

# Universidad Nacional de Ingeniería

## ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICA II — SECCIÓN A — CF1B2



## Laboratorio I: Dinámica de rotación

Estudio del movimiento de rodadura de una rueda de Maxwell con un eje perpendicular al plano de la rueda, que pasa por su centro.

### Profesores:

Cortéz Reyes Gregorio Custodio — Julio César Tello Gálvez

### Integrantes del grupo:

Sarmiento Taboada Ashton Jeremy — Código : 20232502J

Fernández Aguilar Luis Ademyr — Código : 20231344A

Vásquez Alvarado Luis Martín — Código : 20234143G

*Periodo académico 2024-I*

5 de Abril del 2024 — 2:00 p.m.

# 1. Introducción y objetivos del experimento

El presente informe se basa en los datos recopilados de la experimentación en el laboratorio de Física II, en la Facultad de Ciencias. Se apoya en la guía de laboratorio y otras fuentes detalladas más adelante. El propósito del informe es responder las preguntas del cuestionario, de manera adecuada; así como contrastar los resultados de la experimentación con el fundamento teórico. De acuerdo a la guía del laboratorio e indicaciones del profesor, se ha dividido el informe de la siguiente manera.

## 1.1. Contenido

1. Introducción y objetivos del experimento
  - Contenido
  - Competencias generales
  - Competencias específicas
2. Fundamento teórico
  - Energía cinética de rotación y traslación
  - Momento de inercia
  - Dinámica de cuerpo rígido
  - Movimiento de rodadura
  - Aplicaciones en el experimento
3. Equipo utilizado y diagrama de flujo del experimento
  - Equipo utilizado
  - Diagrama de flujo del experimento
4. Procedimiento experimental
5. Cálculos y resultados
  - Uso de unidades
  - Uso de cifras significativas
  - Cálculo de errores
  - Resultados obtenidos y comparación con otros conocidos
    - Resultados obtenidos
    - Tablas, gráficos y comparación con otros resultados conocidos
6. Cuestionario, observaciones y sugerencias
  - Respuestas al cuestionario

- Observaciones
- Sugerencias

7. Conclusiones

8. Bibliografía

## 1.2. Competencias generales

- Observar el movimiento de rodadura de una rueda de Maxwell y a partir de las mediciones efectuadas determinar el momento de inercia de la rueda con respecto al eje perpendicular que pasa por su centro de su gravedad.

## 1.3. Competencias específicas

- Medir el tiempo en el cual la rueda realiza cada recorrido.
- Medir la masa y dimensiones de la rueda para calcular el momento de inercia de la rueda por dos métodos: Por su energía cinética de rotación y por la distribución geométrica de su masa.

\*Aclaración: Debido a indicaciones del profesor, no se calculó el momento de inercia de la rueda por la distribución geométrica de su masa.

# 2. Fundamento teórico

## 2.1. Energía cinética de rotación y traslación

Sabemos que la energía cinética viene dada por la expresión  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ .

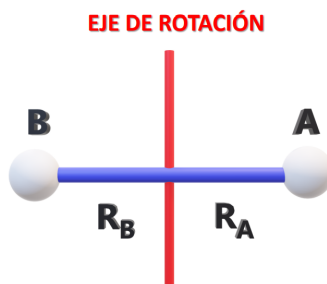


Figura 1: Sistema simple

Considerando el sistema de dos cuerpos A y B unidos por una barra de masa insignificante que rotan alrededor de un eje que pasa por un punto de la barra y es

perpendicular a esta con velocidad angular  $\vec{w}$ , mostrado en 1; luego, la energía cinética del sistema está dada por la siguiente expresión:

$$E_c(sistema) = \frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2 \quad (1)$$

Pero tenemos:  $|\vec{v}_A| = v_A = |\vec{w}||\vec{R}_A| = wR_A$  y  $|\vec{v}_B| = v_B = |\vec{w}||\vec{R}_B| = wR_B$ . Reemplazando en 1:

$$E_c(sistema) = \frac{1}{2}m_A w^2 R_A^2 + \frac{1}{2}m_B w^2 R_B^2 \quad (2)$$

Vemos que, en el caso de la rotación, la energía cinética depende del eje elegido, por lo que debemos separar la energía cinética en el movimiento de traslación y rotación. Luego  $E_{rotacionalA} = \frac{1}{2}m_A w^2 R_A^2$  y  $E_{rotacionalB} = \frac{1}{2}m_B w^2 R_B^2$

## 2.2. Momento de inercia

De 2 podemos factorizar  $\frac{1}{2}w^2$ .

$$\begin{aligned} E_c(sistema) &= \frac{1}{2}m_A w^2 R_A^2 + \frac{1}{2}m_B w^2 R_B^2 \\ &= \frac{1}{2}(m_A R_A^2 + m_B R_B^2)w^2 \\ &= \frac{1}{2}Iw^2 \end{aligned}$$

De donde definimos  $I = m_A R_A^2 + m_B R_B^2$  como el momento de inercia del sistema respecto al eje, con  $R_A$  y  $R_B$  las distancias de los cuerpos A y B al eje, respectivamente. Entonces si tenemos un sistema discreto de "n" partículas, el momento de inercia respecto a un eje está dado por la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \quad (3)$$

Donde  $m_i$  es la masa del cuerpo i-ésimo y  $R_i$  es la mínima distancia del cuerpo i-ésimo al eje de rotación. Luego, si tenemos un sistema de masas continuo, debemos realizar esta sumatoria en base a un diferencial de masa ( $dm \rightarrow 0$ ) con distancia mínima  $r_i$  al eje de rotación.

$$I = \lim_{dm_i \rightarrow 0} \sum r_i^2 dm_i \quad (4)$$

Esto resulta ser la integral:

$$I = \int r^2 dm \quad (5)$$

Para resolver esta integral, hace falta saber como varía la masa respecto a la distancia mínima al eje de rotación.

