

GUIAS DE LABORATORIO DE FÍSICA I.

(*INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS*)
CICLO 2



**Universidad Tecnológica
de Pereira**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Índice general

1. Aplicación del cálculo vectorial en sistemas físicos	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
1.2. Preinforme	1
1.3. Introducción	3
1.4. Fundamento teórico	4
1.5. Marco Teórico	4
1.5.1. Magnitudes vectoriales y representación de fuerzas	4
1.5.2. Suma vectorial y fuerza resultante	5
1.5.3. Condición de equilibrio	5
1.5.4. Segunda ley de Newton en forma vectorial	6
1.5.5. Peso y relación con la aceleración gravitacional	6
1.6. Equipos de la practica	6
1.7. Procedimiento Experimental	7
1.8. Análisis de Resultados	12
1.8.1. Sistema en equilibrio (fuerza equilibrante)	12
1.8.2. Sistema dinámico (segunda ley de Newton)	13
1.9. Conclusiones	13
2. Movimiento en dos dimensiones	14
2.1. Objetivos	14
2.1.1. Objetivo general	14
2.1.2. Objetivos específicos	14
2.2. Preinforme	14
2.3. Introducción	15
2.4. Fundamento teórico	15
2.4.1. Modelo matemático para la linealización de datos	17
2.5. Equipos de la práctica	17
2.6. Práctica de laboratorio	18
2.7. Análisis de resultados	19
2.7.1. Procesamiento de datos para la linealización	19
2.7.2. Regresión lineal y obtención de parámetros físicos	20
2.8. Anexo	20
2.8.1. Lanzador de proyectiles Pasco ME-8600	20
2.8.2. Sistema de recolección de datos (Cronómetro)	21
2.8.3. Anexo 2: Plantilla para impresión	21

3. Caracterización y selección de resortes mediante análisis gráfico para el uso en aplicaciones.	23
3.1. Objetivos	23
3.1.1. Objetivo general	23
3.1.2. Objetivos específicos	23
3.2. Preinforme	23
3.3. Introducción	24
3.4. Fundamento Teórico	24
3.5. Practica de laboratorio	25
3.5.1. Materiales	25
3.5.2. Caracterización experimental de los resortes	25
3.5.3. Registro y organización de datos en hoja de cálculo	26
3.5.4. Construcción de la gráfica comparativa	27
3.5.5. Análisis metrológico y selección del resorte	27
3.5.6. Construcción y validación del dinamómetro	27
3.6. Análisis de Resultados	28
3.7. Conclusiones	28
4. Análisis de procesos físicos basados en caída libre en sistemas reales.	30
4.1. Objetivos	30
4.1.1. Objetivo general	30
4.1.2. Objetivos específicos	30
4.2. Preinforme	30
4.3. Introducción	31
4.4. Fundamento Teórico	31
4.5. Equipos de la Práctica	32
4.6. Procedimiento Experimental	33
4.6.1. Caracterización inicial del sistema	33
4.6.2. Configuración de alturas y adquisición de datos	33
4.6.3. Organización de datos en hoja de cálculo	34
4.6.4. Determinación experimental del modelo físico	34
4.6.5. Propagación de incertidumbre en la determinación de g	35
4.6.6. Aplicación al diseño del sistema industrial (ABP)	35
4.7. Análisis de Resultados	35
4.8. Conclusiones	36

Laboratorio 1

Aplicación del cálculo vectorial en sistemas físicos

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Aplicar los principios del cálculo vectorial al análisis y verificación experimental de sistemas físicos en equilibrio y en condiciones dinámicas, mediante el uso de una mesa de fuerzas, contrastando resultados teóricos con mediciones experimentales y evaluando la coherencia entre el modelo matemático y el comportamiento físico.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Comprender y explicar los principios del cálculo vectorial aplicados a sistemas de fuerzas coplanares, incluyendo descomposición en componentes rectangulares, suma vectorial, condiciones de equilibrio estático y aplicación de la segunda ley de Newton en forma vectorial.
2. Modelar y resolver analíticamente sistemas físicos mediante la determinación de fuerzas resultantes y equilibrantes, y configurar experimentalmente dichos sistemas en la mesa de fuerzas para verificar la correspondencia entre el modelo matemático y el comportamiento físico observado.
3. Contrastar resultados teóricos y experimentales, evaluando la coherencia entre el modelo vectorial y la evidencia física obtenida, interpretando las diferencias a partir de fuentes de error, limitaciones instrumentales y supuestos del modelo ideal.

1.2. Preinforme

El estudiante debe realizar el modelado vectorial previo de los sistemas físicos que serán verificados experimentalmente en la mesa de fuerzas. Todos los cálculos deberán desarrollarse de forma detallada, mostrando procedimientos, descomposición en componentes rectangulares y resultados numéricos con unidades del Sistema Internacional.

1. **Análisis del sistema de fuerzas concurrentes.** (Tomado del texto guía Física universitaria con física moderna) NOTA, si al al ingresar las credenciales no lo lleva a la pagina 58 del libro, cierre la pagina y de clic nuevamente en el enlace. <https://ebooks724.proxyutp.elogim.com/?il=8823&pg=58>

A partir del ejercicio 1.60 del texto guía:

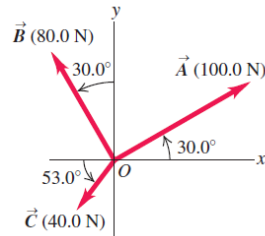


Figura 1.1: Imagen del ejercicio 1.60 a realizar, tomada del texto guía vinculado para uso del estudiante.

- Dibuje el diagrama de cuerpo libre del sistema.
- Descomponga cada fuerza en sus componentes rectangulares.
- Determine la fuerza resultante mediante suma vectorial.
- Calcule la magnitud y dirección del vector resultante.
- Determine la magnitud, dirección y sentido de la cuarta fuerza necesaria para que el sistema esté en equilibrio.

Los resultados deberán presentarse en forma analítica y numérica, incluyendo:

$$\sum F_x \quad \text{y} \quad \sum F_y \quad (1.1)$$

y la expresión general utilizada para la magnitud del vector:

$$F_R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \quad (1.2)$$

2. **Sistema dinámico: problema del carrito.** (Tomado del texto guía Física universitaria con física moderna) <https://ebooks724.proxyutp.elogim.com/?il=8823&pg=154>

A partir del ejercicio 4.33 del texto guía:

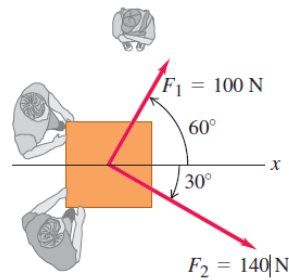


Figura 1.2: Imagen del ejercicio 4.33 a realizar, tomada del texto guía vinculado para uso del estudiante.

- Dibuje el diagrama de cuerpo libre del carrito.
- Descomponga las fuerzas F_1 y F_2 en componentes rectangulares.
- Plantee las ecuaciones de equilibrio en el eje perpendicular a la dirección de movimiento.
- Determine la magnitud y dirección de la fuerza mínima que el niño debe ejercer para que la resultante esté dirigida exclusivamente en el eje $+x$.

Posteriormente:

- Aplique la segunda ley de Newton en la dirección x :

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (1.3)$$

- Determine la masa del carrito a partir de la aceleración indicada en el ejercicio 4.33.
- Calcule el peso del carrito [1]:

$$w = m \cdot g \quad (1.4)$$

3. Análisis conceptual previo

Responda brevemente:

- ¿Qué condición matemática debe cumplirse para que un sistema de fuerzas esté en equilibrio?
- ¿Por qué la fuerza equilibrante tiene la misma magnitud que la resultante pero dirección opuesta?
- ¿Qué relación existe entre fuerza neta y aceleración según la segunda ley de Newton en forma vectorial?

1.3. Introducción

El análisis de sistemas físicos sometidos a múltiples fuerzas constituye una de las aplicaciones fundamentales del cálculo vectorial en la Física. En numerosos contextos ingenieriles, como

el diseño de estructuras, el análisis de tensiones en cables, la distribución de cargas en mecanismos y el estudio de sistemas de tracción; las fuerzas actúan simultáneamente en diferentes direcciones, por lo que su estudio requiere herramientas matemáticas que permitan representar, descomponer y combinar magnitudes vectoriales con rigor.

Desde el punto de vista de la física, una fuerza es una magnitud vectorial caracterizada por módulo, dirección y sentido. La determinación de la fuerza resultante en un sistema de fuerzas concurrentes exige la descomposición en componentes rectangulares y la aplicación sistemática de la suma vectorial. Cuando la resultante es nula, el sistema se encuentra en equilibrio; en caso contrario, la fuerza neta produce una aceleración proporcional según lo establece la segunda ley de Newton en su forma vectorial. En este sentido, la mesa de fuerzas constituye un dispositivo experimental diseñado para verificar estas relaciones. Mediante poleas, masas calibradas y un anillo central que representa el punto de aplicación, es posible reproducir sistemas ideales de fuerzas coplanares y contrastar el modelo matemático con el comportamiento físico observable.

