Mensaje error
3  inicio
4  Estado = derecha
5  ciclo infinito:
6  mensaje mqtt = recibir mensaje Mqtt
7  si mensaje mqtt == "on" entonces
8      Si estado == izquierda entonces
9          Inclinar derecha
10         Recibir datos sensores
11         enviar datos a servidor
12         estado = izquierda
13     sino entonces
14         Inclinar izquierda
15         Recibir datos sensores
16         enviar datos a servidor
17         estado = derecha
18  fin
```

**Figura 6.** Pseudo código de conexión a Broker mqtt

```
1  Entrada: mensaje de activación ()
2  Salida: Datos, Mensaje de error
3  inicio
4  Configuración de pines de entrada y pines de los servo motores
5  Configuración del puerto serial
6  Inicializa sistema para activar pistón y abrir servo motores
7  Se establece condición inicial inclinarse a la derecha
8  Se cierra el servo para sujetar masa
9      ciclo infinito
10         mensaje = Leer serial
11         si mensaje == derecha entonces
12             inclinar a la derecha
13             medir tiempos
14             enviar datos de tiempo
15         sino entonces
16             inclinar a la izquierda
17             medir tiempos
18             enviar datos de tiempo
19  fin
```

**Figura 7.** Pseudo código de control e instrumentación del plano inclinado

## 2.5 Estimación $v_0$ y $a_x$ .

Para calcular estos valores se procede a realizar  $n$  repeticiones del experimento, lo anterior tiene como objetivo tener la información para formular un sistema lineal de ecuaciones que permita la inferencia de estos parámetros a través de la técnica de mínimos cuadrados. Para lograr esto, se realiza la medición anotando los tiempos ( $t_{1n}$ ,  $t_{2n}$  y  $t_{3n}$ ) correspondientes a las distancias ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ ) en cada realización del experimento  $n$ , tal y como se observa en la ecuación 2. Conocidos el conjunto de datos  $[(t_{1n}, t_{2n} \text{ y } t_{3n}), (x_1, x_2 \text{ y } x_3)]$ , se procede a determinar los valores de los parámetros ( $v_0$ ,  $a_x$ ) aplicando la técnica de mínimos cuadrados lineales dado que las ecuaciones 1-2 son lineales e invariantes en los parámetros. La herramienta inicia calculando las matrices de diseño tal como se presenta en la ecuación 4 (Bishop, 2006).

$$b = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \cdot \\ x_3 \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} t_{11} + t_d & (t_{11} + t_d)^2 \\ t_{21} + t_d & (t_{21} + t_d)^2 \\ t_{31} + t_d & (t_{21} + t_d)^2 \\ \cdot \\ t_{3n} + t_d & (t_{3n} + t_d)^2 \end{pmatrix}; W = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widehat{v}_0 \\ \frac{1}{2} \widehat{a}_x \end{pmatrix}; AW + \epsilon = b \quad (3)$$

Donde la notación  $\widehat{v}_0$  hace referencia a la estimación de  $v_0$ , razonamiento similar para los demás parámetros, por otro lado  $\epsilon$  hace mención a una matriz de covarianza la cual se asume como una función de distribución Gaussina con media 0 y varianza  $\sigma^2$  esto es  $\epsilon_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ , con  $\epsilon = [\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n]^T$ , lo anterior significa que las estimaciones ( $\hat{x}$ ) son variables aleatorias, debido a que se está asumiendo una componente de incertidumbre en las lecturas de ( $x$ ) (Bishop, 2006). Las ecuaciones anteriores son la representación matricial de mínimos cuadrados, la incógnita corresponde al valor del vector de parámetros  $W$ , el cual se puede encontrar de acuerdo con la ecuación 4 (Bishop, 2006).

$$W = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

Para garantizar un el comportamiento que presentaría el desplazamiento del móvil en diferentes materiales, se cuenta con la variable de desfase temporal  $t_d$ . Esta variable tiene como objetivo aumentar o disminuir le tiempo que le toma al móvil pasar por cada sensor obstáculo. Este cambio en el modelo de estimación permite representar los diferentes valores de fricción, que son producto del desplazamiento en diferentes tipos de material. Para representar la fricción de la aleación aluminio – plata  $t_d = 0$  y para representar un material sin fricción u otro tipo de valor, esta variable toma diferentes valores y se estiman los parámetros de aceleración y fricción como se propone anteriormente.

