



conecte
L I V E

NEWTON VILLAS BÔAS
RICARDO HELOU DOCA
RONALDO FOGO

TÓPICOS DE

Física

2

PARTE 1



Editora
Saraiva

plurall



conecte
L I V E

TÓPICOS DE

Física

NEWTON VILLAS BÔAS

Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo (USP).
Professor de Física na rede particular de ensino.

RICARDO HELOU DOCA

Engenheiro eletricista formado pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI-SP).
Professor de Física na rede particular de ensino.

RONALDO FOGO

Licenciado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
Engenheiro metalurgista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Coordenador das Turmas Olímpicas de Física do Colégio Objetivo.
Vice-Presidente da IJSO (*International Junior Science Olympiad*).

Direção geral: Guilherme Luz

Direção editorial: Luiz Tonolli e Renata Mascarenhas

Gestão de projeto editorial: Viviane Carpegiani

Gestão e coordenação de área: Julio Cesar Augustus de Paula Santos e Juliana Grassmann dos Santos

Edição: Andrezza Cacione, Lucas James Faga, Marcela Muniz Gontijo, Maria Ângela de Camargo e Mateus Carneiro Ribeiro Alves

Gerência de produção editorial: Ricardo de Gan Braga

Planejamento e controle de produção: Paula Godo, Roseli Said e Marcos Toledo

Revisão: Hélia de Jesus Gonsaga (ger.), Kátia Scalf Marques (coord.), Rosângela Muricy (coord.), Ana Paula C. Malfa, Arali Gomes, Brenda T. M. Moraes, Gabriela M. Andrade, Heloisa Schiavo, Maura Loria, Patricia Cordeiro, Raquel A. Taveira, Sueli Bossi, Amanda Teixeira Silva e Bárbara de Melo Genereze (estagiárias)

Arte: Daniela Amaral (ger.), André Gomes Vitale (coord.) e Lisandro Paim Cardoso (edição de arte)

Diagramação: Setup

Iconografia: Silvío Kligin (ger.), Roberto Silva (coord.), Roberta Freire (pesquisa iconográfica)

Licenciamento de conteúdos de terceiros: Thiago Fontana (coord.), Flavia Zambon (licenciamento de textos), Erika Ramires, Luciana Pedrosa Bierbauer e Claudia Rodrigues (analistas adm.)

Tratamento de imagem: Cesar Wolf e Fernanda Crevin

Ilustrações: CJT/Zapt, Francisco Vilachã, João Anselmo, Luciano da S. Teixeira e Luis Fernando R. Tucillo

Design: Gláucia Correa Koller (ger.), Erika Yamauchi Asato, Filipe Dias (proj. gráfico) e Adilson Casarotti (capa)

Composição de capa: Segue Pro

Foto de capa: Roman Samborski/Shutterstock, Alex Tihonovs/Shutterstock

Todos os direitos reservados por Saraiva Educação S.A.

Avenida das Nações Unidas, 7221, 1ª andar, Setor A –

Espaço 2 – Pinheiros – SP – CEP 05425-902

SAC 0800 011 7875

www.editorasaraiva.com.br

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Bóas, Newton Villas
Tópicos de física 2 : conecte live / Newton Villas
Bóas, Ricardo Helou Doca, Ronaldo Fogo. -- 3. ed. --
São Paulo : Saraiva, 2018.

Suplementado pelo manual do professor.

Bibliografia.

ISBN 978-85-472-3471-3 (aluno)

ISBN 978-85-472-3472-0 (professor)

1. Física (Ensino médio) I. Doca, Ricardo Helou.
II. Fogo, Ronaldo. III. Título.

18-17163

CDD-530.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino fundamental 530.7

Maria Alice Ferreira – Bibliotecária – CRB-8/7964

2018

Código da obra CL 800855

CAE 628175 (AL) / 628176 (PR)

3ª edição

1ª impressão

Impressão e acabamento

Dedicamos este trabalho ao nosso mestre,
professor Eduardo Figueiredo, de raro conhecimento
e exemplar entusiasmo pela Física.
Obrigado por tantos ensinamentos.

Ao estudante

Tópicos de Física é uma obra viva, em permanente processo de renovação e aprimoramento. Pretendemos nesta edição, mais uma vez, oferecer um material contemporâneo e abrangente, capaz de satisfazer aos cursos de Ensino Médio mais exigentes.

Elaboramos este trabalho com a certeza de proporcionar a você um caminho metódico e bem planejado para um início consistente no aprendizado de Física. Nem por um momento perdemos de vista a necessidade de despertar seu real interesse pela disciplina. Para alcançar esse objetivo, criamos uma obra rica em situações contextuais, baseadas em ocorrências do dia a dia. Uma variedade de exemplos, ilustrações e outros recursos foi inserida com o intuito de instigar sua curiosidade e seu desejo de saber mais e se aprofundar nos temas abordados.

Optamos pela distribuição clássica dos conteúdos e dividimos o material em três volumes:

Volume 1: Mecânica;

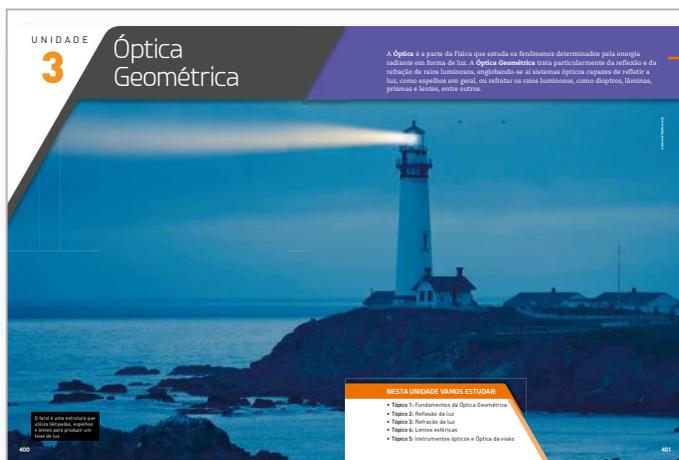
Volume 2: Termologia, Ondulatória e Óptica Geométrica;

Volume 3: Eletricidade, Física moderna e Análise dimensional.

Cada volume compõe-se de *unidades*, que equivalem aos grandes setores de interesse da Física. Estas, por sua vez, são constituídas de *tópicos*, que abordam determinado assunto teórico e operacionalmente. Em cada tópico a matéria está dividida em *blocos*, que agregam itens relacionados entre si. Nos blocos a compreensão da teoria é favorecida pela inclusão de um grande número de exemplos práticos, ilustrações e fotos legendadas.

Esperamos que, ao utilizar este material, você amplie sua percepção de mundo e torne mais flexível seu raciocínio formal. Desejamos também que você adquira uma consistente visão dessa fascinante disciplina, o que, certamente, contribuirá para seu ingresso nas mais concorridas instituições de Ensino Superior do país.

Conheça seu livro



Unidade

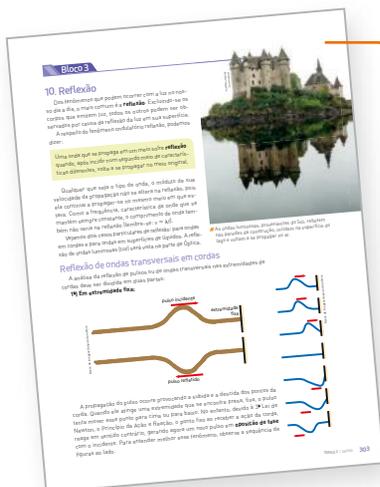
Na *Abertura de unidade*, é feita uma breve apresentação da área da Física que será estudada e da maneira como a unidade foi estruturada, indicando-se os tópicos que a compõem.

Tópico

A *Abertura de tópico* traz uma breve introdução do que será trabalho ao longo do tópico.

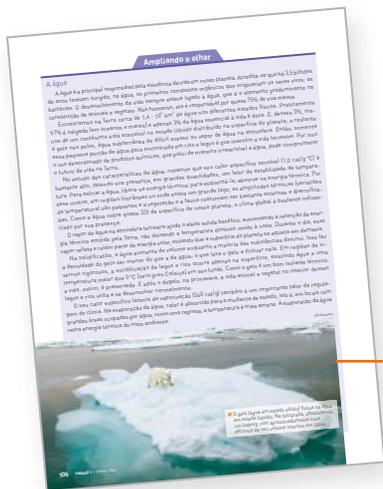
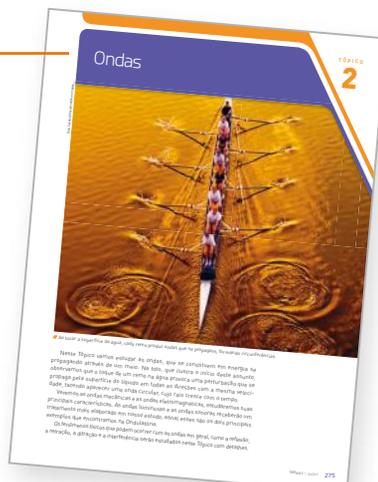
Bloco

Cada tópico está dividido em *blocos*, que agregam itens relacionados entre si.



Faça você mesmo

A seção *Faça você mesmo* traz atividades experimentais ou de verificação simples que podem auxiliá-lo na compreensão de fenômenos e conceitos importantes da Física.



Ampliando o olhar

Nesta seção, você encontra textos complementares cuja finalidade é propor outras referências fenomenológicas, históricas e tecnológicas, além de curiosidades e justificativas que podem contribuir para a construção do conhecimento da Física e de sua relação com outros componentes curriculares.

Efeitos da refração na atmosfera

Posição aparente de astros

Os observadores em uma região do interior visualizam desde o mar uma posição que simulamos de uma imagem de refração...

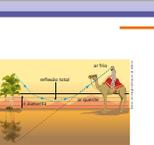


Essa observação é feita à noite, em um céu sem nuvens, e a luz da estrela é desviada para cima...



Miragens atmosféricas

Em regiões desérticas em dias quentes é comum observar-se a imagem invertida de um objeto...



Por isso, não se trata de uma imagem física, decorrente de alguma reflexão, mas sim de uma imagem virtual...



Também em regiões desérticas à noite pode ser observado, como representado a imagem esquematizada...

Podem ocorrer também miragens superiores. É quando se observa no céu imagens de objetos...



Essas miragens ocorrem devido à inversão da temperatura da atmosfera...

Compreensão, pesquisa e debate

1. O que aconteceria se a gravidade fosse zero? O resultado em sua pesquisa?

2. O que é a velocidade da luz? Como se comporta?

Na seção Intersaberes, você tem acesso a textos que podem ser explorados de maneira integrada com outras disciplinas. É uma oportunidade de complementar e aprofundar o conteúdo do tópico, estabelecer conexões entre diferentes áreas do conhecimento...

Já pensou nisto?

Neste boxe, você encontra imagens fotográficas acompanhadas de títulos instigadores. Esses títulos são propostos quase sempre em forma de perguntas ou simples reflexões, cujo objetivo é motivá-lo a fazer a leitura do conteúdo estabelecendo conexões com situações do cotidiano.



2. Energia interna, trabalho e calor. No contexto da termodinâmica em um gás...

Energia interna. Trabalho e calor. A energia interna de um sistema é a soma da energia cinética...

Equation: u = 3/2 nRT. Observamos que a energia interna (U) de um gás depende da função de uma temperatura absoluta (T)...

Descubra mais

No boxe Descubra mais, você encontra questões que o convidam a pesquisar e a conhecer um pouco mais os assuntos estudados. Com isso, você poderá ampliar a abordagem do texto e descobrir temas correlatos enriquecedores.

Complex box containing a photograph of a person, a diagram of a globe, and several text-based questions related to energy and physics.

Em cada tópico há quatro grupos de exercícios com diferentes níveis de dificuldade, a saber, nível 1, nível 2, nível 3 e Para raciocinar um pouco mais. Intercalados aos exercícios nível 1 e nível 2 há alguns Exercícios resolvidos (ER), que servem de partida para o encaminhamento de questões semelhantes.

Exercícios nível 1 - requerem, de forma simples, conhecimento apenas dos conceitos essenciais. Esses exercícios estão logo após a apresentação da teoria de cada bloco.

Exercícios nível 2 - além dos aspectos conceituais, valorizam a descrição quantitativa dos fenômenos e contextos. Os exercícios nível 2 estão logo após os exercícios nível 1.

Exercise sheets for 'Exercícios Nível 1', 'Exercícios Nível 2', and 'Exercícios Nível 3'. Includes a section for 'Para raciocinar um pouco mais' with a diagram of a pendulum and a graph of a wave.

Exercícios nível 3 - em sua maioria são exercícios de vestibulares, nos quais inserimos elementos de complementação. Aparecem logo após a apresentação da teoria do último bloco de cada tópico.

Para raciocinar um pouco mais - comparando nesta edição em maior número, são exercícios com formulações mais difíceis, recomendados àqueles que se dispuserem a alcançar maior grau de aprofundamento no conhecimento de Física. Encontram-se logo após os exercícios nível 3.

Sumário

Parte I

UNIDADE 1 – TERMOLOGIA	10
Tópico 1 – Temperatura	12
Bloco 1	13
1. Introdução	13
2. Temperatura	13
3. Equilíbrio térmico	14
4. Medição de temperatura	14
5. Equação termométrica	16
6. Escalas termométricas	16
7. Pontos fixos fundamentais	17
8. Escalas Celsius e Fahrenheit	17
9. Conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit	18
10. Variação de temperatura	18
Bloco 2	25
11. O zero absoluto	25
12. A escala absoluta	25
Tópico 2 – O calor e sua propagação	34
Bloco 1	35
1. Energia térmica	35
2. Calor	35
3. Unidade usual de calor	36
4. Processos de propagação do calor	38
Bloco 2	46
5. Algumas aplicações tecnológicas	50
Tópico 3 – Calor sensível e calor latente	63
Bloco 1	64
1. Introdução	64
2. Capacidade térmica (C) e calor específico (c)	64
3. O calor sensível e o seu cálculo	65
Bloco 2	72
4. Sistema físico termicamente isolado	72
5. Equivalente em água	72
6. Calorímetro	73
Bloco 3	79
7. As mudanças de estado físico	79
8. Calor latente	80
9. Fusão e solidificação	81
Bloco 4	88
10. Liquefação e vaporização	88
11. Pressão de vapor	92
Bloco 5	101
12. Sublimação	101
13. Ponto crítico e ponto triplo	101
14. Curvas de fusão, vaporização e sublimação	102
15. Diagramas de estado	104
Tópico 4 – Gases perfeitos	120
Bloco 1	121
1. Introdução	121
2. Modelo macroscópico de gás perfeito	121
3. As variáveis de estado de um gás perfeito	122
4. Lei de Boyle	124
5. Lei de Charles e Gay-Lussac	125
6. Lei de Charles	126
Bloco 2	133
7. A Equação de Clapeyron	133
8. A constante universal dos gases perfeitos (R) e seus valores	133
9. Lei Geral dos Gases	135
10. Mistura física de gases perfeitos	135
Bloco 3	144
11. O modelo microscópico de gás perfeito	144
12. Velocidade média quadrática	144
13. Equação Fundamental da Teoria Cinética	145
14. A temperatura na Teoria Cinética	147
15. A energia interna de um gás perfeito	147
16. A energia cinética média molecular	149

Tópico 5 – Termodinâmica	160
Bloco 1	161
1. Introdução	161
2. Energia interna, trabalho e calor	162
3. Lei Zero da Termodinâmica	165
4. A 1ª Lei da Termodinâmica	165
5. Transformações termodinâmicas particulares.....	167
Bloco 2	174
6. Diagramas termodinâmicos	174
Bloco 3	181
7. Calores específicos dos gases perfeitos	181
8. O gráfico da adiabática	182
9. A energia mecânica e o calor	183
Bloco 4	188
10. As máquinas térmicas e a 2ª Lei da Termodinâmica	188
11. A 2ª Lei da Termodinâmica	188
12. O ciclo de Carnot	189
13. Transformações reversíveis e irreversíveis	191
14. Entropia	191
Tópico 6 – Dilatação térmica dos sólidos e dos líquidos	208
Bloco 1	209
1. Introdução	209
2. Forças intermoleculares explicando a dilatação térmica	210
3. Dilatação linear dos sólidos	210

Bloco 2	218
4. Dilatação superficial dos sólidos	218
5. Dilatação volumétrica dos sólidos	219
Bloco 3	225
6. Dilatação térmica dos líquidos	225
7. Temperatura e massa específica	226
8. A dilatação anormal da água	227

UNIDADE 2 – ONDULATÓRIA

Tópico 1 – Movimento harmônico simples (MHS)

Bloco 1	239
1. Movimento oscilatório	239
2. Movimento periódico	239
3. Movimento harmônico simples (MHS)	241
4. Função horária de um MHS	242
5. Função horária da velocidade do MHS	243
6. Função horária da aceleração do MHS	243
7. Velocidade escalar do MHS em função da elongação (x)	244
8. Aceleração escalar do MHS em função da elongação (x)	244

Bloco 2	250
9. Força no MHS	250
10. Período (T) e frequência (f) do MHS	250
11. Oscilador massa-mola	251
12. Pêndulo simples	254
Respostas	269

Parte II

UNIDADE 2 – ONDULATÓRIA

Tópico 2 – Ondas	275
Bloco 1	276
1. Introdução	276
2. Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas	276
3. Ondas longitudinais, ondas transversais e ondas mistas	281
4. Frente de onda e raio de onda	283

Bloco 2	288
5. Grandezas físicas associadas às ondas	288
6. Velocidade de propagação de uma onda periódica	289
7. O som	290
8. A luz	290
9. Velocidade de propagação de ondas transversais em cordas tensas	291

Bloco 3	303
10. Reflexão	303
11. Refração	305
12. Refração e reflexão de ondas transversais em cordas	308
Bloco 4	314
13. Superposição de pulsos em cordas	314
14. Superposição de ondas periódicas	317
15. Ressonância	320
16. Micro-ondas	323
Bloco 5	329
17. Interferência de ondas que se propagam em um plano (bidimensionais) e no espaço (tridimensionais)	329
18. Princípio de Huygens	332
19. Difração	333
20. Experiência de Young	334
21. Interferência em películas delgadas	336
Tópico 3 – Acústica	352
Bloco 1	353
1. Introdução	353
2. A propagação dos sons	353
3. Reflexão do som	354
4. Intensidade de uma onda sonora	355
5. Velocidade de propagação do som	356
6. Refração do som	358
Bloco 2	362
7. Cordas sonoras	362
Bloco 3	371
8. Batimento, difração e ressonância	371
9. Tubos sonoros	372
Bloco 4	380
10. Efeito Doppler com ondas sonoras	380
Bloco 5	386
11. Qualidades fisiológicas do som	386

