

## 1 Cinemática Escalar/Vetorial

## 2 Conceitos Fundamentais

- **Movimento:** variação da posição no tempo em relação a um referencial.
- **Repouso:** posição constante em relação ao referencial.
- **Referencial:** sistema usado como base para descrever o movimento.

## 3 Cinemática Escalar (1D)

- **Posição:**  $s$
- **Deslocamento:**  $\Delta s = s_f - s_0$
- **Velocidade média:**  $v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t}$
- **Aceleração média:**  $a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

## 4 Movimento Retilíneo Uniforme (MRU)

- Velocidade constante:  $a = 0$
- Equação horária:  $s = s_0 + vt$

## 5 Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)

- Aceleração constante.
- $s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$
- $v = v_0 + at$
- $v^2 = v_0^2 + 2a(s - s_0)$
- $\Delta s = \frac{(v+v_0)}{2} \cdot t$

## 6 Cinemática Vetorial (2D e 3D)

- posição:  $\vec{r}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} + z(t)\hat{k}$
- Deslocamento vetorial:  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_0$
- Velocidade vetorial:  $\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt}$
- Aceleração vetorial:  $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}$

## 7 Lançamento Oblíquo

### Separação dos movimentos:

- Horizontal (MRU):  $x(t) = x_0 + v_{0x}t$
- Vertical (MRUV):  $y(t) = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$

### Outras fórmulas:

- Velocidade inicial:  $\vec{v}_0 = v_0 \cos \theta \hat{i} + v_0 \sin \theta \hat{j}$
- Alcance:  $A = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g}$
- Altura máxima:  $H = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$
- Tempo de subida:  $t_s = \frac{v_0 \sin \theta}{g}$
- Tempo total:  $t = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$

## 8 Gráficos

- $s \times t$ : inclinação = velocidade.
- $v \times t$ : área = deslocamento; inclinação = aceleração.
- $a \times t$ : área = variação da velocidade.

## 9 Tipos de Movimento

- MRU:
  - $v > 0$ : progressivo
  - $v < 0$ : retrógrado
- MRUV:

→  $v \cdot a > 0$ : acelerado

→  $v \cdot a < 0$ : retardado

## 10 Estática e Dinâmica

## 11 Conceitos Fundamentais

- **Grandezas escalares:** possuem apenas módulo (ex: massa, tempo).
- **Grandezas vetoriais:** possuem módulo, direção e sentido (ex: força, aceleração).
- **Força resultante:** vetor que representa o efeito combinado de todas as forças aplicadas.
- **Diagrama de corpo livre:** representação de todas as forças atuantes sobre um corpo.

## 12 Equilíbrio do Corpo Rígido e da Partícula

**Condições de equilíbrio:**

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (\text{equilíbrio translacional})$$

$$\sum \vec{\tau} = 0 \quad (\text{equilíbrio rotacional})$$

**Torque (momento de uma força):**

$$\tau = rF \sin \theta$$

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

$$\tau = I \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \sin \theta = 0 \quad \text{MHS}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2 \sin \theta = 0 \quad \text{MHS}$$

Solução geral EDO:

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

## 12.1 Rotação de um Corpo Rígido

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

## 12.2 Relação entre coroas e catracas

Como a corrente impõe a mesma velocidade linear na periferia das duas engrenagens:

$$v_{\text{coroa}} = v_{\text{catraca}} = R_c \cdot \omega_c = R_k \cdot \omega_k$$

## 13 Leis Fundamentais da Dinâmica (Leis de Newton)

- **1ª Lei (Inércia):** um corpo em repouso ou em MRU permanece assim se a força resultante for nula.
- **2ª Lei:** Princípio Fundamental da Dinâmica:

$$\vec{F}_{\text{resultante}} = m\vec{a}$$

- **3ª Lei (Ação e Reação):** forças trocadas entre dois corpos são iguais em módulo, mesma direção e sentidos opostos.

## 14 Gravitação Universal

**Lei da Gravitação Universal:**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

**Campo gravitacional:**

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

Energia potencial gravitacional:

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

## 15 Demonstração da Velocidade de Escape

A velocidade de escape é a mínima velocidade necessária para um corpo escapar da gravidade de um planeta, sem considerar resistência do ar.

### 15.1 Conservação de Energia

Considerando um corpo de massa  $m$  lançado da superfície de um planeta de massa  $M$  e raio  $R$ :

- Energia mecânica inicial:

$$E_{\text{inicial}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R}$$

- Energia mecânica final (no infinito):

$$E_{\text{final}} = 0$$

Aplicando a conservação da energia:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2}v^2 = \frac{GM}{R} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

**Conclusão:** A velocidade de escape depende apenas da massa e do raio do corpo celeste, e não da massa do objeto lançado.

## 16 Forças no Movimento Circular

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (\text{força centrípeta})$$

$$v = \omega r \quad (\text{velocidade tangencial})$$

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (\text{aceleração centrípeta})$$

## 17 Impulso e Quantidade de Movimento

Quantidade de movimento:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Impulso:

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t$$

Teorema do impulso:

$$\vec{I} = \Delta\vec{p}$$

## 18 Coeficiente de Restituição

O **coeficiente de restituição** ( $e$ ) é uma medida que descreve a **elasticidade** de uma colisão entre dois corpos. Ele relaciona a velocidade relativa dos corpos antes e depois da colisão.

### 18.1 Definição

O coeficiente de restituição é dado por:

$$e = \frac{v_{\text{afastamento}}}{v_{\text{aproximação}}} = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2}$$

Onde:

- $e$ : coeficiente de restituição
- $v_{\text{final}}$ : velocidade relativa dos corpos após a colisão
- $v_{\text{inicial}}$ : velocidade relativa dos corpos antes da colisão

### 18.2 Valores do Coeficiente de Restituição

- $e = 1$ : colisão **perfeitamente elástica** (não há perda de energia cinética).
- $e = 0$ : colisão **perfeitamente inelástica** (os corpos permanecem juntos após a colisão).

- $0 < e < 1$ : colisão **parcialmente elástica**.