## 2.6 Validación estadística resultado

Para validar la propuesta de este trabajo, se procede a plantear un caso de estudio basado en los parámetros del sistema físico propuesto para este trabajo. Posteriormente se realiza un modelamiento teórico del fenómeno estudiado y se computa el error relativo con respecto a

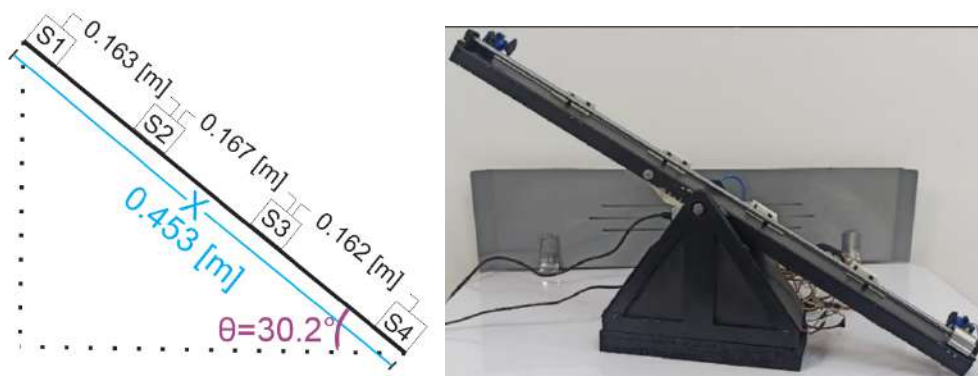
los datos estimados por el laboratorio. Esto permitirá determinar si el laboratorio remoto permite la representación del fenómeno físico a evaluar. Por otro lado, se propone una prueba de verificación de la medición y estimación de los parámetros que permita determinar si el sistema cumple con el objetivo de las dos prácticas propuestas. Para evaluar el nivel de variabilidad en las estimaciones en los parámetros ( $W$ ) como en los valores de la variable aleatoria ( $\hat{x}$ ), se calcula la desviación estándar haciendo uso de la notación matricial dada en la ecuación 4 y teniendo en cuenta que el término  $(A^T A)^{-1}$  presenta la forma que se presenta en la ecuación 5, se asume que valores de  $\epsilon = [\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n]^T$  son independientes entre sí y siguen una distribución Gaussiana con media aritmética 0 y varianza  $\sigma^2$ , esto es una condición suficiente para garantizar que las estimaciones en los parámetros sean no sesgadas (Walpole *et al.*, 2012).

$$\sigma_{\hat{x}}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left( x_i - \left( \hat{v}_0 t_i + \frac{1}{2} \hat{a}_x t_i^2 \right) \right)^2 \quad (5)$$

$$(A^T A)^{-1} = \begin{pmatrix} c_{00} & c_{01} \\ c_{10} & c_{11} \end{pmatrix}, \quad \sigma_{\hat{v}_0}^2 = c_{00} \sigma_x^2, \quad \sigma_{\hat{a}_x}^2 = 4c_{11} \sigma_x^2$$

### 3. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan el conjunto de pruebas realizadas al LR que permiten verificar los diferentes objetivos de las prácticas propuestas. Para verificar estos objetivos, se propone un caso de estudio, el cual consta de un plano inclinado como el presentado en la figura 8. Este tiene un desplazamiento horizontal de 0.493 [m], un ángulo de inclinación de 30.2° y 4 sensores con separaciones de 0.116 [m], 0.162 [m], 0.168 [m] y 0.163 [m]. En la figura 9, se observa la interfaz así como desarrollo del experimento en el sistema de control y en la base de datos en *mysql*.