En esta práctica se abordarán dos situaciones físicas complementarias: primero, un sistema de fuerzas concurrentes en equilibrio, donde se determinará experimentalmente la fuerza equilibrante correspondiente a una resultante previamente calculada; y segundo, un sistema dinámico en el que la fuerza neta produce una aceleración controlada, permitiendo aplicar la segunda ley de Newton para estimar la masa y el peso de un cuerpo.

1.4. Fundamento teórico

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Magnitudes vectoriales y representación de fuerzas

En el análisis mecánico, una fuerza se define como una magnitud vectorial caracterizada por módulo, dirección y sentido. A diferencia de las magnitudes escalares, las fuerzas no pueden sumarse algebraicamente cuando actúan en diferentes direcciones; requieren un tratamiento vectorial formal [1].

En el plano cartesiano, una fuerza \vec{F} puede expresarse como:

$$\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} \quad (1.5)$$

Donde F_x y F_y son las componentes rectangulares obtenidas mediante:

$$F_x = F \cdot \cos \theta \quad (1.6)$$

$$F_y = F \cdot \text{sen} \theta \quad (1.7)$$

Siendo θ el ángulo medido respecto al eje x positivo.

La representación en componentes rectangulares permite transformar un problema geométrico en un problema algebraico, facilitando la suma de fuerzas concurrentes [1].

1.5.2. Suma vectorial y fuerza resultante

Para un sistema de n fuerzas concurrentes en el plano, la resultante se obtiene sumando las componentes correspondientes:

$$R_x = \sum F_x \quad (1.8)$$

$$R_y = \sum F_y \quad (1.9)$$

El vector resultante queda definido como:

$$\vec{R} = R_x \hat{i} + R_y \hat{j} \quad (1.10)$$

Su magnitud se calcula mediante:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (1.11)$$

La dirección del vector resultante está dada por:

$$\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{R_y}{R_x}\right) \quad (1.12)$$

Este procedimiento constituye la base matemática para el análisis de sistemas de fuerzas coplanares [1].

1.5.3. Condición de equilibrio

Un cuerpo se encuentra en equilibrio cuando la fuerza neta que actúa sobre él es nula. Matemáticamente:

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (1.13)$$

Lo cual implica:

$$\sum F_x = 0 \quad \text{y} \quad \sum F_y = 0 \quad (1.14)$$

En sistemas experimentales como la mesa de fuerzas, el equilibrio se alcanza cuando el anillo central permanece centrado, indicando que la suma vectorial de las tensiones es cero. La fuerza equilibrante posee igual magnitud que la resultante de las fuerzas aplicadas, pero dirección y sentido opuestos.

1.5.4. Segunda ley de Newton en forma vectorial

Cuando la resultante de fuerzas no es nula, el sistema experimenta aceleración. La segunda ley de Newton establece:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1.15)$$

En componentes rectangulares:

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (1.16)$$

$$\sum F_y = m \cdot a_y \quad (1.17)$$

Esta formulación permite analizar sistemas dinámicos donde la fuerza neta está dirigida en un eje específico, como en el caso de un carrito que debe desplazarse únicamente en la dirección $+x$. Para que el movimiento ocurra exclusivamente en dicho eje, debe cumplirse la condición de equilibrio para la ecuación 1.14 componente y , garantizando que no exista aceleración perpendicular a la trayectoria deseada.

1.5.5. Peso y relación con la aceleración gravitacional

El peso de un cuerpo corresponde a la fuerza gravitatoria ejercida por la Tierra y se expresa como se muestra en la ecuación 1.4, siendo m la masa del cuerpo y g la aceleración gravitacional local. En problemas dinámicos, la determinación experimental de la masa puede realizarse a partir de la medición de la fuerza neta y la aceleración, aplicando directamente la segunda ley de Newton.

1.6. Equipos de la practica

La práctica se desarrollará utilizando una mesa de fuerzas, dispositivo experimental diseñado para el estudio de sistemas de fuerzas coplanares concurrentes y la verificación de condiciones de equilibrio.

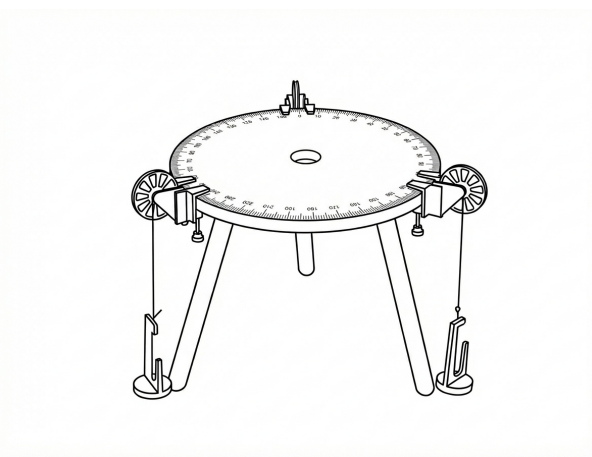


Figura 1.3: Esquemático de la mesa de fuerzas.

- **Mesa de fuerzas:** Plataforma circular rígida con escala angular graduada en su perímetro (0° – 360°), que permite definir con precisión la dirección de aplicación de cada fuerza. En el centro dispone de un anillo móvil que actúa como punto de concurrencia de las fuerzas, así como una grilla con espaciamiento de 5 mm que facilita la verificación visual del centrado del sistema y la detección de desviaciones respecto a la posición de equilibrio.
- **Poleas ajustables:** Dispositivos montados en el borde de la mesa que permiten redirigir la tensión de los hilos sin alterar significativamente la magnitud de la fuerza aplicada. Su función es garantizar que la dirección de la tensión coincida con el ángulo configurado en la escala angular.
- **Portamasas:** Soportes metálicos diseñados para suspender masas patrón. La tensión generada en cada hilo corresponde al peso total suspendido en el portamasas.
- **Juego de masas patrón:** Conjunto de masas utilizadas para generar fuerzas conocidas mediante la relación $F = m \cdot g$. Permiten ajustar con precisión la magnitud de cada vector de fuerza aplicado en el sistema.
- **Dinamómetro analógico:** Instrumento mecánico de medición de fuerza basado en la deformación elástica de un resorte calibrado. Se empleará para medir directamente la magnitud de la fuerza resultante en el sistema dinámico y verificar experimentalmente la coherencia con el modelo teórico.

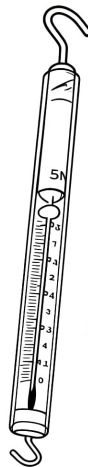


Figura 1.4: Esquemático de dinamómetro analógico.

El conjunto de estos equipos permite reproducir experimentalmente sistemas ideales de fuerzas concurrentes, validar la suma vectorial mediante el equilibrio del anillo central y contrastar resultados teóricos con mediciones directas de fuerza.

1.7. Procedimiento Experimental

La práctica se desarrollará en dos etapas complementarias: (1) verificación experimental del equilibrio de un sistema de fuerzas concurrentes y (2) análisis dinámico de un sistema

con fuerza neta dirigida en un eje específico.

1. Verificación del equilibrio vectorial

1. Configuración inicial del sistema

- Nivele la mesa de fuerzas y verifique que el anillo central se encuentre libre de fricción.

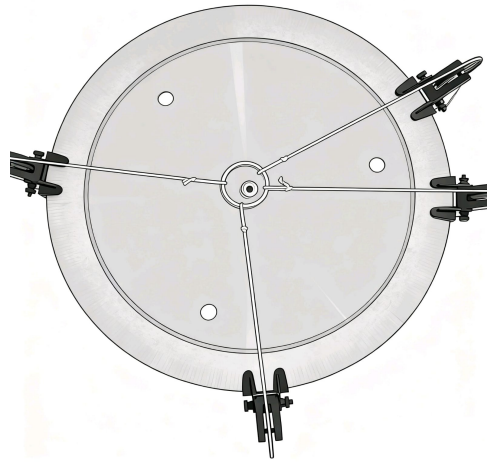


Figura 1.5: Mesa de fuerzas nivelada.

- Instale tres poleas en la mesa de fuerzas siguiendo una de las cuatro arreglos de ángulos mostrados en la tabla 1.2, Instale las poleas con cuidado sin hacer demasiada fuerza en el tornillo de sujeción.

Tabla 1.1: Combinaciones posibles de ángulos

Arreglo	Ángulo 1	Ángulo 2	Ángulo 3
1	30.0°	120°	233°
2	0.00°	90.0°	180°
3	120°	150°	200°
4	45.0°	135°	255°

- Seleccione uno de los cuatro arreglos de masas mostrados en la tabla 1.2, el orden de las masas corresponde al orden de las poleas según el ángulo que le corresponda.

Tabla 1.2: Arreglos de masas

Arreglo	Masa 1	Masa 2	Masa 3
1	100 g	80.0 g	50.0 g
2	120 g	150 g	70.0 g
3	60.0 g	160 g	90.0 g
4	56.0 g	95.0 g	125 g

2. Aplicación de las fuerzas conocidas

- Suspenda en cada portamasas la cantidad de masa equivalente a la magnitud según el arreglo de masas elegido como se muestra en la figura 1.6.