## 19 Momento de Inércia

O **momento de inércia** ( $I$ ) representa a resistência de um corpo à variação de seu movimento rotacional em torno de um eixo. Ele depende da distribuição de massa em relação ao eixo de rotação.

### 1. Momento de inércia para ponto material

$$I = m \cdot r^2$$

- $m$ : massa do ponto (kg)
- $r$ : distância ao eixo de rotação (m)

### 19.1 2. Momento de inércia para corpos contínuos

$$I = \int r^2 dm$$

### 19.2 Momentos de inércia usuais

- Disco ou cilindro sólido (eixo pelo centro, perpendicular à base):

$$I = \frac{1}{2}MR^2$$

- Aro ou anel fino (eixo pelo centro, perpendicular ao plano):

$$I = MR^2$$

- Esfera sólida (eixo pelo centro):

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

- Esfera oca (casca esférica fina):

$$I = \frac{2}{3}MR^2$$

- Haste fina (eixo pelo centro, perpendicular à haste):

$$I = \frac{1}{12}ML^2$$

- Haste fina (eixo pela extremidade):

$$I = \frac{1}{3}ML^2$$

### 19.3 Teorema dos Eixos Paralelos (Steiner)

Seja  $I_{cm}$  o momento de inércia em relação ao centro de massa, então para um eixo paralelo a uma distância  $d$ :

$$I = I_{cm} + Md^2$$

## 20 Referenciais Inerciais e Não Inerciais

### Referencial Inercial

**Definição:** Um referencial é dito **inercial**, quando em repouso relativo às estrelas fixas distantes. Nele a **Primeira Lei de Newton** é válida:

$$\text{Se } \vec{F}_{\text{resultante}} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{constante}$$

#### Características:

- Não está acelerado.
- Permite aplicação direta das Leis de Newton.
- Exemplo: Espaço profundo, ou um carro em movimento retilíneo uniforme.

### 20.1 Referencial Não Inercial

**Definição:** Um referencial é **não inercial** quando está acelerado em relação a um inercial. Nele, a Primeira Lei de Newton **não se aplica diretamente** sem a introdução de forças fictícias.

**Características:**

- Está acelerado (linear ou rotacionalmente).
  - Surgem **forças fictícias**, como:
    - Força centrífuga(pseudoforça)
    - Força de Coriolis: é uma força fictícia que aparece em referenciais rotacionais, como a Terra, e age sobre corpos em movimento dentro desse referencial. O efeito Coriolis pode ser visto como uma correção dinâmica que aparece quando a conservação do momento angular é "quebrada" por se analisar o movimento num referencial rotativo.
- $$\vec{F}_C = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}$$
- \*  $\vec{F}_C$ : força de Coriolis
  - \*  $m$ : massa do corpo
  - \*  $\vec{\omega}$ : vetor velocidade angular do referencial
  - \*  $\vec{v}$ : velocidade do corpo no referencial
  - Força inercial (associada à aceleração do referencial)

- Exemplo: Interior of a carro that freia/brusca mudança de direção, Terra (com rotação), elevador em aceleração.
- A terra não é uma referencial inercial:

$$a_{cp} = \frac{g}{290} = 0.03369m/s^2$$

, com boa aproximação podemos assumir a terra um referencial inercial.

**20.2 Observação:**

Essa força só aparece em referenciais acelerados (não inerciais) e é essencial para descrever corretamente movimentos na superfície da Terra.

**20.3 Comparação Resumida**

Aspecto	Referencial Inercial	Referencial Não Inercial
Aceleração	Nula	$\neq$ de zero
L. Newton	Válidas	$\exists \vec{F}$ fictícias
Exemplo	deep space	Carro em curva

**21 Trabalho e Energia Cinética****Trabalho de uma força constante:**

$$W = Fd \cos \theta$$

**Energia cinética:**

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

**Teorema da energia cinética:**

$$W_{\text{resultante}} = \Delta E_c$$

**22 Força de Atrito****Atrito estático:**

$$f_e \leq \mu_e N$$

**Atrito cinético:**

$$f_c = \mu_c N$$

**23 9. Energia Potencial****Potencial gravitacional:**

$$E_p = mgh$$

**Potencial elástica:**

$$E_{p,el} = \frac{1}{2}kx^2$$

## 24 Conservação da Energia Mecânica

Em sistemas conservativos:

$$E_m = E_c + E_p = \text{constante}$$

## 25 Lei de Hooke

Força elástica:

$$F = -kx$$

### 25.1 Constante da mola ao ser cortada ao meio

Se uma mola ideal com constante elástica  $k$  e comprimento  $L$  for cortada ao meio, cada metade terá comprimento  $\frac{L}{2}$ .

Como a constante elástica é inversamente proporcional ao comprimento:

$$k \propto \frac{1}{L}$$

Ao cortar a mola:

$$k' = \frac{kL}{L/2} = 2k$$

Logo, cada metade da mola terá constante elástica  $2k$ , ou seja, será duas vezes mais rígida que a mola original.

**Energia potencial armazenada:**

$$E_{p,el} = \frac{1}{2}kx^2$$

### 25.2 Leis de Kepler

- **1ª Lei:** Órbitas elípticas, com o Sol em um dos focos.
- **2ª Lei:** Áreas iguais em tempos iguais. *Consequência direta da conservação do momento angular:*

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \text{constante}$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}|\vec{r} \times \vec{v}| = \text{constante}$$

$$\bullet \text{ 3ª Lei: } \frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

## 26 Conser. Momento Angular

O **momento angular**  $\vec{L}$  de um corpo é dado por:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$$

Onde:

- $\vec{L}$ : momento angular
- $I$ : momento de inércia
- $\vec{\omega}$ : velocidade angular

### 26.1 Princípio da Conservação

Se o **torque resultante externo** sobre um sistema é nulo:

$$\vec{L}_{\text{inicial}} = \vec{L}_{\text{final}} \Rightarrow I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

### Aplicações

- Patinadores puxando os braços e girando mais rápido
- Estrelas colapsando em pulsares
- Satélites e giroscópios

## 27 Hidrostática

O **Princípio de Arquimedes** afirma que:

*Todo corpo total ou parcialmente imerso em um fluido em repouso sofre a ação de uma força vertical para cima, denominada empuxo, de intensidade igual ao peso do fluido deslocado.*

Essa força de empuxo é dada por:

$$E = \rho_f \cdot g \cdot V_d$$

## 28 Fluido em Equilíbrio

Fluido em repouso está sujeito apenas a forças normais e pressões. A pressão se transmite igualmente em todas as direções no interior do fluido.