UNIDADE 3 – ÓPTICA GEOMÉTRICA ... 400

Tópico 1 – Fundamentos da Óptica Geométrica ... 402

Bloco 1	403
1. Luz: uma forma de energia radiante	403
2. Óptica: divisão e aplicações	403
3. Fontes de luz	404
4. Meios transparentes, translúcidos e opacos ...	405
5. Frente de luz – Raio de luz	406
6. Pincel de luz – Feixe de luz	407

Bloco 2	411
7. Princípio da Independência dos Raios de Luz ...	411
8. Princípio da Propagação Retilínea da Luz ...	411
9. Sombra e penumbra	412
10. Câmara escura de orifício	414

Bloco 3	421
11. Fenômenos físicos fundamentais na Óptica Geométrica	421
12. Reflexão e refração regulares e difusas	421
13. Reflexão e refração seletivas	422
14. Generalidades sobre sistemas ópticos	425
15. Ponto objeto e ponto imagem	425
16. Sistemas ópticos estigmáticos, aplanéticos e ortoscópicos	428
17. Reversibilidade na propagação da luz	428

Tópico 2 – Reflexão da luz ... 439

Bloco 1	440
1. Reflexão: conceito, elementos e leis	440
2. O espelho plano	443
Bloco 2	447
3. Construção gráfica de imagens nos espelhos planos	447
4. Propriedade Fundamental dos Espelhos Planos: a simetria	448
5. Imagem e objeto não superponíveis	451
6. Campo de um espelho plano	451

Bloco 3	458	Tópico 4 – Lentes esféricas	545
7. Translação de um espelho plano	458	Bloco 1	546
8. Rotação de um espelho plano	459	1. Um componente essencial	546
9. Imagens múltiplas em dois espelhos planos associados	459	2. Classificação e elementos das lentes esféricas	546
Bloco 4	463	3. Comportamento óptico das lentes esféricas	548
10. Classificação e elementos geométricos dos espelhos esféricos	463	4. Centro óptico	549
11. Espelhos esféricos gaussianos	465	5. Focos e pontos antiprincipais	550
12. Focos dos espelhos esféricos	465	6. Raios luminosos particulares	552
13. Raios luminosos particulares	469	7. Construção gráfica de imagens em lentes esféricas	553
14. Construção gráfica das imagens nos espelhos esféricos	472	Bloco 2	562
Bloco 5	478	8. Referencial gaussiano	562
15. O referencial gaussiano	478	9. Função dos pontos conjugados (Equação de Gauss)	563
16. Função dos pontos conjugados (Equação de Gauss)	479	10. Aumento linear transversal	563
17. Aumento linear transversal	479	Bloco 3	573
Tópico 3 – Refração da luz	494	11. Vergência (“grau”) de uma lente	573
Bloco 1	495	12. Equação dos Fabricantes de Lentes	574
1. Índice de refração absoluto de um meio	495	13. Associação de lentes – Teorema das Vergências	577
2. Refringência	496	Tópico 5 – Instrumentos ópticos e Óptica da visão	592
3. Índice de refração relativo entre dois meios	497	Bloco 1	593
4. Diopetro	497	1. Introdução aos instrumentos ópticos	593
5. O fenômeno da refração	498	2. Projetor	594
6. Leis da refração	499	3. Câmera fotográfica	594
7. Decorrências da Lei de Snell	500	4. Lupa ou microscópio simples	595
Bloco 2	509	5. Microscópio composto	595
8. Ângulo-limite e reflexão total	509	6. Lunetas	596
9. Imagens em diopetros planos	513	Bloco 2	606
10. Lâminas de faces paralelas	515	7. Introdução à Óptica da visão	606
Bloco 3	525	8. O bulbo do olho humano	606
11. Dispersão da luz branca	525	9. Adaptação visual	607
12. Prismas ópticos	527	10. Acomodação visual	607
		11. Defeitos visuais e sua correção	608
		Respostas	619

UNIDADE

1

Termologia



Alamy/Fotorena

Vulcão Etna; ao fundo a cidade de Catânia, Itália. Julho de 2014.

Termologia é a parte da Física que estuda os fenômenos relativos à energia térmica, que é a forma de energia relacionada à agitação das partículas de um corpo. A energia térmica, quando em trânsito, é denominada calor.



NESTA UNIDADE VAMOS ESTUDAR:

- Tópico 1: Temperatura
- Tópico 2: O calor e sua propagação
- Tópico 3: Calor sensível e calor latente
- Tópico 4: Gases perfeitos
- Tópico 5: Termodinâmica
- Tópico 6: Dilatação térmica dos sólidos e dos líquidos

Temperatura



Ethan Miller/Getty Images

// Em alguns locais da Terra, são registradas grandes amplitudes térmicas (diferenças de temperatura). É o que ocorre, por exemplo, na costa oeste dos Estados Unidos, particularmente no estado de Nevada, na região desértica conhecida como Vale da Morte. Devido ao clima muito árido e à escassez de água, verificam-se grandes variações de temperatura. Foi esse o local em que ocorreu a maior temperatura já registrada no planeta, 134 °F. Em homenagem a esse recorde, foi construído o maior termômetro do mundo, até hoje, com 134 pés de altura (40,8 m).

Ao iniciarmos nossos estudos, surge o primeiro questionamento: onde encontramos a Termologia em nosso dia a dia? Aprender Termologia vai nos ajudar a entender algumas situações que fazem parte do nosso cotidiano?

Para responder a essas questões, vamos listar algumas situações que vivenciamos frequentemente. Ao ligar o chuveiro para tomar um banho quente, a água está à temperatura ambiente, fria, então é necessário fornecer energia para que ela se aqueça. Ao abriremos a porta da geladeira, recebemos o ar gelado vindo do seu interior – esse ar foi resfriado, perdendo energia. Do congelador retiramos algumas pedras de gelo que são colocadas no suco de laranja. O gelo vai receber energia do suco, que será resfriado, e derreterá, passando do estado sólido para o estado líquido. O aprendizado da Termologia vai nos ajudar a entender essas e muitas outras situações que enfrentamos diariamente.

1. Introdução

Termologia é a parte da Física que estuda os fenômenos relativos ao aquecimento, ao resfriamento ou às mudanças de estado físico em corpos que recebem ou cedem um determinado tipo de energia.

Estudaremos as formas pelas quais essa energia, que denominaremos **energia térmica**, muda de local, propagando-se através de um meio. Veremos, ainda, o comportamento de um modelo teórico de gás, denominado **gás perfeito**, e, entre outras coisas, as relações existentes entre a energia térmica e a energia mecânica.

No estudo de todos os fenômenos relativos à Termologia, sempre aparece um parâmetro muito importante, denominado **temperatura**, capaz de definir o estado térmico do sistema físico estudado. Assim, iniciaremos o nosso estudo de Termologia conceituando a temperatura e estabelecendo processos e regras usados para sua medição.

Na figura ao lado observamos vários fenômenos que serão estudados em Termologia.

2. Temperatura

Temperatura é a grandeza que caracteriza o estado térmico de um sistema.

É comum as pessoas avaliarem o estado térmico de um corpo pela sensação de quente ou frio que sentem ao tocá-lo. Até que ponto, entretanto, podemos confiar nessa sensação? Muitas vezes pessoas diferentes em um mesmo ambiente experimentam sensações térmicas diferentes! Note que isso ocorre porque as sensações de quente e frio são individuais e subjetivas, dependendo do indivíduo e das condições a que ele está sujeito.

Agora você deve estar se perguntando: como podemos avaliar fisicamente esse “quente” e esse “frio”?

Imaginemos um balão de borracha, fechado, com ar em seu interior. O ar, como sabemos, é constituído de pequenas partículas que se movimentam em todas as direções. Agora, vamos aquecer o ar. O que acontece? O balão estufa, aumentando de tamanho. O que provocou isso? Foi o ar em seu interior, que, ao ser aquecido, empurrou mais fortemente as paredes elásticas, aumentando o volume do balão.

Isso ocorre porque as partículas de ar movimentam-se, possuindo certa velocidade, e, portanto, certa energia cinética. Quando aumentamos a temperatura dessas partículas por aquecimento, essa energia cinética aumenta, intensificando os choques dessas partículas com as paredes internas do balão, o que produz aumento de volume.

Assim, podemos associar a temperatura do ar à energia cinética de suas partículas, isto é, ao estado de movimento dessas partículas.

Entretanto, o que acontece nos sólidos e nos líquidos, cujas partículas são impedidas de movimentar-se livremente?



Maksim Gusarov/Shutterstock

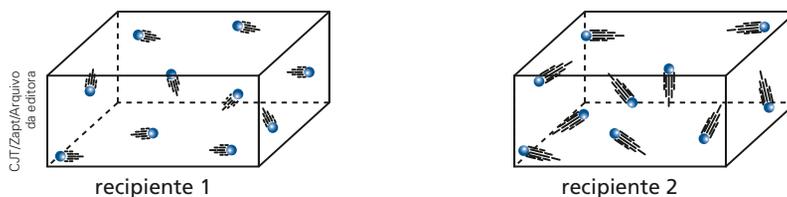
// A preparação de um bolo envolve **energia** em forma de calor. O bolo precisa receber **energia térmica** para seu cozimento.



// A fonte térmica aquece a água; esta vaporiza-se (muda de estado físico), e o vapor formado expande-se, saindo pela abertura existente no recipiente. O vapor atinge as pás da turbina e realiza trabalho, isto é, coloca a turbina em rotação.

Nesses casos, as partículas apenas se agitam em regiões limitadas, e esse estado de agitação aumenta com o aquecimento, com o aumento de temperatura.

A conclusão a que podemos chegar é que, de alguma forma, a temperatura está relacionada com o estado de movimento ou de agitação das partículas de um corpo. Assim, como uma ideia inicial, podemos dizer que a temperatura é um valor numérico associado a um determinado estado de agitação ou de movimentação das partículas de um corpo, umas em relação às outras.



// Considerando que os dois recipientes contêm o mesmo tipo de gás, no recipiente 2 o estado de agitação das partículas que compõem o gás é maior, pois estas se movimentam com maior rapidez. Assim, podemos concluir que o gás do recipiente 2 se encontra em uma temperatura mais elevada que o gás do recipiente 1.

3. Equilíbrio térmico

Suponha que um assado recém-saído de um forno e um suco saído de uma geladeira sejam colocados sobre uma mesa. Após alguns minutos, observamos que ambos atingem a temperatura ambiente. Assim, o assado “esfriou” e o suco “esquentou”.

Da observação de fenômenos dessa natureza, podemos concluir que os corpos colocados em um mesmo meio, sempre que possível, tendem espontaneamente para um mesmo estado térmico. Os corpos mais “quentes” fornecem parte da energia de agitação de suas partículas para os corpos mais “frios”. Assim, os mais “quentes” esfriam e os mais “frios” esquentam, até que seus estados térmicos (suas temperaturas) fiquem iguais. Dizemos, então, que esses corpos atingiram o **equilíbrio térmico**.



Dois ou mais sistemas físicos estão em **equilíbrio térmico** entre si quando suas temperaturas são iguais.

Exemplo:

As partículas da água “quente” fornecem parte de sua energia de agitação para as partículas da água “fria” e esfriam. Ao receber essa energia, as partículas da água “fria” esquentam. A troca de energia só é interrompida quando o equilíbrio térmico é atingido.

4. Medição de temperatura

Considerando o que vimos anteriormente, é possível perceber que não temos condições de medir diretamente a energia de agitação das moléculas de um corpo. Como podemos, então, avaliar sua temperatura?

É simples: isso deve ser feito por um processo indireto, usando-se um segundo corpo que sofra alterações mensuráveis em suas propriedades físicas quando do processo de busca do equilíbrio térmico com o primeiro. A esse corpo chamamos de **termômetro**.

Vamos estudar com um pouco mais de detalhe o **termômetro de mercúrio**, instrumento amplamente utilizado para a identificação da temperatura corporal.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

NOTA!

Os termômetros de mercúrio estão sendo substituídos por outros modelos que utilizam outras substâncias ou se baseiam em outras propriedades termométricas. O mercúrio tem alta toxicidade.

Na extremidade esquerda do termômetro acima, há um reservatório (bulbo) onde fica armazenada a **substância termométrica**. No caso desse termômetro, essa substância é o mercúrio, mas poderia ser outra, como o álcool, por exemplo. No interior da haste, há um tubo muito estreito (capilar) através do qual a substância termométrica se desloca para a direita ou para a esquerda conforme a temperatura que está sendo medida. O valor da temperatura é fornecido pela medida do comprimento da coluna, que é chamada de **grandeza termométrica**.

É importante observar que:

Substância termométrica é aquela em que pelo menos uma de suas propriedades físicas (comprimento, volume, pressão, entre outras) varia de forma mensurável com a temperatura.

Grandeza termométrica é a propriedade física da substância termométrica que varia de forma mensurável com a temperatura e é usada para medi-la.

Vamos observar outros modelos de termômetros.

Na foto ao lado podemos observar um termômetro bastante prático utilizado para medir a temperatura do corpo humano. Ele funciona recebendo radiações na faixa do infravermelho emitidas pela pele da testa da pessoa. Não há necessidade de encostar o aparelho, ele deve estar a alguns centímetros da pele. A temperatura é registrada em poucos segundos com razoável precisão.

// O termômetro de infravermelho foi muito utilizado durante a epidemia de ebola entre 2014 e 2016 para verificar a temperatura corporal das pessoas. Na foto, uma oficial de saúde avalia a temperatura de um passageiro no aeroporto Murtala Muhammed, na Nigéria.

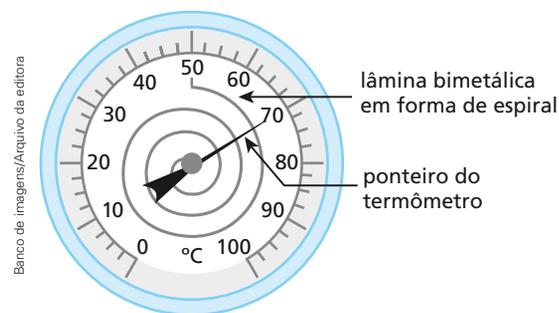


Alamy/Fotorena

No interior de fornos são utilizados termômetros que funcionam através da dilatação de uma lâmina bimetálica. Esse tipo de termômetro costuma ser usado na culinária e também no interior de câmaras frigoríficas e de fornos de padaria.



Africa Studio/Shutterstock



Banco de imagens/Arquivo da editora

// Termômetro de lâmina bimetálica avalia a temperatura de uma ave assada. Nesse tipo de termômetro a dilatação acontece de forma diferente em cada uma das placas e, com isso, elas espiralam e movimentam o ponteiro.



lâmina bimetálica



lâmina bimetálica sendo aquecida

Mas o que são lâminas bimetálicas? São lâminas compostas de duas camadas, cada uma de um metal diferente. Observe a ilustração ao lado. Quando a lâmina bimetálica é aquecida, um dos metais dilata mais do que o outro e seu comprimento fica maior. No entanto, como as chapas estão “coladas”, a dilatação provoca o encurvamento da lâmina, ficando o metal que dilata mais na face externa (face convexa).



/// Pirômetro óptico.



/// Termômetro a gás.

Um outro modelo de termômetro é o óptico (também chamado de **pirômetro óptico**). Ele pode medir altas temperaturas utilizando a intensidade das radiações emitidas por um objeto muito aquecido. Esse tipo de termômetro é usualmente utilizado em fundições e siderúrgicas.

Para medir baixas temperaturas, podemos utilizar um termômetro a gás, a volume constante. No resfriamento, associamos o valor da pressão do gás a um valor de temperatura.

Esse termômetro é muito usado em laboratórios de pesquisa e, devido a sua precisão, é muito utilizado para calibrar outros termômetros.



/// Termômetro de álcool. A substância termométrica (álcool) é tingida de vermelho para melhor visualização.

5. Equação termométrica

Em um termômetro, a grandeza termométrica varia praticamente de modo uniforme com a temperatura. Podemos, com boa aproximação, afirmar que a relação matemática de correspondência entre a grandeza termométrica (G) e a temperatura (θ) é uma função do 1º grau.

A essa relação damos o nome de **equação termométrica**:

$$G = a\theta + b$$

em que a e b são constantes características do termômetro, com $a \neq 0$.

No termômetro de álcool, por exemplo, a grandeza termométrica (G) é a altura da coluna. Substituindo o valor dessa altura na equação termométrica, obtemos a temperatura correspondente.

6. Escalas termométricas

Escala termométrica é um conjunto de valores numéricos em que cada valor está associado a uma determinada temperatura.

Se, por exemplo, a temperatura de um sistema **A** é representada pelo valor 50 e a de um sistema **B**, pelo valor 20, em uma mesma escala termométrica, dizemos que a temperatura de **A** é maior que a de **B**. Isso indica que as partículas do sistema **A** estão em um nível energético mais elevado que as do sistema **B**.

Como uma escala termométrica é constituída por um conjunto de valores arbitrários, um mesmo estado térmico pode ser representado em escalas termométricas diversas, por valores numéricos diferentes.

Os valores numéricos de uma escala termométrica são obtidos a partir de dois valores atribuídos previamente a dois estados térmicos de referência, bem definidos, denominados **pontos fixos**.

7. Pontos fixos fundamentais

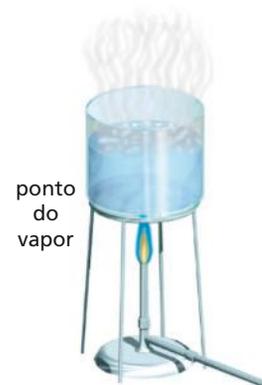
Pela facilidade de obtenção prática, são adotados usualmente como pontos fixos os estados térmicos correspondentes ao gelo fundente e à água em ebulição, ambos sob pressão normal. Esses estados térmicos costumam ser denominados **ponto do gelo** e **ponto do vapor**, respectivamente, e constituem os **pontos fixos fundamentais**.

1º ponto fixo: ponto do gelo – temperatura na qual o gelo e a água permanecem em equilíbrio térmico quando sob pressão normal.

2º ponto fixo: ponto do vapor – temperatura na qual a água entra em ebulição sob pressão normal.



ponto do gelo



ponto do vapor

Luis Fernando R. Tucillo/Arquivo da editora

NOTA!

Em 1939, o químico canadense William Francis Giauque (1895-1982) passou a defender a proposta de Lorde Kelvin, que pretendia que as escalas termométricas usassem apenas um ponto fixo, o **ponto tríplice da água** (temperatura em que ela se apresenta em equilíbrio térmico nos três estados físicos: sólido, líquido e vapor). Essa tese foi aprovada em 1954 pelos representantes da comunidade científica e passou a ser chamada de **solução Giauque**. Por ser mais prático, no entanto, continuamos usando o ponto do gelo e o ponto do vapor como referências nas escalas termométricas.