**Figura 8.** Esquema de plano inclinado para el caso de estudio y módulo real

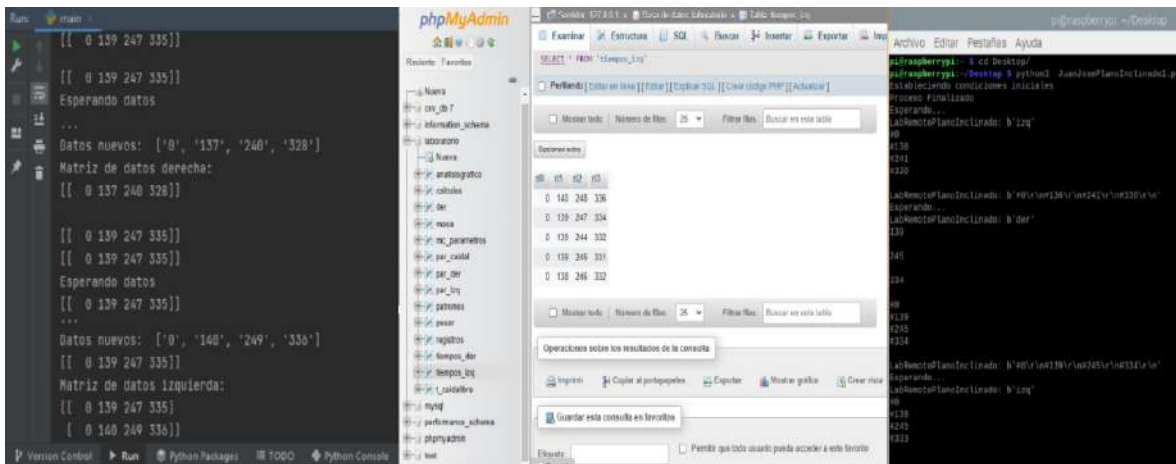


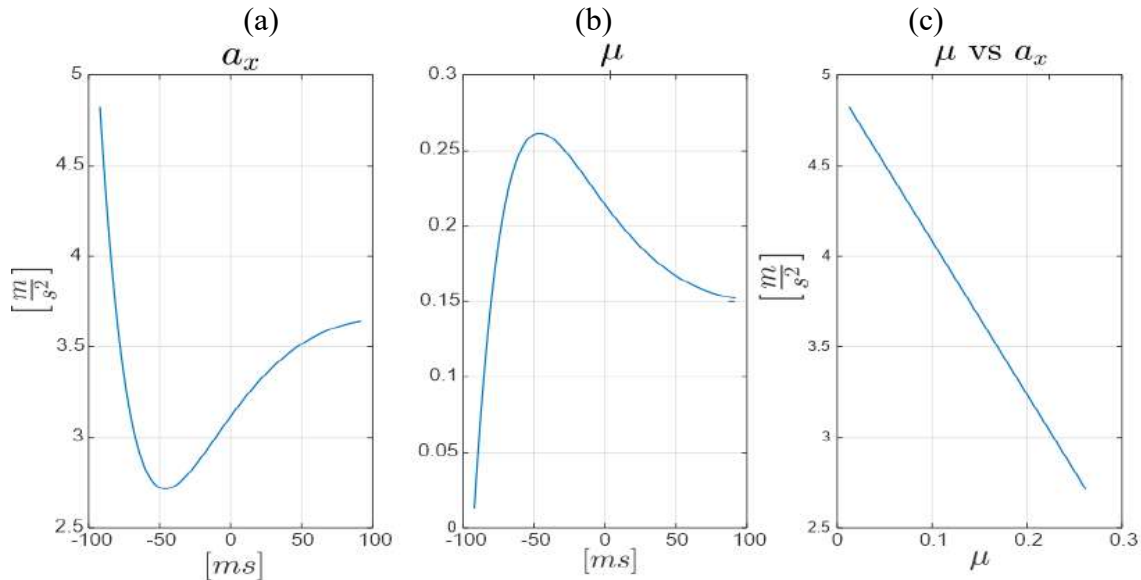
Figura 9. Interfaz y ejecución de laboratorio remoto.

En la tabla 1 se presentan los cálculos para cada uno de los parámetros y variables estudiados. De esta tabla se observa un comportamiento estable de la estimación, al presentar valores bajos para  $\sqrt{\sigma^2}$ . Por otro lado, los valores estimados ( $\bar{x}$ ,  $\bar{v}_0$ ,  $\bar{a}_x$ ) muestran similitud con los valores teóricos, evidenciando un margen aceptable de error, que es un factor clave en el funcionamiento, permitiendo asumir un correcto funcionamiento del laboratorio.