## 29 Conceito de Pressão

$$P = \frac{F}{A}$$

Unidade: Pascal (Pa), onde  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .

## 30 Densidade

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Unidade:  $\text{kg/m}^3$ . Densidade da água:  $\rho_{\text{água}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

## 31 Pressão de uma Coluna de Líquido

$$P = \rho gh$$

Onde:  $\rho$  é a densidade,  $g$  a gravidade,  $h$  a profundidade.

## 32 Conservação da Massa (Eq. da Continuidade)

Para um fluido incompressível:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Onde:

- $A$ : área da seção transversal
- $v$ : velocidade do fluido

## 33 Equação de Bernoulli

Expressa a conservação da energia para fluidos ideais:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Onde:

- $P$ : pressão
- $\rho$ : densidade
- $v$ : velocidade
- $h$ : altura

## 34 Princípio de Pascal

Uma variação de pressão aplicada a um fluido incompressível em equilíbrio transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido e às paredes do recipiente.

## 35 Pressão Atmosférica

Pressão exercida pelo ar ao nível do mar:

$$P_{\text{atm}} \approx 1,0 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$$

## 36 Experiência de Torricelli

$P_{\text{atm}} = \rho gh$ , com  $h = 0,76 \text{ m}$  (coluna de mercúrio)

## 37 Lei de Stevin

$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

Válida para qualquer ponto de um mesmo fluido em equilíbrio.

## 38 Vasos Comunicantes

Se o fluido for o mesmo, os níveis de líquido se igualam:

$$h_1 = h_2 \quad (\text{para } \rho_1 = \rho_2)$$

## 39 Conservação do Momento Angular

O **momento angular**  $\vec{L}$  de um corpo é dado por:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$$

Onde:

- $\vec{L}$ : momento angular
- $I$ : momento de inércia
- $\vec{\omega}$ : velocidade angular

### 39.1 Princípio da Conservação

Se o **torque resultante externo** sobre um sistema é nulo:

$$\vec{L}_{\text{inicial}} = \vec{L}_{\text{final}} \Rightarrow I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

### 39.2 Aplicações

- Patinadores puxando os braços e girando mais rápido
- Estrelas colapsando em pulsares
- Satélites e giroscópios

## 40 Prensa Hidráulica

Aplicação do Princípio de Pascal:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Permite multiplicar força aplicando pressão a um fluido entre dois êmbolos de áreas diferentes.

## 41 Equilíbrio térmico e temperatura

- Temperatura é uma medida da energia cinética média das partículas.

- Dois corpos estão em **equilíbrio térmico** quando não trocam mais calor entre si.
- **Lei Zero da Termodinâmica:** Se  $A$  está em equilíbrio com  $B$ , e  $B$  com  $C$ , então  $A$  está em equilíbrio com  $C$ .

## 42 Escalas termométricas

- Principais escalas: Celsius ( $^{\circ}C$ ), Fahrenheit ( $^{\circ}F$ ), Kelvin ( $K$ ).
- Conversões:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

$$T(^{\circ}F) = \frac{9}{5}T(^{\circ}C) + 32$$

## 43 Dilatação dos sólidos e líquidos

- Dilatação linear:  $\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$
- Dilatação superficial:  $\Delta A = A_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T$
- Dilatação volumétrica:  $\Delta V = V_0 \beta \Delta T$ , com  $\beta = 3\alpha$
- Dilatação aparente dos líquidos:  $\Delta V_{ap} = V_0 (\gamma_{\text{líqu}} - \beta_{\text{rec}}) \Delta T$

## 44 Estudo térmico dos gases

- Gases ideais obedecem à equação de estado e ignoram interações intermoleculares.
- Variáveis de estado:  $P, V, T, n$ .
- Hipóteses: moléculas puntiformes, colisões elásticas, movimento aleatório.



## 45 Lei geral dos gases perfeitos

$$PV = nRT$$

Onde:

- $R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  (constante dos gases)

## 46 Equação de Clapeyron

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

## 47 Transformações gasosas

- **Isotérmica** ( $\Delta T = 0$ ):  $PV = \text{constante}$  (Lei de Boyle)
- **Isobárica** ( $\Delta P = 0$ ):  $\frac{V}{T} = \text{constante}$  (Lei de Charles)
- **Isocórica** ( $\Delta V = 0$ ):  $\frac{P}{T} = \text{constante}$  (Lei de Gay-Lussac)
- **adiabático** ( $Q = 0$ )

$$\rightarrow PV^\gamma = \text{constante}$$

$$\rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{constante}$$

$$\rightarrow P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{constante}$$

$$\rightarrow \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$\rightarrow \text{gás monoatômico: } \gamma = \frac{5}{3}$$

$$\rightarrow \text{gás diatômico: } \gamma = \frac{7}{5}$$

$$\rightarrow C_p = C_v + R$$

$$\rightarrow U = \frac{3}{2} nRT \text{ Energia Interna, gases monoatômico}$$

$$\rightarrow U = \frac{f}{2} nRT, f \text{ graus de liberdade.}$$

$$\rightarrow W = \int \frac{nRT}{V} dV$$

## 48 Princípio da conservação da energia

- Energia interna se conserva em sistemas isolados.
- Base do **Primeiro Princípio da Termodinâmica**.

## 49 Mudanças de estado físico

- Fusão, vaporização, solidificação, condensação, sublimação.
- Ocorrem à temperatura constante.
- Energia envolvida depende da massa e do calor latente.