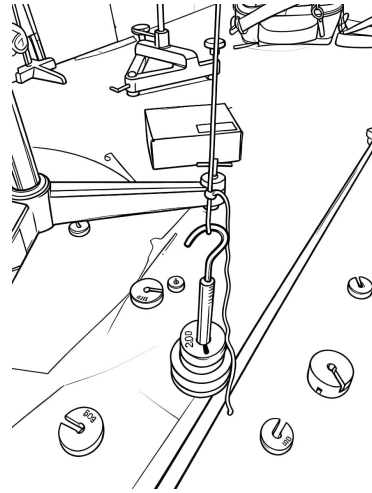


Figura 1.6: Arreglo de masas.

- Verifique que cada hilo esté alineado radialmente con el ángulo marcado en el perímetro de la mesa, utilizando la línea indicadora que se encuentra en la base de la polea.
- Observe el desplazamiento del anillo central respecto a la grilla de referencia.

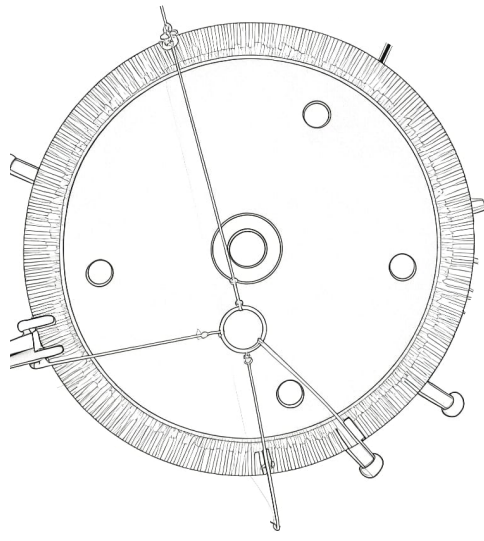


Figura 1.7: Mesa de fuerzas con anillo desplazado.

3. Determinación experimental de la fuerza equilibrante

- Llene la segunda columna de la tabla 1.3 con los valores de masa según el arreglo seleccionado, la tercer columna con el peso de cada portamasas calculado con la ecuación 1.4, en la cuarta columna digite el valor del ángulo para cada

portamasa según el arreglo seleccionado, con los pesos calculados y los ángulos correspondientes a cada portamasa calcule la componentes del peso en la dirección x con la ecuación 1.6 y la componente del peso en la dirección y con la ecuación 1.7 y llene las ultimas dos columnas de la tabla.

Tabla 1.3: Fuerza aplicada

Porta masa	Masa	Peso	Ángulo	F_x	F_y
1					
2					
3					

- Obtenga el vector de fuerza aplicada resultante como se muestra en la ecuación 1.10, para esto sume las fuerzas obtenidas en la columna F_x y las fuerzas obtenidas en la columna F_y , con la ecuación 1.11 obtenga la magnitud del vector y con la ecuación 1.12 encuentre su dirección, con los datos obtenidos llene la tabla 1.4.

Tabla 1.4: Fuerza equilibrante

Fuerza resultante	Dirección	Fuerza equilibrante	Dirección

Para encontrar la fuerza equilibrante revise la sección 1.5.3 y termine de llenar la tabla con estos datos.

- Instale una cuarta polea en el ángulo correspondiente a la fuerza equilibrante.
- Prepare un portamasa con el valor más cercano posible al valor de la masa equilibrante que se pueda conseguir con los juegos de masa disponibles, suspenda el portamasa de la cuerda y ajuste ligeramente el ángulo hasta lograr que el anillo permanezca centrado exactamente sobre la referencia de la grilla.

4. Verificación y registro

- Registre la magnitud de la masa utilizada como fuerza equilibrante y su angulo final en la tabla 1.5.
- Compare la dirección angular configurada con la dirección teórica calculada.
- Calcule el error porcentual entre la magnitud teórica y la experimental.

Tabla 1.5: Resultados

Datos	Masa	Dirección
Teórica		
Experimental		
Error %		

2. Análisis de un sistema dinámico (Aplicación de la segunda ley de Newton)

1. Modelado del sistema

- Instale un dinamómetro analógico en el soporte fijo verificando que la punta del dinamómetro coincida con 0° de la mesa de fuerza; utilizando una polea en 180° sujete una cuerda a la punta del dinamómetro con una masa en el otro extremo de la cuerda y verifique que la cuerda sea paralela al eje horizontal marcado en la mesa de fuerza.
- Configure dos fuerzas $F_1 = 0.98\text{ N}$ y $F_2 = 1.37\text{ N}$ en los portamasas y ubíquelos en las poleas de la mesa de fuerza con ángulos de 205° y 150° respectivamente como se muestra en la figura 1.8.
- Tome la lectura de la fuerza resultante en el dinamómetro, anote este valor en la tabla 1.6; se notará que el anillo queda desviado del eje central.

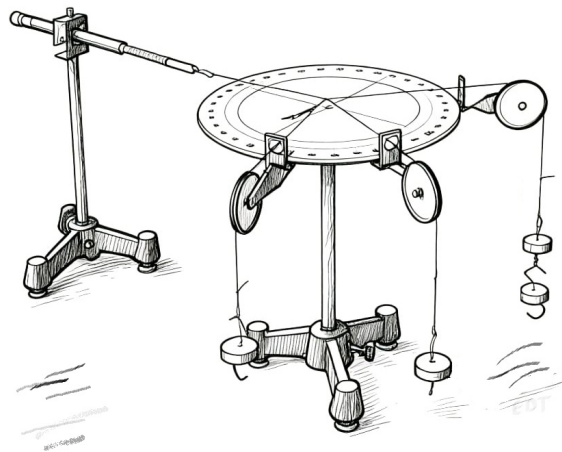


Figura 1.8: Posición del dinamómetro.

- Calcule la fuerza resultante en cada uno de los ejes y anote los valores en la tabla 1.6.
- Ubique una tercera polea sin apretarla de modo que la pueda mover para ajustar el ángulo.

2. Condición de movimiento unidimensional

- Ajuste la magnitud y dirección de la tercera fuerza de modo que el anillo tienda a desplazarse hasta el eje (x) o central sin modificar el valor de la fuerza registrada por el dinamómetro.
- Verifique que no exista desviación apreciable en el eje perpendicular (y), lo cual implica que $\sum F_y = 0$ anote el valor de masa y el ángulo en la tabla 1.6.

3. Determinación de la masa del sistema

Tabla 1.6: Fuerza

$F_{\text{dinamometro}}$	F_x	F_y	F_{neta}	$F_{\text{equilibrio}_y}$	Ángulo [°]
--------------------------	-------	-------	-------------------	---------------------------	------------

- Utilice la relación matemática 1.15, considerando la aceleración indicada en el enunciado del ejercicio del carrito, enlace de la sección 2 para calcular la masa teórica del ejercicio.
- Determine el peso correspondiente a la fuerza total medida, utilizando la ecuación 1.4.

4. Análisis comparativo

- Compare la fuerza calculada para el eje (y) con la configurada experimentalmente.
- Encuentre la incertidumbre de la fuerza medida en el dinamómetro (suponiendo que este es clase II) y compárela medición reportada con su respectiva incertidumbre frente la fuerza calculada para el eje (y).

Consideraciones experimentales

- Todas las masas deben expresarse en kilogramos y las fuerzas en newton.
- Los ángulos deben medirse respecto al eje x positivo en sentido antihorario.
- El centrado del anillo debe verificarse con precisión utilizando la grilla de 5 mm como referencia, evitando el error de paralaje.

1.8. Análisis de Resultados

1.8.1. Sistema en equilibrio (fuerza equilibrante)

1. Comparación de magnitudes

- Presente en una tabla la magnitud teórica de la fuerza equilibrante y la magnitud experimental obtenida.
- Calcule el error porcentual mediante la ecuación 1.18.

$$\text{Error \%} = \left| \frac{F_{\text{exp}} - F_{\text{teo}}}{F_{\text{teo}}} \right| \times 100 \quad (1.18)$$

2. Análisis direccional

- Compare el ángulo teórico del vector equilibrante con el ángulo configurado experimentalmente.
- Explique cómo pequeñas variaciones angulares pueden afectar el centrado del anillo.

3. Discusión física

- ¿Se cumple experimentalmente la condición de equilibrio, ecuación 1.14?
- Analice las posibles fuentes de error: fricción en poleas, masa del hilo, desalineación angular, resolución de la escala y errores de lectura.
- Discuta si el sistema puede considerarse un modelo ideal de fuerzas concurrentes.

1.8.2. Sistema dinámico (segunda ley de Newton)

1. Condición de movimiento unidimensional

- Verifique matemáticamente que la condición de equilibrio, ecuación 1.14 se cumple para el eje y .
- Explique la importancia física de esta condición para garantizar aceleración exclusivamente en el eje x .