Tabla 1. Incertidumbre calculados alrededor de los experimentos

LR	Parámetro de la guía	Valor determinado	Valor Teórico	Error relativo (%)
Plano Inclinado	$\bar{x} \pm \sqrt{\sigma_x^2}$	$0.328 \pm 0.003 \text{ m}$	$0.328 \text{ m}$	0.000
	$\bar{v}_0 \pm \sqrt{\sigma_{v_0}^2}$	$0.965 \pm 0.005 \text{ m/s}$	$0.875 \text{ m/s}$	10.360
	$\bar{a}_x \pm \sqrt{\sigma_{a_x}^2}$	$3.264 \pm 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$	$3.255 \text{ m}^2/\text{s}$	0.200
	$\bar{\mu} \pm \sqrt{\sigma_{\mu}^2}$	$0.2143 \pm 0.0045$	0.198	0.07

Llama la atención en la tabla 2, el error relativo en la estimación del valor  $\bar{v}_0 = 11.56$ , lo anterior, se puede deber en gran medida a la técnica de inferencia, la cual puede exigir una regularización de la información, aunque el valor es más alto al de las otras variables se encuentra en un rango aceptable para lograr los objetivos de la guía. Finalmente, se observa que el valor de  $a_x$  se encuentra cerca al valor esperado, sin embargo, es necesario introducir un retardo de tiempo  $t_d$  en los todos los valores  $[(t_{1n} + t_d, t_{2n+t_d} \text{ y } t_{3n} + t_d)]$ , que sea imperceptible para las personas realizan el experimento y que lleve al estimador a representar otros tipos de materiales en el desplazamiento del móvil. Este factor es clave para simular el comportamiento de otros valores de fricción que constituyen el objetivo de la segunda práctica de laboratorio. Para lograr que esta variación se fija una variación máxima de 92 [ms]. En la figura 10 se presentan las estimaciones de fricción y aceleración calculadas para diferentes tiempos de retardo o adelanto.



**Figura 10.** (a) Estimación de  $a_x$  para diferentes valores de  $t_d$ . (b) Estimación de  $\mu$  para diferentes valores de  $t_d$ . (c) Representación gráfica de  $\mu$  vs  $a_x$ .

Nótese como en la figura 10 (a), la aceleración es mayor cuando  $t_d$  es negativa, lo anterior se debe a que esta variable resta tiempo al registro de cada sensor haciendo comportar al móvil, como si hubiese pasado a mayor velocidad, amentando la aceleración. En cambio, cuando  $t_d$  es positiva indica que, por el contrario, el móvil se desplazó a menor velocidad. Es importante resaltar que este modelo tiene un comportamiento cuadrático por lo cual se alcanzará una máxima aceleración y no será posible seguirla aumentado así  $t_d$  cambie. En figura 9 (c), puede observar que a medida que aumenta la fricción en el material, la aceleración disminuye indicando que el modelo de estimación logra reproducir la dinámica de diferentes tipos de materiales logrando el objetivo de la segunda práctica.

En la tabla 2, se evidencia los valores de  $t_d$  necesarios para lograr diferentes magnitudes de fricción reportadas en la literatura (ASM, 1998; Hufnagel, 2015; Serway *et al.*, 2015). Los valores de fricción elegidos corresponden a materiales de interés para diferentes aplicaciones de ingeniería. Nótese cómo al introducir  $t_d$ , se cambia la dinámica del modelo, reproduciendo el desplazamiento del móvil sobre un material en específico. Esto es fundamental para que desde el modelo pedagógico se aborden estos cambios y conceptos, sin necesidad de variar las superficies de contacto del riel y móvil. Lo anterior permite reproducir diferentes situaciones experimentales, que son fundamentales para cumplir con el objetivo de este trabajo.

**Tabla 2.** Incertidumbre calculados alrededor de los experimentos

LR	Tipo de Material	Coefficiente de fricción ( $\mu$ )	$t_d$ en [ms]
Plano Inclinado	Acero - Teflón	0.04	-90.09
	Vidrio - Madera	0.2	-73.04
	Acero - Latón	0.24	-63.53
	Acero -Aluminio	0.15	-80.13
	Latón -Aluminio	0.15	-80.13
	Cromo - Cromo	0.12	-83.36

## 4. Conclusiones

Se implementó un laboratorio remoto multi fricción que no varía el diseño físico del dispositivo. Este utiliza una estrategia algorítmica que permite modificar el registro temporal de los sensores ópticos sin que el usuario perciba el cambio. Gracias a esto, el valor de fricción varía permitiendo entender cómo se afecta la velocidad y aceleración. Por otro lado, se evidencia una estrategia para la construcción de este tipo laboratorios utilizando MQTT y sistemas embebidos de bajo costo como Arduino y Raspberry. Lo anterior puede facilitar el proceso de construcción, haciéndolos más asequibles para instituciones educativas con poco presupuesto de inversión. Este diseño permite reproducir el comportamiento de algunos materiales de interés para aplicaciones de ingeniería, lo cual fortalece la funcionalidad del módulo y permite pensar en el diseño de múltiples prácticas científicas en la que se combine resultados reales con algunas estimaciones hechas por software. Como trabajo futuro, se propone utilizar esta metodología para agregar otros cómputos de interés, como es el caso de energía cinética sobre este sistema de desplazamiento.

