

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 Forças no Movimento Circular

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

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

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

16 Impulso e Quantidade de Movimento

Quantidade de movimento:

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

Impulso:

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

Teorema do impulso:

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

17 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.

17.1 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_{final} : velocidade relativa dos corpos após a colisão
- v_{inicial} : velocidade relativa dos corpos antes da colisão

17.2 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**.

18 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)

18.1 2. Momento de inércia para corpos contínuos

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

18.2 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):

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

18.3 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 :

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

19 Referenciais Inerciais e Não Inerciais

Referencial Inercial

Definição: Um referencial é dito **inercial**¹ se nele a **Primeira Lei de Newton** é válida:

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.

19.1 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,

¹Um referencial em repouso relativo às estrelas fixas distantes.

Terra (com rotação), elevador em aceleração.

- A terra não é uma referencial inercial:

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

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

Observação:

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

19.2 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

20 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:

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

21 Força de Atrito

Atrito estático:

$$f_e \leq \mu_e N$$

Atrito cinético:

$$f_c = \mu_c N$$

22 9. Energia Potencial

Potencial gravitacional:

$$E_p = mgh$$

Potencial elástica:

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

23 Conservação da Energia Mecânica

Em sistemas conservativos:

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

24 Lei de Hooke

Força elástica:

$$F = -kx$$

24.1 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:

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

24.2 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:*

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

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

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

25 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

25.1 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

26 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:

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

27 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.

28 Conceito de Pressão

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

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

29 Densidade

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

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

30 Pressão de uma Coluna de Líquido

$$P = \rho gh$$

Onde: ρ é a densidade, g a gravidade, h a profundidade.

31 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

32 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
- ρ : densidade
- v : velocidade
- h : altura

33 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.

34 Pressão Atmosférica

Pressão exercida pelo ar ao nível do mar:

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

35 Experiência de Torricelli

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

36 Lei de Stevin

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

Válida para qualquer ponto de um mesmo fluido em equilíbrio.

37 Vasos Comunicantes

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

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

38 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

38.1 Princípio da Conservação

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

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

38.2 Aplicações

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

39 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.

40 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 .

41 Escalas termométricas

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

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

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

42 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: $\Delta V_{ap} = V_0(\gamma_{líq} - \beta_{rec})\Delta T$

43 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.

44 Lei geral dos gases perfeitos

$$PV = nRT$$

Onde:

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

45 Equação de Clapeyron

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

46 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 gás monoatômico: $\gamma = \frac{5}{3}$
 - \rightarrow gás diatômico: $\gamma = \frac{7}{5}$

$$\rightarrow C_p = C_v + R$$

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

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

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

47 Princípio da conservação da energia

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

48 Mudanças de estado físico

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

49 Quantidade de calor

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

50 Propagação do calor

50.1 Condução térmica - Lei de Fourier da Condução de Calor

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

50.2 Convecção

- Transferência por movimentação de massa em fluidos.

50.3 Radiação

$$P = \sigma AT^4$$

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

51 Princípios da Termodinâmica

51.1 Primeiro Princípio

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

51.2 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)

$$S = k_B \ln \Omega$$

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

Unidade

Joules por kelvin (J/K)

Exemplos onde a entropia aumenta

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

51.3 Terceiro Princípio

- A entropia de um cristal perfeito é zero no zero absoluto (0 K).

52 Definição

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

53 Rendimento

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

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

54 Rendimento da Máquina de Carnot

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

55 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 : $Q_q = Q_f + W$

Coeficiente 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)

56 Equivalente mecânico do calor

- Experiência de Joule:

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

57 Movimento Vibratório e Ondulatório

57.1 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).

58 Movimento Harmônico Simples (MHS)

- Posição em função do tempo:

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

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

59 Oscilador Harmônico

- Sistema massa-mola:

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

- Solução: MHS com:

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

60 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.

61 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).

62 Velocidade de propagação de uma onda unidimensional

$$v = \lambda f$$

Onde:

- λ é o comprimento de onda.
- f é a frequência.

63 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

64 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.

65 Frente de onda

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

66 Fenômenos Ondulatórios

66.1 Reflexão

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

66.2 Refração

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

66.3 Difração

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

66.3.1 Dispersão em uma Rede de Difração

66.3.2 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)
- θ : ângulo de difração
- m : ordem do máximo (inteiro)

- λ : comprimento de onda da luz

66.3.3 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 θ , pois $\cos \theta$ diminui

66.4 Polarização

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

66.5 Superposição

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

66.6 Ondas estacionárias

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

66.7 Interferência de ondas bidimensionais

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

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

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

67 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;
 - λ é o comprimento de onda da luz no ar;
 - $m \in \mathbb{Z}$ é a ordem da interferência.
-

68 Acústica: Natureza e características do som

69 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°C).

70 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 (β):** 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, ρ é a densidade, γ é o coeficiente adiabático, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura e M a massa molar.

71 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.

72 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.

73 Óptica e Ondulatória

74 Óptica Geométrica

74.1 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.

74.2 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.