1.9. Conclusiones

- Explique cómo la descomposición vectorial en componentes rectangulares permitió transformar un problema geométrico en uno algebraico. Argumente de qué manera las condiciones de la ecuación 1.14 describen formalmente el equilibrio estático y cómo la segunda ley de Newton en forma vectorial relaciona fuerza neta y aceleración.
- Describa cómo la configuración experimental en la mesa de fuerzas permitió verificar el modelo matemático desarrollado en el preinforme. Justifique la validez del procedimiento utilizado para determinar la fuerza equilibrante y la masa del sistema dinámico, señalando la correspondencia entre cálculo teórico y medición instrumental.
- Evalúe el grado de concordancia entre resultados teóricos y experimentales. Identifique las principales fuentes de error y discuta las limitaciones del modelo ideal empleado (ausencia de fricción, poleas ideales, hilos sin masa). Argumente en qué medida estas simplificaciones afectan la interpretación de los resultados y cómo podrían mitigarse en un contexto de aplicación real.
- Reflexione sobre la importancia del cálculo vectorial en el análisis de sistemas físicos reales. Explique cómo los principios estudiados en esta práctica son aplicables en contextos de ingeniería donde múltiples fuerzas actúan simultáneamente.

Laboratorio 2

Movimiento en dos dimensiones

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Determinar la magnitud de la aceleración de la gravedad local (g) a partir del análisis cinemático de un objeto en movimiento curvilíneo, aplicando un ajuste no lineal sobre datos experimentales.

2.1.2. Objetivos específicos

- Manipular adecuadamente los instrumentos del montaje experimental para registrar las variables cinemáticas, reconociendo y escribiendo apropiadamente las unidades y símbolos asociados al Sistema Internacional de Unidades (SI).
- Aplicar técnicas de linealización y regresión lineal a los datos cinemáticos recolectados, con el fin de interpretar la relación empírica entre las variables del movimiento y determinar experimentalmente la magnitud de la aceleración de la gravedad.
- Clasificar los componentes de incertidumbre en las mediciones obtenidas y reportar el procedimiento, análisis y conclusiones en un documento científico, demostrando responsabilidad, honestidad y colaboración en el trabajo de equipo.

2.2. Preinforme

1. Análisis conceptual del movimiento bidimensional

- Defina movimiento curvilíneo y explique por qué el movimiento de proyectiles puede analizarse como la superposición de dos movimientos independientes.
- Explique por qué la aceleración en el movimiento parabólico es constante y vertical.
- Justifique físicamente por qué la componente horizontal del movimiento es uniforme.

2. Derivación del modelo cinemático

A partir de la ecuación vectorial 2.4:

- Desarrolle paso a paso la obtención de las ecuaciones paramétricas escalares $x(t)$ y $y(t)$.
- Demuestre algebraicamente cómo se obtiene la ecuación 2.6 partiendo de las ecuaciones paramétricas.
- Explique por qué esta ecuación permite transformar el problema en un modelo lineal de la forma $Y = mX + b$.

Requisitos obligatorios para la sesión de laboratorio:

- Desarrollo completo del preinforme.
- Plantilla del Anexo 2 (Figura 2.3) impresa en tamaño carta.

El estudiante que no presente la plantilla impresa no podrá realizar adecuadamente la toma de datos experimentales.

2.3. Introducción

El estudio de la cinemática de partículas bajo la influencia de un campo gravitacional uniforme constituye uno de los elementos fundamentales en la formación en ingeniería. Desde el diseño de trayectorias balísticas hasta el análisis de chorros de fluidos y la dinámica de mecanismos, el movimiento curvilíneo representa un modelo físico indispensable. A pesar de que la abstracción teórica del movimiento de proyectiles suele ignorar fuerzas disipativas como la resistencia aerodinámica, su verificación empírica exige el control de las variables iniciales y un tratamiento analítico riguroso. Esta práctica de laboratorio trasciende la mera comprobación de la trayectoria parabólica; se enfoca en la caracterización vectorial del movimiento bidimensional y en la aplicación de técnicas de transformación matemática para linealizar modelos no lineales, permitiendo así una determinación experimental de la magnitud de la aceleración de la gravedad local (g).

2.4. Fundamento teórico

En el movimiento curvilíneo, el vector velocidad (\mathbf{v}) experimenta cambios tanto en su magnitud como en su dirección debido a que es continuamente tangente a la trayectoria. El cambio instantáneo de este vector define la aceleración de la partícula.

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \tag{2.1}$$

Para el caso específico de la cinemática de proyectiles a bajas altitudes, la aceleración es constante en magnitud y dirección, correspondiendo a la aceleración de la gravedad ($\mathbf{a} = \mathbf{g}$). Al integrar la ecuación diferencial de la aceleración asumiendo un tiempo inicial $t_0 = 0$ s, se obtiene la expresión para la velocidad instantánea.

$$\int_{v_0}^v d\mathbf{v} = \int_{t_0}^t \mathbf{g} \cdot dt$$

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_0 + \mathbf{g} \cdot t \quad (2.2)$$

Una segunda integración respecto al tiempo proporciona el vector de posición en cualquier instante de tiempo t .

$$\int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}} d\mathbf{r} = \int_{t_0}^t (\mathbf{v}_0 + \mathbf{g} \cdot t) dt$$

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 \cdot t + \frac{1}{2} \mathbf{g} \cdot t^2 \quad (2.3)$$

Estableciendo un sistema de coordenadas cartesianas bidimensional donde el eje y es colineal y de sentido opuesto al vector gravedad ($\vec{\mathbf{g}} = -g\hat{j}$) y el origen coincide con un punto de referencia arbitrario, el vector velocidad inicial puede descomponerse en sus componentes rectangulares $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \theta$ y $v_{0y} = v_0 \cdot \text{sen} \theta$ (Figura 2.1). Esto permite desacoplar la ecuación vectorial en dos ecuaciones paramétricas escalares en función del tiempo.

$$x(t) = x_0 + (v_0 \cdot \cos \theta) \cdot t \quad (2.4)$$

$$y(t) = y_0 + (v_0 \cdot \text{sen} \theta) \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad (2.5)$$

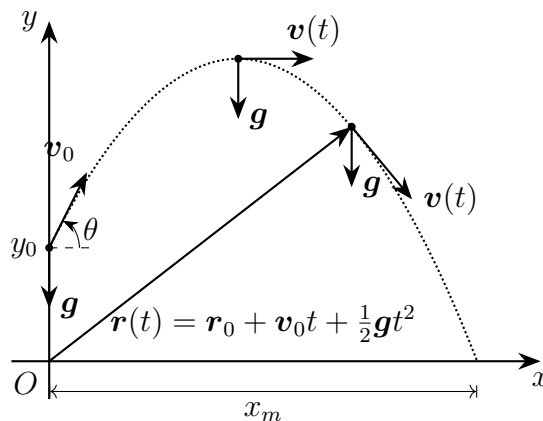


Figura 2.1: Diagrama de movimiento bidimensional de un proyectil.

En el contexto de la configuración experimental, el análisis de la trayectoria se delimita por dos magnitudes cinemáticas observables. Por un lado, el tiempo de vuelo (t_v) se define como el intervalo temporal total durante el cual el proyectil se encuentra en movimiento bajo la acción del campo gravitacional. El alcance máximo (x_m) representa el desplazamiento horizontal total experimentado por la partícula durante su tiempo de vuelo. Esta es una magnitud escalar.

2.4.1. Modelo matemático para la linealización de datos

Si bien el análisis tradicional busca ajustar los datos (x, y) a la ecuación de una parábola eliminando el parámetro temporal, las mediciones experimentales de esta práctica proporcionan directamente el alcance máximo (x_m) , la altura inicial de salida (y_0) , el ángulo de lanzamiento (θ) y el tiempo de vuelo (t_v) .

Para determinar g es conveniente transformar las ecuaciones paramétricas escalares en un modelo lineal de la forma $Y = mX + b$.

Partiendo de la ecuación paramétrica horizontal (Ecuación 2.4) evaluada en $t = t_v$, donde la posición corresponde a (x_m)

$$x_m = (v_0 \cdot \cos \theta)t_v$$

Despejando la velocidad inicial (v_0)

$$v_0 = \frac{x_m}{t_v \cdot \cos \theta}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación paramétrica vertical (Ecuación 2.5) evaluada en el tiempo de vuelo (t_v) . Dado que en ese instante el proyectil impacta el suelo, la posición final es $y(t_v) = 0$:

$$0 = y_0 + \left(\frac{x_m}{t_v \cdot \cos \theta} \right) (\text{sen} \theta) \cdot t_v - \frac{1}{2}g \cdot t_v^2$$

Simplificando los términos temporales y aplicando la identidad trigonométrica para $\tan \theta$, se obtiene.

$$0 = y_0 + x_m \tan \theta - \frac{1}{2}g \cdot t_v^2$$

Reorganizando algebraicamente los términos para aislar las variables dependientes del sistema, se llega a la ecuación fundamental de trabajo.

$$x_m \tan \theta = \frac{1}{2}g \cdot t_v^2 - y_0 \tag{2.6}$$

Este modelo matemático permite un análisis gráfico. Si se realizan múltiples lanzamientos variando el ángulo o la velocidad, y se grafica la cantidad $(x_m \tan \theta)$ en el eje de las ordenadas frente a (t_v^2) en el eje de las abscisas, los puntos experimentales deberán ajustarse a una recta. La pendiente de dicha recta de regresión lineal corresponderá a $g/2$, y su intercepto será la altura inicial negativa $(-y_0)$.