## 5. Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Tecnológica de Pereira por su apoyo en este trabajo.

## 6. Declaraciones

Declaramos que no tenemos intereses competitivos significativos, incluidos intereses financieros o no financieros, profesionales o personales que interfieren con la presentación completa y objetiva del trabajo descrito en este manuscrito.

## 7. Referencias

- Abadía, A. (2022). Diálogo sobre el impacto de la pandemia en la educación superior y la transformación digital de las universidades en Iberoamérica - SEGIB. From <https://www.segib.org/dialogo-sobre-el-impacto-de-la-pandemia-en-la-educacion-superior-y-la-transformacion-digital-de-las-universidades-en-iberoamerica/>
- Albert Gómez, M., García Pérez Calabuig, M., y Díaz Orueta, G. (2016). La evaluación como instrumento de formación para el aprendizaje a través de los laboratorios remotos. REDU. Revista De Docencia Universitaria, 14(1), 377. Doi: 10.4995/redu.2016.5788.
- Andrés, M., Pesa, M. A., y Meneses, J. (2006). La actividad experimental en física: visión de estudiantes universitarios. Paradigma, 27(1), 349-363.
- ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology. Estados Unidos, 1998.
- Bacca. B., Caicedo Bravo. E., Calvache, B., Cardona. J., y Buitrago. J. (2009) Laboratorio distribuido con acceso remoto para la enseñanza de la robótica. En: Revista Educación en Ingeniería, tomo 4, no 7, 2009, págs. 51\_69. 1.1, 1.2
- Balderas Solís, J., Roque Hernández, R., López Mendoza, A., Salazar Hernández, R., & Juárez Ibarra, C. (2021). ¿Cómo cambió la enseñanza-aprendizaje de las asignaturas prácticas en el área de tecnologías de la información con la covid-19?. RIDE Revista Iberoamericana Para La Investigación Y El Desarrollo Educativo, 11(22). doi: 10.23913/ride.v11i22.826
- Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). Pattern recognition and machine learning (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: Springer.
- Contreras-Mendieta, J. A., Sarango-Lapo, C. P., Jara-Roa, D. I., y Agila-Palacios, M. V. (2019). Implementación de un Laboratorio Remoto (LR), como recurso de apoyo en un sistema de Educación a Distancia. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Información, (E17), 923-935
- Domínguez, M., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J., Fuertes, J., Prada, M., y Morán, A. (2020). Development of a Remote Industrial Laboratory for Automatic Control based on Node-RED. IFAC-Papersonline, 53(2), 17210-17215. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1741
- Hayashi, V., De Almeida, F., Harada, L., Hayashi, F., y Arakaki, R. (2021). Dashboard IoT Remote Lab with MQTT Protocol. Anais Estendidos Do XXVII Simpósio Brasileiro De Sistemas Multimídia E Web (Webmedia 2021). doi: 10.5753/webmedia\_estendido.2021.17614
- Hufnagel, W. (2015). Manual del aluminio Vol. Barcelona: Reverté.
- IMCYC. La importancia de los laboratorios. Revista Ingeniería Construcción y Tecnología, <http://www.revistacyt.com.mx/index.php> (2018).
- Márquez, J. A., y Sanguino, T. M. (2010). Diseño de laboratorios virtuales y/o remotos. Un caso práctico. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 7(1), 64-72.

- Meza Contreras, L. G., Gallego Becerra, H. A., y Orozco Gallego, H. (2009). Medición de la gravedad empleando el dispositivo " caída libre" con base al microcontrolador pic 16f84a y su correspondiente incertidumbre de medida. *Scientia et Technica*, 15(42), 248-253.
- Ponce, I. (2020). Parametrización de un péndulo simple con una plataforma basada en Arduino. Instituto de Ingeniería y Tecnología.
- Serway, R. A., y Jewett, J. W. J. (2015). *Física para ciencias e ingeniería* (9a. ed. --.). México: Cengage Learning.
- Tiempo, C. (2022). Unos 13.000 estudiantes del país dejaron el colegio durante pandemia. August 2022, from <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/desercion-escolar-durante-la-pandemia-en-colombia-529536>
- UTP, R. Facultad Ciencias Básicas: Contenidos Departamento de Física. <https://basicas.utp.edu.co/contenidos-departamento-de-fisica.html> (2022).
- Vargas, J., Cuero, J., y Torres, C. (2020). Laboratorios Remotos e IOT una oportunidad para la formación en ciencias e ingeniería en tiempos del COVID-19. doi: 10.48082/espacios-a20v41n42p16, 41(42).
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Norma, 162, 157.