8. Escalas Celsius e Fahrenheit

A escala termométrica mais utilizada no mundo, inclusive no Brasil, foi criada pelo astrônomo e físico sueco Anders **Celsius** (1701-1744) e oficializada em 1742 por uma publicação da Real Academia Sueca de Ciências. O interessante é que, originalmente, Celsius utilizou o valor **0** para o ponto de ebulição da água e o valor **100** para seu ponto de congelamento. Foi um biólogo sueco, chamado Lineu [Carl von Linné (1707-1778)], quem inverteu essa escala, tornando-a tal como a conhecemos hoje.

Em 1708, o físico alemão Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736), utilizando as ideias do astrônomo dinamarquês Ole Römer (1644-1710), estabeleceu os pontos de referência de uma nova escala. Para o ponto **0**, ele utilizou a temperatura de equilíbrio de uma mistura de gelo e cloreto de amônia e, para o ponto **100**, a temperatura do corpo humano. Somente mais tarde, quando passaram a utilizar a água como referência, observou-se que a sua escala assinalava **32** para o ponto do gelo e **212** para o ponto do vapor. A escala Fahrenheit de temperaturas é utilizada principalmente nos países de língua inglesa, como nos Estados Unidos, nas Bahamas, em Belize e em Palau.

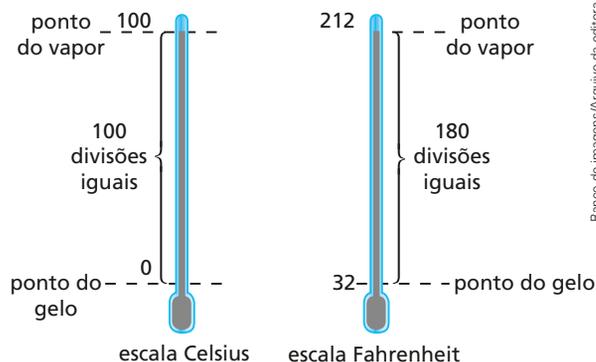
Na **escala Celsius**, temos 100 divisões iguais entre os pontos fixos, cada divisão correspondendo à unidade da escala, que recebe o nome de **grau Celsius**, simbolizado por **°C**.

Na **escala Fahrenheit**, temos 180 divisões iguais entre os pontos fixos, sendo a unidade da escala denominada **grau Fahrenheit**, simbolizado por **°F**.



Retrato de Anders Celsius.

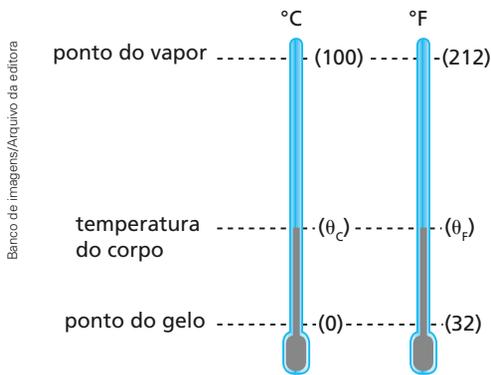
Album/akg-images/Foroteca Giaridi/Latinstock



Banco de imagens/Arquivo da editora

9. Conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit

Sempre é possível estabelecer uma relação entre duas escalas termométricas quaisquer. Podemos, por exemplo, obter uma equação que relacione os valores numéricos dados pelas escalas Celsius e Fahrenheit. Isso significa que, conhecendo a temperatura em uma determinada escala, podemos também, utilizando essa equação, conhecê-la em outra escala qualquer.



A que valor na escala Fahrenheit corresponde, por exemplo, 60 °C?

Para fazer a correspondência, vamos utilizar dois termômetros idênticos de mercúrio, sendo um graduado na escala Celsius e outro, na Fahrenheit. Ao colocá-los em contato com um mesmo corpo, observamos que as alturas de mercúrio são iguais, mas, por se tratar de escalas distintas, os valores numéricos assinalados são diferentes (θ_C e θ_F).

Perceba que os intervalos de temperatura correspondentes nos dois termômetros são proporcionais. Assim, vale a relação:

$$\frac{\theta_C - 0}{\theta_F - 32} = \frac{100 - 0}{212 - 32}$$

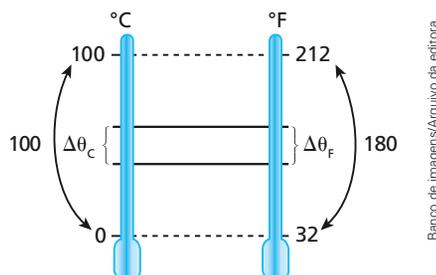
$$\frac{\theta_C}{\theta_F - 32} = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}$$

Essa **equação de conversão** pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

10. Variação de temperatura

Para converter uma **variação de temperatura** em graus Celsius para graus Fahrenheit, ou vice-versa, observe o esquema abaixo, em que comparamos essas duas escalas.



Note que a variação em uma das escalas é proporcional à variação correspondente na outra.

Assim, podemos afirmar que:

$$\frac{\Delta\theta_C}{100} = \frac{\Delta\theta_F}{180}$$

Escala Réaumur

Em 1730, o físico francês René-Antoine Ferchault de **Réaumur** (1683-1757) observou que o álcool, ao ser aquecido do ponto do gelo até o ponto do vapor, apresentava uma expansão de 80 partes por mil. Assim, estabeleceu em sua escala a marca **0** para a fusão do gelo e **80** para a ebulição da água, sob pressão normal.

A conversão entre a escala Réaumur e a escala Celsius é feita pela relação:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_R}{4}$$

Em um mesmo termômetro, podem-se utilizar escalas diferentes. No termômetro abaixo, podemos observar uma mesma temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Réaumur.



Thales Trigo/Arquivo da editora



TH Foto/SPL/Latinstock

// Retrato de René-Antoine Ferchault de Réaumur.

Ampliando o olhar

Termômetros

Todo dispositivo utilizado para medir temperaturas é chamado de termômetro. O primeiro termômetro de que se tem notícia foi construído por Galileu Galilei (1564-1642) em 1597 (chamado de termoscópio de Galileu) e era formado por um longo tubo de vidro, aberto na extremidade inferior e com um reservatório na parte superior (um bulbo). Esse tubo era parcialmente preenchido com água e emborcado em uma vasilha, que também continha água. O ar que preenchia o bulbo e parte da haste, ao sofrer variação de pressão, se contraía ou se expandia, provocando alteração na altura da coluna de água. Dessa forma, media-se a temperatura. Esse termômetro, porém, era muito impreciso. Somente cinquenta anos após sua invenção, um amigo de Galileu, o Duque de Toscana, utilizou álcool em vez de água e lacrou o sistema, fazendo com que seu funcionamento não dependesse da pressão atmosférica.

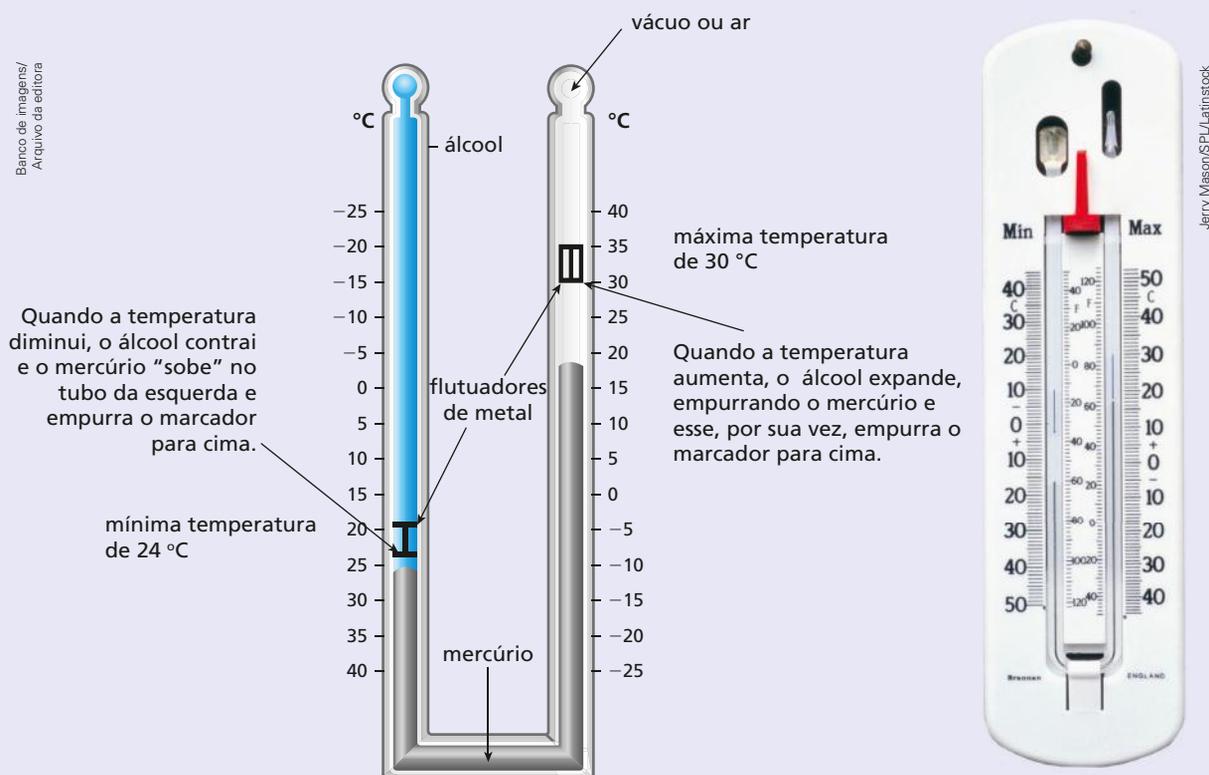


SPL DC/Latinstock

// Reprodução do termosκόpio de Galileu.

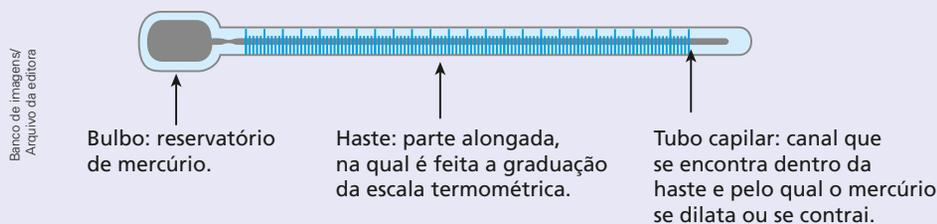
Termômetro de máxima e mínima

O termômetro de máxima e mínima foi idealizado pelo cientista inglês James Six e é utilizado para medir a **máxima** e a **mínima** temperatura em determinado intervalo de tempo. O líquido termométrico utilizado costuma ser o álcool (o mercúrio existente no interior do tubo é usado apenas para empurrar os flutuadores de ferro). Na coluna da direita (coluna de temperaturas máximas) existe uma bolha de ar, o que facilita a dilatação do álcool da coluna da esquerda. Essa dilatação do álcool, ou contração, empurra o mercúrio, que move os flutuadores de ferro. Devido ao atrito, os flutuadores não acompanham o álcool, permanecendo nos locais que indicam as temperaturas máxima e mínima. Para recolocar os flutuadores nos níveis do mercúrio, utiliza-se um ímã.



Termômetro clínico

O termômetro clínico tem por finalidade medir a temperatura do corpo humano. Por isso, ele indica apenas temperaturas com valores entre 35 °C e 42 °C. As substâncias termométricas mais utilizadas nesse termômetro são o mercúrio e o álcool.

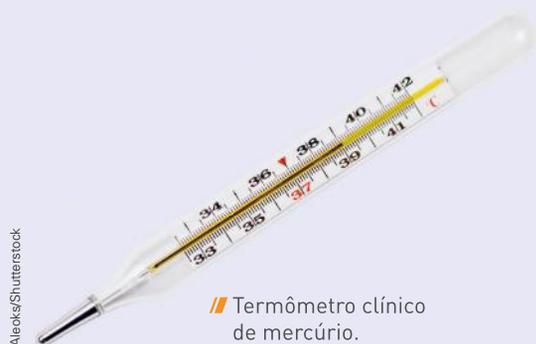


O tubo capilar pelo qual passa o mercúrio é muito estreito. Isso pode dificultar a visão do nível atingido. Por isso, a haste de vidro é moldada de tal forma que serve de lente de aumento, ampliando o tubo capilar, facilitando a visão do nível de mercúrio.

Entre o bulbo e o início da haste existe um estrangulamento no tubo que permite ao mercúrio se expandir ao longo do tubo mas não voltar ao bulbo. Isso faz dele um termômetro de máxima, ou seja, em determinado intervalo de tempo, ele mede apenas a máxima temperatura do corpo.

A fim de que a porção do mercúrio expandida no tubo retorne ao bulbo, deve-se agitar o termômetro.

Para o uso clínico é utilizado também o termômetro digital. O funcionamento desse termômetro é baseado nas propriedades elétricas dos materiais. O termômetro digital possui um circuito interno que mede correntes elétricas, valor esse que muda com a temperatura.



// Termômetro clínico de mercúrio.



// Termômetro clínico digital.

Termômetro de rua

Um termômetro diferente, que podemos encontrar nas ruas de algumas cidades, são os relógios como o da fotografia, que também registram a temperatura do ar no local. No seu funcionamento, esse dispositivo conta com uma antena que possui em sua extremidade um diodo semiconductor. Esse diodo está associado a outros componentes eletrônicos e o circuito é alimentado por uma fonte de tensão. Quando o ar no local esquenta (ou esfria), a corrente elétrica no diodo aumenta (ou diminui), e essa informação é transmitida ao circuito elétrico existente no interior do relógio, que altera o indicativo da temperatura.



Exercícios Nível 1

1. Um jornalista, em visita aos Estados Unidos, passou pelo deserto de Mojave, onde eram realizados os pousos dos ônibus espaciais da Nasa. Ao parar em um posto de gasolina, à beira da estrada, ele observou um grande painel eletrônico que indicava a temperatura local na escala Fahrenheit. Ao fazer a conversão para a escala Celsius, ele encontrou o valor 45°C . Que valor ele havia observado no painel?
2. Uma agência de turismo estava desenvolvendo uma página na internet que, além dos pontos turísticos mais importantes, continha também informações relativas ao clima da cidade de Belém (Pará). Na versão dessa página destinada a clientes dos Estados Unidos, a temperatura média de Belém (30°C) deveria aparecer na escala Fahrenheit. Que valor o turista iria encontrar, para essa temperatura, na página em inglês?
3. Um turista brasileiro, ao descer no aeroporto de Chicago (EUA), observou um termômetro marcando a temperatura local (68°F). Fazendo algumas contas, ele verificou que essa temperatura era igual à de São Paulo, quando embarcara. Qual era a temperatura de São Paulo, em graus Celsius, no momento do embarque do turista?

4. Dois termômetros, um graduado na escala **ER** Celsius e o outro, na escala Fahrenheit, são mergulhados em um mesmo líquido. A leitura em Fahrenheit supera em 100 unidades a leitura em Celsius. Qual era a temperatura desse líquido?

Resolução:

Do enunciado do problema, podemos escrever:

$$\theta_F = \theta_C + 100 \text{ (I)}$$

A relação entre as escalas citadas é dada por:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9} \text{ (II)}$$

Substituindo (I) em (II), temos:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{(\theta_C + 100) - 32}{9}$$

$$9\theta_C = 5\theta_C + 340$$

$$4\theta_C = 340$$

$$\theta_C = 85 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{ou} \quad \theta_F = 185 \text{ }^\circ\text{F}$$

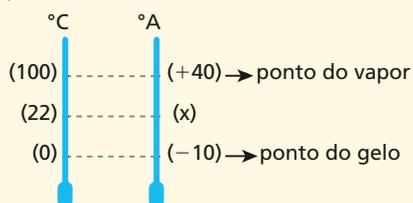
5. Ao chegar ao aeroporto de Miami (EUA), um turista brasileiro observou em um painel eletrônico que a temperatura local medida na escala Fahrenheit ultrapassava o valor medido na escala Celsius em 48 unidades. Qual era a temperatura registrada no painel, em graus Celsius?

6. Em um laboratório, dois termômetros, um graduado em Celsius e outro em Fahrenheit, são colocados no interior de um freezer. Após algum tempo, verificou-se que os valores lidos nos dois termômetros eram iguais. Qual era a temperatura medida, em graus Celsius?

7. Em uma escala de temperaturas **A**, o ponto do gelo equivale a $-10 \text{ }^\circ\text{A}$ e o do vapor, a $+40 \text{ }^\circ\text{A}$. Se uma temperatura for indicada em um termômetro em Celsius pelo valor $22 \text{ }^\circ\text{C}$, que valor será indicado por outro termômetro graduado na escala **A**?

Resolução:

Comparando-se as escalas, temos:



Banco de imagens/
Arquivo da editora

Assim:

$$\frac{22 - 0}{100 - 0} = \frac{x - (-10)}{40 - (-10)}$$

$$\frac{22}{100} = \frac{x + 10}{50}$$

$$11 = x + 10$$

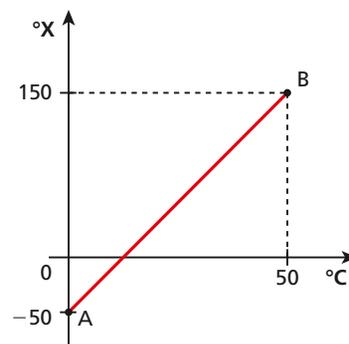
$$x = 1 \text{ }^\circ\text{A}$$

8. Um professor de Física inventou uma escala termométrica que chamou de escala **X**. Comparando-a com a escala Celsius, ele observou que $-4 \text{ }^\circ\text{X}$ correspondiam a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, e $44 \text{ }^\circ\text{X}$ equivaliam a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Que valores essa escala **X** assinalaria para os pontos fixos fundamentais?

9. Lendo um jornal brasileiro, um estudante encontrou a seguinte notícia: "Devido ao fenômeno *El Niño*, o verão no Brasil foi mais quente do que costuma ser, ocorrendo em alguns locais variações de até $20 \text{ }^\circ\text{C}$ em um mesmo dia". Se essa notícia fosse reescrita para leitores das Bahamas, a variação de temperatura deveria ser dada na escala Fahrenheit. Que valor iria substituir a variação de $20 \text{ }^\circ\text{C}$?

10. (UPM-SP) Um turista brasileiro sente-se mal durante uma viagem e é levado inconsciente a um hospital. Após recuperar os sentidos, sem saber em que local estava, é informado de que a temperatura de seu corpo atingira 104 graus, mas que já "caíra" de 5,4 graus. Passado o susto, percebeu que a escala utilizada era a Fahrenheit. De quanto seria a queda da temperatura desse turista se fosse utilizado um termômetro graduado em Celsius?