Si ya conocemos el centro de masa del objeto, y consideramos una lámina plana de este, podemos hallar el momento de inercia de un eje paralelo a uno que pase por el centro de masa del objeto y que sea perpendicular al plano de la lámina.

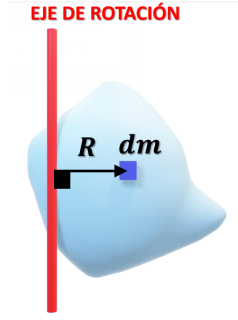


Figura 2: Sistema de masas continuo

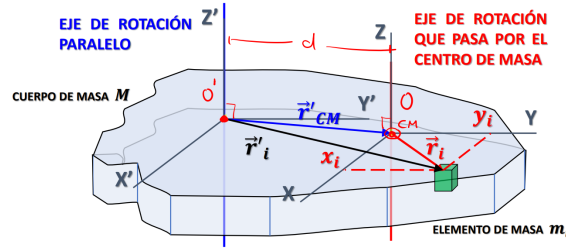


Figura 3: lámina plana del objeto.

Donde  $\vec{r}_i$  es la posición del elemento de masa  $m_i$  respecto al CM,  $\vec{r}'_i$  es la posición del elemento respecto al eje paralelo y  $\vec{r}_{CM}'$  es la posición del centro de masa respecto al eje paralelo.

Luego, sabemos que :  $\vec{r}'_i = \vec{r}_{CM}' + \vec{r}_i$  ,  $\sum_{i=1}^n m_i r_i'^2$  ,  $\vec{r}'_i = \vec{x}_i' + \vec{y}_i'$  con  $x_i \perp y_i$ . Luego:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n m_i r_i'^2 &= \sum_{i=1}^n m_i (\vec{x}_i' + \vec{y}_i')^2 \\
 &= \sum_{i=1}^n m_i (x_i'^2 + y_i'^2) \\
 &= \sum_{i=1}^n m_i (x_{CM}' + \vec{x}_i)^2 + \sum_{i=1}^n m_i (y_{CM}' + \vec{y}_i)^2
 \end{aligned}$$

Donde :

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n m_i (x_{CM}' + \vec{x}_i)^2 &= \sum_{i=1}^n m_i x_{CM}^2 + 2 \sum_{i=1}^n m_i \langle x_{CM}', \vec{x}_i \rangle + \sum_{i=1}^n m_i x_i^2 \\
 \sum_{i=1}^n m_i (y_{CM}' + \vec{y}_i)^2 &= \sum_{i=1}^n m_i y_{CM}^2 + 2 \sum_{i=1}^n m_i \langle y_{CM}', \vec{y}_i \rangle + \sum_{i=1}^n m_i y_i^2
 \end{aligned}$$

Pero sabemos que  $x_{CM}'$  y  $y_{CM}'$  son constantes. entonces:

$$\sum_{i=1}^n m_i \langle x_{CM}', \vec{x}_i \rangle = \langle x_{CM}', \sum_{i=1}^n m_i \vec{x}_i \rangle = y \sum_{i=1}^n m_i \langle y_{CM}', \vec{y}_i \rangle = \langle y_{CM}', \sum_{i=1}^n m_i \vec{y}_i \rangle$$

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{x}_i = \sum_{i=1}^n m_i (\vec{x}_i' - x_{CM}') = \vec{0}, \sum_{i=1}^n m_i \vec{y}_i = \sum_{i=1}^n m_i (\vec{y}_i' - y_{CM}') = \vec{0}$$

Entonces:

$$\sum_{i=1}^n m_i r_i'^2 = \sum_{i=1}^n m_i (x_{CM}'^2 + y_{CM}'^2) + \sum_{i=1}^n m_i (x_i^2 + y_i^2)$$

Luego :

$$I_{eje paralelo} = I_{CM} + Md^2$$

Donde d es la distancia del eje paralelo al eje que pasa por el CM del sistema. Luego, esto se replica en todas las láminas que conforman el volumen del objeto, dando a entender que se cumple en objetos de cualquier dimensión.

Físicamente, el momento de inercia es la resistencia que ofrece el cuerpo a rotar sobre el eje elegido. También hay que tomar en cuenta al eje elegido, pues de este depende el momento de inercia, al variar las distancias respecto al eje si es que lo cambiamos.

### 2.3. Dinámica de cuerpo rígido

Definimos al torque de una fuerza como una cantidad asociada a la capacidad de la fuerza, de alterar el estado de rotación de un cuerpo rígido.

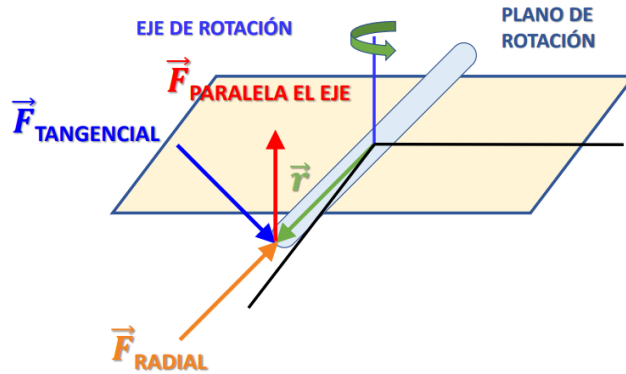


Figura 4: Representación del torque de una fuerza

Observamos que solo  $F_{tangencial}$  es capaz de alterar dicho estado de rotación respecto al punto de aplicación y el eje de rotación. Esto se debe a que, solo esta fuerza produce cambio en la velocidad tangencial y como  $|\vec{v}| = |\vec{\omega}| \cdot |\vec{r}|$ , implica entonces que  $\vec{\omega}$  aumenta. Luego observamos que el sentido de giro está ligado a la dirección del vector  $\vec{r} \times \vec{F}$ .

