

## Roteiro do Experimento “Giroscópio Quantitativo”

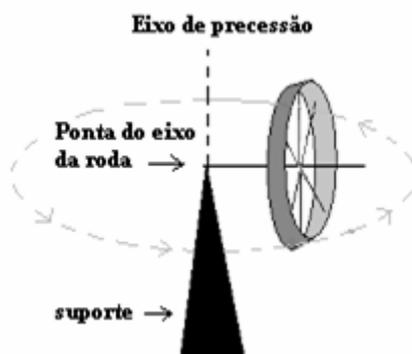
### A) Introdução ao experimento

O experimento consiste no estudo do movimento de uma roda de bicicleta que gira em torno do seu próprio eixo e está apoiada no suporte metálico fixo ao chão. Nessa situação, ela se comporta como um giroscópio e o objetivo é estudar os movimentos de spin e precessão, bem como a relação entre eles.

### B) Procedimento de análise

**B1.** Assista aos vídeos do experimento disponibilizados na página *Vídeos* (acessível a partir da aba *Filmes e Quadros*) e tente notar a existência de uma marcação na roda que será usada posteriormente para o cálculo da velocidade de spin.

**Importante:** *you will analyze two turns given by the gyroscope in its precession movement, according to Figure 1. Therefore, it will be necessary to perform the tasks described below for each of the turns.*



**Figura 1.** Movimento de precessão da roda, que está apoiada (e não presa) ao suporte.

**B2.** A partir das fotos extraídas do vídeo, construa uma tabela dos ângulos  $\theta_p$  (em graus) descritos pela extremidade do eixo em função do tempo (em segundos). É importante notar que o vídeo mostra as *voltas completas* do giroscópio, enquanto as imagens referem-se ao *movimento descrito apenas num quadrante*. Isso visa amenizar erros de paralaxe, bem como a influência do movimento de nutação. O giroscópio foi apoiado sobre um círculo de referência, o qual é dividido em intervalos de  $5^\circ$ . Dessa forma, pode-se adotar a incerteza na posição angular como sendo  $\sigma_{\theta_p} = 2,5^\circ$ .

**B3.** A partir da tabela construída no item **B2**, calcule a velocidade angular média de precessão  $\bar{\omega}_p$  no intervalo de tempo  $t_{i-1} \leq t \leq t_{i+1}$ , que é dada por:

$$\bar{\omega}_p(t_{i-1} \leq t \leq t_{i+1}) = \frac{\theta_{p\ i+1} - \theta_{p\ i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (1)$$

onde  $\theta_p$  corresponde à posição angular,  $t$  ao instante de tempo e  $i$  ao número da imagem.

**B4.** A velocidade angular média dada pela equação (1) é aproximadamente igual à velocidade angular instantânea no instante médio  $\bar{t}_i$ , que acaba sendo o instante em que a imagem entre  $t_{i-1}$  e  $t_{i+1}$  foi obtida, uma vez que o intervalo de tempo entre sucessivas imagens é sempre o mesmo. Na forma de equação,

$$\bar{t}_i = \frac{t_{i-1} + t_{i+1}}{2} = t_i \quad (2)$$

Por esta razão, podemos adotar a aproximação:

$$\bar{\omega}_p(t_{i-1} \leq t \leq t_{i+1}) \cong \omega_p(\bar{t}_i) = \omega_p(t_i) \quad (3)$$

onde  $\omega_p(t_i)$  é a velocidade angular instantânea de precessão no instante  $t_i$ .

Essa aproximação é muito boa, porque o intervalo de tempo  $t_{i-1} \leq t \leq t_{i+1}$  é muito pequeno. Finalmente, perceba que não é possível calcular a velocidade nem para a primeira e nem para a última imagem.

**B5.** Determine a incerteza em  $\omega_p(t_i)$ , considerando nula a incerteza no tempo. Se necessário, consulte o *Roteiro para Cálculo de Incertezas*, disponível no menu *Guias Auxiliares*.

**B6.** Calcule a média dos valores obtidos para  $\omega_p(t_i)$  no item **B4**. Calcule a incerteza desse valor a partir do desvio-padrão da média. A partir daqui, este será o seu **valor experimental da velocidade de precessão**.

**B7.** Para calcular a velocidade de spin, observe a marca feita na roda. É um tanto difícil de notá-la, mas veja as imagens várias vezes, em sequência, até acostumar-se com a marcação. Para facilitar, foram selecionadas de antemão duas imagens para cada volta. Elas correspondem à posição da fita num instante inicial e num instante final (respectivamente): a fita apareceu na primeira imagem, a roda realizou uma volta e então a fita apareceu novamente na segunda imagem. Com os dois instantes de tempo fornecidos, será possível calcular o período de rotação da roda em torno do seu próprio eixo e posteriormente a velocidade de spin a partir de

$$\omega_s = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (4)$$

onde  $\Delta\theta$  é o ângulo total subtendido pelo arco da roda e  $\Delta t$  é seu período de rotação. Assumindo, nesse caso específico, que a roda completou uma volta completa, temos que  $\Delta\theta = 2\pi$  rad e  $\Delta t = T$ . Assim, utilize a próxima relação para calcular a velocidade de spin da roda:

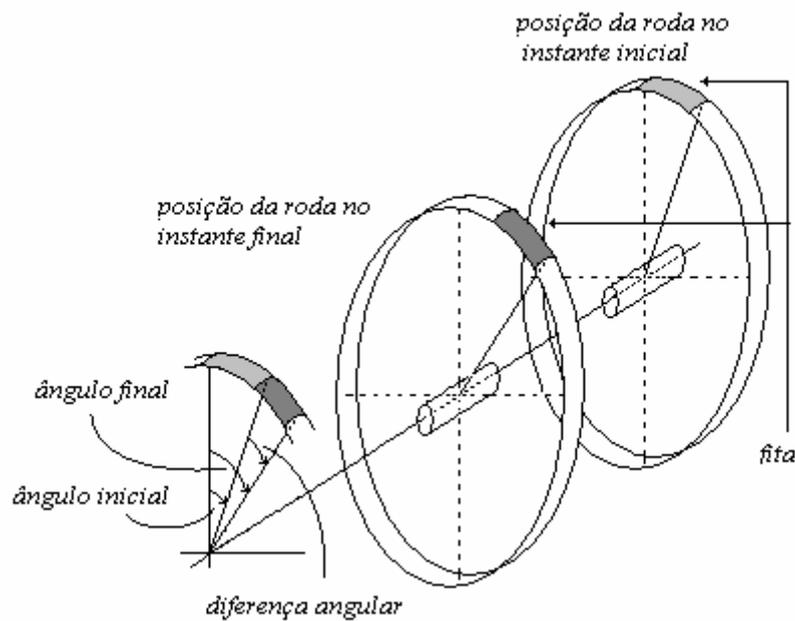
$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

É bom lembrar que a relação (5) é válida para o movimento circular uniforme. Para a análise do movimento do giroscópio, será feita essa aproximação.

**B8.** Calcule a incerteza na velocidade de spin utilizando a seguinte fórmula:

$$\sigma_{\omega_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\theta}}{T} \quad (6)$$

onde a incerteza na posição  $\sigma_{\theta}$  deverá ser estimada de acordo com a diferença de posição aproximada entre a marcação da fita na primeira imagem da roda (início do período) e na segunda imagem. É considerada essa incerteza porque a fita não retorna exatamente à posição original ao final da volta. **Explique** como você estimou a incerteza na posição. Para facilitar sua estimativa, imagine a roda vista numa posição frontal, conforme é mostrado na Figura 2. Orientando-se pelo eixo localizado no centro da roda, você pode basear-se no comprimento da fita para estimar a diferença angular. Tendo a fita um comprimento de 5 cm e tendo o valor do raio da roda (vide a Tabela 2, disponível no Apêndice), é possível determinar o ângulo subtendido por esse arco. Dessa forma, a diferença pode ser estimada como metade de uma fita, um quarto de fita etc. A partir daqui, este será o seu **valor experimental da velocidade de spin**.



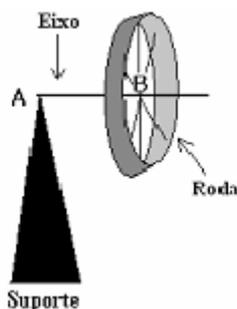
**Figura 2.** Esquema frontal da roda para ajudar na determinação da diferença angular e na estimativa da velocidade angular de spin.

**B9.** Construa uma tabela com os **valores experimentais** obtidos para a velocidade de precessão média e para a velocidade de spin, conforme a Tabela 1 sugerida no Apêndice. Não se esqueça de incluir em sua tabela as respectivas incertezas das velocidades.

**B10.** Analisando a velocidade de spin e a velocidade de precessão experimentais organizadas na tabela do item **B9**, verifique a relação existente entre ambas. Lembre-se da expressão a seguir para embasar sua argumentação:

$$\omega_p = \frac{Mgd}{I\omega_s} \quad (7)$$

onde  $M$  é a massa do giroscópio,  $g$  o módulo da aceleração gravitacional,  $d$  a distância do ponto  $A$  onde o eixo se apoia no suporte até o ponto  $B$ , onde se localiza aproximadamente o centro de massa da roda de bicicleta (conforme a Figura 3 a seguir), e  $I$  o momento de inércia<sup>1</sup> da roda.



**Figura 3.** Esquema das partes do giroscópio.

**Atenção!** Em cada conjunto de dados, o giroscópio teve seu eixo apoiado num ponto diferente. Assim, confira qual a distância  $d$  deverá ser utilizada na análise do seu conjunto de dados.