## 50 Quantidade de calor

- Calor sensível:  $Q = mc\Delta T$
- Calor latente:  $Q = mL$
- Unidade no SI: Joule (J)

## 51 Propagação do calor

### 51.1 Condução térmica - Lei de Fourier da Condução de Calor

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

### 51.2 Convecção

- Transferência por movimentação de massa em fluidos.

### 51.3 Radiação

$$P = \sigma AT^4$$

$$\text{Onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

## 52 Princípios da Termodinâmica

### 52.1 Primeiro Princípio

$$\Delta U = Q - W \quad \longrightarrow \quad Q = W + \Delta U$$

### 52.2 Segundo Princípio

- O calor não flui espontaneamente de um corpo frio para um corpo quente.
- Entropia tende a aumentar.

## O que é entropia?

A entropia ( $S$ ) é uma função de estado que mede o grau de desordem de um sistema, a quantidade de microestados possíveis, e a irreversibilidade de processos.

## Definição termodinâmica

Para processos reversíveis:

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

Para temperatura constante (isotérmico):

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T}$$

## Segunda Lei da Termodinâmica

$$\Delta S_{\text{total}} \geq 0$$

- $\Delta S_{\text{total}} = 0$ : processo reversível
- $\Delta S_{\text{total}} > 0$ : processo irreversível

## Entropia estatística (Boltzmann)

$$S = k_B \ln \Omega$$

- $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- $\Omega$ : número de microestados possíveis

## Unidade

Joules por kelvin (J/K)

## Exemplos onde a entropia aumenta

- Derretimento de gelo
- Expansão de gás
- Mistura de substâncias

## 52.3 Terceiro Princípio

- A entropia de um cristal perfeito é zero no zero absoluto ( $0 \text{ K}$ ).

## 53 Definição

Uma máquina térmica converte calor em trabalho, operando entre duas fontes térmicas.

## 54 Rendimento

$$\eta = \frac{W}{Q_f} = \frac{Q_f - Q_r}{Q_f} = 1 - \frac{Q_r}{Q_f}$$

- $\eta$ : rendimento
- $W$ : trabalho útil
- $Q_q$ : calor absorvido da fonte quente
- $Q_f$ : calor rejeitado à fonte fria

## 55 Rendimento da Máquina de Carnot

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

## 56 Refrigerador/Termodinâmica

O **refrigerador** transfere calor do meio frio para o quente, usando trabalho externo.

- Retira calor  $Q_f$  do interior (frio).
- Rejeita calor  $Q_q$  para o exterior (quente).
- Gasta trabalho  $W$ :  $Q_q = Q_f + W$

**Coefficiente de performance (COP):**

$$K = \frac{Q_f}{W}$$

**Quanto maior  $K$ , mais eficiente é o refrigerador.**

- $T_q$ : temperatura da fonte quente (em K)
- $T_f$ : temperatura da fonte fria (em K)

## 57 Equivalente mecânico do calor

- Experiência de Joule:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

## 58 Movimento Vibratório e Ondulatório

### 58.1 Movimento Periódico

- **Amplitude** ( $A$ ): valor máximo da oscilação.
- **Período** ( $T$ ): tempo para uma oscilação completa.
- **Frequência** ( $f$ ): número de oscilações por segundo,  $f = \frac{1}{T}$ .
- Unidade de frequência: hertz (Hz).

## 59 Movimento Harmônico Simples (MHS)

- Posição em função do tempo:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

- $\omega$ : frequência angular,  $\omega = 2\pi f$
- $\varphi$ : fase inicial
- Velocidade:  $v(t) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi)$
- Aceleração:  $a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x(t)$

## 60 Oscilador Harmônico

- Sistema massa-mola:

$$F = -kx \Rightarrow m\ddot{x} = -kx$$

- Solução: MHS com:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

## 61 Pêndulo Simples

- Para pequenos ângulos ( $\theta < 10^\circ$ ), o movimento é aproximadamente harmônico:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

- Onde  $L$  é o comprimento e  $g$  a aceleração da gravidade.

## 62 Classificação das Ondas

- **Quanto à natureza:**
  - Mecânicas (necessitam meio): som, ondas em corda.
  - Eletromagnéticas (propagam no vácuo): luz, micro-ondas.
- **Quanto à direção da vibração:**
  - Transversais: vibração  $\perp$  propagação (ex: luz).
  - Longitudinais: vibração  $\parallel$  propagação (ex: som).

## 63 Velocidade de propagação de uma onda unidimensional

$$v = \lambda f$$

Onde:

- $\lambda$  é o comprimento de onda.
- $f$  é a frequência.

## 64 Ondas Periódicas

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ : número de onda
- $\omega = 2\pi f$ : frequência angular

## 65 Reflexão e refração de um pulso numa corda

- Reflexão em extremidade fixa: inversão de fase.
- Reflexão em extremidade livre: sem inversão.
- Refração: mudança de meio altera velocidade e comprimento de onda.

## 66 Frente de onda

- Superfície formada por pontos que vibram em fase.
- Representa a forma da propagação (plana, esférica, etc).

## 67 Fenômenos Ondulatórios

### 67.1 Reflexão

- Onda retorna ao encontrar um obstáculo.
- Lei da reflexão: ângulo de incidência = ângulo de reflexão.

### 67.2 Refração

- Mudança de direção ao passar de um meio para outro com velocidade diferente.
- A frequência permanece constante.

### 67.3 Difração

- Capacidade de contornar obstáculos e atravessar fendas.
- Mais evidente quando  $\lambda \sim$  dimensão da fenda.