11. Uma escala termométrica **X** foi comparada com a escala Celsius, obtendo-se o gráfico dado a seguir, que mostra a correspondência entre os valores das temperaturas nessas duas escalas.

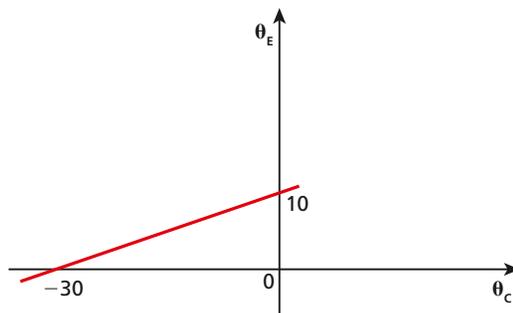


Banco de imagens/Arquivo da editora

Determine:

- a equação de conversão entre as escalas **X** e Celsius;
- a indicação da escala **X**, quando tivermos $80\text{ }^\circ\text{C}$;
- a indicação da escala **X** para os estados térmicos correspondentes aos pontos fixos fundamentais.

12. Um estudante construiu uma escala de temperatura **E** cuja relação com a escala Celsius é expressa no gráfico representado a seguir.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Qual é a temperatura cujas leituras coincidem numericamente nessas duas escalas?

Exercícios Nível 2

13. [Uespi] Um estudante está lendo o romance de ficção científica "Fahrenheit 451", de Ray Bradbury. Num certo trecho, uma das personagens afirma que $451\text{ }^\circ\text{F}$ é a temperatura na escala Fahrenheit em que o papel de que são feitos os livros entra em combustão. O estudante sabe que, nesta escala, as temperaturas de fusão e ebulição de água são respectivamente iguais a $32\text{ }^\circ\text{F}$ e $212\text{ }^\circ\text{F}$. Ele conclui, acertadamente, que $451\text{ }^\circ\text{F}$ é aproximadamente equivalente a:

- $100\text{ }^\circ\text{C}$
- $205\text{ }^\circ\text{C}$
- $233\text{ }^\circ\text{C}$
- $305\text{ }^\circ\text{C}$
- $316\text{ }^\circ\text{C}$

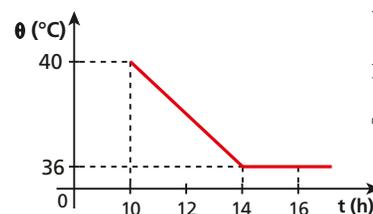
14. [Unaerp-SP] Durante um passeio em outro país, um médico, percebendo que seu filho está "quente", utiliza um termômetro com escala Fahrenheit para medir sua temperatura. O termômetro, após o equilíbrio térmico, registra $98,6\text{ }^\circ\text{F}$. O médico, então:

- deve correr urgente para o hospital mais próximo, o garoto está mal, $49,3\text{ }^\circ\text{C}$.
- não se preocupa, ele está com $37\text{ }^\circ\text{C}$, manda o garoto brincar e mais tarde mede novamente sua temperatura.
- fica preocupado, ele está com $40\text{ }^\circ\text{C}$, então lhe dá para ingerir uns quatro comprimidos de antitérmico.
- faz os cálculos e descobre que o garoto está com $32,8\text{ }^\circ\text{C}$.
- fica preocupado, ele está com $39\text{ }^\circ\text{C}$, dá um antitérmico ao garoto e o coloca na cama sob cobertores.

15. Um determinado estado térmico foi avaliado usando-se dois termômetros, um graduado em Celsius e outro, em Fahrenheit. A leitura Fahrenheit excede em 23 unidades o dobro da leitura Celsius. Essa temperatura corresponde a que valor na escala Celsius?

16. Uma jovem estudante, folheando um antigo livro de Física de seu avô, encontrou a temperatura de ebulição do álcool expressa na escala Réaumur ($62,4\text{ }^\circ\text{R}$). Fazendo a conversão para a escala Celsius, ela encontrou que valor?

17. Um paciente foi internado em um hospital e apresentou o quadro de temperatura ao lado.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Que temperatura esse paciente apresentou às 12 h 30 min, expressa na escala Réaumur?

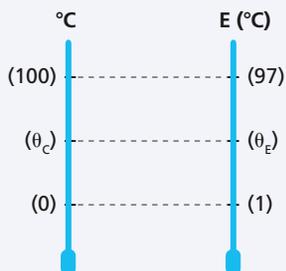
18. Em um termômetro de mercúrio, a altura da coluna assume os valores $1,0\text{ cm}$ e 21 cm quando o termômetro é submetido aos estados correspondentes aos pontos do gelo fundente e do vapor de água em ebulição, respectivamente, sob pressão normal. Determine:

- a equação termométrica desse termômetro em relação à escala Celsius.
- a temperatura registrada pelo termômetro quando a altura da coluna assume o valor 10 cm .
- a altura da coluna quando o ambiente onde se encontra o termômetro está a $27\text{ }^\circ\text{C}$.

19. Um termômetro foi graduado, em graus Celsius, **ER** incorretamente. Ele assinala 1 °C para o gelo em fusão e 97 °C para a água em ebulição, sob pressão normal. Qual a única temperatura que esse termômetro assinala corretamente, em graus Celsius?

Resolução:

Comparando os termômetros, temos:



$$\frac{\theta_C - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_E - 1}{97 - 1} \Rightarrow \frac{\theta_C}{100} = \frac{\theta_E - 1}{96}$$

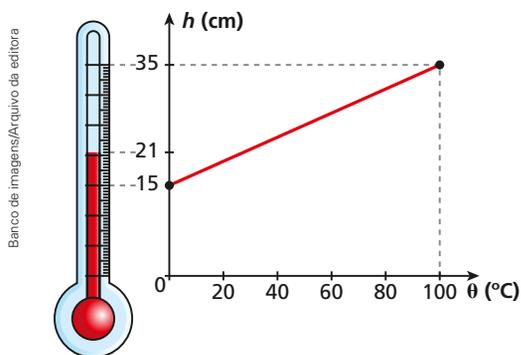
Para $\theta_C = \theta_E$, vem:

$$96\theta_C = 100\theta_E - 100$$

$$4\theta_C = 100$$

$$\theta_C = 25 \text{ °C}$$

20. Nos termômetros utilizados no nosso dia a dia, a substância termométrica é um líquido (geralmente mercúrio ou álcool) e a propriedade termométrica, a altura h da coluna desse líquido. Na aferição, esse termômetro é colocado em equilíbrio com o gelo fundente e, depois, com a água em ebulição em condições de pressão normal. Ele foi colocado também em contato com um corpo **X**, quando, após o equilíbrio térmico, a altura h atingiu a marca de 21 cm. Na figura dada a seguir, encontramos a relação entre as colunas h do líquido e as temperaturas Celsius correspondentes.

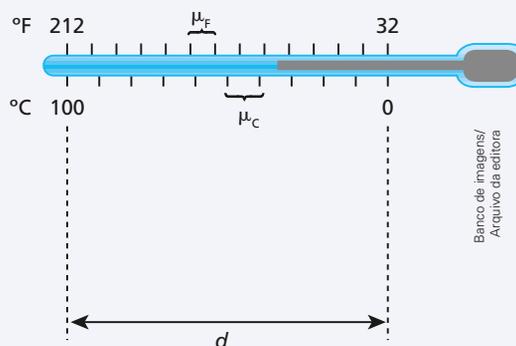


Qual a temperatura, em graus Celsius, encontrada para esse corpo?

21. Um fabricante de termômetros lançou no mercado um termômetro de mercúrio graduado nas escalas Celsius e Fahrenheit. Na parte referente à escala Celsius, a distância entre duas marcas consecutivas era de 1,08 mm. Qual a distância, na escala Fahrenheit, entre duas marcas consecutivas?

Resolução:

Chamemos de μ_C e μ_F as respectivas distâncias entre duas marcas consecutivas nas escalas Celsius e Fahrenheit:



Como a distância d , indicada na figura, é a mesma nas duas escalas, podemos escrever:

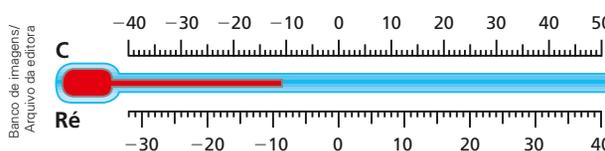
$$d = 100\mu_C = 180\mu_F$$

Do enunciado, sabemos que: $\mu_C = 1,08$ mm. Substituindo esse valor na expressão acima, calculemos μ_F :

$$100 \cdot 1,08 = 180 \mu_F \Rightarrow \mu_F = \frac{108}{180}$$

$$\mu_F = 0,60 \text{ mm}$$

22. Em um laboratório, um professor de Física encontrou um antigo termômetro que trazia graduações nas escalas Celsius e Réaumur. Com uma régua, observou que a distância entre duas marcas consecutivas na escala Celsius era de 1,0 mm. Que valor ele encontrou na escala Réaumur? Em outras palavras, qual a distância entre duas marcas consecutivas na escala Réaumur, no mesmo termômetro?



11. O zero absoluto

Imagine um sistema físico qualquer. Quando o aquecemos, sua temperatura se eleva, aumentando o estado de agitação de suas partículas. Se o esfriamos, sua temperatura diminui porque o estado de agitação das partículas também diminui. Se continuarmos a esfriar esse sistema, o estado de agitação das partículas diminuirá mais e mais, tendendo a um mínimo de temperatura, denominado **zero absoluto**.

Zero absoluto é o limite inferior de temperatura de um sistema. É a temperatura correspondente ao menor estado de agitação das partículas, isto é, um estado de agitação praticamente nulo.

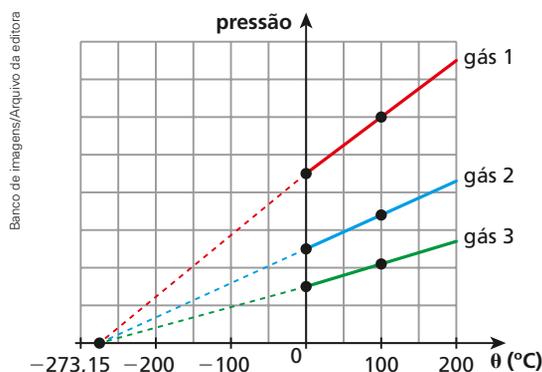
No zero absoluto, ainda existe nas partículas do sistema uma quantidade finita, não nula, de energia cinética. Essa energia é denominada **energia do ponto zero**.

12. A escala absoluta

O físico britânico William Thomson (1824-1907), mais conhecido como **Lorde Kelvin**, foi quem verificou experimentalmente a variação da pressão de um gás a volume constante. Por meio de uma extrapolação, ele concluiu que a menor temperatura que aquele gás poderia atingir coincidia com a anulação da pressão.

Até chegar a essa conclusão ele realizou experiências com diferentes amostras de gases, a volume constante. As variações de pressão foram plotadas (marcadas) em um gráfico, em função da temperatura Celsius. O prolongamento do gráfico levou-o ao valor $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, que foi denominado "**zero absoluto**".

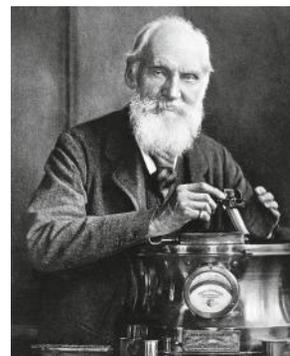
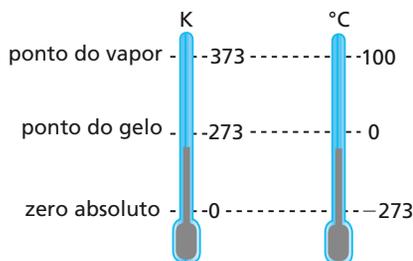
Para facilitar os cálculos, aproximamos esse valor para $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.



A escala Kelvin, também denominada **escala absoluta**, tem sua origem no zero absoluto e utiliza o grau Celsius como unidade de variação. O símbolo da unidade da escala Kelvin é **K**.

Assim, pode-se concluir que a equação de conversão entre as escalas Celsius e Kelvin é dada por:

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$$



Retrato de Lorde Kelvin.

Royal Astronomical Society/SP/Latinstock

NOTA!

A partir de 1967, convencionou-se não usar "grau" para essa escala. Assim, 20 K, por exemplo, lê-se 20 kelvins e não 20 graus Kelvin.

Banco de imagens/Arquivo da editora

Alguns estados térmicos interessantes

A maior temperatura já registrada na superfície da Terra foi de 56,7 °C (134 °F), em 10 de julho de 1913, no Vale da Morte, Califórnia, nos Estados Unidos, e a menor foi -89,2 °C, em 21 de julho de 1983, na estação russa de Vostok, na Antártida. A menor temperatura de resfriamento obtida em laboratório é da ordem de 10^{-10} K.

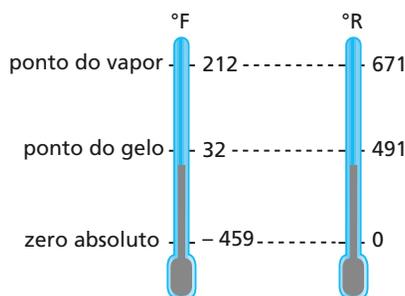
Na tabela a seguir, você poderá observar alguns dos principais estados térmicos, expressos nas escalas convencionais: Celsius, Fahrenheit e Kelvin. Note que os valores apresentados estão em ordem crescente de temperatura.

	Celsius	Fahrenheit	Kelvin
Zero absoluto	-273,15	-459,67	0
Ar liquefeito	-39	-38,2	234
Menor temperatura na superfície da Terra	-89,2	-128	184
Ponto de solidificação do mercúrio	-39	-38,2	234
Ponto do gelo	0	32	273,15
Maior temperatura na superfície da Terra	56,7	136	331
Ponto do vapor	100	212	373,15
Ponto de combustão do papel	184	363	457
Ponto de combustão da madeira	250	482	523
Ponto de fusão do chumbo	327	620	600
Temperatura na chama do gás natural	660	1 220	933
Ponto de fusão do ferro	1 535	2 795	1 808
Temperatura na superfície do Sol	5 530	10 000	5 800

Fonte: *The visual dictionary of Physics*. A Dorling Kindersley Book. Canadá, 1995.

Escala Rankine

Criada pelo físico escocês William John Macquorn **Rankine** (1820-1872), essa escala tem o valor zero atribuído ao zero absoluto e utiliza o grau Fahrenheit como unidade de variação.



Banco de imagens/Arquivo da editora

SSPL/Getty Images



// Retrato de William John Macquorn Rankine.

Criogenia

A Criogenia é o estudo das baixas temperaturas. Ela pesquisa as técnicas de obtenção das temperaturas muito baixas e o comportamento dos elementos e materiais nessas condições.

A Criogenia surgiu na virada do século XX, quando se conseguiu a liquefação do ar atmosférico e a separação de seus componentes por destilação fracionada. A indústria alimentícia passou a usar dois desses gases criogênicos: o dióxido de carbono e o nitrogênio. O dióxido de carbono (nome comercial: gelo-seco) sublima a $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ e costuma ser usado no estado sólido na conservação de alimentos, como nos carrinhos que vendem sorvetes. O nitrogênio tem como ponto de liquefação a temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo usado nas situações que requerem temperaturas mais baixas. O nitrogênio líquido é também utilizado na Medicina para conservação de embriões, espermatozoides e óvulos.

Algo que costuma despertar divergência de opiniões quanto aos estudos em Criogenia refere-se ao processo de preservação de corpos de humanos recém-falecidos com a expectativa de reanimá-los no futuro. Sobre esse processo, leia o texto a seguir.



Anamaria Mejia/Shutterstock

Na fotografia, observamos a Criogenia sendo empregada para a conservação de embriões em nitrogênio líquido.

Congelar um corpo é fácil. O que os cientistas não sabem ainda é como ressuscitá-lo

1. Assim que uma pessoa morre, um funcionário da empresa de Criogenia resfria o cadáver com gelo. Nessa fase, a temperatura do corpo fica pouco acima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Não é muito frio, mas é o suficiente para evitar, por algum tempo, a proliferação das bactérias que iriam apodrecer o cadáver.
2. Nessa fase, o corpo também recebe uma injeção de substâncias anticoagulantes, para manter os vasos sanguíneos desobstruídos. Depois, todo o sangue é bombeado para fora e no lugar entram substâncias químicas que protegerão as células na hora do congelamento, evitando a formação de parte dos cristais de gelo, que rompem a estrutura celular.
3. No local em que o corpo vai ser congelado, o cadáver passa por um resfriamento gradual, em uma câmara de gelo-seco. Para evitar danos às células, a intenção é que todos os tecidos se congelem no mesmo ritmo. Todo o processo ocorre de maneira lenta e pode durar dois dias, quando a temperatura do corpo chega a $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Depois do resfriamento, o corpo é submergido lentamente em um tanque de nitrogênio líquido, até ser totalmente coberto. Quando essa fase termina, após uma semana, o cadáver está a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, impedido de apodrecer. Ele fica no tanque por toda a eternidade ou até que alguém invente uma tecnologia para ressuscitá-lo.

Disponível em: <www.mundoestranho.abril.com.br/materia/o-que-e-criogenia-humana>. Acesso em: 18 jun. 2018.

Compreensão, pesquisa e debate

- Normalmente, o tema da Criogenia humana nos leva a um confronto de ideias sobre suas implicações tecnológicas, éticas e religiosas. Procure na internet ou em revistas e jornais textos que apresentem diferentes pontos de vista sobre esse assunto, leia-os e debata com seus colegas. Respeite a opinião de todos os participantes do debate.

Exercícios Nível 1

23. (PUC-SP) O Slide, o nome dado ao *skate* futurista, usa levitação magnética para se manter longe do chão e ainda ser capaz de carregar o peso de uma pessoa. É o mesmo princípio utilizado, por exemplo, pelos trens ultrarrápidos japoneses.

Para operar, o Slide deve ter a sua estrutura metálica interna resfriada a temperaturas baixíssimas, alcançadas com nitrogênio líquido. Daí a “fumaça” que se vê nas imagens, que, na verdade, é o nitrogênio vaporizando novamente devido à temperatura ambiente e que, para permanecer no estado líquido, deve ser mantido a aproximadamente -200 graus Celsius. Então, quando o nitrogênio acaba, o *skate* para de “voar”.