Luego afirmamos:  $\vec{t}_{eje}^F = \vec{r} \times \vec{F}$

Después, podemos notar que si la distancia respecto al eje de giro es lo suficientemente grande como para considerar al cuerpo rígido una partícula, podemos notar una nueva magnitud vectorial llamada momento angular, dada por la expresión  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$  (Donde

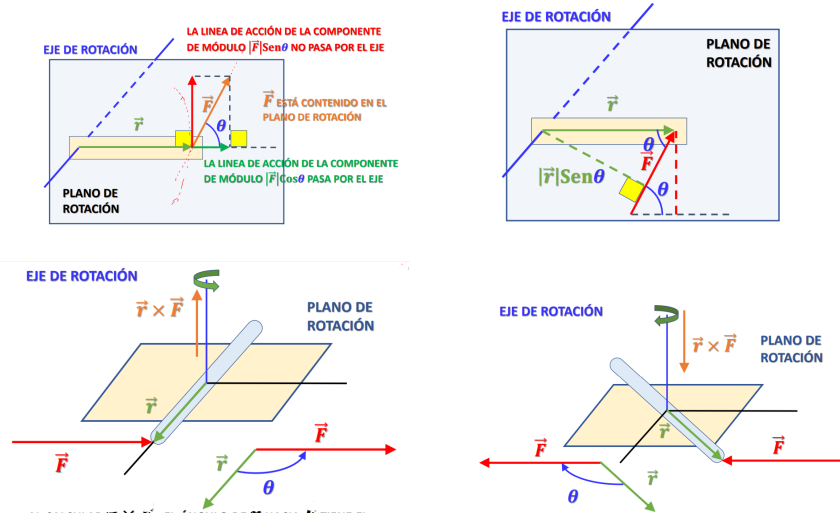


Figura 5: Representación de  $\vec{r} \times \vec{F}$  y su relación con el torque

p es la cantidad de movimiento lineal y r es la posición del cuerpo rígido respecto al eje de giro).

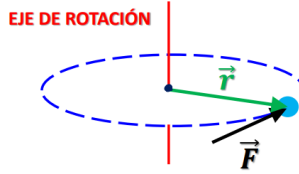


Figura 6: Se desprecian las dimensiones del cuerpo rígido

Si derivamos  $\vec{L}$  respecto al tiempo, tenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{L}}{dt} &= \frac{d(\vec{r} \times \vec{p})}{dt} \\
 &= \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} + \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p} \\
 &= \vec{r} \times \vec{F} + m\vec{v} \times \vec{v} \\
 &= \vec{r} \times \vec{F} \\
 &= \vec{t}_{eje}^F
 \end{aligned}$$

Luego , si elegimos el eje adecuado, de tal manera que  $\vec{L} \parallel \vec{\omega}$  (y al ocurrir:  $\vec{r} \perp \vec{\omega}$ ). Tenemos:  $\vec{L} = m\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = m(\langle \vec{r}, \vec{r} \rangle \vec{\omega} - \langle \vec{\omega}, \vec{r} \rangle \vec{r}) = mr^2\vec{\omega} = I\vec{\omega}$  Donde I es el momento de inercia del cuerpo rígido respecto al eje. Luego si derivamos, queda :  $\vec{t}_{eje}^F = I\vec{\alpha}$  (donde  $\vec{\alpha}$  es la aceleración angular).

## 2.4. Movimiento de rodadura

Un caso especial de la combinación del movimiento de traslación y rotación de un cuerpo rígido(en este caso una rueda simétrica), es el movimiento de rodadura pura(rueda sin resbalar). Físicamente, no resbalar significa que el punto de contacto entre

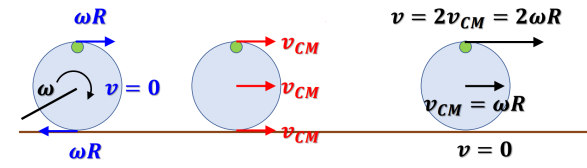


Figura 7: Rotación+Traslación sin resbalar

la rueda y la superficie no tenga desplazamiento ni velocidad, como consecuencia de las condiciones iniciales:  $v_{CM} = wR$ ; este punto es llamado centro instantáneo de rotación(CIR), ya que la rueda aparenta rotar en un eje instantáneo perpendicular al plano de la rueda que pasa por el punto de contacto. De esto, tenemos que la rueda solo realiza rotación respecto al CIR, por lo que si hay pérdidas, estas serían por rotación y no por traslación. Pero observamos que podemos reformular la expresión en función a las características del centro de masa(velocidad de este y momento de inercia respecto a un eje que pasa por el centro de masa y es perpendicular al plano de la rueda).

$$\begin{aligned}
 E_{rotacional} &= \frac{1}{2} I_{CIR} w^2 \\
 &= \frac{1}{2} (I_{CM} + mR^2) w^2 \\
 &= \frac{1}{2} I_{CM} w^2 + \frac{1}{2} m(wR)^2 \\
 &= \frac{1}{2} I_{CM} w^2 + \frac{1}{2} m v_{CM}^2 \\
 &= E_{rotacional/CM} + E_{traslacional/CM}
 \end{aligned}$$

Donde m es la masa de la rueda.

En el caso ideal, la rueda y la superficie no se deforman por acción de las fuerzas. Como

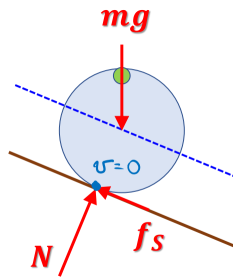


Figura 8: DCL de la rueda en un plano inclinado.

el punto de contacto no se desplaza,  $W_{fs} = W_{FNC} = 0$  y por lo tanto se conserva la



energía mecánica.

En un caso real, se consideran las deformaciones de la rueda y la superficie, además se puede apreciar que la rueda desliza producto de las formaciones, este fenómeno se conoce como fricción por rodadura.