#### 67.3.1 Dispersão em uma Rede de Difração

#### 67.3.2 Equação da Rede de Difração

A condição para os máximos de interferência é dada por:

$$d \sin \theta = m\lambda$$

Onde:

- $d$ : espaçamento entre as fendas (passo da rede)
- $\theta$ : ângulo de difração
- $m$ : ordem do máximo (inteiro)
- $\lambda$ : comprimento de onda da luz

#### 67.3.3 Dispersão Angular

A dispersão angular  $D$  é definida como a variação do ângulo de difração com o comprimento de onda:

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}$$

- A dispersão aumenta com a ordem  $m$
- A dispersão é maior para redes com menor espaçamento  $d$  (mais linhas por mm)
- Aumenta com o ângulo  $\theta$ , pois  $\cos \theta$  diminui

### 67.4 Polarização

- Ocorre apenas com ondas transversais.
- Restrição da direção de oscilação.

### 67.5 Superposição

- Ondas que se encontram somam-se ponto a ponto.
- Pode ser construtiva (reforço) ou destrutiva (cancelamento).

### 67.6 Ondas estacionárias

- Resultam da superposição de duas ondas idênticas que se propagam em sentidos opostos.
- Formam nós (amplitude nula) e ventres (amplitude máxima).

### 67.7 Interferência de ondas bidimensionais

- Padrões de interferência gerados por duas fontes coerentes.
- Franja de interferência depende da diferença de caminho óptico:

$$\Delta s = n\lambda \quad (\text{interferência construtiva})$$

$$\Delta s = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{interferência destrutiva})$$

## 68 Condições para Interferência em Filmes Finos (Incidência Normal)

Quando a luz incide perpendicularmente a um filme fino de espessura  $d$  e índice de refração  $n$ , a diferença de caminho óptico entre os dois feixes refletidos é:

$$\Delta = 2nd$$

A condição de interferência depende da ocorrência (ou não) de inversão de fase ao refletir nas interfaces.

### Interferência Construtiva

- Com inversão de fase em uma das interfaces:

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

- Sem inversão de fase (ou inversão em ambas):

$$2nd = m\lambda$$

### Interferência Destrutiva

- Com inversão de fase em uma das interfaces:

$$2nd = m\lambda$$

- Sem inversão de fase (ou inversão em ambas):

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

Onde:

- $n$  é o índice de refração do filme;
- $d$  é a espessura do filme;
- $\lambda$  é o comprimento de onda da luz no ar;
- $m \in \mathbb{Z}$  é a ordem da interferência.

## 69 Acústica: Natureza e características do som

### 70 Natureza do Som

- O som é uma **onda mecânica longitudinal** que se propaga em meios materiais (sólidos, líquidos e gases).
- É gerado por um corpo em vibração e necessita de um meio material para se propagar (não se propaga no vácuo).

- A propagação ocorre devido à compressão e rarefação das partículas do meio.
- A velocidade do som depende do meio e da sua temperatura. No ar,  $a \approx 340 \text{ m/s}$  (a  $20^\circ\text{C}$ ).

## 71 Características Físicas do Som

- **Frequência** ( $f$ ): número de vibrações por segundo. Está relacionada à altura do som (grave ou agudo).

– Sons audíveis:  $20 \text{ Hz} \leq f \leq 20\,000 \text{ Hz}$

– Infrassons:  $f < 20 \text{ Hz}$     Ultra-ssons:  $f > 20\,000 \text{ Hz}$

- **Intensidade** ( $I$ ): quantidade de energia transportada pela onda sonora por unidade de área. Relaciona-se com o volume (forte ou fraco).

$$I = \frac{P}{A}$$

Onde  $P$  é a potência da fonte sonora e  $A$  é a área.

- **Nível Sonoro** ( $\beta$ ): medido em decibéis (dB).

$$\beta = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Onde  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  é a intensidade de referência.

- **Timbre**: característica que permite distinguir sons de mesma frequência e intensidade produzidos por fontes diferentes. Está relacionado com a forma da onda sonora e os harmônicos presentes.
- **Velocidade do som** ( $v$ ): depende da densidade e da rigidez do meio. É

maior em sólidos, intermediária em líquidos e menor em gases.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{em sólidos})$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\text{em gases ideais})$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\rho$  é a densidade,  $\gamma$  é o coeficiente adiabático,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura e  $M$  a massa molar.

## 72 Fenômenos Acústicos

- **Reflexão do som**: retorno do som ao encontrar obstáculos (eco).
- **Refração**: mudança de direção ao passar de um meio para outro com velocidade distinta.
- **Difração**: contorno de obstáculos e passagem por frestas.
- **Interferência**: superposição de ondas sonoras, gerando reforço ou cancelamento.
- **Ressonância**: amplificação das vibrações quando a frequência natural de um sistema coincide com a frequência da fonte sonora.
- **Efeito Doppler**: variação aparente da frequência sonora devido ao movimento relativo entre fonte e observador.

## 73 Aplicações e Limites da Audição Humana

- A audição humana é sensível a frequências entre aproximadamente 20 Hz e 20 kHz.

- Sons com intensidade acima de 120 dB podem causar dor (limiar da dor).
- Utilizações práticas: ultrassonografia, sonar, acústica de ambientes, isolamento acústico.

## 74 Óptica e Ondulatória

## 75 Óptica Geométrica

### 75.1 Propagação da Luz

- A luz propaga-se em linha reta em meios homogêneos e transparentes.
- Três princípios fundamentais: propagação retilínea, reversibilidade e independência dos raios de luz.

### 75.2 Espelhos Planos

- A imagem formada é virtual, direita e do mesmo tamanho do objeto.
- Propriedades: simetria em relação ao plano do espelho, conservação do ângulo de incidência.

### 75.3 Refração da Luz e Índice de Refração

- Refração: mudança de direção da luz ao passar de um meio para outro.
- Lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Índice de refração:

$$n = \frac{c}{v}$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  no meio.

### 75.4 Reflexão Total

- Ocorre quando a luz passa de um meio mais refringente para um menos refringente com ângulo maior que o ângulo crítico.
- Aplicação: fibras ópticas.
- $n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(90^\circ)$

### 75.5 Lâminas e Prismas

- Lâminas planas provocam apenas deslocamento lateral do feixe de luz.
- Prismas desviam e dispersam a luz branca em seus componentes (dispersão).

