

# OLIMPÍADA BRASILEIRA DE FÍSICA

## Prova Seletiva 1 - SOIF / 2026

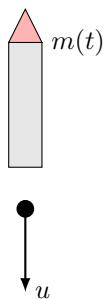
27 de setembro de 2025

### INSTRUÇÕES

1. A prova é composta por 5 questões. Sem contar essa folha de rosto, ela contém 8 páginas.
2. A duração da prova é de 5 horas ininterruptas. **O tempo de prova começa no instante de acesso ao caderno de questões.**
3. **Todas as respostas devem ser justificadas**, ou seja, a resolução da questão compreendida pelas principais etapas que levam às respostas deve ser apresentada.
4. **As resoluções devem escritas de próprio punho** em folhas inicialmente em branco (não use editores de texto). É permitido apenas o uso de caneta, de cor **azul ou preta**, lápis preto de traço forte, régua e calculadora **não programável**.
5. As folhas com a resolução de cada questão devem ser escaneadas no formato PDF. Um documento PDF (documento resposta) para cada questão.
6. Cada documento resposta deve ser enviado (submetido) através da correspondente interface de respostas em <https://app.graxaim.org/soif/2026>.
7. Quando um documento resposta é enviado a questão é considerada respondida. Não é possível enviar um documento para substituir outro já enviado.
8. Você pode responder as questões (enviar os documentos) em qualquer ordem. **Atenção para não enviar o documento resposta de uma questão no lugar de outra.**
9. Durante a prova, é permitido o uso de celular ou computador **apenas** para acessar o site <https://app.graxaim.org/soif/2026>, ou para trocas de mensagens com os coordenadores da SOIF através do endereço [equipeobf@graxaim.org](mailto:equipeobf@graxaim.org). **Todos os demais usos (aplicativos gráficos e numéricos, consultas, busca na internet, etc) são proibidos.**
10. Questões enviadas após do 5 horas do início da prova (acesso ao caderno de questões) não serão avaliadas, apesar do sistema aceitar a submissão normalmente.

**Q1 - Física de foguetes (10 pontos)**

Considere um foguete de massa inicial  $m_0$ , composto por um único estágio, que contém uma quantidade de material propelente de massa  $m_c < m_0$ . Durante a decolagem, iniciada no instante  $t = 0$ , o foguete expelle gases resultantes da queima do combustível com velocidade constante  $u$  em relação ao próprio foguete, de tal forma que a massa total do foguete pode ser descrita por uma função  $m(t)$ . A taxa de ejeção de massa por unidade de tempo é constante e igual a  $\mu$ . A aceleração local da gravidade pode ser assumida constante ao longo de todo o movimento e igual a  $g$ . Despreze efeitos de resistência do ar e considere que o movimento seja unidimensional ao longo da direção vertical.



O processo de decolagem é definido como o intervalo de tempo entre o instante  $t = 0$  e o instante  $T$ , no qual o foguete lançado não dispõe de mais material para a sua propulsão. Com base na situação descrita acima, faça o que se pede nos itens a seguir.

**A1.** Determine a duração  $T$  do processo descrito. 1,0pt

**A2.** Determine a aceleração instantânea  $a(t)$  do foguete com respeito ao referencial do solo. 3,0pt

**A3.** Determine a velocidade  $v_{\max}$  atingida pelo foguete ao final do processo de queima do combustível. 3,0pt

**A4.** Estime a altura máxima atingida pelo foguete. 3,0pt

## Q2 - Cone de Mach (10 pontos)

Quando um objeto se move na atmosfera, ele gera ondas esféricas de pressão, ondas essas que se propagam com uma velocidade de módulo igual ao módulo da velocidade das ondas sonoras. Em particular, as cristas das ondas geradas pelo objeto ficam tão mais próximas umas das outras à frente do objeto e tão mais afastadas atrás dele quanto maior for o módulo da velocidade do objeto em relação à atmosfera. Se o módulo da velocidade do objeto,  $v$ , estiver próximo do módulo da velocidade das ondas sonoras,  $c$ , as cristas à frente se sobrepõem, formando uma crista única, de amplitude bem maior do que a amplitude de qualquer das ondas originais. Quando o objeto se move com velocidade de módulo igual ao módulo da velocidade das ondas sonoras, a crista única passa a ter uma amplitude muito grande e recebe o nome de onda de choque.