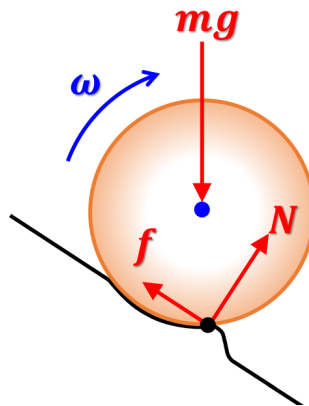
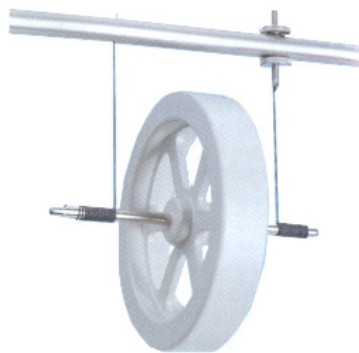


Figura 9: Se aprecian deformaciones

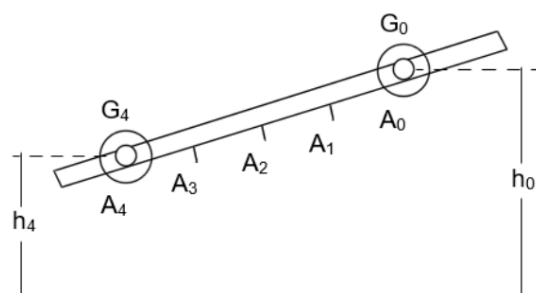
Esto causa la pérdida de energía mecánica; aunque es común despreciar este efecto en experimentaciones reales, al ser la rueda y la superficie muy rígidas como para observar efectos apreciables a causa de la fricción por rodadura, por lo que consideramos, la energía mecánica se conserva en estos casos también.

## 2.5. Aplicaciones en el experimento

Tenemos una rueda de Maxwell brindada en el laboratorio, que tiene un eje perpendicular al plano de la rueda, el cual pasa por su centro de gravedad. El eje es un cilindro concéntrico a la rueda con un radio  $r < R$  (radio de la rueda), similar a lo que se muestra en la figura (a). En la figura 10b tenemos marcados los puntos  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,



(a) Rueda de Maxwell



(b) Trayectoria de la rueda

Figuras referenciales

$A_3$  y  $A_4$  separados 10 cm; tenemos también  $G_0$  y  $G_4$  que representan las posiciones del centro de gravedad de la tierra, en el punto más alto y bajo de su trayectoria respectivamente. Por todo lo antes visto, despreciamos la fricción por rodadura, y por ende, se conserva la energía mecánica. Por lo que :

$$E_{M(4)} = mgh_4 + \frac{1}{2}I_G w_{G_4}^2 + \frac{1}{2}mv_{G_4}^2 \quad (6)$$

$$= mgh_4 + \frac{1}{2}I_G \frac{v_{G_4}^2}{r^2} + \frac{1}{2}mv_{G_4}^2 \quad (7)$$

$$= E_{M(0)} \quad (8)$$

$$= mgh_0 + \frac{1}{2}I_G \frac{v_{G_0}^2}{r^2} + \frac{1}{2}mv_{G_0}^2 \quad (9)$$

$$mgh_0(v_{G_0} = 0) = mgh_4 + \frac{1}{2}I_G \frac{v_{G_4}^2}{r^2} + \frac{1}{2}mv_{G_4}^2 \quad (10)$$

Luego  $x = \frac{1}{2}at^2$  respecto al centro de gravedad al ser la posición inicial  $x = 0$  y observarse un MRUV por parte de la rueda, producto de una aceleración constante producida por el peso , la fricción estática y la fuerza normal. Luego sabemos  $v_G = at$  al ser  $v_0 = 0$ , luego  $v_G = \frac{2x}{t}$ . Con todo esto, podemos realizar el experimento y verificar los resultados, midiendo solo la velocidad, el radio del eje de giro, el desplazamiento y el tiempo transcurrido.

### 3. Equipo utilizado y diagrama de flujo del experimento

#### 3.1. Equipo utilizado

- Un par de rieles paralelos (como plano inclinado)
- Una rueda de Maxwell
- Un cronómetro digital
- Un pie de rey
- Una regla milimetrada
- Una balanza
- Un nivelador

## Integrantes del grupo:

Apellidos. - Sarmiento Taboada Ashton Jeremy — Código : 20232502J      Código. -  
                  Fernández Aguilar Luis Ademyr — Código : 20231344A  
                  Vásquez Alvarado Luis Martín — Código : 20234143G

1. Los objetivos de la experiencia son: (MARCAR LAS AFIRMACIONES CORRECTAS)

- I. Observar la rodadura de una rueda de Maxwell.
- II. Determinar el momento de inercia de la rueda respecto al eje perpendicular que pasa por su centro de gravedad.
- III. Determinar el momento de inercia de la rueda con respecto al eje paralelo que pasa por su centro de gravedad.
- IV. Determinar el momento angular de la rueda respecto al eje perpendicular que pasa por su centro de gravedad.

A. I y II      B. II y III      C. II y IV      D. III y IV      E. I, II y III      F. I y III      G. \_\_\_\_\_

2. De la siguiente relación que material falta para realizar la experiencia?

- Un par de rieles paralelos (como plano inclinado).
- Una regla milimetrada.
- Un cronómetro digital.
- Una balanza.
- Una Rueda de Maxwell

A. Cables de conexión.      B. Un nivel.      C. Un galvanómetro.      D. Un pie de rey.      E. \_\_\_\_\_

3.

- I. En esta experiencia se asume la Conservación de la energía mecánica
- II. En esta experiencia se asume la descomposición de la energía cinética en energía de traslación y de rotación.
- III. Las pérdidas por fricción, se deben a la fricción por desplazamiento y a la fricción por rodadura.
- IV. Las pérdidas por rodadura son despreciables en el caso de cuerpos rígidos.