### 75.6 Dispersão da Luz

- A velocidade da luz depende do comprimento de onda no meio material.
- Cada cor sofre um desvio diferente ao atravessar prismas, formando o espectro visível.

### 75.7 Lentes Esféricas

- Podem ser convergentes ( $f > 0$ ) ou divergentes.
- Equação de Gauss para lentes delgadas:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Onde  $f$  é a distância focal,  $p$  a distância do objeto e  $p'$  da imagem.

- $f = \frac{R}{2}$
- Aumento Linear:  $A = \frac{i}{o} = -\frac{p}{p'}$
- côncavo: convergente (imagem: Real ou virtual)
- convexo: divergente (somente virtual)

- Espelhos convexos ampliam o campo de visão e diminuem a imagem.

## 76 Equação dos Fabricantes de Lentes

A equação dos fabricantes de lentes relaciona o índice de refração da lente, os raios de curvatura das faces e a vergência (potência) da lente.

### 76.1 Fórmula:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Onde:

- $f$ : distância focal da lente (em metros)
- $n$ : índice de refração do material da lente
- $R_1$ : raio de curvatura da face anterior
- $R_2$ : raio de curvatura da face posterior

### Observações sobre os sinais:

- $R > 0$ : centro de curvatura à direita da superfície
- $R < 0$ : centro de curvatura à esquerda da superfície
- Para lentes convergentes (como biconvexas),  $f > 0$
- Para lentes divergentes (como biconcavas),  $f < 0$

### 76.2 Vergência (potência da lente):

$$\mathcal{P} = \frac{1}{f} \quad (\text{em dioptrias, D})$$

### 76.3 Associação de Lentes Delgadas

- Potência de associação:

$$P_{\text{eq}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Onde  $P = \frac{1}{f}$  (com  $f$  em metros e  $P$  em dioptrias).

### 76.4 Formação de Imagens

- Utiliza-se construção geométrica com raios notáveis.
- A natureza da imagem (real ou virtual, direita ou invertida, aumentada ou reduzida) depende da posição do objeto em relação ao foco e ao centro óptico.

### 76.5 Instrumentos Ópticos

- **Lupa**: lente convergente que aumenta o tamanho angular do objeto observado.
- **Microscópio simples**: uma única lente convergente usada como lupa.
- **Luneta astronômica**: utiliza duas lentes — objetiva (imagem real e invertida) e ocular (amplia a imagem).

## 77 Óptica Física e Ondulatória

### 77.1 Natureza da Luz

- A luz possui natureza dual: comporta-se como onda (fenômenos de interferência, difração e polarização) e como partícula (efeito fotoelétrico).
- Como onda, é uma onda eletromagnética transversal.



### 77.2 Fenômenos de Interferência

- Superposição de ondas que resulta em reforço (interferência construtiva) ou cancelamento (destrutiva).

### 77.3 Experiência de Young

- Demonstra a natureza ondulatória da luz.
- Fenda dupla produz padrões de interferência em um anteparo.
- Distância entre franjas:

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz,  $L$  a distância até o anteparo e  $d$  a distância entre fendas.

### 77.4 Polarização da Luz

- Luz natural é não polarizada (os vetores do campo elétrico vibram em todos os planos perpendiculares à direção de propagação).
- Polarização restringe a vibração da luz a um plano.
- Evidência da natureza transversal da luz.

## 78 Síntese

- A óptica estuda tanto a propagação da luz (geométrica) quanto seus aspectos ondulatórios (física).
- Instrumentos ópticos e fenômenos ondulatórios da luz são essenciais para tecnologias modernas (óptica oftálmica, telescópios, interferômetros, fibras ópticas).

## Velocidade da Luz/Constantes Fundamentais

A velocidade da luz no vácuo é dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Onde:

- $c$ : velocidade da luz no vácuo
- $\varepsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo
- $\mu_0$ : permeabilidade magnética do vácuo

### 78.1 Valores das constantes:

$\varepsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  (farads por metro)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  (newtons por ampère ao quadrado)

**Resultado:**

$$c \approx 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$


---

## 79 Eletricidade e Magnetismo

### 80 Eletrostática

#### 80.1 Eletrização

- Métodos: atrito, contato e indução.
- Cargas elétricas: positivas e negativas, quantizadas e conservadas.

#### 80.2 Lei de Coulomb

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

- Força de interação entre duas cargas puntiformes no vácuo.

### 80.3 Potencial Elétrico

O potencial elétrico gerado por uma distribuição contínua de carga é dado por:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

Onde:

- $\vec{r}$ : ponto onde se calcula o potencial,
- $\vec{r}'$ : ponto onde está o elemento de carga  $dq$ ,
- $\epsilon_0$ : permissividade do vácuo.

## 81 Tipos de Distribuição

### 81.1 Distribuição Linear de Carga (fio)

Densidade linear:  $\lambda = \frac{dq}{dl}$

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda dl'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

### 81.2 Distribuição Superficial de Carga (superfície)

Densidade superficial:  $\sigma = \frac{dq}{dA}$

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma dA'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

### 81.3 Distribuição Volumétrica de Carga (volume)

Densidade volumétrica:  $\rho = \frac{dq}{dV}$

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

## 82 Observações

- O potencial elétrico é uma grandeza escalar.
- A simetria do sistema pode facilitar os cálculos.
- Para pontos distantes, pode-se usar aproximações (ex: dipolo).

### 82.1 Campo de Forças Coulombianas e Campo Elétrico

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

- Campo elétrico gerado por uma carga pontual.
- $\vec{E} = -\nabla V$

### 82.2 Linhas de Força

- Representação gráfica da direção e sentido do campo elétrico.
- Saem de cargas positivas e entram em cargas negativas.

### 82.3 Trabalho e Potencial Eletrostático

- Potencial elétrico:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

- Energia potencial elétrica:

$$U = qV$$

- Trabalho da força elétrica:

$$W = -\Delta U$$

## 83 Corrente Contínua e Resistência

### 83.1 Corrente Elétrica

- Corrente:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

- Sentido convencional: do positivo para o negativo.