### Parte A: Cinemática de um pulso de perturbação em um meio - 4 pontos

Suponha uma frente de propagação de uma perturbação em um tempo  $t_0 = \tau$ , na origem do referencial fixo  $x - y$ , como mostra a figura a seguir: A onda esférica, em um tempo  $t > \tau$ , possui seu centro,  $O$ , na posição

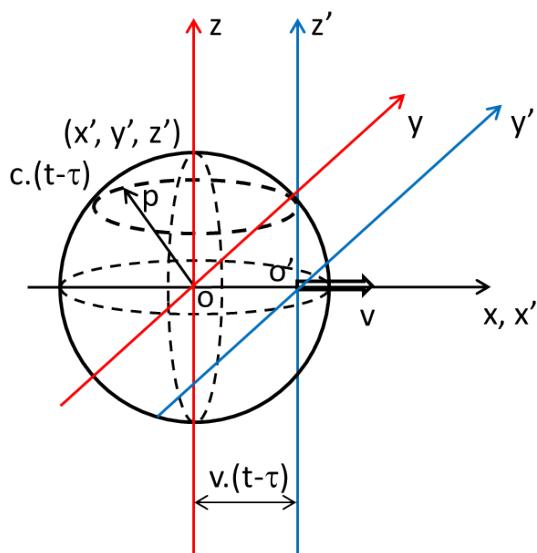


Figura 1: Pulso de onda esférica. Figura meramente ilustrativa.

$v.(t - \tau)$ , em relação ao referencial  $x' - y'$  ligado à fonte,  $O'$ , que se move com velocidade constante  $v$ . Aqui a velocidade  $v$  é genérica, ou seja, pode ser maior, menor ou igual a  $c$ .

O número de Mach é uma medida adimensional que expressa a razão entre a velocidade de um objeto em relação à velocidade do som no meio em que ele se move

$$M = \frac{v}{c}.$$

Com base no valor de  $M$ , é possível classificar o regime de velocidade de aeronaves em voo. Quando  $M < 0,8$ , o regime é considerado *subsônico*; no intervalo  $0,8 \leq M < 1,2$ , denomina-se *transônico*; para  $1,2 \leq M < 5,0$ , o regime é *supersônico*; e, por fim, valores  $M \geq 5,0$  caracterizam o regime *hipersônico*.

- A1.** Encontre uma expressão para o tempo de “retardo”,  $\tau$ , em função das coordenadas de um ponto  $p$ ,  $(x', y', z')$ , pertencente à frente da onda, no referencial em movimento, no instante  $t$ , assim como do número de Mach  $M$ . 4,0pt

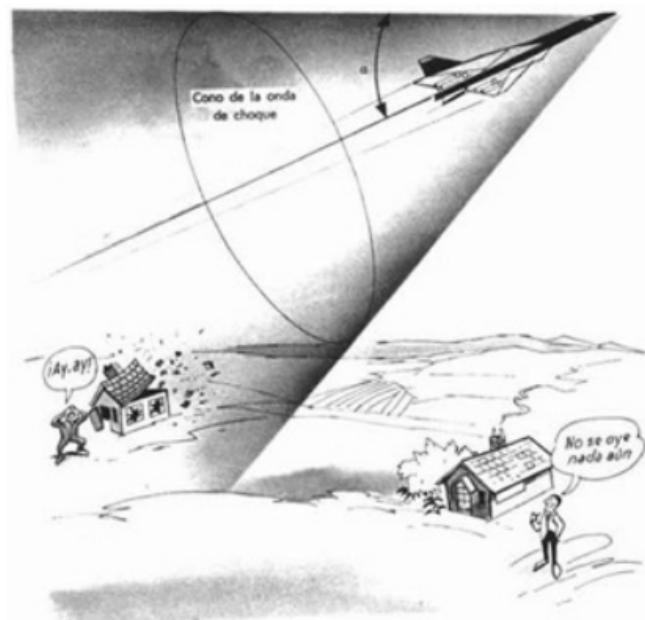


Figura 2: Ilustração de um avião supersônico viajando próximo a duas casas. A casa da esquerda é afetada pela onda de choque, enquanto a da direita não percebe o som produzido pela aeronave. (Imagem apenas ilustrativa.)

## Parte B: Aviões supersônicos - 6 pontos

Considere agora um avião voando horizontalmente, com velocidade  $v > c$ . Nestas circunstâncias, a superfície envoltória das frentes dos pulsos da onda de som formam um cone (Cone de Mach), de semiabertura  $\theta$ , medida entre a superfície do cone e o seu eixo de simetria, relacionada com o número de Mach  $M$ .