A. I y II      B. II y III      C. II y IV      D. III y IV      E. I, II y III      F. I y III      G. I, II, IV

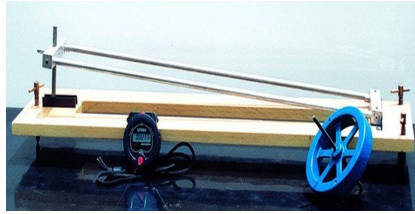
4.

- I. Si evitamos el deslizamiento (patinaje) podemos suponer que las pérdidas por fricción son insignificantes.
- II. El movimiento de rodadura puede considerarse como rotaciones sucesivas con velocidad angular  $\omega_A$  alrededor de un eje de giro móvil, que pasa por los puntos de contacto ( $A_i$ ) entre el eje cilíndrico y los rieles.
- III. Si  $V_G$  es la velocidad del centro de gravedad,  $\omega_A$  es la velocidad angular alrededor de  $A_i$  y  $r$  es la distancia de  $G$  a  $A_i$  (radio del eje cilíndrico), entonces, se cumple la relación:  $V_G = \omega_A r$ .
- IV. El movimiento de rodadura es considerado como la composición de una traslación del centro de masa  $G$ , más una rotación simultánea, con velocidad angular  $\omega_G$  alrededor de  $G$ .

A. I y II      B. II y III      C. II y IV      D. III y IV      E. I, II y III      F. I y III      G. I, II, III y IV

6. ¿Es necesario medir la masa de la volante y la diferencia de las alturas entre las posiciones  $G_0$  y  $G_4$ ? Debe justificar.

Sí, debido a que estas sirven para calcular el momento de inercia de la volante, usando la ecuación planteada en la guía de laboratorio.



(a) Tornillos de nivelación y rieles paralelos



(b) Rueda de maxwell y cronómetro digital



(c) Nivelador



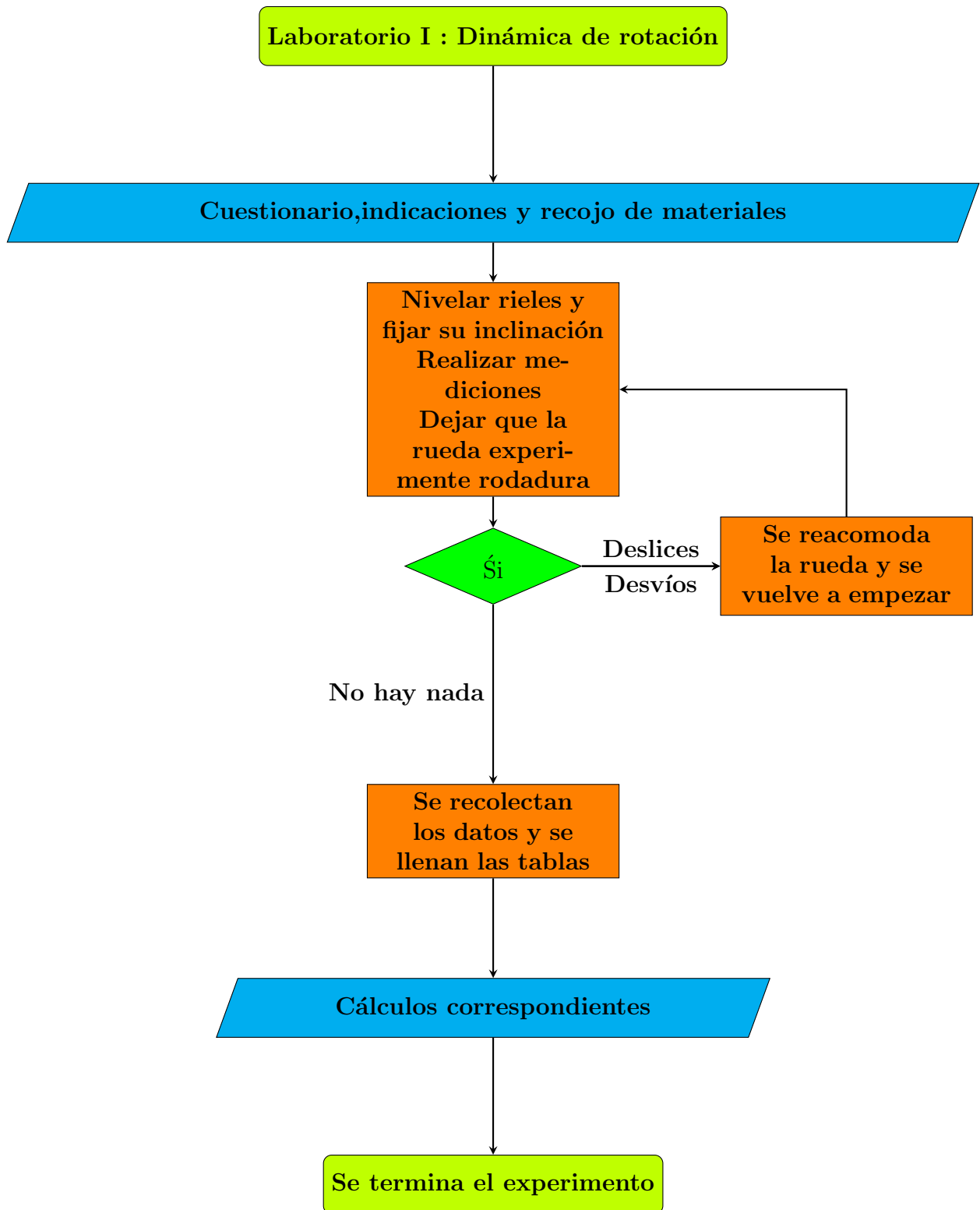
(d) Calibrador de vernier



(e) Balanza

Figura 10: Imágenes de los instrumentos utilizados en el laboratorio

### 3.2. Diagrama de flujo del experimento



#### 4. Procedimiento experimental

1) Nivelar el plano de los rieles usando el nivel de burbuja.