74.3 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.

74.4 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.
- $n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(90^\circ)$

74.5 Lâminas e Prismas

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

74.6 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.

74.7 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.

75 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.

75.1 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), $f < 0$

75.2 Vergência (potência da lente):

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

75.3 Associação de Lentes Delgadas

- Potência de associação:

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

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

75.4 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.

75.5 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).

76 Óptica Física e Ondulatória

76.1 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.

76.2 Fenômenos de Interferência

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

76.3 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 λ é o comprimento de onda da luz, L a distância até o anteparo e d a distância entre fendas.

76.4 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.

77 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
- ε_0 : permissividade elétrica do vácuo
- μ_0 : permeabilidade magnética do vácuo

77.1 Valores das constantes:

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

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

Resultado:

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

78 Eletricidade e Magnetismo

79 Eletrostática

79.1 Eletrização

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

79.2 Lei de Coulomb

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

- Força de interação entre duas cargas puntiformes no vácuo.

79.3 Potencial Elétrico

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

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int \frac{dq}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

Onde:

- \vec{r} : ponto onde se calcula o potencial,
- \vec{r}' : ponto onde está o elemento de carga dq ,
- ε_0 : permissividade do vácuo.

80 Tipos de Distribuição

80.1 Distribuição Linear de Carga (fio)

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

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

80.2 Distribuição Superficial de Carga (superfície)

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

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

80.3 Distribuição Volumétrica de Carga (volume)

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

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

81 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).

81.1 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.
- $\vec{E} = -\nabla V$

81.2 Linhas de Força

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

81.3 Trabalho e Potencial Eletrostático

- Potencial elétrico:

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

- Energia potencial elétrica:

$$U = qV$$

- Trabalho da força elétrica:

$$W = -\Delta U$$

82 Corrente Contínua e Resistência

82.1 Corrente Elétrica

- Corrente:

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

- Sentido convencional: do positivo para o negativo.

82.2 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):

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

- λ : 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):

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

- σ : densidade superficial de carga (C/m²)
- dA : elemento de área

3. Densidade Volumétrica de Carga

Usada quando a carga está distribuída em todo um volume:

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

- ρ : densidade volumétrica de carga (C/m³)
- dV : elemento de volume

82.3 Campo Elétrico: Placa Infinita

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

82.4 Associação de Resistores

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

82.5 Resistividade e Temperatura

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

82.6 Efeito Joule

$$Q = RI^2t$$

82.7 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:

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

82.8 Pilhas em Série e Paralelo

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

82.9 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.

82.10 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.

83 Magnetismo e Indução

83.1 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.

84 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.

84.1 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):

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

84.2 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:

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

84.3 Trabalho realizado pela força magnética

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

85 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

85.1 Eletroímã

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

85.2 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.

85.3 Lei de Lenz

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

85.4 Campo Elétrico Induzido

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

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

86 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)

$$\text{Gauss (elétrica)} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{Gauss (magnética)} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\text{Faraday da indução} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{Ampère-Maxwell} \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

86.0.1 Corrente de deslocamento (forma diferencial)

$$\vec{J}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

86.1 Forma Integral

$$\text{Gauss} \quad \oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

$$\text{Magnetismo} \quad \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\text{Faraday} \quad \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\text{Ampère-Maxwell} \quad \oint_{\partial S} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

86.2 Corrente de deslocamento (forma integral)

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

Constantes envolvidas

- ε_0 — permissividade elétrica do vácuo
- μ_0 — permeabilidade magnética do vácuo
- ρ — densidade de carga elétrica
- \vec{J} — densidade de corrente elétrica
- \vec{J}_d — densidade de corrente de deslocamento

87 Física Moderna

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

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

89 Efeito Fotoelétrico

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

$$K_{\max} = h\nu - \phi$$

onde ϕ é a função trabalho do material.

90 Efeito Compton

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

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

91 Dualidade Onda-Partícula

- Toda partícula possui propriedades ondulatórias:

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

(relação de De Broglie).

- Confirmada por experimentos de difração de elétrons.

92 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)
- ΔV : 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).

93 Teoria da Relatividade Restrita

93.1 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.

93.2 Consequências

- Dilatação do tempo:

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

- Contração do comprimento:

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

93.3 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:

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

94 Modelos Atômicos

94.1 Rutherford

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

94.2 Bohr

- Níveis de energia quantizados:

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

- Transições entre níveis explicam linhas espectrais do hidrogênio.

95 Princípio da Incerteza de Heisenberg

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

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

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

96 Radioatividade

- Decaimento espontâneo de núcleos instáveis.
- Três tipos principais:
 - **Alfa** (α): emissão de núcleo de hélio.
 - **Beta** (β^-): emissão de elétron (ou pósitron em β^+).
 - **Gama** (γ): radiação eletromagnética de alta energia.

- Lei do decaimento:

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

- Meia-vida:

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

97 Energia Nuclear

- Baseada na equivalência massa-energia de Einstein.
- Fissão nuclear: divisão de núcleos pesados (ex: ^{235}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.