2.5. Equipos de la práctica

Para el desarrollo de la práctica de laboratorio se dispondrá de los siguientes instrumentos y accesorios. Las instrucciones para su correcto uso se encuentran en el Anexo.

- Lanzador de proyectiles y bola de plástico.
- Prensa tipo C.
- Compuerta óptica.
- Sensor de impacto de proyectil.
- Módulo de cronómetro digital.
- Cinta métrica, plantilla del anexo 2.3 y papel carbón.

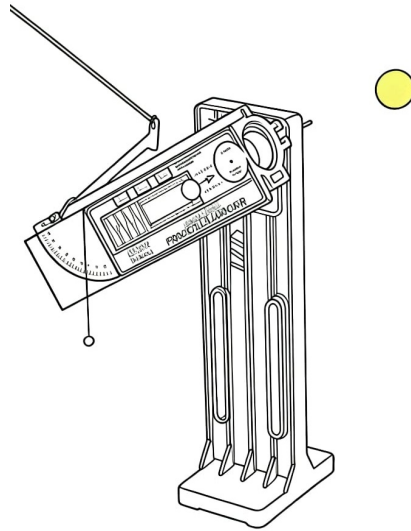


Figura 2.2: Cañón de lanzamiento con proyectil.

2.6. Práctica de laboratorio

Asegúrese de registrar todas las mediciones directas en una tabla.

- a) Con la cinta métrica mida la altura vertical (y_0) desde la base (nivel del sensor de impacto) hasta el punto donde pasa la bola en el sensor óptico. Este valor de y_0 se mantendrá constante durante toda la práctica.
- b) Fije la plantilla 2.3 sobre la placa del sensor de impacto, asegurando la parte inferior derecha con la esquina del sensor y coloque sobre ella una hoja de papel carbón.
- c) Fije el ángulo del cañón respecto a la horizontal haciendo uso del tornillo de fijación lateral, la plomada y el transportador integrados en el equipo. Una vez establecido el ángulo, vuelva a apretar firmemente el tornillo para asegurar el lanzador y evitar desajuste durante el disparo.
- d) Cargue el proyectil en la posición *Short*. Esta configuración busca garantizar que la velocidad inicial (v_0) suministrada por la energía potencial del resorte sea constante en todos los lanzamientos.

Nota metodológica sobre la selección de ángulos.

Para garantizar la validez del modelo cinemático ideal (asumido en el vacío), se recomienda acotar los lanzamientos a un rango angular comprendido entre 15° y 35° . Ángulos inferiores a 15° producen tiempos de vuelo muy cortos, lo cual maximiza el error relativo de los instrumentos de medición de tiempo. Por el contrario, lanzamientos con ángulos superiores a 35° incrementan el tiempo de exposición del proyectil a la fricción aerodinámica, introduciendo un error sistemático que atenúa el alcance horizontal real.

- e) Se realizarán ensayos variando el ángulo de lanzamiento (θ) en incrementos regulares. Para cada ángulo repita el siguiente ciclo:
- 1) Realice un disparo de prueba (sin registrar datos) para observar la trayectoria y ajustar la posición horizontal del sensor de impacto, garantizando que el proyectil golpee la zona cubierta por el papel carbón.
 - 2) Cargue el proyectil nuevamente en la posición *Short* y posteriormente inicie el cronómetro pulsando el botón *Start/Stop* en el módulo de adquisición de datos.
 - 3) Efectúe el disparo accionando el mecanismo sin golpear bruscamente el equipo para no alterar el ángulo de lanzamiento.
 - 4) Registre el tiempo de vuelo (t_v) reportado por el cronómetro.
 - 5) Utilizando la cinta métrica, mida el alcance horizontal máximo (x_m), desde el punto de la proyección vertical del sensor óptico sobre la mesa hasta la marca dejada por el papel carbón en la plantilla.
 - 6) Con el fin de minimizar los errores aleatorios propios del sistema mecánico, repita este disparo al menos tres (3) veces para el mismo ángulo. Promedie las lecturas de tiempo de vuelo y alcance máximo.

Con los datos recolectados construya una tabla similar a la Tabla 2.1 para organizar sus mediciones

Tabla 2.1: Registro de mediciones cinemáticas para el movimiento del proyectil.

θ ($^\circ$)	x_{m_1} (m)	x_{m_2} (m)	x_{m_3} (m)	t_{v_1} (s)	t_{v_2} (s)	t_{v_3} (s)

2.7. Análisis de resultados

2.7.1. Procesamiento de datos para la linealización

De acuerdo con la Ecuación 2.6 el comportamiento del sistema puede modelarse mediante la ecuación de una línea recta $Y = mX + b$, donde las nuevas variables a graficar son

- Variable independiente $X = \bar{t}_v^2$
- Variable dependiente $Y = \bar{x}_m \tan \theta$

A partir de los datos recolectados en la fase experimental, calcule las nuevas variables X y Y y regístrelas en una tabla.

Nota: Asegúrese de que su *software* opere en grados para las funciones trigonométricas y preste atención a las cifras significativas.

2.7.2. Regresión lineal y obtención de parámetros físicos

- a) Grafique los datos ubicando $X = \bar{t}_v^2$ en el eje horizontal y $Y = \bar{x}_m \tan \theta$ en el eje vertical.
- b) Aplique una regresión lineal, utilizando la función `ESTIMACION.LINEAL(y, x, 1, 1)` de Google Sheets, por el método de mínimos cuadrados para encontrar la ecuación de la recta de mejor ajuste.
- c) Registre el valor del coeficiente de determinación (R^2).
- d) A partir de los parámetros de la recta ajustada ($Y = mX + b$), extraiga las constantes físicas del experimento:
 - Magnitud de la aceleración de la gravedad experimental (g_{exp})
Dado que la pendiente teórica es $m = \frac{g}{2}$, calcule la gravedad como $g_{exp} = 2m$. y su respectiva incertidumbre (incertidumbre de la pendiente).
 - Altura inicial experimental ($y_{0,exp}$). Dado que el intercepto teórico es $b = -y_0$, determine que $y_{0,exp} = -b$ y su respectiva incertidumbre (incertidumbre del intercepto).
- e) Compare los resultados experimentales obtenidos en el punto anterior con los valores teóricos o medidos directamente, calculando el error relativo porcentual ($\%E$).
- f) ¿El valor del intercepto (b) arrojado por el *software* tiene un sentido físico coherente (es decir, es negativo)? ¿Concuerda cuantitativamente con la altura medida directamente?
- g) Si el porcentaje de error de la gravedad es significativo, ¿qué fuentes de error sistemático podrían estar afectando el resultado más fuertemente? Discuta.

2.8. Anexo

2.8.1. Lanzador de proyectiles Pasco ME-8600

El sistema consta de un cañón con un resorte interno que almacena energía potencial elástica al introducir la bola. Un pistón empuja el proyectil evitando la fricción con las paredes del cañón, garantizando un disparo prácticamente sin rotación (*spin*).

- Fijación: para minimizar el retroceso y reducir la dispersión de los datos, la base del lanzador debe asegurarse firmemente al borde de una mesa robusta utilizando una prensa tipo C.

- Medida del ángulo: el ángulo de inclinación, que va desde la horizontal (0°) hasta la vertical (90°), se ajusta mediante los tornillos laterales. La medición se realiza con el transportador y la plomada integrados en el equipo, los cuales permiten variaciones de 0.5° .
- Rangos de disparo: el cañón permite comprimir el resorte en tres posiciones: *short*, *medium* y *large*. El rango fijado se verifica observando un indicador amarillo a través de las ranuras del cañón.
- Palanca de lanzamiento: el disparo se ejecuta tirando suavemente de una cuerda conectada al gatillo (aproximadamente 1 cm hacia arriba). Hacerlo mediante esta cuerda evita tirones bruscos que puedan desalinearse el montaje.

2.8.2. Sistema de recolección de datos (Cronómetro)

La compuerta óptica, encargada de detectar la salida de la bola desde el cañón, se conecta al canal de entrada 1 (ENT 1) del cronómetro. Por su parte, el sensor de impacto se conecta al canal de entrada 2 (ENT 2).

Una vez encendido el módulo, presione el botón 1 (*Select Measurement*) para seleccionar la medida de tiempo (*Time*) y el botón 2 (*Select Mode*) para configurar el modo de dos compuertas (*Two Gates*). Para iniciar la medición, presione el botón 3 (*Start/Stop*) hasta que visualice un asterisco (*) en la pantalla; esto indica que el equipo está listo y esperando a que el proyectil cruce la compuerta óptica.