- 2) Marque en los rieles los puntos  $A_0, A_1, A_2, A_4$ , separados unos 10 cm entre sí.
- 3) Mida con el pie de rey el diámetro del eje cilíndrico que se apoya sobre los rieles.
- 4) Fije la inclinación de los rieles de manera que la rueda experimente un movimiento de rodadura pura.
- 5) Mida la masa de la rueda de Maxwell y la diferencia de las alturas entre las posiciones  $G_0$  y  $G_4$ .
- 6) Coloque la rueda en reposo en la posición  $A_0$ , suéltela y simultáneamente comience a medir el tiempo (es decir,  $t_0 = 0$ ); mida los intervalos de tiempo  $t_1, t_2, t_3$ , correspondientes a los tramos  $A_0A_1, A_0A_2, A_0A_3$ , respectivamente.
- 7) Modifique la inclinación de los rieles y mida 10 veces  $t_4$  y la nueva diferencia de alturas entre  $G_0$  y  $G_4$ .

## 5. Cálculos y resultados

### 5.1. Uso de unidades

- Unidad de la regla usada (l): 1cm
- Unidad de la balanza digital (m) : 1g
- Unidad del pie de rey (p) : 1mm
- Unidad del cronómetro digital (s) : 1s

### 5.2. Uso de cifras significativas

- Se utilizan solo hasta dos cifras decimales por cada medición realizada(En sus respectivas unidades).
- Se utilizan hasta tres cifras significativas en el cálculo del momento de inercia, aceleración del centro de masa y velocidades del C.G. de la rueda.

### 5.3. Cálculo de errores

- Error de la regla :  $\Delta l = 0,5cm$
- Error de la balanza digital :  $\Delta m = 0,1g$
- Error del pie de rey :  $\Delta p = 0,03mm$
- Error del cronómetro digital :  $\Delta s = 0,01s$
- Error en cálculo de aceleración( $a = \frac{2x}{t^2}$ ):  $\frac{\Delta a}{a} = 2\frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta l}{x}$ . Luego  $\Delta a = \frac{4x\Delta s}{t^3} + \frac{2\Delta l}{t^2}$ .
- Error en cálculo de velocidades( $v = \frac{2x}{t}$ ):  $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta l}{x}$ . Luego  $\Delta v = \frac{2x\Delta s}{t^2} + \frac{2\Delta l}{t}$ .

# Laboratorio N°1.- Dinámica de Rotación

Integrantes de la Mesa: \_\_\_\_\_

Apellidos	Nombres	Firma
1. <u>Fernandez Aguilar Le Ademir</u>		<u>[Firma]</u>
2. <u>Sarmiento Taboada Ashton Jeremy</u>		<u>[Firma]</u>
3. <u>Vásquez Alvarado Luis Martín</u>		<u>[Firma]</u>

## Datos a obtener en el laboratorio

$D_{eje}$  = diámetro del eje de la volante     $h_{01}$  = primera altura del CM de la rueda de Maxwell

Masa de la volante (g) = $353.3 \Delta = \pm 0.1$	$D_{eje}$ (mm) = $3.45 \Delta = \pm 0.03$	$h_{01}$ (mm) = $68 \Delta = \pm 0.5$
---	---	---------------------------------------

Tabla 1.- Tiempos que toma la rueda en pasar por los puntos A1, A2, A3, A4 al ser soltada desde el reposo en el punto A0, en la parte superior de la rampa.

Tiempo por Tramo en el descenso de la rueda	Tramo (cm) $\Delta = \pm 0.05$			
	A0A1 = 10	A0A2 = 20	A0A3 = 30	A0A4 = 40
$t_{1j}$ (s)	7.52	11.93	14.80	
$t_{2j}$ (s)	8.21	11.90	14.18	
$t_{3j}$ (s)	7.68	11.31	14.54	
Promedio por Tramo (s)	7.80	11.71	14.51	

## CAMBIAR LA ALTURA DEL CENTRO DE MASA DE LA RUEDA DE MAXWELL

Masa de la volante (g) = $353.3 \pm 0.1g$	$D_{eje}$ (mm) = $3.45 \pm 0.03$	$h_{02}$ (mm) = $79 \pm 0.5$
---	----------------------------------	------------------------------

Tabla 2.- Tiempos empleados por la rueda en el Tramo A0A4, al modificar la inclinación de los rieles ( $h_{02}$ ).

Tramo A0A4 = 40 cm $\Delta = \pm$	t (s)	t (s)	t (s)	t (s)
A0A4	1. 13.91	2. 13.52	3. 13.68	4. 13.26
A0A4	5. 13.82	6. 13.54	7. 13.86	8. 13.89
A0A4	9. 13.92	10. 13.84		
Tiempo Promedio empleado en el Tramo A0A4 (s)	13.72			

## 5.4. Resultados obtenidos y comparación con otros conocidos

### 5.4.1. Resultados

- Tiempos promedio por tramo:

- $t_{A_0A_1} = 7,80s \pm \Delta s$  ( $h_{01} = 6,8cm \pm \Delta l$ )
- $t_{A_0A_2} = 11,71s \pm \Delta s$  ( $h_{01} = 6,8cm \pm \Delta l$ )
- $t_{A_0A_3} = 14,51s \pm \Delta s$  ( $h_{01} = 6,8cm \pm \Delta l$ )
- $t_{A_0A_4} = 13,72s \pm \Delta s$  ( $h_{02} = 7,9cm \pm \Delta l$ )

- Aceleración del centro de masa:

Se toma el promedio de los valores obtenidos por el ajuste de curvas.