Reprodutor/PUC-SP, 2016



// A fumaça que aparenta sair do *skate*, na verdade, é nitrogênio em gaseificação (Foto: Divulgação/Lexus)

Fonte: www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2015/07/como-funciona-o-skate-voador-inspirado-no-filme-de-volta-para-o-futuro-2.html. Consultado em: 03/07/2015

Com relação ao texto, a temperatura do nitrogênio líquido, -200 °C, que resfria a estrutura metálica interna do Slide, quando convertida para as escalas Fahrenheit e Kelvin, seria respectivamente:

- a) -328 e 73
 - b) -392 e 73
 - c) -392 e -473
 - d) -328 e -73
24. No interior de uma sala, há dois termômetros pendurados na parede. Um deles, graduado em Kelvin, indica 298 K para a temperatura ambiente. O outro está graduado em graus Celsius. Quanto esse termômetro está marcando?
25. Lorde Kelvin conceituou zero absoluto como o estágio nulo de agitação das partículas de um sistema físico. Nas escalas Celsius e Fahrenheit, que valores vamos encontrar para expressar a situação física do zero absoluto? (Dê sua resposta desprezando possíveis casas decimais.)
26. As pessoas costumam dizer que na cidade de São Paulo podemos encontrar as quatro estações do ano em um mesmo dia. Claro que essa afirmação é um tanto exagerada. No entanto, não é difícil termos variações de até 15 °C em um mesmo dia. Na escala absoluta Kelvin, que valor representaria essa variação de temperatura?

Exercícios Nível 2

27. (Unifesp) O texto a seguir foi extraído de uma matéria sobre congelamento de cadáveres para sua preservação por muitos anos, publicada no jornal *O Estado de S. Paulo*.

Após a morte clínica, o corpo é resfriado com gelo. Uma injeção de anticoagulantes é aplicada e um fluido especial é bombeado para o coração, espalhando-se pelo corpo e empurrando para fora os fluidos naturais. O corpo é colocado em uma câmara com gás nitrogênio, onde os fluidos endurecem em vez de congelar. Assim que atinge a temperatura de -321 °, o corpo é levado para um tanque de nitrogênio líquido, onde fica de cabeça para baixo.

Na matéria, não consta a unidade de temperatura usada. Considerando que o valor indicado de -321 ° esteja correto e pertença a uma das escalas, Kelvin, Celsius ou Fahrenheit, pode-se concluir que foi usada a escala:

- a) Kelvin, pois se trata de um trabalho científico e esta é a unidade adotada pelo Sistema Internacional.
- b) Fahrenheit, por ser um valor inferior ao zero absoluto e, portanto, só pode ser medido nessa escala.
- c) Fahrenheit, pois as escalas Celsius e Kelvin não admitem esse valor numérico de temperatura.

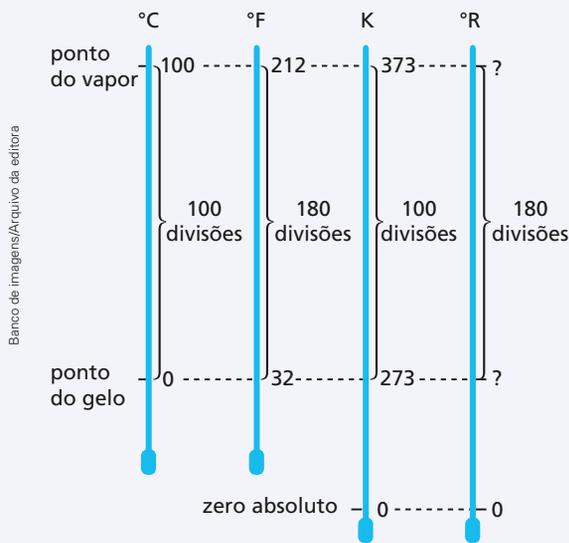
- d) Celsius, pois só ela tem valores numéricos negativos para a indicação de temperaturas.
- e) Celsius, por tratar-se de uma matéria publicada em língua portuguesa e essa ser a unidade adotada oficialmente no Brasil.

28. (UPM-SP) Um pesquisador verifica que certa temperatura obtida na escala Kelvin é igual ao correspondente valor na escala Fahrenheit acrescido de 145 unidades. Qual o valor dessa temperatura na escala Celsius?

29. A escala Kelvin tem sua origem no zero absoluto e usa como unidade o grau Celsius. Existe uma outra escala, denominada Rankine, que também tem sua origem no zero absoluto, mas usa como unidade o grau Fahrenheit. Determine a equação de conversão entre as escalas Kelvin e Rankine.

Resolução:

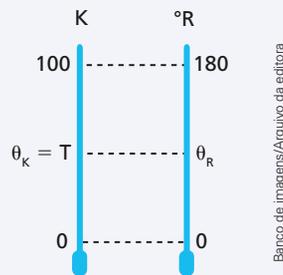
Façamos, inicialmente, um esquema representando as escalas Celsius, Fahrenheit, Kelvin e Rankine:



Do enunciado, sabemos que as origens das escalas Kelvin e Rankine coincidem com o zero absoluto.

Uma vez que a escala Rankine usa como unidade o grau Fahrenheit, observamos que entre os pontos do gelo e do vapor temos 180 divisões, enquanto na Kelvin temos 100 divisões para o mesmo intervalo.

Então, podemos afirmar que ao valor 100 da escala Kelvin corresponde o valor 180 da escala Rankine:



$$\frac{T - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_R - 0}{180 - 0}$$

$$\frac{T}{100} = \frac{\theta_R}{180} \Rightarrow \frac{T}{5} = \frac{\theta_R}{9}$$

$$\boxed{T = \frac{5}{9} \theta_R}$$

- 30. A escala Rankine tem origem no zero absoluto e utiliza como unidade o grau Fahrenheit. Que valores, nessa escala, representam os pontos do gelo e do vapor?
- 31. A relação entre as escalas Celsius (C) e Rankine (R) é dada pela equação:

$$\frac{\theta_R - 492}{9} = \frac{\theta_C}{5}$$

Para qual temperatura essas escalas fornecem a mesma leitura? Essa temperatura pode existir?

- 32. Um físico chamado Galileu Albert Newton encontrava-se em um laboratório realizando um experimento no qual deveria aquecer certa porção de água pura. Primeiramente, ele mediu a temperatura inicial da água e encontrou o valor 20 °C. Porém, como ele era muito desajeitado, ao colocar o termômetro sobre a mesa, acabou quebrando-o. Procurando outro termômetro, encontrou um graduado na escala Kelvin. No final do aquecimento, observou que a temperatura da água era de 348 K. Na equação utilizada por esse físico, a variação de temperatura deveria estar na escala Fahrenheit. O valor, em graus Fahrenheit, que ele encontrou para a variação de temperatura da água foi de:
 - a) 20 °F.
 - b) 66 °F.
 - c) 75 °F.
 - d) 99 °F.
 - e) 106 °F.

33. (UFSE) Um termômetro que mede a temperatura ambiente indica sempre $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura correta, e outro que mede a temperatura de um líquido indica $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura correta. Se o líquido está $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura ambiente, a indicação dos termômetros defeituosos, em graus Celsius, pode ser:

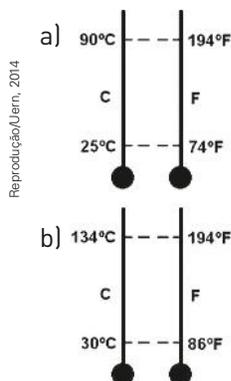
- a) 18 e 16.
- b) 18 e 18.
- c) 18 e 20.
- d) 18 e 23.
- e) 18 e 28.

34. (OBF) Um estudante encontra em um laboratório, localizado ao nível do mar, um velho termômetro de mercúrio cuja escala se apagou completamente e resolve calibrá-lo. Inicialmente, ele prepara dois sistemas: (A) água líquida em equilíbrio com certa massa de gelo e (B) água em ebulição. Em seguida, coloca o termômetro em contato com o sistema A e espera que a coluna de mercúrio atinja um valor de equilíbrio que, então, é marcado com um ponto. Repete esse procedimento com o sistema B. Após marcar esses dois pontos, faz marcas igualmente espaçadas ao longo do instrumento. A figura abaixo é uma representação desse termômetro no momento que está registrando a temperatura ambiente do laboratório, depois de calibrado. Em graus Celsius, qual é essa temperatura?

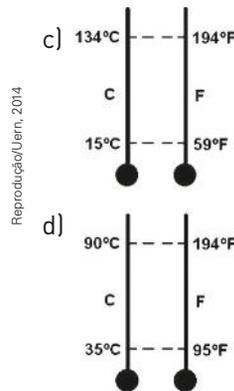


Reprodução/Sociedade Brasileira de Física, 2015

35. (Uern) Dos pares de termômetros, assinale o que representa a relação correta entre as escalas Celsius e Fahrenheit.



Reprodução/Uern, 2014



Reprodução/Uern, 2014

36. (UPM-SP) Um termômetro graduado na escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$) é colocado juntamente com dois outros, graduados nas escalas arbitrárias A ($^{\circ}\text{A}$) e B ($^{\circ}\text{B}$), em uma vasilha contendo gelo (água no estado sólido) em ponto de fusão, ao nível do mar. Em seguida, ainda ao nível do mar, os mesmos termômetros são colocados em uma outra vasilha, contendo água em ebulição, até atingirem o equilíbrio térmico. As medidas das temperaturas, em cada uma das experiências, estão indicadas nas figuras 1 e 2, respectivamente:

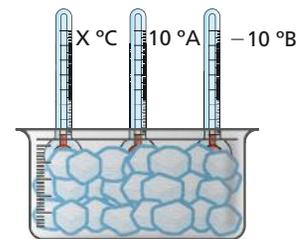


figura 1

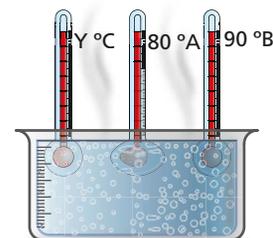


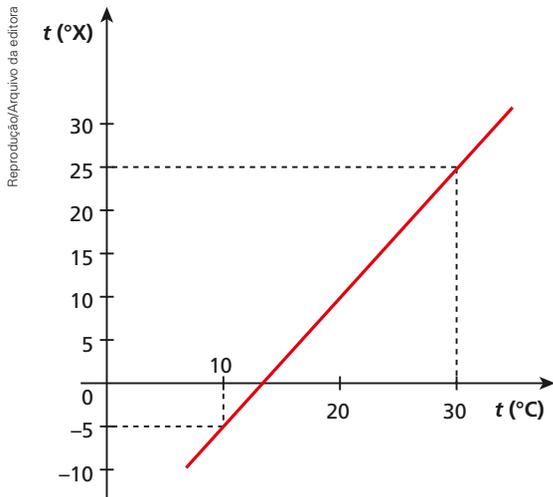
figura 2

Ilustrações: Reprodução/Arquivo da editora

Para uma outra situação, na qual o termômetro graduado na escala A indica $17\text{ }^{\circ}\text{A}$, o termômetro graduado na escala B e o graduado na escala Celsius indicarão, respectivamente:

- a) $0\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $7\text{ }^{\circ}\text{C}$
- b) $0\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- c) $10\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $17\text{ }^{\circ}\text{C}$
- d) $10\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $27\text{ }^{\circ}\text{C}$
- e) $17\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

37. (UEL-PR) O gráfico indicado a seguir representa a relação entre a temperatura medida em uma escala **X** e a mesma temperatura medida na escala Celsius.



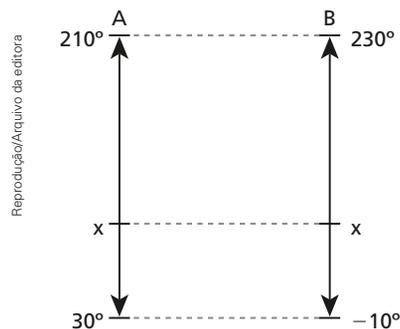
Para a variação de $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, que intervalo vamos observar na escala **X**?

38. (UCDB-MS) Um processo rápido para estimar o valor em graus Celsius de uma temperatura fornecida em graus Fahrenheit é dividir o valor fornecido por dois e subtrair 16. Assim, $76\text{ }^{\circ}\text{F}$ valeriam, aproximadamente, $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. O erro dessa estimativa seria de:
- 10%.
 - 15%.
 - 20%.
 - 23%.
 - 25%.
39. Na parede da sala de uma residência são colocados quatro termômetros, graduados nas escalas Celsius, Fahrenheit, Réaumur e Kelvin. Numericamente, qual deles apresentará maior leitura?
- Fahrenheit.
 - Celsius.
 - Réaumur.
 - Kelvin.
 - Todos os termômetros apresentarão a mesma leitura.

Para raciocinar um pouco mais

40. (UEPB) Em 1851, o matemático e físico escocês William Thomson, que viveu entre 1824 e 1907, mais tarde possuidor do título de Lord Kelvin, propôs a escala absoluta de temperatura, atualmente conhecida como escala Kelvin de temperatura (**K**). Utilizando-se das informações contidas no texto, indique a alternativa **correta**:
- Com o avanço da tecnologia, atualmente, é possível obter a temperatura de zero absoluto.
 - Os valores dessa escala estão relacionados com os da escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), por meio da expressão $K = ^{\circ}\text{F} + 273$.
 - A partir de 1954, adotou-se como padrão o ponto tríplice da água, temperatura em que a água coexiste nos três estados – sólido, líquido e vapor. Isso ocorre à temperatura de $0,01\text{ }^{\circ}\text{F}$ ou $273,16\text{ K}$, por definição, e à pressão de 610 Pa ($4,58\text{ mm Hg}$).
 - Kelvin é a unidade de temperatura comumente utilizada nos termômetros brasileiros.
 - Kelvin considerou que a energia de movimento das moléculas dos gases atingiria um valor mínimo de temperatura, ao qual ele chamou de zero absoluto.

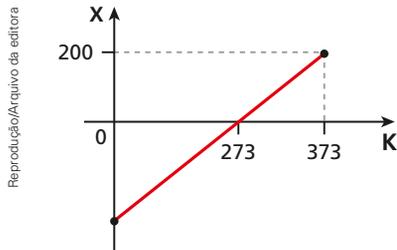
41. (Unirio-RJ) Em uma certa escala termométrica **A**, os pontos de fusão do gelo e de ebulição da água ao nível do mar são, respectivamente, 30° e 210° . Em outra escala termométrica **B**, os pontos de fusão do gelo e de ebulição da água ao nível do mar são, respectivamente, -10° e 230° , como mostra a figura abaixo. Há uma temperatura que é representada em ambas as escalas pelo mesmo número.



Sabendo-se que a temperatura de um corpo está entre os pontos de fusão do gelo e de ebulição da água ao nível do mar a probabilidade de que sua temperatura seja maior do que x vale:

- $\frac{2}{5}$
- $\frac{3}{4}$
- $\frac{1}{4}$
- $\frac{2}{3}$
- $\frac{1}{3}$

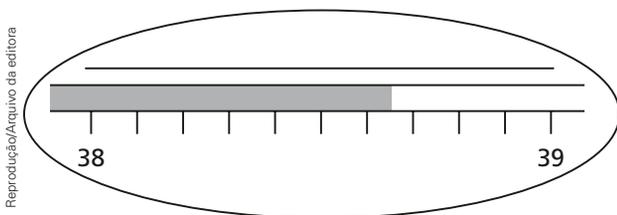
42. (OPF) A figura a seguir representa um gráfico que relaciona uma escala de temperaturas hipotéticas, **X**, e a escala Kelvin de temperaturas absolutas. Sabendo que um objeto está a uma temperatura de 80°X , determine sua temperatura se fosse medida por um termômetro calibrado na escala Celsius.



43. (Unitau-SP) Um estudante encontrou um termômetro graduado em uma desconhecida escala de temperatura. Quando o estudante usou o termômetro para medir a temperatura do ponto de solidificação da água, ao nível do mar e sob a pressão atmosférica, obteve o valor de 20°Q . Quando o mesmo termômetro foi usado para medir o ponto de ebulição da água, também ao nível do mar e sob a pressão atmosférica, obteve o valor de 140°Q . A partir dessas medidas, o estudante obteve uma equação para transformar valores medidos na escala Celsius (θ_c) para a escala **Q** (θ_q). Assinale a alternativa que apresenta a equação **correta**:

- a) $\theta_c = 1,2\theta_q + 20$ d) $\theta_q = 1,2\theta_c + 20$
 b) $\theta_q = 1,4\theta_c - 20$ e) $\theta_q = 1,4\theta_c + 20$
 c) $\theta_c = 20\theta_q + 1,2$

44. (Unifesp) Na medida de temperatura de uma pessoa por meio de um termômetro clínico, observou-se que o nível de mercúrio estacionou na região entre 38°C e 39°C da escala, como está ilustrado na figura.

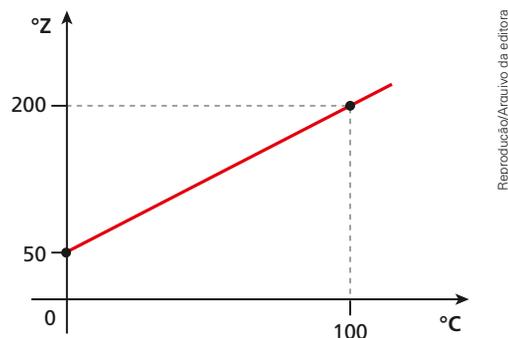


Após a leitura da temperatura, o médico necessita do valor transformado para uma nova escala, definida por $t_x = \frac{2t_c}{3}$ e em unidades $^\circ\text{X}$, onde t_c é

a temperatura na escala Celsius. Lembrando de seus conhecimentos sobre algarismos significativos, ele conclui que o valor mais apropriado para a temperatura t_x é:

- a) $25,7^\circ\text{X}$.
 b) $25,7667^\circ\text{X}$.
 c) $25,766^\circ\text{X}$.
 d) $25,77^\circ\text{X}$.
 e) 26°X .

45. (Fatec-SP) Um certo pesquisador constrói, na Baixada Santista, um termômetro de álcool e determina que sua escala será denominada "**Z**". Para calibrá-lo, ele resolve adotar como parâmetros de referência a água e outro termômetro na escala Celsius. Assim, ele constrói um gráfico, como apresentado, relacionando as duas escalas.



Dessa forma é correto afirmar que, em condições normais:

- a) os valores atribuídos ao ponto de fusão do gelo nas duas escalas são iguais.
 b) os valores atribuídos ao ponto de ebulição da água nas duas escalas são iguais.
 c) a escala **Z** é uma escala centígrada.
 d) o valor de 120°Z equivale a 60°C .
 e) o valor de 60°C equivale a 140°Z .

46. No século XVIII, o físico francês Réaumur criou uma escala termométrica que assinalava 0 para o ponto do gelo e 80 para o ponto do vapor. A razão de ter adotado os valores 0 e 80 é que, após vários experimentos, ele descobriu que o álcool, que foi usado como substância termométrica, expandia 80 partes por mil ao ser aquecido do ponto do gelo até o ponto do vapor.

Comparando essa escala Réaumur com a escala Fahrenheit, qual a temperatura em que as leituras correspondem a um mesmo valor numérico?