Imagine um observador no solo, no mesmo plano vertical do avião, que escuta o som proveniente da aeronave, um tempo  $t$  depois de tê-la visto passando acima da sua cabeça.

- B1.** Encontre uma expressão para a altura  $h$  a que voava o avião, em função de  $t$ ,  $c$  e  $M$ . 2,0pt

Analisemos, desta vez, a situação em que um caça supersônico voa em linha reta, a uma altitude  $z = 12000\text{ m}$ , com velocidade constante,  $v = 680\text{ m/s}$ . A velocidade do som no ar pode ser considerada igual a  $c = 340\text{ m/s}$ . Em  $t = 0$ , o avião passa diretamente sobre um ponto de coordenadas  $x = y = 0$ , no plano do solo, e continua voando na direção  $x$ , no sentido positivo. Um receptor acústico se encontra posicionado no solo no ponto de coordenadas  $x_r = 5000\text{ m}$  e  $y_r = 3000\text{ m}$ .

- B2.** Determine o instante  $T$  em que o som emitido pelo avião será detectado pelo receptor acústico. 4,0pt

### Q3 - Viagem de balão (10 pontos)

Passeios de balão são oferecidos como atrações turísticas em diversas cidades, como na região da Capadócia, na Turquia, ou, aqui no Brasil, na cidade de Boituva. No entanto, há riscos associados a esse tipo de aventura, pois o balão, feito de uma camada muito fina de material inflável, funciona a partir do aquecimento do ar por um queimador, alimentado por cilindros de gás e localizado no mesmo espaço ocupado pelas pessoas que participam do voo.

Muitos acidentes têm ocorrido, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo, seja por negligência, seja por mau funcionamento dos equipamentos. A prática de soltar balões, mesmo os “não tripulados”, é crime no Brasil e pode causar diversos danos, como, por exemplo, acidentes aéreos.

### Parte A: Antes do voo - 4 pontos

Um balão de ar é enchedo no solo com ar quente. Suponha que a cobertura, composta de uma fina camada de material inflável do balão, tem massa diferente de zero e espessura dada por  $d \ll R$ , mas não desprezível, em que  $R$  é o seu raio. Veja a figura esquemática a seguir.

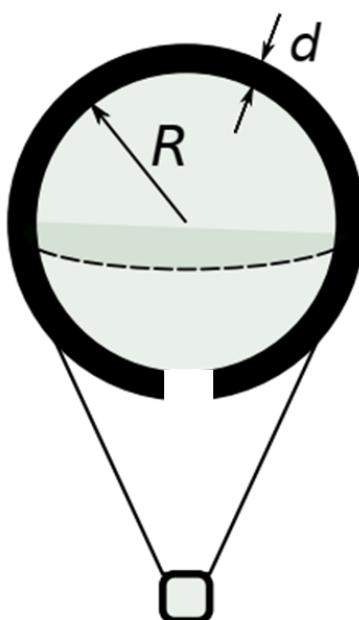


Figura 4: Diagrama esquemático de um balão de ar quente.

Denote as densidades do material da cobertura por  $\rho_b$ , do ar atmosférico por  $\rho_{at}$ , do ar quente dentro do balão por  $\rho_{ar}$ .

- A1.** Nestas circunstâncias, determine uma expressão para calcular o raio  $R$  necessário para que o globo flutue, em equilíbrio, em função de  $\rho_b$ ,  $\rho_{at}$ ,  $\rho_{ar}$  e sua espessura  $d$ . 1,5pt

Considere agora um balão como o do item anterior, com um volume inicial de  $3700\ m^3$ , e temperatura do ar de  $100\ ^\circ C$ . O sistema, envolvendo a cesta, o queimador, os cilindros de gás e os audaciosos balonistas, tem uma massa combinada de  $900\ kg$ . A temperatura ambiente é de  $20\ ^\circ C$  e a pressão atmosférica é de aproximadamente  $1,01 \times 10^5\ Pa$ . O invólucro deste balão pode ser considerado de massa e espessura desprezíveis. Use  $\mu_{ar} = 0,029\ kg \cdot mol^{-1}$  (massa molar do ar a  $100\ ^\circ C$ ), e  $c_{ar} = 1,0\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

- A2.** Calcule a força de contenção  $F$  necessária para segurar este balão no chão. 2,5pt

**Parte B: O voo do balão - 6 pontos**

A partir deste ponto, suponha que a força de contenção  $F$  foi removida e o balão foi liberado para subir. Considere que a temperatura ambiente permanece constante com a altitude, e que a pressão atmosférica diminui 1,2% a cada 100 m de elevação.