- $a_{altura_1}(0,068m): \frac{2(0,00118898+0,00136667)}{2}m/s^2 \approx 0,003m/s^2$
- $a_{altura_2}(0,079m): \frac{2(0,00212496+0,00212506)}{2}m/s^2 \approx 0,004m/s^2$

- Radio del eje cilíndrico :  $r = 1,73mm \pm \Delta p$

- Velocidades:

- $V_1 = 0,026m/s \pm 0,001m/s$
- $V_2 = 0,034m/s \pm 0,001m/s$
- $V_3 = 0,041m/s \pm 0,001m/s$
- $V_4 = 0,058m/s \pm 0,001m/s$  (Con altura cambiada)

- Velocidades angulares:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 15,02rad/s \pm 0,2rad/s \\ \omega_2 &= 19,65rad/s \pm 0,2rad/s \\ \omega_3 &= 23,70rad/s \pm 0,2rad/s \\ \omega_4 &= 33,52rad/s \pm 0,2rad/s \text{ (Con altura cambiada)}\end{aligned}$$

- Momento de inercia:  $I_{G_1} = 5,20662112 \times 10^{-4}Kg.m^2$

$$I_{G_2} = 6,09119744 \times 10^{-4}Kg.m^2$$

$$I_{G_3} = 6,28357928 \times 10^{-4}Kg.m^2$$

$$I_{G_4} = 4,86141118 \times 10^{-4}Kg.m^2$$

- Desviación estándar de los tiempos del tramo ( $A_0A_4$ ): 0.21

### 5.4.2. Tablas , gráficos y comparación con otros resultados conocidos

Tomando de referencia a los resultados del ppt , tenemos:



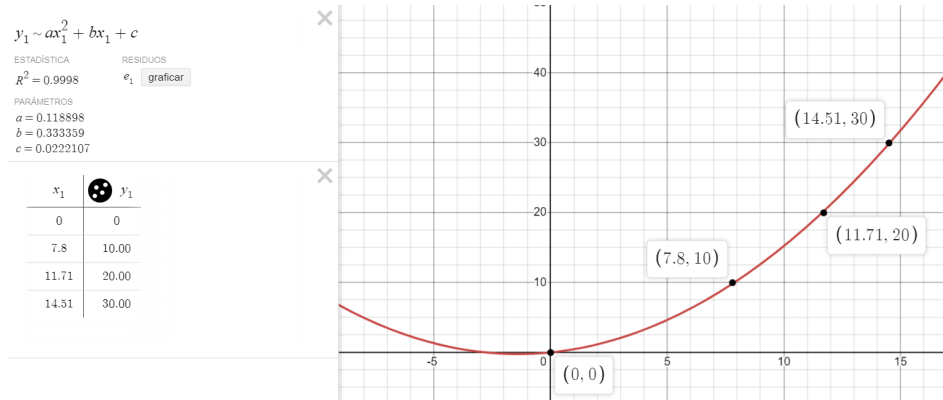


Figura 11: Gráfica  $d(\text{cm})$  vs  $t(\text{s})$  de los tramos  $A_0A_1, A_0A_2, A_0A_3$

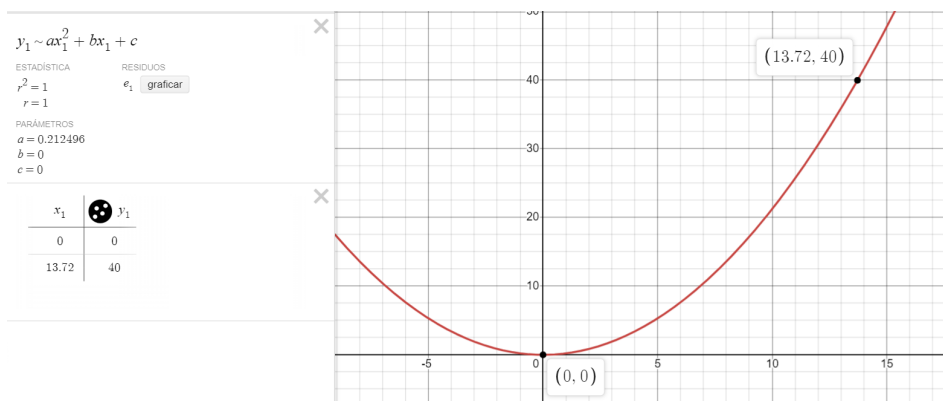


Figura 12: Gráfica  $d(\text{cm})$  vs  $t(\text{s})$  de  $A_0A_4$  (Con altura cambiada)

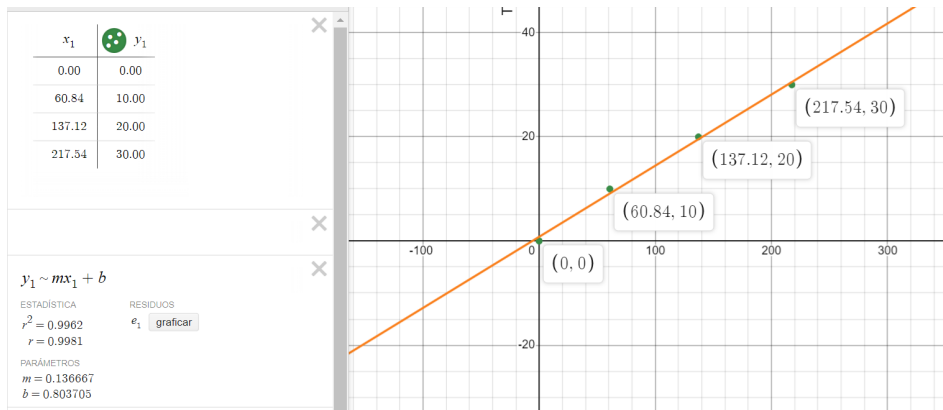


Figura 13: Gráfica  $d(\text{cm})$  vs  $t^2(\text{s}^2)$  de los tramos  $A_0A_1, A_0A_2, A_0A_3$



Figura 14: Gráfica  $d(\text{cm})$  vs  $t^2(\text{s}^2)$  de  $A_0A_4$ (Con altura cambiada)

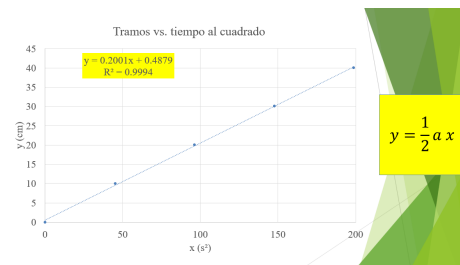
Tramo	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)
A0A4	13.91	13.52	13.68	13.26
A0A4	13.82	13.54	13.86	13.89
A0A4	13.92	13.84		
Desviación	0.21			