### 83.2 Resistência Elétrica e Lei de Ohm

$$U = RI$$

$$P = Ri^2 = R \cdot \left(\frac{U}{R}\right)^2 = \frac{U^2}{R} = U \cdot i$$

### Densidade de Carga Elétrica

A densidade de carga descreve como a carga elétrica ( $Q$ ) está distribuída no espaço. Existem três tipos principais:

#### 1. Densidade Linear de Carga

Utilizada quando a carga está distribuída ao longo de uma linha (como em fios):

$$\lambda = \frac{dQ}{dl}$$

- $\lambda$ : densidade linear de carga (C/m)
- $dQ$ : quantidade infinitesimal de carga
- $dl$ : elemento infinitesimal de comprimento

#### 2. Densidade Superficial de Carga

Usada quando a carga está distribuída sobre uma superfície (como em chapas condutoras):

$$\sigma = \frac{dQ}{dA}$$

- $\sigma$ : densidade superficial de carga (C/m<sup>2</sup>)
- $dA$ : elemento de área

#### 3. Densidade Volumétrica de Carga

Usada quando a carga está distribuída em todo um volume:

$$\rho = \frac{dQ}{dV}$$

- $\rho$ : densidade volumétrica de carga (C/m<sup>3</sup>)
- $dV$ : elemento de volume

### 83.3 Campo Elétrico: Placa Infinita

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{x}$$

### 83.4 Associação de Resistores

- Série:  $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$
- Paralelo:  $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$

### 83.5 Resistividade e Temperatura

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad \rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

### 83.6 Efeito Joule

$$Q = RI^2t$$

### 83.7 Geradores e Receptores

- Geradores fornecem energia elétrica (ex: baterias).
- Receptores consomem energia elétrica (ex: motores).
- Equação geral do gerador:

$$U = \mathcal{E} - rI$$

- Para receptores:

$$U = \mathcal{E} + rI$$

### 83.8 Pilhas em Série e Paralelo

- Série:  $\mathcal{E}_{eq} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots$
- Paralelo: mesma  $\mathcal{E}$ , menor resistência interna.

### 83.9 Leis de Kirchhoff

- Lei das malhas (tensões): soma das ddps em um circuito fechado é zero.
- Lei dos nós (correntes): soma das correntes que entram num nó é igual à soma das que saem.

### 83.10 Instrumentos de Medida

- **Amperímetro:** mede corrente — ligado em série.
- **Voltímetro:** mede tensão — ligado em paralelo.
- **Multímetro:** mede corrente, tensão e resistência.
- **Ponte de Wheatstone:** circuito para medir resistências desconhecidas com alta precisão.

## 84 Magnetismo e Indução

### 84.1 Campo Magnético Gerado por Corrente Elétrica

- Fio retilíneo:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{eng}, \rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- Espira circular:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

- Solenóide (interior):

$$B = \mu_0 n I$$

Onde  $n$  é o número de espiras por unidade de comprimento.

## 85 Campo Magnético de uma Onda Eletromagnética

Uma onda eletromagnética é composta por um campo elétrico  $\vec{E}$  e um campo magnético  $\vec{B}$  que oscilam perpendicularmente entre si e à direção de propagação.

### 85.1 Representação vetorial

Em uma onda plana no vácuo propagando-se na direção  $x$ , temos:

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{y}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{z}$$

- $\vec{E}$ : campo elétrico (direção  $\hat{y}$ )
- $\vec{B}$ : campo magnético (direção  $\hat{z}$ )
- Propagação: direção  $\hat{x}$
- $E_0$  e  $B_0$ : amplitudes dos campos
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ : número de onda
- $\omega = 2\pi f$ : frequência angular

### Relação entre os campos

Como a onda se propaga no vácuo, temos:

$$\frac{E_0}{B_0} = c \Rightarrow B_0 = \frac{E_0}{c}$$

- $c$ : velocidade da luz no vácuo ( $c \approx 3 \times 10^8$  m/s)

### Direções ortogonais

A orientação dos vetores segue a regra da mão direita:

$$\vec{E} \times \vec{B} = \text{direção da propagação da onda}$$

## Energia transportada pela onda

A densidade de energia média associada aos campos é:

$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$$

E o vetor de Poynting (densidade de fluxo de energia) (Energia/Área.tempo):

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

## 85.2 Força Magnética e Força Elétrica

- Força de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

- Regra/Mão Direita:  $F = |q|vB \sin \theta$

Se a partícula tem massa  $m$  e entra perpendicularmente no campo magnético:

- Raio da trajetória:

$$R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$$

- Período do movimento:

$$T = \frac{2\pi m}{|q| \cdot B}$$

## 85.3 Trabalho realizado pela força magnética

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = 0$$

## 86 Força Magnética sobre um Fio com Corrente

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

$$F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \theta.$$

Regra da Mão Esquerda

## 86.1 Eletroímã

- Solenóide com núcleo ferromagnético, que se magnetiza quando a corrente circula.

## 86.2 Indução Eletromagnética

- Lei de Faraday:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Onde  $\Phi_B = B \cdot A \cdot \cos \theta$  is a magnético flux.

In an enrolamento with N espiras, temos that a força eletromotriz is  $\mathcal{E}$  (cada espira) times N.

## 86.3 Lei de Lenz

- O sentido da corrente induzida é tal que seu campo magnético se opõe à variação do fluxo que a gerou.

## 86.4 Campo Elétrico Induzido

- Um campo elétrico pode ser gerado por variação de campo magnético:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

## 87 Equações de Maxwell com Corrente de Deslocamento

As equações de Maxwell descrevem os campos elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{B}$ ). A quarta equação, conhecida como Lei de Ampère-Maxwell, inclui a **corrente de deslocamento**.