2.8.3. Anexo 2: Plantilla para impresión

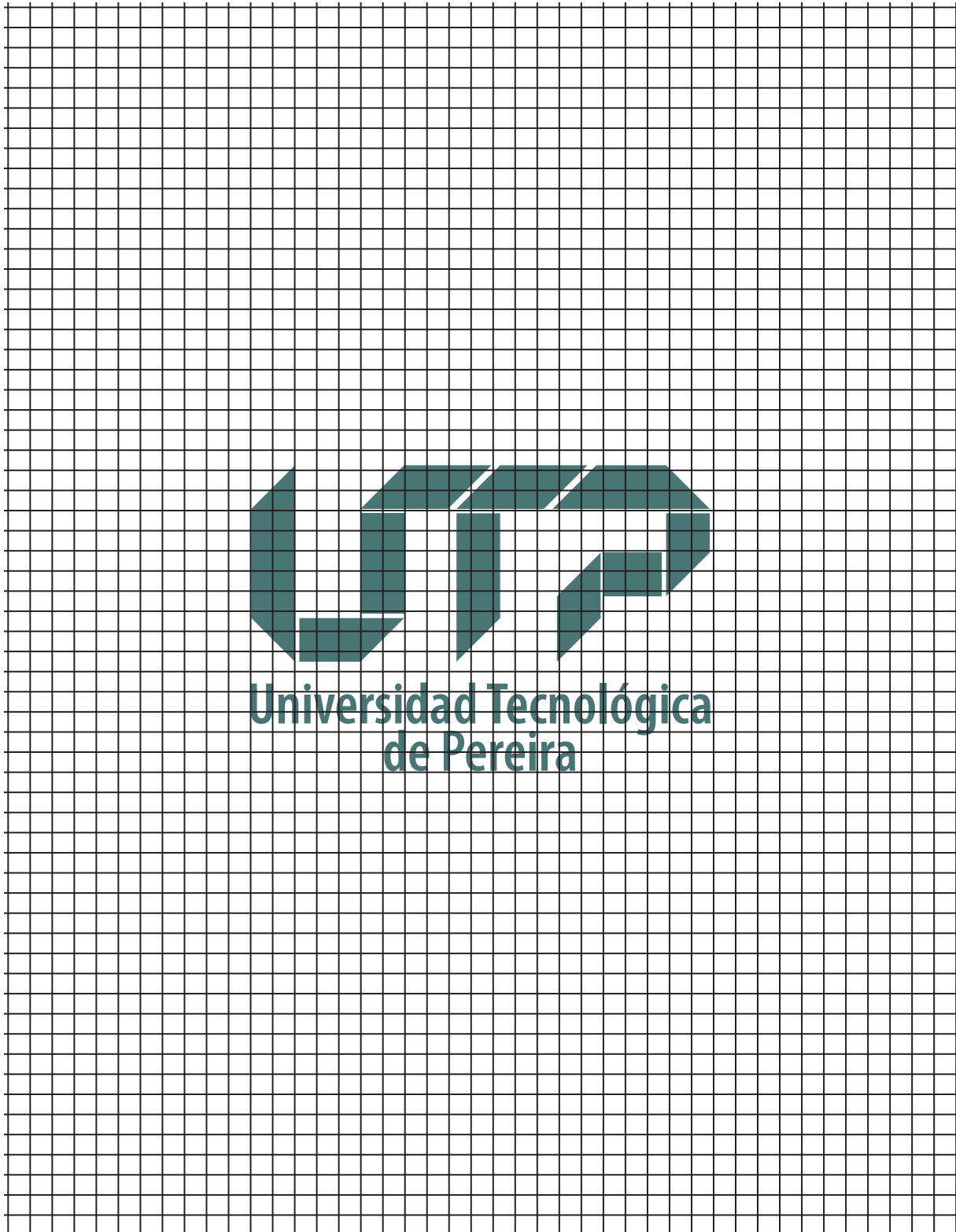


Figura 2.3: cuadrícula de apoyo para sensor de impacto.

Laboratorio 3

Caracterización y selección de resortes mediante análisis gráfico para el uso en aplicaciones.

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

Integrar los principios de la Ley de Hooke con herramientas de análisis gráfico y criterios metrológicos para caracterizar experimentalmente resortes, seleccionar el componente elástico adecuado y diseñar un instrumento de medición de fuerza, evaluando su desempeño mediante el análisis de error, incertidumbre y reproducibilidad, conforme a los lineamientos del método experimental y del Sistema Internacional de Unidades.

3.1.2. Objetivos específicos

- a) Verificar experimentalmente la relación lineal entre la fuerza aplicada a un resorte y su longitud de deformación bajo los principios de la Ley de Hooke.
- b) Aplicar técnicas gráficas y numéricas de regresión lineal (mínimos cuadrados) para determinar la constante de elasticidad (k) de diferentes resortes.
- c) Diseñar y construir un instrumento de medición de fuerza (dinamómetro análogo) seleccionando el componente elástico que garantice una resolución específica.
- d) Validar el desempeño del instrumento construido mediante el cálculo de su error de medida, incertidumbre y repetibilidad frente a un instrumento patrón de laboratorio.

3.2. Preinforme

- a) Defina qué es un material elástico lineal y explique el significado físico de la constante elástica (k).

- b) Describa el procedimiento de linealización para un conjunto de datos experimentales que siguen una tendencia lineal simple

$$y = a \cdot x + b \quad (3.1)$$

- c) ¿Qué diferencia existe entre la repetibilidad y la reproducibilidad en un proceso de medición ?.
- d) Explique cómo se determina la resolución en un instrumento de medición analógico basado en una escala graduada.

3.3. Introducción

El análisis y selección de elementos elásticos constituyen un aspecto fundamental en el diseño de instrumentos de medición mecánica empleados en aplicaciones industriales y académicas. En particular, los resortes helicoidales metálicos son dispositivos ampliamente utilizados debido a su comportamiento elástico aproximadamente lineal dentro de un rango determinado de deformación. Esta característica permite establecer una relación funcional directa entre una magnitud mecánica aplicada y una variable geométrica medible, posibilitando así la construcción de instrumentos como dinamómetros análogos.

Desde el punto de vista experimental, la caracterización de un resorte no solo implica verificar la proporcionalidad entre fuerza y deformación, sino también determinar con precisión su constante elástica mediante métodos cuantitativos de análisis de datos. En este contexto, el uso de herramientas de regresión lineal adquiere relevancia, ya que permite modelar matemáticamente el comportamiento del sistema físico y estimar parámetros con criterio estadístico.

La presente práctica integra los fundamentos de la mecánica clásica con procedimientos experimentales y criterios metrológicos, permitiendo al estudiante comprender cómo un fenómeno físico elemental puede transformarse en una herramienta tecnológica funcional mediante un análisis riguroso y validación cuantitativa.

3.4. Fundamento Teórico

El comportamiento elástico lineal de un resorte ideal está descrito por la Ley de Hooke, la cual establece que, dentro del límite elástico del material, la fuerza restauradora es directamente proporcional a la deformación producida. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$F = -k \cdot x \quad (3.2)$$

donde F corresponde a la fuerza aplicada, x es la elongación respecto a la longitud natural del resorte y k representa la constante elástica o rigidez del sistema, parámetro que depende de las propiedades geométricas y del material del resorte [1].

La constante elástica k tiene interpretación física como la pendiente de la gráfica F (fuerza) versus x (desplazamiento). Un valor elevado de k indica un resorte rígido,

es decir, que requiere mayor fuerza para producir una deformación determinada; mientras que un valor pequeño corresponde a un sistema más flexible. Experimentalmente, la determinación de k se realiza midiendo la elongación generada por fuerzas conocidas, comúnmente obtenidas a partir del peso de masas suspendidas:

$$F = m \cdot g \quad (3.3)$$

Donde m es la masa aplicada y g la aceleración gravitacional local.

Dado que las mediciones experimentales están sujetas a dispersión y errores instrumentales, el análisis de los datos requiere la aplicación del método de mínimos cuadrados para ajustar un modelo lineal de la forma (3.1):

En este caso, la pendiente a corresponde a la constante elástica k , mientras que el intercepto b permite identificar posibles desviaciones sistemáticas, tales como errores de cero o precargas iniciales. El criterio de mínimos cuadrados minimiza la suma de los cuadrados de los residuos, definidos como la diferencia entre los valores experimentales y los valores estimados por el modelo, proporcionando así el mejor ajuste lineal en sentido estadístico.

Desde la perspectiva metrológica, el diseño de un dinamómetro basado en un resorte implica establecer una relación directa entre deformación y la escala graduada. La resolución del instrumento dependerá de la sensibilidad del resorte (variación de elongación por unidad de fuerza) y de la capacidad del sistema de lectura para discriminar pequeñas variaciones. Asimismo, la validación del instrumento requiere estimar la incertidumbre asociada a las mediciones, entendida como un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a la magnitud medida [2].

Finalmente, la evaluación del error relativo, la repetibilidad y la reproducibilidad permite determinar la confiabilidad del instrumento construido y su viabilidad para aplicaciones prácticas, asegurando que opere dentro del rango elástico del material y que sus mediciones mantengan coherencia frente a un instrumento patrón de referencia.

3.5. Práctica de laboratorio

3.5.1. Materiales

- Base universal.
- Juego de resortes de distintas características.
- Juego de masas patrón de diferente valor de masa nominal.

3.5.2. Caracterización experimental de los resortes

Para cada resorte realice el siguiente procedimiento:

- Instale el resorte de manera vertical en el soporte universal, verificando su alineación axial para evitar componentes laterales de fuerza que introduzcan error sistemático.

