4a AP

Convenção (para todas): adote o sentido anti-horário como positivo. Como o eixo de rotação tem direção fixa, trate torque, momento angular, ω e α como escalares com sinal.

1. **Cinemática da rotação.** Um corpo rígido gira em torno de um eixo fixo com aceleração angular constante α. No instante $t = 0$, tem velocidade angular ω_0 e posição angular φ_0.
   (a) Obtenha $\omega(t)$ e $\varphi(t)$.
   (b) Elimine t e escreva uma relação direta entre ω e $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$.
   (c) Determine o tempo necessário para ω dobrar, isto é, $\omega = 2\omega_0$.

2. **Máquina de Atwood com polia real.** Dois blocos de massas m_1 e m_2 estão ligados por um fio ideal (inextensível e de massa desprezível) que passa por uma polia de raio R e momento de inércia I. A polia gira em torno de um eixo fixo (atrito no eixo desprezível). O fio não escorrega na polia. Os dois ramos do fio saem **verticalmente** da polia, e os blocos movem-se somente na vertical. Considere a gravidade g. Assuma $m_1 > m_2$, de modo que m_1 desce e m_2 sobe.
   (a) Determine o módulo da aceleração a dos blocos.
   (b) Determine as tensões T_1 (no lado de m_1) e T_2 (no lado de m_2).
   (c) Mostre o limite quando $I \to 0$ e interprete fisicamente.

3. **Bastão uniforme.** Um bastão uniforme de massa M e comprimento L gira num plano vertical em torno de um pivô ideal numa extremidade (eixo fixo perpendicular ao plano do movimento). Ele é solto do repouso quando está horizontal.
   (a) Determine a aceleração angular inicial α_0 (com sinal).
   (b) Usando conservação de energia, determine ω quando o bastão passa pela posição vertical para baixo.
   (c) No instante em que passa pela vertical para baixo, determine as componentes da força de reação do pivô sobre o bastão.

4. **Escada em equilíbrio.** Uma escada uniforme de massa M e comprimento L encosta numa parede lisa (sem atrito) e apoia no chão rugoso (coeficiente de atrito estático μ_s). A escada faz um ângulo θ com o chão.
   (a) Determine a força normal N e a força de atrito estático f no chão (módulo e sentido), em função de θ, M, g e L.
   (b) Determine o ângulo crítico θ_c (em função de μ_s) para o qual a escada fica na iminência de escorregar.

5. **Carretel puxado por uma linha com ângulo.** Um carretel rígido está sobre uma superfície horizontal rugosa e rola sem deslizar. Ele tem raio externo R (contato com o chão), raio interno r (onde a linha está enrolada) e momento de inércia I em torno do eixo central (eixo fixo perpendicular ao plano). A linha sai do carretel pelo ponto superior do raio interno e é puxada por uma força F ao longo da própria linha, fazendo um ângulo β com a horizontal (acima da horizontal), apontando para a direita.
   (a) Determine o sentido do movimento do centro de massa (direita ou esquerda) em função de R, r e β.
   (b) Encontre o(s) ângulo(s) crítico(s) β_0 que separa(m) os regimes em que o carretel rola para a direita e para a esquerda.
   (c) Determine o sentido do atrito estático e obtenha uma condição do tipo $|f| \leq \mu_s N$ para que o rolamento sem deslizar seja possível.

6. **Colisão inelástica em disco girante.** Um disco rígido gira em torno de um eixo fixo vertical passando pelo centro, com velocidade angular inicial ω_0 e momento de inércia I_d em torno do eixo. Um bloco de massa m cai verticalmente e gruda na borda do disco, a uma distância R do eixo. Durante o choque, despreze torques externos impulsivos em torno do eixo.
   (a) Usando conservação do momento angular no eixo, determine a velocidade angular final ω_f.
   (b) Calcule a variação de energia mecânica no choque, $\Delta E = E_f - E_i$, e mostre que $\Delta E < 0$.
   (c) Explique fisicamente para onde foi a energia "perdida".