- B1.** Determine a aceleração com que o balão sobe imediatamente após o lançamento. 2,5pt  
Calcule a altitude que o balão atingirá se a temperatura interna permanecer constante.

Considere agora que, com o queimador desligado, o ar quente no interior do balão esfria lentamente, reduzindo a força de empuxo a uma taxa constante de 10 N/s.

- B2.** Estime o tempo máximo que o balão pode manter sua altitude acendendo regularmente o queimador, se ele estiver carregando um suprimento total de gás propano de 80 kg, que tem um poder calorífico de 50 MJ/kg. 3,5pt

## Q4 - Michelson–Morley e LIGO (10 pontos)

Neste problema abordaremos o experimento de Michelson–Morley, um experimento conduzido no final do século XIX, com o intuito de medir a velocidade da luz em diferentes direções visando detectar a velocidade da luz com respeito ao éter.

Embora o experimento, na época, não tenha sido bem-sucedido, mais de cem anos depois, princípios semelhantes foram usados para detectar ondas gravitacionais no LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Aqui, investigaremos um modelo simplificado do experimento do LIGO, e como ele detecta ondas gravitacionais através de interferometria.

De forma simplificada, o experimento do LIGO consiste em uma fonte de luz cujos fôtons são divididos igualmente por um “divisor” de luz denominado *beam splitter* ou *divisor de feixe* (o ponto A) — em dois percursos perpendiculares denominados *braços* — AB e AC, como na figura 5. Cada feixe dividido viaja até um espelho no fim de cada braço (os pontos B e C), é refletido de volta, e é então recombinaido no divisor. Finalmente, um fotodetector mede a intensidade da luz combinada. Com base em diferenças na distância AB e AC pode se medir um padrão de interferência. Dito isso, o experimento do LIGO é calibrado muito precisamente, de forma que, originalmente, a distância entre AB e AC é aproximadamente igual.

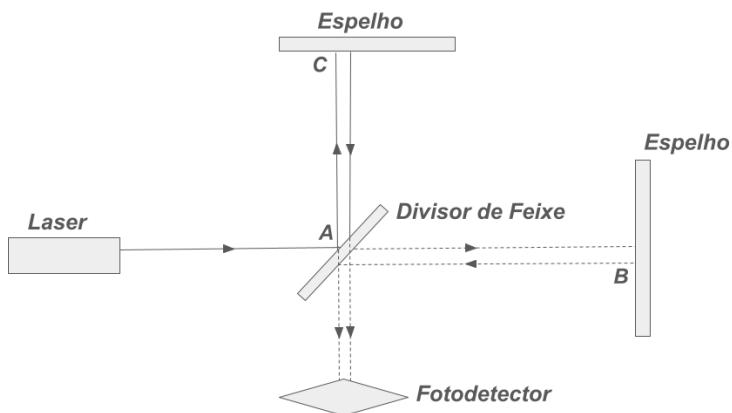


Figura 5: Experimento de Michelson Morley

Quando uma onda gravitacional passa sobre o detector, ela levemente distorce o comprimento dos braços AB e AC de forma diferente, devido a efeitos relativísticos. Essa pequena distorção causa um padrão de interferência no fotodetector, e a partir disso pode se inferir a massa envolvida e a distância de origem da onda gravitacional.

O experimento visa medir uma quantia  $h$  da onda gravitacional, denominada *strain*. Quando uma onda gravitacional de *strain*  $h$  passa sobre o experimento, ela estende o braço AB por um fator proporcional a  $(1 + h)$ , e encurta o braço AC por  $(1 - h)$ . Nos itens seguintes, assuma que o comprimento dos braços AB e AC originais é igual a  $L$ , e o comprimento de onda do laser usado é  $\lambda$ .

- A1.** Assumindo que uma onda gravitacional com *strain*  $h$  passe pelo interferômetro, 2,0pt calcule a diferença de caminho óptico de um fôton passando pelo caminho ABA e ACA.

- A2.** Dada a diferença de caminho óptico calculada acima, obtenha agora a diferença de 2,0pt fase  $\Delta\phi$  dos fôtons entre os dois braços.