- Mida la longitud natural L_0 del resorte sin carga utilizando el dial superior de la regla, teniendo en cuenta la resolución del instrumento.
- Suspenda masas patrón en incrementos uniformes de 50 g o 100 g según disponibilidad. Antes de cada lectura:
 - Espere a que el sistema alcance equilibrio estático.
 - Evite oscilaciones residuales.
 - Verifique que la lectura se realice a nivel visual perpendicular a la escala (evitar error de paralaje).
- Registre la longitud total L y calcule la elongación:

$$x = L - L_0 \tag{3.4}$$

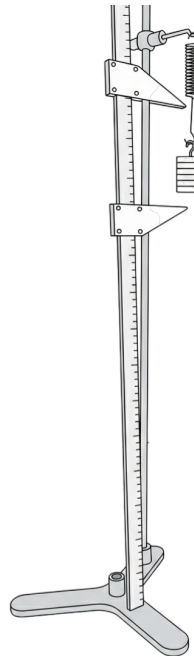


Figura 3.1: Soporte universal utilizado para caracterización de los resortes.

3.5.3. Registro y organización de datos en hoja de cálculo

Cada grupo deberá estructurar la hoja de cálculo con las siguientes columnas independientes para cada resorte:

Tabla 3.1: Registro de datos para resorte n .

m (kg)	$F = mg$ (N)	x_1	x_2	x_3	\bar{x}

3.5.4. Construcción de la gráfica comparativa

En la hoja de cálculo:

- Inserte un gráfico de dispersión (x, y) .
- Ubique la fuerza F en el eje vertical y la elongación promedio \bar{x} en el eje horizontal.
- Agregue en la misma gráfica las series correspondientes a todos los resortes caracterizados.
- Incorpore para cada serie una línea de tendencia lineal.
- Active la opción “mostrar ecuación en el gráfico” y “mostrar coeficiente de determinación R^2 ”.

El valor de la pendiente de cada ajuste corresponde a la constante elástica k del resorte, y el coeficiente R^2 permitirá evaluar la calidad del ajuste lineal y, por tanto, la validez del modelo de **Ley de Hooke** dentro del rango trabajado.

3.5.5. Análisis metrológico y selección del resorte

Con las pendientes obtenidas:

- Compare los valores de k y determine cuál resorte presenta mayor sensibilidad (mayor deformación por unidad de fuerza).
- Evalúe el rango lineal útil antes de evidenciar desviaciones del comportamiento proporcional.
- Determine la incertidumbre asociada a la pendiente utilizando las herramientas estadísticas del ajuste lineal.

El resorte seleccionado deberá permitir una resolución mínima equivalente a 50 N (Peso de una masa de 5 g o la indicada por el docente). Para verificarlo, se calculará la variación de elongación correspondiente a esa carga mínima y se comparará con la mínima división legible de la escala diseñada.

3.5.6. Construcción y validación del dinamómetro

Una vez seleccionado el resorte:

- Diseñe la escala graduada considerando la relación lineal obtenida.
- Marque divisiones uniformes en función de la ecuación (3.1)
- Estructure en su hoja de cálculo una nueva tabla 3.2 donde registre los datos de la siguiente manera:

Tabla 3.2: Registro de datos para fuerzas n .

m (kg)	F_t (N)	F_1	F_2	F_3	\bar{F}	E (%)	E_R	U
----------	-----------	-------	-------	-------	-----------	---------	-------	-----

3. Realice mediciones comparativas suspendiendo una masa patrón de un dinamómetro del laboratorio, registre el valor de masa y fuerza en las primeras columnas de la tabla 3.2.
4. Ahora, mida tres veces la fuerza en el dinamómetro diseñado en clase y registre los resultados en la tabla 3.2.

Para cada punto de comparación deberán calcular:

- Error absoluto:

$$E = F_{\text{dinamómetro}} - F_{\text{patrón}} \quad (3.5)$$

- Error relativo porcentual.
- Incertidumbre expandida:

$$U = k \cdot u_c \quad (3.6)$$

Donde k es el factor de cobertura (usualmente $k = 2$ para un 95 % de confianza).

Finalmente, se evaluará:

- Repetibilidad: variación bajo mismas condiciones y operador.
- Reproducibilidad: variación con cambio de operador o momento de medición.

Criterio de aceptación

El instrumento será considerado apto si:

- Presenta comportamiento lineal con R^2 cercano a 1.
- El error relativo se mantiene dentro del límite establecido.
- La incertidumbre expandida es comparable con la resolución diseñada.

3.6. Análisis de Resultados

- a) Error de medida: Determine la diferencia entre las lecturas del dinamómetro del laboratorio y el dinamómetro diseñado, calculando el error relativo porcentual.
- b) Incertidumbre: Estime la incertidumbre combinada y expandida del proceso, considerando la resolución del instrumento y la dispersión de las medidas.
- c) Reproducibilidad: Evalúe la concordancia de los resultados realizando mediciones repetidas con diferentes operadores o en distintos momentos de la sesión.
- d) Limitaciones: Analice el rango de operación (alcance) del instrumento y su aplicabilidad en un entorno real.

3.7. Conclusiones

- ¿Se verificó experimentalmente la relación lineal entre la fuerza aplicada y la deformación del resorte en el rango de trabajo seleccionado? Explique si los datos obtenidos confirman el cumplimiento de la Ley de Hooke para todos los resortes caracterizados.

- ¿Qué interpretación física le otorga a la pendiente (k) y al intercepto (b) obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados? Analice si el modelo matemático resultante describe con exactitud el comportamiento elástico del material frente a la incertidumbre experimental.
- ¿Fue adecuado el resorte seleccionado para garantizar la resolución exigida por el docente en el diseño del dinamómetro? Justifique si la sensibilidad del componente elástico permitió una construcción precisa de la escala graduada conforme a los parámetros metrológicos.
- ¿Qué tan confiable es el dinamómetro construido frente a la balanza de laboratorio según el error relativo y la reproducibilidad hallados? Determine si el instrumento es apto para su uso en un entorno productivo basado en los límites de incertidumbre expandida calculados.
- ¿Qué factores instrumentales o ambientales influyeron más significativamente en la "duda" sobre la validez de las mediciones del nuevo instrumento? Identifique las principales fuentes de incertidumbre y proponga mejoras técnicas para aumentar la exactitud del diseño.

Laboratorio 4

Análisis de procesos físicos basados en caída libre en sistemas reales.

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivo general

Modelar experimentalmente el movimiento de caída libre mediante la adquisición y análisis estadístico de datos de posición y tiempo, con el fin de determinar la aceleración gravitacional local y aplicar el modelo cinemático obtenido al diseño y optimización de un sistema industrial de detección y rechazo por gravedad, integrando criterios de medición, incertidumbre y validación experimental propios del laboratorio de Física I.

4.1.2. Objetivos específicos

- a) Caracterizar el comportamiento cinemático de un cuerpo en caída libre para modelar procesos industriales de transporte por gravedad.
- b) Determinar el mensurando adecuado y estimar el valor de la aceleración gravitacional local (g) mediante el procesamiento estadístico de datos experimentales.
- c) Diseñar y proponer las posiciones óptimas de un sensor magnético y una compuerta de rechazo basándose en las variables cinemáticas caracterizadas en el laboratorio.

4.2. Preinforme

- a) Defina el concepto de mensurando y explique su importancia en la definición de un proceso de medición.
- b) Deduzca, a partir de la ecuación de posición $r(t)$, la expresión para la altura (h) en función del tiempo para un cuerpo que parte del reposo ($v_0 = 0$).
- c) Consulte qué es un tiempo de respuesta (latencia) en un sistema de control electrónico y cómo afecta la ubicación de un actuador (como una compuerta de

rechazo).

4.3. Introducción

En diversos procesos industriales, especialmente en las industrias alimentaria, farmacéutica y de procesamiento de materiales a granel, se emplean sistemas de transporte y dosificación por gravedad para el desplazamiento de productos a través de tolvas, ductos y canales verticales. En estos sistemas, el material describe un movimiento de caída libre bajo la acción exclusiva del campo gravitatorio terrestre (g). Uno de los dispositivos críticos es el detector de metales de caída libre; este consta de una zona de detección con bobinas electromagnéticas. Si una partícula metálica atraviesa la zona, se induce una perturbación registrada por el sistema.

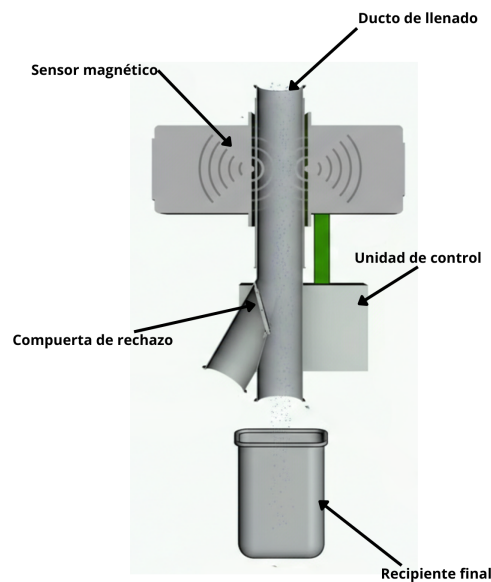


Figura 4.1: Esquemático de equipo de llenado.