O calor e sua propagação



Alf Ribeiro/Piranga RM/Lainstock

// Estufas – como a do viveiro Manequinho Lopes, localizado no Parque Ibirapuera, São Paulo – são lugares que têm como objetivo manter a temperatura em seu interior adequada ao cultivo de plantas. Para isso, o material utilizado em suas paredes e teto deve ter como propriedade física a não transferência de calor entre o ambiente interno e o externo. No entanto, a luz solar, fonte de energia térmica, deve atingir seu interior.

Diariamente vivemos inúmeras situações relacionadas aos conceitos de calor e equilíbrio térmico: desde a maneira como nossos sentidos percebem a temperatura do ar (sensação térmica) até a empírica constatação de que, se deixarmos um bolo recém-saído do forno em cima de uma mesa, ele irá esfriar e, após certo tempo, a sua temperatura será igual à do ambiente. Essas experiências indicam a natureza do conceito de calor, assunto deste tópico. Estudaremos também as unidades usuais de calor e seus processos de propagação, além de algumas aplicações tecnológicas que visam à melhoria da nossa qualidade de vida e sinalizam a possibilidade de aumentar o uso global de energias sustentáveis.

1. Energia térmica

Quando observamos o mundo material à nossa volta, encontramos casas, plantas, automóveis, pessoas, a atmosfera (o ar), água, pedras e tantos outros representantes da matéria. Todos têm em comum o fato de serem formados por pequenas partículas, as moléculas.

Como vimos no Tópico 1, essas partículas possuem energia de agitação, sendo mínima no **zero absoluto**.

Em uma primeira abordagem desse assunto, podemos dizer que essa energia de agitação das partículas é a **energia térmica** do corpo. Portanto, o somatório das energias de agitação das partículas de um corpo estabelece a energia térmica desse corpo. No Tópico 3, veremos que a energia térmica é, na realidade, o somatório das energias de agitação com a energia de agregação das partículas. Essa energia de agregação é que estabelece o estado físico do corpo (sólido, líquido ou gasoso).

A **energia térmica** do corpo depende de dois fatores: da energia de agitação média de cada partícula (que determina a temperatura do corpo) e do número de partículas que o corpo possui.

Assim:

A **energia térmica** de um corpo é o somatório das energias de agitação das suas partículas e depende da temperatura do corpo e do número de partículas nele existentes.

É oportuno observar que o fato de um corpo **A** estar a uma temperatura maior que um corpo **B** não implica, necessariamente, que **A** tenha maior quantidade de energia térmica que **B**. O corpo **B**, por exemplo, pode ter mais partículas que **A**, de tal forma que o somatório das energias de vibração de suas partículas supere o de **A**.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

// A barra de chocolate foi dividida em duas partes. Apesar de ambas estarem à mesma temperatura, a parte maior possui mais energia térmica que a menor, por ser constituída de um número maior de partículas.

2. Calor

Quando colocamos em contato térmico dois corpos de temperaturas diferentes, notamos que eles buscam uma situação de equilíbrio térmico, em que as temperaturas tornam-se iguais.

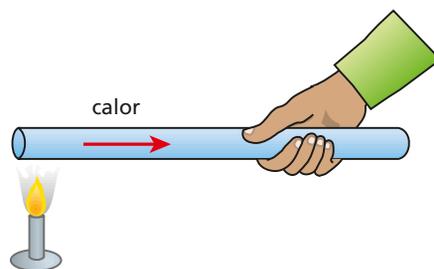
Para que isso aconteça, o corpo de maior temperatura fornece certa quantidade de energia térmica ao de menor temperatura. Isso provoca uma diminuição em sua temperatura e um aumento na temperatura do corpo inicialmente mais frio, até que se estabeleça o equilíbrio térmico.

Essa energia térmica, que ocorre apenas enquanto está em trânsito, é denominada **calor**.

Calor é energia térmica em trânsito de um corpo para outro ou de uma parte para outra de um mesmo corpo. O trânsito é provocado por uma diferença de temperaturas.

Observe que o calor flui, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

// Nesta situação, o calor propaga-se da extremidade esquerda da barra, em contato com o fogo, para a extremidade direita. Note que o calor flui naturalmente da região de maior temperatura para a de menor temperatura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

3. Unidade usual de calor

Sendo o calor uma forma de energia, no Sistema Internacional de Unidades (SI) sua unidade é o **joule (J)**. Esse nome foi uma forma de a comunidade científica homenagear o físico inglês James Prescott Joule (1818-1889), que, entre outros trabalhos, demonstrou a equivalência entre a energia mecânica e a energia térmica. Esse assunto será tratado no Tópico 5 (Termodinâmica).

Além do joule, podemos usar a unidade **caloria (cal)** para avaliar quantidades de calor. Essa unidade é pouco utilizada nos laboratórios, mas muito usada nos livros escolares. Inicialmente, a caloria foi definida como a quantidade de calor necessária para fazer 1 grama de água sofrer a variação de 1 grau Celsius em sua temperatura. Porém, observou-se que essa quantidade de energia era um pouco diferente quando se aquecia 1 grama de água de 10 °C para 11 °C e de 90 °C para 91 °C, por exemplo. Assim, foi estabelecido um valor médio, que acabou se encaixando entre 14,5 °C e 15,5 °C. Portanto:

Uma **caloria (cal)** é a quantidade de calor que 1 grama de água pura deve receber, sob pressão normal, para que sua temperatura seja elevada de 14,5 °C a 15,5 °C.

Na comparação com a definição de joule, estabelecida como o trabalho realizado por uma força de 1 newton aplicada a um ponto que se desloca 1 metro na direção dessa força, encontramos a equivalência entre essas unidades:

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

No entanto, para facilitar os cálculos, é comum aparecer o valor 4,2 joules para cada caloria.

Assim:

$$J = 4,2 \frac{\text{joules}}{\text{caloria}}$$

Essa relação é utilizada na conversão de joule para caloria ou vice-versa.

$$\tau \text{ (joule)} = J \cdot Q \text{ (caloria)}$$

Além da unidade caloria, um dos múltiplos mais usados é a **quilocaloria (kcal)**.

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$$

Esse múltiplo costuma aparecer nos rótulos dos alimentos, expressando o valor energético de uma porção definida, como vamos ver a seguir.

Ampliando o olhar

Caloria alimentar (Cal)

Nas embalagens de alimentos, normalmente encontramos a equivalência energética de uma porção. Essa energia vem expressa em kcal (quilocaloria) ou em Cal (caloria alimentar ou grande caloria), que são equivalentes.

$$1,0 \text{ Cal} = 1,0 \text{ kcal}$$

Observe a tabela abaixo, retirada da embalagem de uma caixa de aveia.

Informação nutricional			
Cada 100 g de aveia contém em média:			
Carboidratos	66,6 g	Ferro	4,5 mg
Proteínas	13,9 g	Vitamina B1	0,6 mg
Gordura	4,8 g	Vitamina B2	0,0 mg
Fibras alimentares	9,1 g	Sódio	4,60 mg
Cálcio	47,9 mg	Niacina	4,5 mg
Fósforo	153,4 mg	Calorias	393,9
CONTÉM GLÚTEN			
Ingrediente: Aveia 100% natural.			
CONSERVAR EM LUGAR SECO E AREJADO			

Fonte: <www.tabelanutricional.com.br/aveia-flocos-crua>. Acesso em: 18 jun. 2018.

Apesar de não vir mencionado na embalagem, a unidade utilizada é a caloria alimentar (Cal), que equivale a 10^3 calorias, ou a 1 quilocaloria (kcal).

Assim, cada 100 gramas dessa aveia tem capacidade energética equivalente a 393,9 Cal (393,9 kcal). Uma pessoa geralmente precisa, em média, de 2500 kcal/dia para suas necessidades básicas. Um atleta necessita de uma quantidade maior que a citada e uma pessoa sedentária necessita de uma quantidade menor.

Nas tabelas a seguir, é apresentado um estudo feito pela Organização das Nações Unidas, no qual encontramos a média alimentar diária, em calorias alimentares, de alguns países.

OS MAIS FAMINTOS	
Países	Média alimentar diária
Eritreia	1 590 Cal
Burundi	1 680 Cal
Comores	1 840 Cal
Haiti	1 850 Cal
Zâmbia	1 880 Cal
Etiópia	1 950 Cal
República Centro-Africana	1 960 Cal
Angola	1 960 Cal

A MESA MAIS FARTA	
Países	Média alimentar diária
Áustria	3 800 Cal
Estados Unidos	3 750 Cal
Grécia	3 710 Cal
Bélgica	3 690 Cal
Luxemburgo	3 680 Cal
Itália	3 650 Cal
Malta	3 560 Cal
Irlanda	3 590 Cal

Fonte: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO).

É bom lembrar que uma mesa farta nem sempre é composta de alimentos saudáveis.

4. Processos de propagação do calor

Já vimos que a energia térmica pode mudar de local, indo, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Essa mudança pode processar-se de três maneiras distintas, denominadas **condução**, **convecção** e **radiação**.

A condução

Ao colocarmos a ponta de uma barra de metal em contato com uma fonte térmica e segurarmos a outra extremidade, notamos que o local que está em contato com a mão se torna, rapidamente, cada vez mais quente, apesar de estar distante da fonte de calor.

É o que acontece quando um cozinheiro fica mexendo o conteúdo de uma panela com uma colher metálica. Após algum tempo ele não consegue manter a colher em sua mão, já que toda a colher se encontra muito quente. Os cozinheiros mais experientes, por terem conhecimento desse fato, usam colher de madeira, material que conduz o calor de forma mais lenta do que o metal.

Nos exemplos citados, o calor propaga-se através da barra e da colher. Esse fenômeno físico é denominado **condução**.

Assim:

Condução é o processo de propagação de calor no qual a energia térmica passa de partícula para partícula de um meio.

Banco de imagens/
Arquivo da editora



// Esquema, sem rigor na escala, que representa a condução do calor através de uma barra. Note que a energia térmica é passada sequencialmente de partícula para partícula e que vibram mais as partículas mais próximas da fonte de calor.

João Anselmo/Arquivo da editora



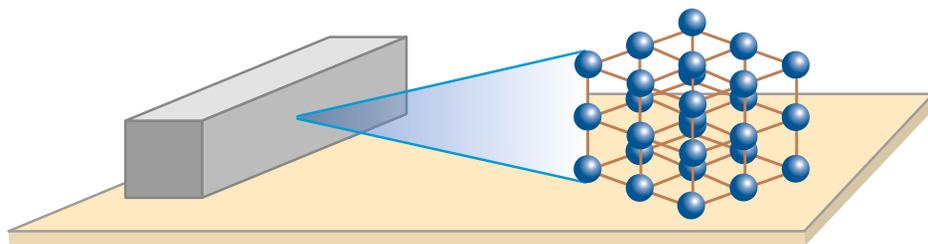
É importante notar que, na condução, as partículas permanecem vibrando em torno de suas posições de equilíbrio. As partículas não se deslocam, ao contrário do que acontece com a energia.

Destaquemos que, como a ocorrência da condução requer a existência de um meio material, esse fenômeno não ocorre no vácuo.

// O calor propaga-se por condução através da parede do forno da pizzaria, atingindo a mão da pessoa que se encontra na face externa dessa parede.

Forças intermoleculares explicando a condução

As forças de interação molecular são de origem eletromagnética.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

// Representação esquemática da estrutura cristalina de um sólido. As partículas se mantêm coesas devido às forças intermoleculares.

Num corpo, duas moléculas vizinhas estão na **posição de equilíbrio** quando a resultante das forças de interação entre elas é nula. Nessa situação, chamaremos de d_0 a distância que separa essas moléculas.

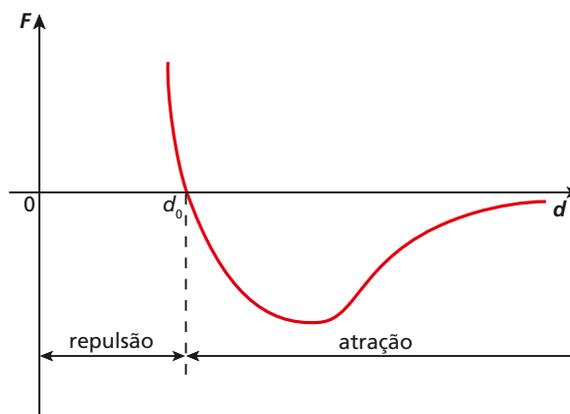
Quando a distância d entre as moléculas torna-se maior que d_0 , surgem forças de interação **atrativas**. É por isso que uma barra de ferro, por exemplo, resiste a esforços de tração.

Quando as moléculas são aproximadas de modo que a distância d entre elas torna-se menor que d_0 , surgem as forças de interação **repulsivas**. É por essa razão que a barra de ferro do exemplo anterior resiste a esforços de compressão.

Seja F a intensidade da força de interação entre as moléculas vizinhas pertencentes a um dado corpo. O gráfico a seguir mostra a variação de F em função da distância d entre essas moléculas.

No gráfico, os valores positivos de F correspondem a forças de repulsão ($d < d_0$), enquanto os valores negativos correspondem a forças de atração ($d > d_0$). A força atrativa praticamente se anula quando d vale aproximadamente $10d_0$.

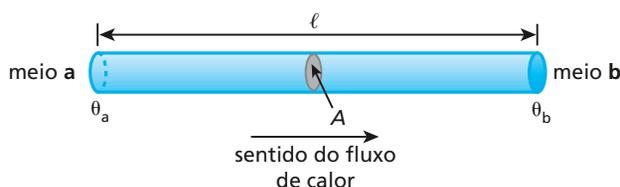
Dessa forma, podemos concluir que as moléculas, ao vibrarem com maior amplitude, conseguem aproximar-se mais de moléculas vizinhas, intensificando-se as forças repulsivas. Conseqüentemente, essas moléculas vizinhas são "sacudidas" pelas primeiras, passando a um estágio de vibração de amplitudes maiores. Assim, a energia térmica (o calor) é conduzida de molécula para molécula do meio a que elas pertencem.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Cálculo do fluxo de calor (ϕ) – Lei de Fourier

Façamos, agora, um estudo quantitativo do calor que flui através de uma barra de secção transversal uniforme. Para tanto, vamos considerar ℓ o comprimento da barra e A a área de sua secção transversal. Coloquemos as extremidades dessa barra em contato térmico com dois meios **a** e **b**, cujas temperaturas constantes são, respectivamente, θ_a e θ_b (com $\theta_a > \theta_b$). Para evitar possíveis perdas de calor, a barra é isolada termicamente ao longo de sua superfície, de modo que o calor só possa entrar e sair pelas extremidades.



Banco de imagens/Arquivo da editora



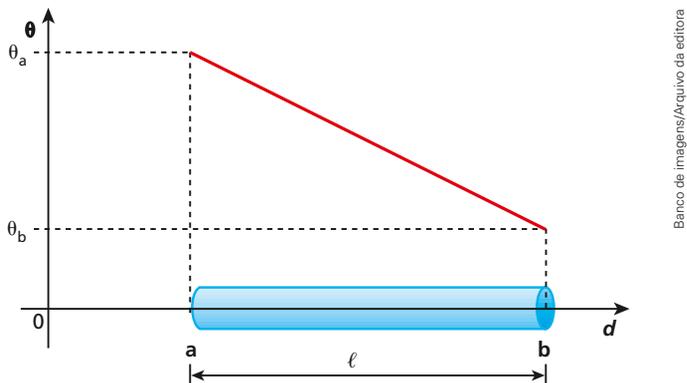
SPL DC/Latinstock

Jean-Baptiste Joseph Fourier, matemático e físico francês, que nasceu em 1768, em Auxerre (Borgonha), e faleceu em 1830.

Em razão da diferença de temperatura entre as extremidades **a** e **b**, há um fluxo de calor (ou corrente térmica) através da barra, no sentido da extremidade mais quente para a mais fria. A intensidade desse fluxo térmico é definida pela razão entre a quantidade de calor Q que atravessa uma secção transversal da barra e o intervalo de tempo Δt correspondente:

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{Unidade usual: } \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

Inicialmente, a temperatura das diversas secções da barra varia com o tempo. Decorrido certo intervalo de tempo, entretanto, essas secções assumem temperaturas constantes, mas diferentes entre si. Nessa situação, atingiu-se um equilíbrio e o fluxo de calor dá-se em **regime permanente** ou **estacionário**. Nesse caso, o fluxo de calor é o mesmo em qualquer secção da barra e a temperatura ao longo dela obedece ao gráfico representado a seguir.



No regime permanente, o fluxo térmico depende de quatro fatores: da área (A) da secção transversal da barra, de seu comprimento (ℓ), da diferença de temperaturas ($\Delta\theta$) dos meios **a** e **b** e do material de que é feita a barra (k).

Matematicamente, tais grandezas são relacionadas pela equação a seguir, denominada **lei de Fourier**:

$$\phi = k \frac{A|\Delta\theta|}{\ell}$$

A grandeza k é uma constante característica do material da barra, sendo denominada **coeficiente de condutibilidade térmica**.

Os maiores valores do coeficiente k pertencem aos metais, que são os melhores condutores de energia térmica. Os menores valores de k ficam para os isolantes térmicos, como a lã de vidro, a cortiça, a madeira, os gases em geral e outros.

A seguir, temos uma tabela dos coeficientes de condutibilidade térmica de algumas substâncias (ou materiais).

Tabela de condutibilidade térmica					
Gases		Sólidos diversos		Metais	
Material	k em $\frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	Material	k em $\frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	Material	k em $\frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
Oxigênio (a 20 °C)	$5,6 \cdot 10^{-5}$	Cortiça e feltro	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Chumbo	$8,2 \cdot 10^{-2}$
Ar (a 0 °C)	$5,7 \cdot 10^{-5}$	Lã de vidro	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Aço	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Hidrogênio	$3,3 \cdot 10^{-4}$	Madeira	$3,0 \cdot 10^{-4}$	Latão	$2,6 \cdot 10^{-1}$
Hélio	$3,4 \cdot 10^{-4}$	Tijolo de barro	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Alumínio	$4,9 \cdot 10^{-1}$
		Concreto e vidro	$2,0 \cdot 10^{-3}$	Cobre	$9,2 \cdot 10^{-1}$
		Tijolo refratário	$2,5 \cdot 10^{-3}$	Prata	1,01
		Gelo	$4,0 \cdot 10^{-3}$		

Fonte: HAYNES, W. M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press LCC, 2012, p. 209.

Casa de gelo?

A casa de gelo (iglu) é um abrigo feito de neve endurecida (gelo), utilizado por povos que habitam regiões de frio extremo, como o norte do Alasca e o continente Ártico (polo norte). Para construir tais abrigos, esses povos cortam grandes blocos de gelo e os organizam para formar uma cúpula que é completada com um único bloco na parte superior. A forma arredondada é importante para que a neve, ao cair, escorregue, evitando que o sobrepeso cause o desmoronamento da construção.