- A3.** Digamos que, sem a onda gravitacional, a intensidade medida no fotodetector é  $I_0$ , 2,0pt e na presença da onda a intensidade medida é de  $I'$ . Calcule a variação relativa de intensidade  $\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I' - I_0}{I_0}$ . Simplifique seu resultado para  $h$  muito pequeno.

- A4.** Dado que, para a primeira onda gravitacional detectada em 2015, o *strain* era  $h = 1,0 \times 10^{-21}$ , com  $L = 4,0 \text{ km}$  e  $\lambda = 1034 \text{ nm}$ , calcule numericamente o valor de  $\Delta I/I_0$ .

Comente sobre a magnitude desse valor e se este experimento, da forma como apresentado, é capaz de detectar ondas gravitacionais.

- A5.** Sugira *sucintamente* como aumentar a chance de detecção de ondas gravitacionais no LIGO, **sem aumentar o comprimento físico dos braços**.

### Q5 - Vasos comunicantes no trem acelerado (10 pontos)

Um professor leva seus alunos para um experimento dentro de um trem. Nele, o seguinte aparato com vasos comunicantes é fixado ao piso do vagão, inicialmente em repouso. O eixo da parte inferior do tubo está disposto paralelamente aos trilhos do trem.

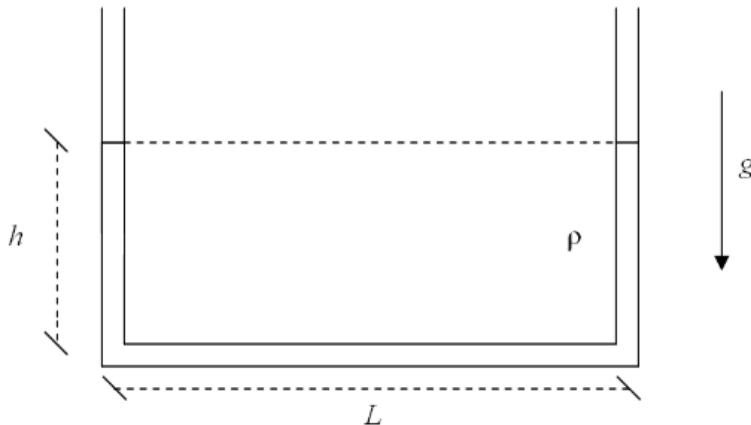


Figura 6: Aparato com vasos comunicantes disposto dentro do trem.

A distância entre as duas partes verticais do tubo é  $L$  e cada um desses lados (daqui em diante referidos como braços) está preenchido até a altura  $h$  com um líquido de densidade  $\rho$ . Considere a aceleração gravitacional local igual a  $g$ . Para esta questão, despreze as dimensões da secção transversal do tubo, constante em toda sua extensão, em relação à altura de cada coluna de líquido e à distância entre os seus braços.

#### Parte A: Derramamento de outro líquido - 2 pontos

Antes de iniciar o experimento, o professor pede para um de seus alunos despejar o conteúdo de um tubo de ensaio preenchido até uma altura  $h_1$  com um líquido de densidade  $\rho_1$ , com secção idêntica à do aparato de vasos comunicantes, no seu braço esquerdo. Considere que este líquido despejado é menos denso que o líquido inicialmente presente no aparato e que ambos não se misturam.

- A1.** Determine a altura da superfície de líquido (contato com o ar) em cada braço após o retorno do sistema ao equilíbrio hidrostático. 2,0pt

#### Parte B: Trem acelerado - 8 pontos

Dada a situação do item anterior, o trem inicia então um movimento com aceleração constante. Após o retorno ao equilíbrio hidrostático, um dos alunos faz a seguinte observação: “Professor, se não estivéssemos em um referencial acelerado, eu diria que o líquido despejado tem densidade nula”. Despreze qualquer possível vasamento de líquido do aparato.

- B1.** Com base no que este aluno observou, determine a intensidade e o sentido da aceleração do trem. 4,0pt

Agora, o trem muda sua aceleração e uma nova situação de equilíbrio hidrostático é estabelecida. Novamente, um dos alunos diz: “Professor, se não estivéssemos em um referencial acelerado, eu diria que os líquidos dentro desse aparato possuem a mesma densidade”.

- B2.** Com base nessa nova observação, determine a intensidade e o sentido da aceleração neste último caso. 4,0pt