Figura 15: Desviación estándar de los tiempos en el tramo  $A_0A_4$

Tabla 1.- Tiempos que toma la rueda de Maxwell al descender desde  $A_0$ , hasta  $A_4$ , pasando por los puntos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$

Nº	Posición	t (s)	$x=t^2 (\text{s}^2)$	y= tramo (cm)
1	$A_0$	0.00	0.00	0.00
2	$A_1$	6.73	45.29	10.00
3	$A_2$	9.80	96.04	20.00
4	$A_3$	12.15	147.62	30.00
5	$A_4$	14.09	198.53	40.00

(a) Tabla de datos ppt



(b) Gráfica de datos ppt

## 6. Cuestionario, observaciones y sugerencias

### 6.1. Cuestionario

- 1) Considerando los tiempos promedios para  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$ , grafique los puntos  $(0,0)$ ,  $(t_1, A_0A_1)$ , ...  $(t_4, A_0A_4)$ . ¿Es el movimiento de traslación uniformemente acelerado?  
R: Se aprecia en las figuras (11) y (12). Se aprecia que no hay movimiento de traslación uniformemente acelerado debido al valor de los interceptos con el eje Y.
- 2) Graficar  $d$  vs  $t^2$ .  
R: Se aprecia en las figuras (13) y (14).
- 3) Suponiendo que la aceleración de traslación es constante y aplicando la desviación standard y propagación de errores, calcular:
  - a) La aceleración del centro de masa  $a_G$ 
    - Altura 1:  $0.003 \text{ m/s}^2$
    - Altura 2:  $0.004 \text{ m/s}^2$

- b) La velocidad de traslación,  $V_4$ , del centro de masa en posición G4.  
R:  $V_{4G} = 0,058m/s \pm 0,001m/s$
- c) La velocidad angular de la rueda en el instante  $t_4$ .  
R:  $\omega_{4G} = 33,52rad/s \pm 0,2rad/s$
- d) El momento de inercia de la volante, usando la ecuación (10).  
R:  $I_G = 4,18303351 \times 10^{-4}Kg.m^2$  (Con incertidumbre insignificante)
- e) ¿Cuáles son las mediciones que introducen mayor incertidumbre en el cálculo del momento de inercia?.  
R: La velocidad del centro de masa y el radio del eje cilíndrico.
- f) ¿Cómo influye la longitud del recorrido sobre el valor de I?  
R: La longitud del recorrido influye en el valor de I, solo por el uso de cifras significativas y las incertidumbres, ya que el momento de inercia depende netamente de las distancias al eje de rotación. Esto se puede comprobar con los cálculos.
- g) ¿Cómo influye la inclinación de los rieles sobre el valor de I?.  
R: El momento de inercia solo depende del eje de rotación, por lo tanto no debería verse afectado salvo por las incertidumbres de las mediciones y el uso de cifras significativas. Siempre se usa el mismo eje y cuerpo.

## 6.2. Observaciones

- La plataforma se desnivelaba cada vez que la rueda llegaba al final de los rieles, provocando que no se tuviera una altura fija en todo momento y que hubieran retrasos en el experimento.
- La rueda sufría evidentes desviaciones aún así la plataforma estuviese nivelada. Esto complicó aún más al experimento.
- Al haber agujeros en la rueda, esto provoca una distribución desigual, algo que podría causar las desviaciones.
- El eje cilíndrico tenía cierto desgaste, otra posible causa de las desviaciones.
- La rueda tardaba mucho en adquirir velocidad, afectando de manera significativa a los tiempos promedio.

## 6.3. Sugerencias

- Cambiar el eje de cilíndrico y la rueda de Maxwell.
- Ocupar tornillos más resistentes.
- Estar atento a que la rueda no choque con la plataforma.
- Pulir los rieles para que la rueda adquiriera velocidad mucho más rápido.

## 7. Conclusiones

- El experimento resulto ser 90 % debido a las observaciones antes mencionadas.
- El cálculo del momento de inercia solo se vió afectado por la incertidumbre en las mediciones y el uso de cifras significativas(pág. 13).
- Las condiciones del laboratorio y los materiales utilizados no eran los adecuados.
- El movimiento de rodadura no se concretó debido a las observaciones antes mencionadas(pág. 16).
- El movimiento no era uniformemente acelerado como se ve en los ajustes cuadráticos y lineales, habiendo una velocidad distinta a cero al inicio de estos ajustes(Cosa que no debería ocurrir debido a que se dejo a la rueda en reposo para que descendiera por sí sola)(pág. 14-15, gráficas (14,13,12 y 11)).
- La fricción por rodadura no es 100 % despreciable por no haber un movimiento uniformemente acelerado, llegando a desviar la trayectoria de la rueda de Maxwell sobre los rieles.
- La altura elegida afecta directamente al nivel de inclinación y por consiguiente al valor de la aceleración del centro de masa, debido a que la normal disminuye al aumentar la altura  $h_0$  a causa del ángulo entre plano y aceleración de la gravedad. Esto ocasiona que la rueda descienda mucho más rápido tal y como se ve en los resultados obtenidos(pág. 13).
- El tiempo de reacción del estudiante no afectó en casi nada a los cálculos debido al uso de cifras significativas.
- La precisión de las gráficas supera el 0.99 de 1 , por esto y todo lo antes visto podemos concluir, las mediciones son el problema principal en el experimento.

## 8. Bibliografía

- Física vol. I Mecánica, Marcelo Alonso-Edward J. Finn, Pearson, edición revisada y aumentada, 296-313.
- Física para ciencias e ingenierías volumen 1, Serway-Jewett, Cengage, 10ma edición, 249-278