Como o gelo apresenta coeficiente de condutibilidade térmica pequeno $\left(2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$, ele pode ser considerado um bom isolante térmico. Assim, o calor produzido no interior do iglu pela transpiração e respiração das pessoas, bem como a energia resultado da queima de óleo de foca ou de outro combustível, permanece no interior aquecendo o ar. Enquanto isso, a temperatura externa pode chegar a -50°C no inverno.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Faça você mesmo



Esse experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão de seu professor.

Fio metálico e condução de calor

Vimos neste tópico que a transmissão de calor pode ocorrer por condução, convecção ou radiação. Vamos agora realizar um experimento muito simples, que consiste em verificar o processo de condução de calor através de um fio metálico.

Material necessário

- 1 pedaço de fio de cobre maciço desencapado, com comprimento em torno de 30 cm, o mais grosso possível;
- 1 vela comum;
- 3 preguinhos ou tachinhas;
- 1 caixa de fósforos ou isqueiro;
- 1 alicate.

Procedimento

- I. Acenda a vela e, com cuidado, deixe pingar parafina derretida em três pontos do fio. Espere a parafina começar a se solidificar e encoste os preguinhos na parafina, fixando-os um a um no fio.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

- II. Segure uma das extremidades do fio com o alicate e encoste a extremidade oposta na chama da vela, que deverá estar acoplada a uma base de apoio (pode ser um pires, no qual você derramará parafina derretida para fixar a vela).



Fernando Favoretto/Criar Imagem

- III. Aguarde alguns instantes e você notará que, depois de derretida a parafina de fixação, o primeiro preguinho se soltará e o mesmo poderá ser observado em relação aos outros dois preguinhos, que se soltarão sequencialmente.

Desenvolvimento

1. Por que os preguinhos vão se soltando sequencialmente?
2. Como você explica esse fenômeno?
3. O processo de transmissão de calor por condução pode ocorrer no vácuo? Por quê? Converse com os colegas e o professor.

Exercícios Nível 1

- Imagine dois corpos **A** e **B** com temperaturas θ_A e θ_B , sendo $\theta_A > \theta_B$. Quando colocamos esses corpos em contato térmico, podemos afirmar que ocorre o seguinte fato:
 - Os corpos se repelem.
 - O calor flui do corpo **A** para o corpo **B** por tempo indeterminado.
 - O calor flui do corpo **B** para o corpo **A** por tempo indeterminado.
 - O calor flui de **A** para **B** até que ambos atinjam a mesma temperatura.
 - Não acontece nada.
- No café da manhã, uma colher metálica é colocada no interior de uma caneca que contém leite bem quente. A respeito desse acontecimento, são feitas três afirmativas:
 - Após atingirem o equilíbrio térmico, a colher e o leite estão a uma mesma temperatura.
 - Após o equilíbrio térmico, a colher e o leite passam a conter quantidades iguais de energia térmica.
 - Após o equilíbrio térmico, cessa o fluxo de calor que existia do leite (mais quente) para a colher (mais fria).Podemos afirmar que:
 - somente a afirmativa I é correta;
 - somente a afirmativa II é correta;
 - somente a afirmativa III é correta;
 - as afirmativas I e III são corretas;
 - as afirmativas II e III são corretas.
- (Enem) Nos dias frios, é comum ouvir expressões como: "Esta roupa é quentinha" ou então "Feche a janela para o frio não entrar". As expressões do senso comum utilizadas estão em desacordo com o conceito de calor da termodinâmica. A roupa não é "quentinha", muito menos o frio "entra" pela janela. A utilização das expressões "roupa é quentinha" e "para o frio não entrar" é inadequada, pois o(a)
 - roupa absorve a temperatura do corpo da pessoa, e o frio não entra pela janela, o calor é que sai por ela;
 - roupa não fornece calor por ser um isolante térmico, e o frio não entra pela janela, pois é a temperatura da sala que sai por ela;
 - roupa não é uma fonte de temperatura, e o frio não pode entrar pela janela, pois o calor está contido na sala, logo o calor é que sai por ela;
 - calor não está contido num corpo, sendo uma forma de energia em trânsito de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura;
 - calor está contido no corpo da pessoa, e não na roupa, sendo uma forma de temperatura em trânsito de um corpo mais quente para um corpo mais frio.
- (Enem) A sensação de frio que nós sentimos resulta:
 - do fato de nosso corpo precisar receber calor do meio exterior para não sentirmos frio;
 - da perda de calor do nosso corpo para a atmosfera que está a uma temperatura maior;
 - da perda de calor do nosso corpo para a atmosfera que está a uma temperatura menor;
 - do fato de a friagem que vem da atmosfera afetar o nosso corpo;
 - da transferência de calor da atmosfera para o nosso corpo.
- Você sabe que o aprendizado da Física também **ER** se faz por meio da observação das situações que ocorrem no nosso dia a dia. Faça um experimento. Caminhe descalço sobre um tapete ou um piso cerâmico, como o do banheiro da sua casa, por exemplo. Você vai notar que o piso cerâmico parece mais frio do que o tapete, apesar de estarem à mesma temperatura. Essa diferença de sensação se deve ao fato de:
 - a capacidade térmica do piso cerâmico ser menor que a do tapete;
 - a temperatura do piso cerâmico ser menor que a do tapete;
 - a temperatura do tapete ser menor que a do piso cerâmico;
 - a condutividade térmica do piso cerâmico ser maior que a do tapete;
 - a condutividade térmica do piso cerâmico ser menor que a do tapete.

Resolução:

A sensação de quente e de frio que sentimos está relacionada com a rapidez com que recebemos ou cedemos calor. Ao pisar no piso de cerâmica, perdemos energia mais rapidamente do que quando pisamos em um tapete. Isso ocorre porque a condutividade térmica do piso é maior do que a do tapete.

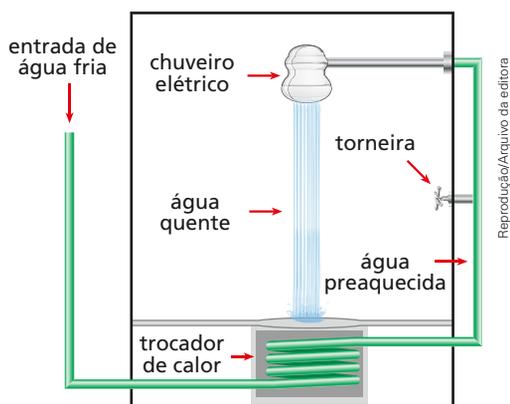
Resposta: alternativa **d**.

6. Numa noite muito fria, você ficou na sala assistindo à televisão. Após algum tempo, foi para a cama e deitou-se debaixo das coberturas (lençol, cobertor e edredom). Você nota que a cama está muito fria, apesar das coberturas, e só depois de algum tempo o local se torna aquecido.

Isso ocorre porque:

- a) o cobertor e o edredom impedem a entrada do frio que se encontra no meio externo.
- b) o cobertor e o edredom possuem alta condutividade térmica.
- c) o cobertor e o edredom possuem calor entre suas fibras, que, ao ser liberado, aquece a cama.
- d) o cobertor e o edredom não são aquecedores, são isolantes térmicos, que não deixam o calor liberado por seu corpo sair para o meio externo.
- e) sendo o corpo humano um bom absorvedor de frio, após algum tempo não há mais frio debaixo das coberturas.

7. (UFV-MG) Um engenheiro criou um chuveiro que preaquece a água no ralo antes que ela chegue à resistência do chuveiro. A água quente que cai do chuveiro, ao passar pelo ralo, entra em contato com o cano que fornece água fria para o chuveiro. Nesse ralo há um tubo em forma de espiral cuja função é proporcionar a troca de calor, como se observa no esquema abaixo.



Para aumentar a troca de calor no ralo, o engenheiro testou vários materiais. Usou o CPVC, que é isolante térmico e, em ordem crescente de condutividade térmica, o aço, o alumínio e o cobre. Dos materiais testados, o mais adequado para ser usado como trocador de calor no ralo é o:

- a) cobre.
 - b) alumínio.
 - c) CPVC.
 - d) aço.
8. Uma garrafa de vidro e uma lata de refrigerante permanecem durante vários dias em uma geladeira. Quando pegamos a garrafa e a lata com as mãos desprotegidas para retirá-las da geladeira, temos a impressão de que a lata está mais fria do que a garrafa. Isso é explicado pelo fato de:
- a) a temperatura do refrigerante na lata ser diferente da temperatura do refrigerante na garrafa;
 - b) a capacidade térmica do refrigerante na lata ser diferente da capacidade térmica do refrigerante na garrafa;
 - c) o calor específico dos dois recipientes ser diferente;
 - d) o coeficiente de dilatação térmica dos dois recipientes ser diferente;
 - e) a condutividade térmica dos dois recipientes ser diferente.
9. (Enem) Num experimento, um professor deixa duas bandejas de mesma massa, uma de plástico e outra de alumínio, sobre a mesa do laboratório. Após algumas horas, ele pede aos alunos que avaliem a temperatura das duas bandejas, usando para isso o tato. Seus alunos afirmam, categoricamente, que a bandeja de alumínio encontra-se numa temperatura mais baixa. Intrigado, ele propõe uma segunda atividade, em que coloca

Exercícios Nível 2

um cubo de gelo sobre cada uma das bandejas, que estão em equilíbrio térmico com o ambiente, e os questiona em qual delas a taxa de derretimento do gelo será maior.

O aluno que responder corretamente ao questionamento do professor dirá que o derretimento ocorrerá

- a) mais rapidamente na bandeja de alumínio, pois ela tem uma maior condutividade térmica que a de plástico;
- b) mais rapidamente na bandeja de plástico, pois ela tem inicialmente uma temperatura mais alta que a de alumínio;
- c) mais rapidamente na bandeja de plástico, pois ela tem uma maior capacidade térmica que a de alumínio;
- d) mais rapidamente na bandeja de alumínio, pois ela tem um calor específico menor que a de plástico;
- e) com a mesma rapidez nas duas bandejas, pois apresentarão a mesma variação de temperatura.

10. Uma barra de alumínio de 50 cm de comprimento e área de seção transversal de 5 cm^2 tem uma de suas extremidades em contato térmico com uma câmara de vapor de água em ebulição ($100 \text{ }^\circ\text{C}$).

A outra extremidade está imersa em uma cuba que contém uma mistura bifásica de gelo fundente ($0 \text{ }^\circ\text{C}$).



A pressão atmosférica local é normal. Sabendo que o coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio vale $0,5 \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$, calcule:

- a) a intensidade da corrente térmica através da barra, depois de estabelecido o regime permanente;
- b) a temperatura numa seção transversal da barra, situada a 40 cm da extremidade mais quente.

Resolução:

a) No regime permanente, a corrente térmica é calculada pela lei de Fourier:

$$\phi = k \frac{A \Delta \theta}{\ell}$$

Do enunciado, temos:

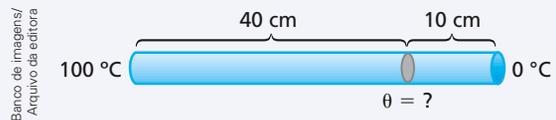
$$k = 0,5 \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}; A = 5 \text{ cm}^2;$$

$$\Delta \theta = 100 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 100 \text{ }^\circ\text{C}; \ell = 50 \text{ cm}$$

Substituindo esses valores na expressão anterior, temos:

$$\phi = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 100}{50} \therefore \boxed{\phi = 5 \text{ cal/s}}$$

b) Sabemos que, no regime permanente ou estacionário, a intensidade da corrente térmica através da barra é constante; assim, temos:

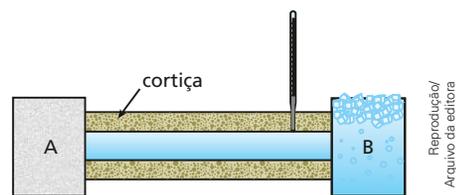


$$\phi = \frac{kA(100 - \theta)}{40} \Rightarrow 5 = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot (100 - \theta)}{40}$$

$$\boxed{\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}}$$

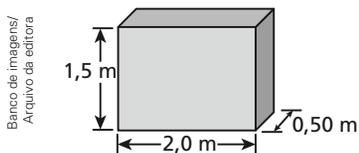
11. (Unama-PA) A figura a seguir apresenta uma barra de chumbo de comprimento 40 cm e área de seção transversal 10 cm^2 isolada com cortiça; um termômetro fixo na barra calibrado na escala Fahrenheit, e dois dispositivos **A** e **B** que proporcionam, nas extremidades da barra, as temperaturas correspondentes aos pontos do vapor e do gelo, sob pressão normal, respectivamente. Considerando a intensidade da corrente térmica constante ao longo da barra, determine a temperatura registrada no termômetro, sabendo que ele se encontra a 32 cm do dispositivo **A**.

Dado: coeficiente de condutibilidade térmica do chumbo = $8,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}}$



12. Na figura a seguir, você observa uma placa de alumínio que foi utilizada para separar o interior de um forno, cuja temperatura mantinha-se estável a $220 \text{ }^\circ\text{C}$, e o meio ambiente ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Após atingido o regime estacionário, qual a intensidade da corrente térmica através dessa chapa metálica? Suponha que o fluxo ocorra através da face de área maior.

Dado: coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio = $0,50 \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$

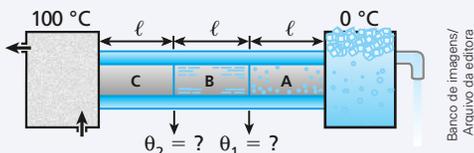


13. Três barras cilíndricas idênticas em comprimento e secção são ligadas formando uma única barra, cujas extremidades são mantidas a 0°C e 100°C . A partir da extremidade mais fria, as condutibilidades térmicas dos materiais das barras valem:

$$(0,20), (0,50) \text{ e } (1,0) \frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Supondo que em volta das barras exista um isolamento de vidro e desprezando qualquer perda de calor, calcule a temperatura nas junções onde uma barra é ligada à outra.

Resolução:



$$k_A = 0,20 \frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}; k_B = 0,50 \frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$k_C = 1,0 \frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

No regime permanente, o fluxo de calor através das barras será o mesmo e permanecerá constante; portanto, podemos escrever:

$$\phi = k_A \frac{A_A(\theta_1 - 0)}{l_A} = k_B \frac{A_B(\theta_2 - \theta_1)}{l_B}$$

$$\phi = k_C \frac{A_C(100 - \theta_2)}{l_C}$$

Mas $A_A = A_B = A_C$ e $l_A = l_B = l_C$.

Logo:

$$k_A(\theta_1 - 0) = k_B(\theta_2 - \theta_1) = k_C(100 - \theta_2)$$

Desmembrando, temos:

$$\begin{cases} k_A(\theta_1 - 0) = k_C(100 - \theta_2) \\ k_A(\theta_1 - 0) = k_B(\theta_2 - \theta_1) \end{cases}$$

Substituindo os valores conhecidos, temos:

$$\begin{cases} 0,20\theta_1 = 1,0(100 - \theta_2) & \text{(I)} \\ 0,20\theta_1 = 0,50(\theta_2 - \theta_1) & \text{(II)} \end{cases}$$

De (II), temos:

$$0,20\theta_1 = 0,50\theta_2 - 0,50\theta_1$$

$$0,70\theta_1 = 0,50\theta_2 \Rightarrow \theta_2 = \frac{0,70}{0,50}\theta_1$$

$$\theta_2 = 1,4\theta_1 \text{ (III)}$$

Substituindo (III) em (I), temos:

$$0,20\theta_1 = 100 - 1,4\theta_1 \Rightarrow 1,6\theta_1 = 100$$

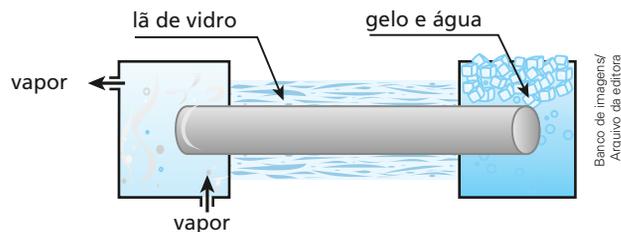
$$\theta_1 = 62,5^\circ\text{C}$$

Voltando em (III), resulta:

$$\theta_2 = 1,4(62,5) \therefore \theta_2 = 87,5^\circ\text{C}$$

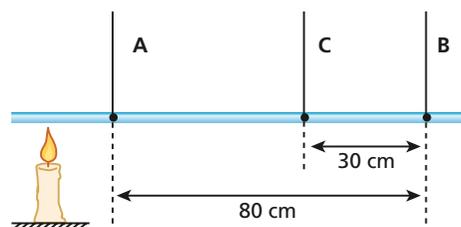
14. Uma barra de alumínio de 50 cm de comprimento e área de secção transversal 5 cm^2 tem uma de suas extremidades em contato térmico com uma câmara de vapor de água em ebulição. A outra extremidade da barra está imersa em uma cuba que contém uma mistura bifásica de gelo e água em equilíbrio térmico.

A pressão atmosférica é normal. Sabe-se que o coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio vale $0,5 \frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$.



Qual a temperatura da secção transversal da barra, situada a 40 cm da extremidade mais fria?

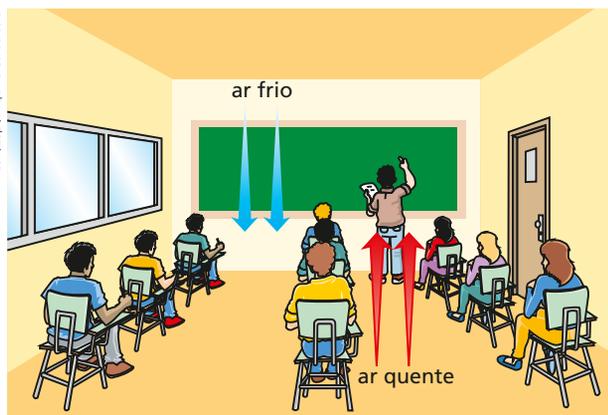
15. Uma barra metálica é aquecida conforme a figura; **A**, **B** e **C** são termômetros. Admita a condução de calor em regime estacionário e no sentido longitudinal da barra. Quando os termômetros das extremidades indicarem 200°C e 80°C , o intermediário indicará:



- a) 195°C . c) 140°C . e) 100°C .
b) 175°C . d) 125°C .

A convecção

É comum, quando estamos num ambiente fechado (cinema, teatro ou a sala de aula), sentirmos, após algum tempo, que ele está muito “abafado”. Parece que o ar fica “parado”. O que pode ter ocorrido, já que no início não sentíamos isso?