## Forma Diferencial (Leis)

$$\begin{aligned} \text{Gauss (elétrica)} \quad \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \text{Gauss (magnética)} \quad \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \text{Faraday da indução} \quad \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{Ampère-Maxwell} \quad \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

### 87.0.1 Corrente de deslocamento (forma diferencial)

$$\vec{J}_d = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

### 87.1 Forma Integral

$$\begin{aligned} \text{Gauss} \quad \oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} &= \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV \\ \text{Magnetismo} \quad \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \text{Faraday} \quad \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \\ \text{Ampère-Maxwell} \quad \oint_{\partial S} \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \\ &\quad \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$

### 87.2 Corrente de deslocamento (forma integral)

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

### Constantes envolvidas

- $\varepsilon_0$  — permissividade elétrica do vácuo
- $\mu_0$  — permeabilidade magnética do vácuo
- $\rho$  — densidade de carga elétrica
- $\vec{J}$  — densidade de corrente elétrica
- $\vec{J}_d$  — densidade de corrente de deslocamento

## 88 Física Moderna

### 89 Radiação do Corpo Negro e Constante de Planck

- Um corpo negro ideal absorve toda radiação incidente.
- A distribuição espectral da energia emitida depende da temperatura.
- Planck introduziu a quantização da energia:

$$E = h\nu$$

onde  $h \approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  é a constante de Planck.

#### Lei de Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma AT^4,$$

onde  $P$  é a potência total (W),  $A$  a área ( $\text{m}^2$ ),  $T$  a temperatura (K) e

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}.$$

#### Lei de Wien:

$$\lambda_{\max} T = b,$$

onde  $\lambda_{\max}$  é o comprimento de onda de máxima emissão (m),  $T$  a temperatura (K) e

$$b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}.$$

## 90 Efeito Fotoelétrico

- A luz incide sobre um metal e ejeta elétrons.
- Einstein explicou usando fótons com energia  $E = h\nu$ .

- Equação do efeito fotoelétrico:

$$K_{\text{máx}} = h\nu - \phi$$

onde  $\phi$  é a função trabalho do material.

## 91 Efeito Compton

- Espalhamento de fótons por elétrons livres.
- Mostra o comportamento corpuscular da radiação:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

## 92 Dualidade Onda-Partícula

- Toda partícula possui propriedades ondulatórias:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

(relação de De Broglie).

- Confirmada por experimentos de difração de elétrons.

## 93 Trabalho sobre uma carga elétrica

Quando uma carga elétrica  $q$  se desloca em um campo elétrico, o **trabalho** realizado pelo campo é dado por:

$$W = q \cdot \Delta V$$

Onde:

- $W$ : trabalho (em joules)
- $q$ : carga elétrica (em coulombs)
- $\Delta V$ : diferença de potencial elétrico (em volts)

**Observações:**

- Se  $\Delta V > 0$ , o campo realiza trabalho negativo (carga contra o campo).
- Se  $\Delta V < 0$ , o campo realiza trabalho positivo (carga a favor do campo).
- O trabalho depende do potencial inicial e final, não do caminho percorrido (campo conservativo).

## 94 Teoria da Relatividade Restrita

### 94.1 Postulados

1. As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.
2. A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores inerciais.

### 94.2 Consequências

- Dilatação do tempo:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Contração do comprimento:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

### 94.3 Energia Relativística

- Energia total:

$$E = \gamma mc^2 \quad \text{com } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Energia em repouso:

$$E_0 = mc^2$$

- Relação energia-momento:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

## 95 Modelos Atômicos

### 95.1 Rutherford

- Descoberta do núcleo atômico.
- Átomo com núcleo positivo e elétrons ao redor.
- Instável segundo a eletrodinâmica clássica.

### 95.2 Bohr

- Níveis de energia quantizados:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

- Transições entre níveis explicam linhas espectrais do hidrogênio.
- As órbitas estáveis(estacionárias) ao redor do núcleo sem emitir radiação.
- Mudar de órbita  $\rightarrow$  **Absorção** ou **Emissão**.

### 95.3 Modelo Atômico de Bohr

No modelo de Bohr, a luz é emitida quando um elétron salta de um nível mais externo ( $n_i$ ) para um mais interno ( $n_f$ ), liberando um fóton com energia específica:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

A fórmula de Rydberg permite calcular o comprimento de onda emitido:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Onde:

- $\lambda$  é o comprimento de onda (m),
- $R$  é a constante de Rydberg ( $R \approx 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ),
- $n_i$  é o nível inicial (mais energético),
- $n_f$  é o nível final (menos energético).

### 95.3.1 Séries Espectrais do Hidrogênio

- **Lyman**: região ultravioleta (UV), com transições para  $n_f = 1$  e  $n_i > 1$ .
- **Balmer**: região visível, com transições para  $n_f = 2$  e  $n_i > 2$ .
- **Paschen**: região do infravermelho, com transições para  $n_f = 3$  e  $n_i > 3$ .
- **Brackett**: região do infravermelho, com transições para  $n_f = 4$  e  $n_i > 4$ .
- **Pfund**: região do infravermelho, com transições para  $n_f = 5$  e  $n_i > 5$ .

### 95.3.2 Observações

- A série de Balmer é a única cujas linhas estão no espectro visível.
- As outras séries estão em faixas não visíveis (UV e infravermelho).
- Cada transição corresponde a uma linha espectral com comprimento de onda específico.

## 96 Princípio da Incerteza de Heisenberg

- É impossível conhecer simultaneamente posição e momento com precisão arbitrária:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\text{onde } \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

## 97 Radioatividade

- Decaimento espontâneo de núcleos instáveis.
- Três tipos principais:
  - **Alfa** ( $\alpha$ ): emissão de núcleo de hélio.



– **Beta** ( $\beta^-$ ): emissão de elétron (ou pósitron em  $\beta^+$ ).

– **Gama** ( $\gamma$ ): radiação eletromagnética de alta energia.

- Lei do decaimento:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

- Meia-vida:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

## 98 Energia Nuclear

- Baseada na equivalência massa-energia de Einstein.
- Fissão nuclear: divisão de núcleos pesados (ex:  $^{235}\text{U}$ ).
- Fusão nuclear: união de núcleos leves (ex: deuterônio + trítio).
- Liberação de energia:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

- Aplicações: reatores nucleares, armas, medicina.