<sup>1</sup> O valor do momento de inércia da roda foi medido experimentalmente, pois a mesma possuía um eixo interno cilíndrico que impedia o cálculo da inércia rotacional considerando-a um aro ( $I = M \cdot R^2$ ). Na aba *Filmes e Quadros* da página do experimento, acesse o tópico *Medição experimental da Inércia Rotacional da Roda*, que explica o procedimento utilizado para medição, e depois utilize o valor fornecido para realizar seus cálculos.

**B11.** A partir dos valores fornecidos pela Tabela 2 do Apêndice, calcule os **valores esperados** para as velocidades angulares de precessão e de spin utilizando a expressão (7). É importante destacar que ao calcular o *valor esperado da velocidade de precessão*, será necessário utilizar na equação o *valor experimental da velocidade de spin*, e vice-versa.

**B12.** Calcule a incerteza para o **valor esperado da velocidade de precessão**, utilizando a seguinte expressão:

$$\sigma_{\omega_p} = \omega_p \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\omega_s}}{\omega_s}\right)^2} \quad (8)$$

onde  $\sigma_d$  é a incerteza na distância entre os pontos A e B (vide Figura 3),  $\sigma_I$  a incerteza no momento de inércia (calculado experimentalmente) e  $\sigma_{\omega_s}$  a incerteza do valor experimental da velocidade de spin, determinada no item **B8**. A incerteza na massa foi desconsiderada por ter uma incerteza relativa muito pequena quando comparada às outras grandezas. **Adote** um procedimento análogo para calcular a incerteza para o **valor esperado da velocidade de spin**.

**B13.** Analise os valores esperados obtidos para as velocidades de precessão e de spin. O que acontece com a velocidade de precessão em relação à de spin? Lembre-se novamente da expressão (7).

**Importante:** *os próximos itens só deverão ser respondidos quando os cálculos e as análises (até o item B13) tiverem sido realizados para as duas voltas do giroscópio.*

**B14.** Compare seus valores experimentais com os esperados. Eles são condizentes? Por quê? Não se esqueça de avaliar também o valor das incertezas. Para facilitar a apresentação de sua análise comparativa, sugerimos que seja seguido o exemplo da Tabela 1, disponível no Apêndice.

**B15.** Uma vez finalizada a tabela do item **B14**, verifique o que aconteceu com os valores das velocidades de precessão e de spin na mudança de um quadrante para o outro, isto é, quando o giroscópio continua dando voltas? Elas se alteram? Em caso afirmativo, elas diminuíram ou aumentaram?

### C) Procedimento de elaboração do relatório

Escreva um relatório para um público que não conheça nem o experimento nem os procedimentos de análise, mas que possua conhecimentos em Física. Descreva o que foi feito, formule a conclusão e explique como ela foi obtida. Tente ser claro, objetivo e sintético, usando suas próprias palavras. Cada grupo deve entregar um único relatório, com as seguintes seções:

**C1. Identificação:** liste os nomes dos membros do grupo (ou apenas o seu, se trabalhou individualmente) e identifique o conjunto de imagens analisado.

**C2. Introdução:** apresente uma introdução resumida contendo a situação física e o objetivo do experimento.

**C3. Descrição do Experimento:** descreva o arranjo experimental de forma sucinta, não deixando de mencionar os principais dispositivos e componentes utilizados, assim como suas características.

**C4. Análise de Dados e Resultados Obtidos:** apresente os dados brutos extraídos da análise inicial do conjunto de imagens (tabela do item **B2**). Em seguida, exiba a tabela construída no item **B14**. Com todas essas informações, responda às questões referentes aos itens **B8**, **B10**, **B13**, **B14** e **B15**.

**C7. Conclusão:** Retome a introdução, atente para o objetivo do experimento e comente se ele foi alcançado plenamente, parcialmente ou não e por quê.

## D) Apêndice

**Tabela 1.** Exemplo para a organização dos dados obtidos no decorrer da análise.

<b>Valores Experimentais</b>				
Volta	$\omega_p$ (rad/s)	$\sigma_{\omega_p}$ (rad/s)	$\omega_s$ (rad/s)	$\sigma_{\omega_s}$ (rad/s)
1 <sup>a</sup>				
2 <sup>a</sup>				
<b>Valores Esperados</b>				
Volta	$\omega_p$ (rad/s)	$\sigma_{\omega_p}$ (rad/s)	$\omega_s$ (rad/s)	$\sigma_{\omega_s}$ (rad/s)
1 <sup>a</sup>				
2 <sup>a</sup>				

**Tabela 2.** Informações a respeito do arranjo experimental para cada conjunto de imagens.

	<b>Diâmetro da Roda</b>	$(64,5 \pm 0,5) \text{ cm}$
	<b>Conjuntos 04 e 06</b>	$(7,7 \pm 0,2) \text{ cm}$
<b>Distância <math>d</math></b>	<b>Conjuntos 02 e 05</b>	$(9,3 \pm 0,2) \text{ cm}$
	<b>Conjuntos 01 e 03</b>	$(11,0 \pm 0,2) \text{ cm}$
	<b>Massa da Roda</b>	$(3460 \pm 20) \text{ g}$