4.4. Fundamento Teórico

El movimiento de caída libre constituye un caso particular del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), en el cual un cuerpo se desplaza verticalmente bajo la acción exclusiva del campo gravitatorio terrestre. En este modelo ideal se desprecia la resistencia del aire y se asume que la aceleración gravitacional (g) es constante en el intervalo espacial considerado.

Si se define un sistema de referencia con eje vertical positivo en el sentido descendente, y el cuerpo es liberado desde el reposo ($v_0 = 0$), las ecuaciones cinemáticas que describen el movimiento se expresan como:

$$v(t) = g \cdot t \quad (4.1)$$

$$h(t) = \frac{1}{2}g \cdot t^2 \quad (4.2)$$

Estas relaciones establecen una dependencia directa entre el tiempo de caída, la altura recorrida y la velocidad instantánea alcanzada por el objeto. Desde el punto de vista metrológico, el mensurando principal puede definirse como la aceleración gravitacional local (g), la cual se determina indirectamente mediante la medición de las variables altura y tiempo, y el posterior ajuste del modelo matemático a los datos experimentales obtenidos.

Bajo estas consideraciones, el comportamiento dinámico del sistema puede analizarse cuantitativamente y extrapolarse a aplicaciones tecnológicas donde el transporte por gravedad constituye el principio físico dominante.

Físicamente, el desempeño del sistema depende de:

- La altura de caída (h).
- La aceleración gravitacional (g).
- La velocidad instantánea del objeto al atravesar la región de medición determinada por la ecuación 4.1.

Para que la compuerta de rechazo actúe eficazmente, debe conocerse con precisión el tiempo que tarda la partícula en viajar desde el sensor hasta la compuerta. Si definimos el sentido del eje Y positivo hacia abajo, la relación entre la altura y el tiempo como se muestra en la ecuación 4.2.

4.5. Equipos de la Práctica

El montaje requerido para la practica consta de una torre vertical graduada que permite fijar diferentes alturas de liberación, un mecanismo de liberación electromagnético ubicado en la parte superior, el cual asegura que el cuerpo inicie su movimiento desde el reposo, y dos sensores ópticos ajustables a lo largo de la torre, empleados para detectar el paso del cuerpo y definir intervalos de medición temporal. En la base del sistema se dispone un sensor de impacto que registra el instante de llegada del cuerpo al punto de referencia. Todos los sensores están conectados a una unidad de control electrónica, encargada de sincronizar la liberación del objeto, procesar las señales de los sensores y mostrar en pantalla los tiempos medidos.

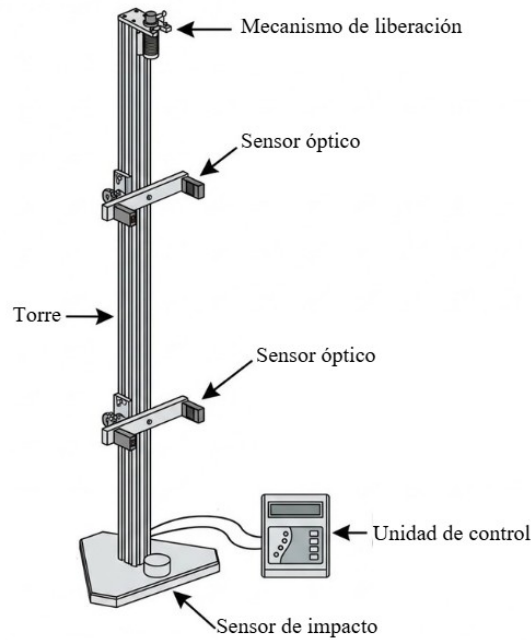


Figura 4.2: Representación esquemática del equipo de caída libre

4.6. Procedimiento Experimental

El desarrollo de esta practica se realizará bajo un enfoque sistemático de adquisición de datos, control de condiciones iniciales y tratamiento estadístico, garantizando la validez metrológica del mensurando definido (aceleración gravitacional local, g).

4.6.1. Caracterización inicial del sistema

- Verifique la correcta alineación vertical de la torre de caída libre utilizando un nivel o inspección visual rigurosa. Cualquier desviación angular introduce error sistemático en la medición de la altura.
- Identifique y registre la resolución del instrumento de medición de altura (regla o escala graduada) y la resolución del sistema de cronometraje digital.
- Compruebe el funcionamiento del electroimán y del sistema de liberación asegurando que el balón inicie el movimiento desde el reposo ($v_0 = 0$). No debe existir impulso inicial adicional.
- Realice una prueba preliminar para verificar que el sensor de impacto o el segundo sensor óptico detecten correctamente el instante final del movimiento.

4.6.2. Configuración de alturas y adquisición de datos

- Seleccione cinco (5) alturas diferentes distribuidas uniformemente entre la altura máxima disponible en el montaje.
- Para cada altura:

- a) Mida la distancia vertical desde el punto de liberación hasta el punto de referencia inferior (sensor de impacto).
- b) Registre la altura con su respectiva incertidumbre instrumental (asociada a la resolución).
- c) Libere el balón y registre el tiempo de caída indicado por el cronómetro digital.
- d) Repita el procedimiento cinco (5) veces para la misma altura.

Es fundamental que durante cada repetición:

- No se modifique la posición del sensor.
- No se altere la altura configurada.
- Se permita que el sistema retorne completamente a estado inicial antes de una nueva medición.

4.6.3. Organización de datos en hoja de cálculo

Para cada altura, la hoja de cálculo deberá estructurarse con las siguientes columnas:

Tabla 4.1: Registro de datos para caída del balón n .

Medida	h (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	t_5 (s)
1						
2						
3						
4						
5						

Posteriormente se calculará:

- Tiempo promedio:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \quad (4.3)$$

- Desviación estándar experimental del tiempo.
- Incertidumbre tipo A del tiempo:
- Incertidumbre tipo B asociada a la resolución del cronómetro:
- Incertidumbre combinada del tiempo:

4.6.4. Determinación experimental del modelo físico

- Construya un gráfico de dispersión h vs t^2 .
- Realice un ajuste lineal del tipo:

$$h = a \cdot t^2 \quad (4.4)$$

- Identifique el parámetro a , el cual teóricamente corresponde a:

$$a = \frac{1}{2}g \quad (4.5)$$

- Determine el valor experimental de la aceleración gravitacional:

$$g = 2a \quad (4.6)$$

- Registre el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de la calidad del ajuste.

4.6.5. Propagación de incertidumbre en la determinación de g

La incertidumbre asociada a la aceleración gravitacional se estimará a partir de la incertidumbre del parámetro de ajuste, considerando la relación funcional 4.6.

Por tanto, la incertidumbre expandida se calculará como:

$$U(g) = k \cdot u_c(g) \quad (4.7)$$

donde k es el factor de cobertura (usualmente $k = 2$ para un nivel de confianza aproximado del 95 %).

4.6.6. Aplicación al diseño del sistema industrial (ABP)

Con el valor experimental de g :

- Determine la altura para una latencia de 50 ms desde h_1 hasta una posición inferior h_2 . Donde h_1 es la altura en la que se encuentra el sensor óptico que reemplaza la función del sensor magnético; y h_2 es la altura en la que se encuentra el sensor óptico 2 que reemplaza la compuerta de rechazo.
- Registre cinco mediciones en la hoja de cálculo, correspondientes al tiempo entre h_1 y h_2 .
- Obtenga el valor de la incertidumbre y el error porcentual.

4.7. Análisis de Resultados

- a) Cálculo de la gravedad: Compare el valor experimental de g obtenido mediante el análisis gráfico con el valor teórico y calcule el error porcentual.
- b) Cinemática del sistema: Determine las velocidades instantáneas para cada altura configurada utilizando la expresión

$$v = \sqrt{2g \cdot h} \quad (4.8)$$

- c) Propuesta Técnica: Basándose en la velocidad calculada y el tiempo de respuesta del sistema, proponga la mejor posición (en cm) para el sensor y la compuerta, de modo que se reduzca la pérdida de producto.

4.8. Conclusiones

- Qué relación existe entre la altura de caída y la velocidad de paso por la zona de detección? Explique cómo afecta una mayor altura de caída a la sensibilidad requerida por el sensor electromagnético.
- ¿Es el movimiento del balín en el laboratorio un modelo fiel para un sistema de dosificación industrial? Analice factores como la resistencia del aire y la densidad del material a granel.
- ¿Cómo influye la precisión en la determinación de g en el éxito de la compuerta de rechazo? Justifique la necesidad de considerar la incertidumbre en el diseño de sistemas automáticos.
- ¿Se cumplieron los objetivos propuestos para la optimización del sistema de detección? Resuma la validez de su propuesta técnica basada en los datos recolectados.

Bibliografía

- [1] Raymond A. Serway and John W. Jewett. *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. Cengage Learning Editores, México, 2018.
- [2] Departamento de Física, Universidad Tecnológica de Pereira. Guía para la estimación de la incertidumbre en las mediciones (ingenierías y tecnologías), 2026. Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.