Tal fato acontece porque as camadas de ar mais próximas das pessoas que estão no ambiente são aquecidas por elas e se expandem, aumentando seu volume, com conseqüente diminuição de sua densidade. Esse ar (quente) menos denso sobe, ocasionando a descida do ar (frio) de maior densidade, que se encontra mais acima. Como esse fenômeno é cíclico, ao se repetir constantemente, produz no ar as **correntes de convecção**. Após algum tempo, todo o ar da sala encontra-se aquecido de maneira praticamente uniforme, não mais ocorrendo a convecção. Vem daí a sensação de ambiente “abafado”.

Convecção é o processo de propagação de calor no qual a energia térmica muda de local, acompanhando o deslocamento do próprio material aquecido.

Notemos que a energia térmica muda de local acompanhando as partículas do fluido, ao contrário da condução, em que apenas a energia térmica se desloca e as partículas permanecem em suas posições de equilíbrio.

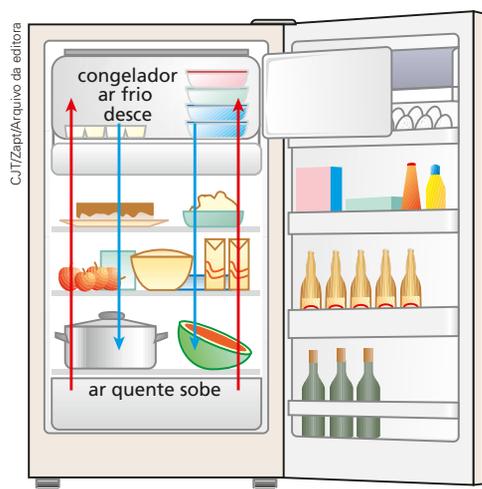
É importante observar que a convecção só ocorre nos fluidos (gases, vapores e líquidos), não acontecendo nos sólidos e no vácuo.

O movimento vertical de massas fluidas, de densidades diferentes, é provocado pela existência do campo gravitacional da Terra. Em um local sem campo gravitacional não ocorre convecção. No interior de uma espaçonave em uma viagem entre a Terra e a Lua, por exemplo, um sistema de ventiladores e exaustores deve ser usado para movimentar e renovar o ar da cabine onde estão os astronautas.

Refrigeradores domésticos

Nos refrigeradores domésticos convencionais, a refrigeração dos alimentos é feita por convecção do ar em seu interior. O ar em contato com os alimentos é aquecido, expande-se – com conseqüente diminuição de densidade –, sobe até o congelador, onde é resfriado, e volta a descer. Notemos que, para isso acontecer, é necessário que o congelador esteja na parte superior e as prateleiras sejam grades vazadas.

Nos refrigeradores que funcionam com sistema *frost free* (livre de gelo), a placa fria não fica na parte interna do aparelho,

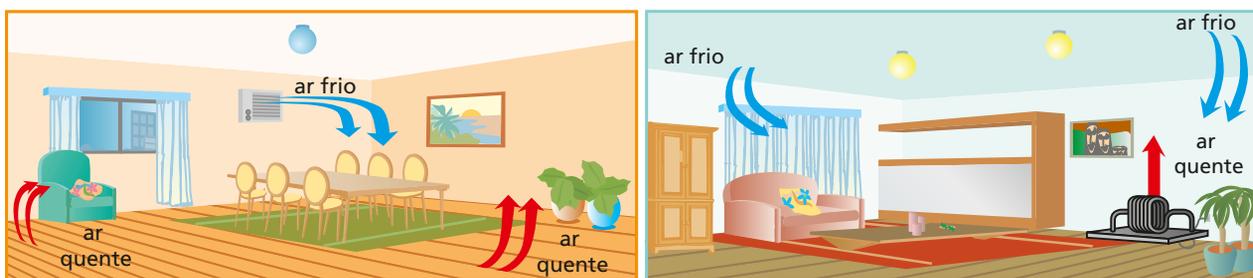


// A convecção do ar no interior de um refrigerador doméstico.

mas entre as paredes interna e externa traseira. Um conjunto de ventiladores provoca a circulação do ar, retirando o ar quente e injetando o ar frio, resfriando a parte interna onde ficam os alimentos. As prateleiras são inteiriças, de vidro ou de plástico, fazendo com que cada compartimento receba ar gelado através de aberturas existentes na parede do fundo. A circulação de ar quente, por convecção, ocorre nas prateleiras da porta, que são vazadas. O ar quente é retirado na parte superior da geladeira. A água formada pela condensação escorre para um recipiente na parte inferior e evapora.

Ar-condicionado (ar frio) e aquecedor (ar quente)

Em uma residência, podemos usar um aparelho de ar-condicionado no verão e um aquecedor elétrico no inverno. Observe nas figuras que o ar-condicionado deve sempre ficar na parte superior da parede, enquanto o aquecedor deve ficar no nível do chão. Lembre-se de que o ar quente (menos denso) sobe e o ar frio (mais denso) desce.



João Anselmo/Arquivo da editora

Note que, se fosse feito o contrário, o ar frio (mais denso) continuaria embaixo e o ar quente (menos denso) permaneceria em cima, não havendo circulação de ar.

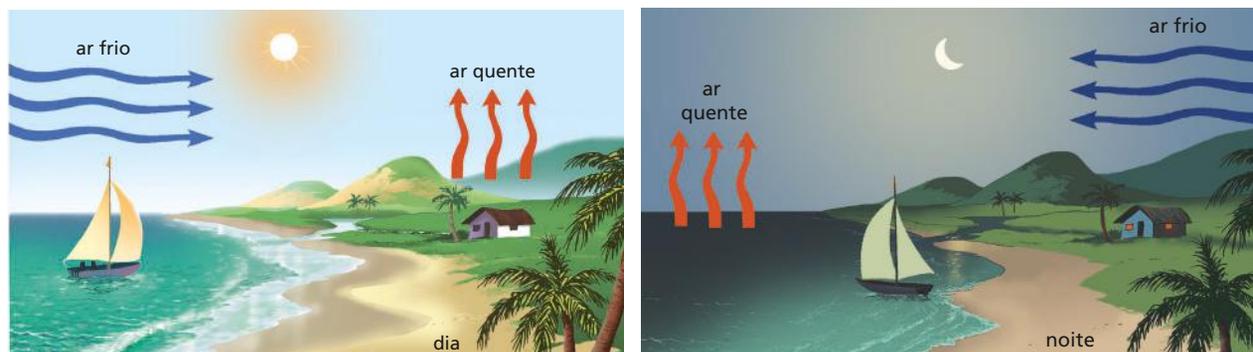
Brisas marinhas

No litoral, durante o dia, a brisa sopra do mar para a praia e, à noite, da praia para o mar. A explicação para isso é que a areia tem calor específico muito pequeno em relação ao da água (para massas iguais, a areia precisa de menos energia para sofrer a mesma variação de temperatura), por isso se aquece e se resfria mais rapidamente.

Durante o dia, o ar quente próximo à areia sobe, provocando o deslocamento do ar frio que se encontra sobre a água.

À noite, a água demora mais para esfriar, invertendo o sentido das correntes de ar.

Isso explica por que o jangadeiro tem de sair de madrugada, quando a brisa sopra da praia para o mar, e tem de voltar antes de escurecer, quando a brisa ainda sopra do mar para a praia.



João Anselmo/Arquivo da editora

Faça você mesmo



Realize este experimento somente na presença de seu professor. Use luvas térmicas ao manusear objetos aquecidos.

Entendendo a convecção

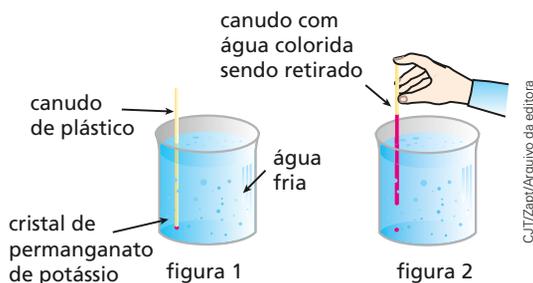
Após a leitura da parte teórica envolvendo a **convecção**, podemos pensar em realizar uma atividade experimental simples que seja capaz de mostrar esse fenômeno.

Material necessário

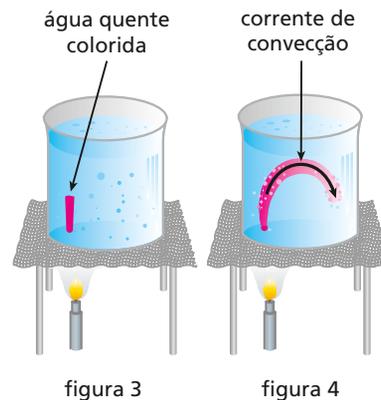
- 1 recipiente de vidro refratário e transparente;
- 1 canudo de plástico, com diâmetro de 0,5 cm ou mais;
- cristais de permanganato de potássio, encontrado em qualquer farmácia;
- água;
- 1 vela.

Procedimento

- I. Inicialmente colocamos água no recipiente de vidro refratário e introduzimos, através do canudo, cristais de permanganato de potássio. Eles deslizarão até o fundo (figura 1). Procure não agitar o recipiente.



- II. Para eliminar a parte colorida existente no interior do canudo, retire-o com o dedo indicador fechando a abertura superior (figura 2).
- III. Acenda a vela e, utilizando a chama, aqueça a água da região onde se encontram os cristais de permanganato de potássio (figura 3). Tome os devidos cuidados para não queimar as mãos. Seus colegas devem ficar a uma distância de fácil visualização do fenômeno, mas que não possam atrapalhar a realização da atividade.
- IV. Observe o caminho percorrido pela água colorida. Ela acompanhará as correntes de convecção que se formam no interior do recipiente (figura 4).



Desenvolvimento

1. Discuta com seus colegas o que ocorreria se essa atividade experimental fosse realizada no interior de uma espaçonave, viajando pelo espaço sideral. A vela permaneceria acesa?

A radiação

Quando nos bronzeamos na praia, ficamos expostos às radiações solares. A maior parte da energia que recebemos vem do Sol até a Terra através de ondas eletromagnéticas, que, ao atingirem nosso corpo, são absorvidas e transformadas, em grande parte, em energia térmica.

Esse processo de propagação da energia através de ondas eletromagnéticas é denominado **radiação**.

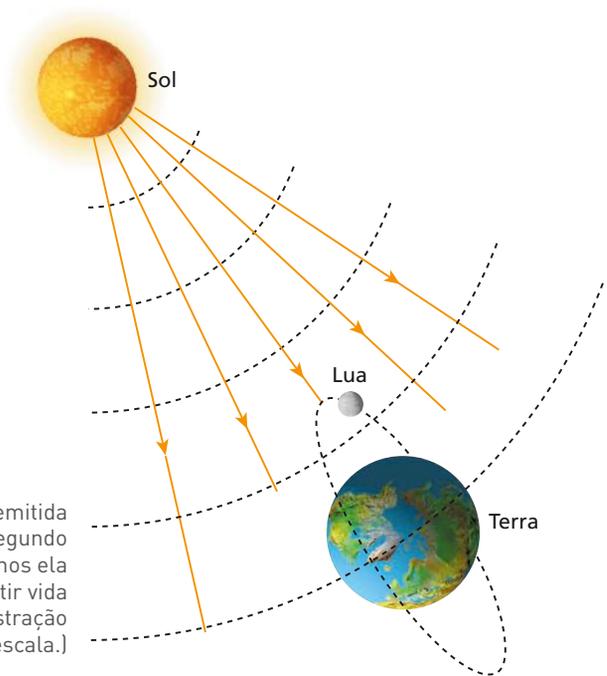
Radiação é o processo de propagação de energia na forma de ondas eletromagnéticas. Ao serem absorvidas, essas ondas se transformam em energia térmica.

Rigorosamente, a radiação não é um processo de transmissão de calor. Sabemos, no entanto, que um corpo emite energia radiante ao sofrer um resfriamento. Assim, associamos a energia existente nas ondas eletromagnéticas emitidas com a energia térmica que saiu do corpo. Essas ondas, ao serem absorvidas por um outro corpo, transformam-se novamente em energia térmica, aquecendo-o. Por isso, costuma-se definir radiação como um processo de transferência de energia térmica.

Apesar de todas as ondas eletromagnéticas transportarem energia, apenas as correspondentes à faixa do infravermelho são chamadas de ondas de calor. Isso porque o infravermelho transforma-se mais facilmente em energia térmica ao ser absorvido. Num banho de luz solar, recebemos, dentre outras radiações, a ultravioleta e a infravermelha, sendo que a ultravioleta produz bronzeamento e a infravermelha provoca aquecimento e até queimaduras na pele.

O fato de as ondas eletromagnéticas se propagarem no vácuo explica como parte da energia térmica que saiu do Sol chega até a superfície da Terra. Assim, apenas por meio da radiação podemos entender como a energia térmica é levada de uma região para outra, havendo vácuo entre elas.

// A vida na Terra pôde se desenvolver devido à energia emitida pelo Sol. Essa estrela é uma fonte limitada de energia. Segundo as modernas teorias científicas, dentro de 5 bilhões de anos ela será uma estrela morta. Sem essa energia, poderá existir vida na Terra? Será que o ser humano chegará até lá? (Ilustração com tamanhos e distâncias fora de escala.)



Banco de imagens/Arquivo da editora

JÁ PENSOU NISTO?

Como são as roupas usadas no deserto?

As roupas usadas pelos moradores do deserto, em geral, são escuras, largas e confeccionadas com lã de camelo, material de péssima condutibilidade térmica. Pode parecer estranho o fato de usarem roupas com essas características; no entanto, a lã de camelo serve como isolante térmico. Esse material evita que o calor do Sol entre diretamente em contato com a pele durante o dia e dificulta a saída do calor gerado pelo corpo humano durante as noites frias.

Essas roupas são largas para facilitar a convecção do ar existente entre a face interna da roupa e a pele da pessoa. Desse modo, o ar aquecido sobe e sai pela parte de cima, na região próxima ao pescoço. Como o ar mais quente sobe, entra pela parte inferior da roupa ar mais frio, circulando e resfriando o corpo da pessoa. A temperatura no deserto do Saara, na África, pode atingir 50 °C durante o dia e -5 °C à noite.



Cezary Wojtkowski/Shutterstock

// Viajante em Wadi Rum, região desértica da Jordânia. Maio de 2017.

5. Algumas aplicações tecnológicas

O conhecimento tecnológico é extremamente importante para que as condições de vida do ser humano possam melhorar mais e mais com custo cada vez menor. Todos sabemos que o nosso corpo não suporta temperaturas muito altas ou muito baixas. Por isso, a tecnologia procura manter os ambientes em que vivemos dentro de intervalos de temperatura confortáveis.

O aparelho de ar-condicionado foi uma das criações da tecnologia para tornar ambientes quentes e abafados em locais agradáveis para as pessoas. Não esquecer que esse mesmo aparelho pode também aquecer ambientes muito frios. Ele pode ter somente a função “frio”, indicada para locais quentes (de invernos amenos) e também a função “quente” para locais onde o inverno é muito rigoroso. O conhecimento do funcionamento da convecção nos ajuda a entender o local em que tal aparelho deve ser instalado.



// O aparelho da foto é um ar-condicionado modelo “Split”, muito utilizado nas residências. Ele pode ter apenas a função “frio” ou as funções “frio” e “quente”.

Em ambientes muito abafados, como o galpão de uma indústria, é preciso fazer o ar circular utilizando-se exaustores que retiram o ar quente do interior e provocam a entrada de ar externo mais frio. Algumas pessoas, utilizando a tecnologia e seus conhecimentos, podem produzir sistemas eficientes, capazes de tornar confortáveis tais locais. Os exaustores eólicos podem, com baixo custo, realizar essa função.



// Na fotografia, podemos observar um exaustor eólico utilizado na renovação do ar de grandes ambientes.

Uma das riquezas da natureza é a grande quantidade de energia que a Terra recebe do Sol. Essa energia pode e deve ser utilizada para melhor conforto das pessoas.

O Brasil recebe, em média, 1800 kWh/m² ao ano de energia proveniente do Sol. Para se ter uma ideia, a radiação que incide em um ano na área do Distrito Federal, onde se encontra a cidade de Brasília, equivale a mais de 160 usinas de Itaipu. A utilização de parte dessa energia poderia representar grande economia para cada um de nós e para o país, que não precisaria construir novas usinas hidrelétricas, termelétricas ou nucleares.

A utilização de coletores solares para uso doméstico no aquecimento de água pode representar uma economia de 30% a 40% na conta de energia elétrica das residências. Cada metro quadrado de coletor solar em uso representa 56 m² a menos de área inundada em usinas hidrelétricas e a economia de 55 kg/ano de gás ou 215 kg/ano de lenha que deixaria de ser queimada.



// As placas coletoras são, geralmente, colocadas no telhado das residências.

Hoje, 73% das residências brasileiras têm chuveiro elétrico e poucas possuem aquecedor solar. Em 2014, iniciou-se a contratação de energia solar pública no Brasil, sendo que estudos estimam que 18% dos domicílios brasileiros contarão com energia solar em 2050. Além disso, desde 2015 os países em desenvolvimento lideram os investimentos em energia solar e em outros tipos de energia renovável.

O aquecedor solar é um sistema simples que utiliza a radiação, a condução e a convecção térmica para aquecimento da água. Esse dispositivo é constituído de duas partes: o coletor solar (placas) e o reservatório térmico (onde a água aquecida é armazenada).

O vaso de Dewar

Ao contrário do que muita gente pensa, a garrafa térmica não foi inventada para manter o café quente. Foi o físico britânico James Dewar (1842-1923) que, no final do século XIX, a pedido de colegas, inventou um recipiente que pudesse conservar soluções biológicas a temperaturas estáveis. Dewar havia lido trabalhos do físico italiano Evangelista Torricelli, que no século XVII tinha comprovado ser o vácuo um bom isolante térmico. O grande problema de Dewar era como manter o vácuo. Para isso, ele construiu uma garrafa de vidro com paredes duplas. O ar existente entre essas paredes foi retirado, e a garrafa, lacrada. Para evitar que a luz atingisse a solução biológica e provocasse alguma alteração, Dewar espelhou as paredes da garrafa. Com isso, evitava que as ondas de calor entrassem ou saíssem dela.

James Dewar era um daqueles cientistas que achavam que suas descobertas deviam ser usadas por todos, por isso não patenteou essa invenção, considerando-a um presente à Ciência. Somente no início do século XX, o alemão Reinhold Burger, fabricante de vidros, aperfeiçoou o invento de Dewar, diminuindo o seu tamanho e lançando-o no mercado. Foi um sucesso de vendas, que tornou Burger muito rico.

Detalhes funcionais de uma garrafa térmica

A garrafa térmica é um dispositivo cuja finalidade principal é manter constante, por um maior intervalo de tempo, a temperatura de seu conteúdo. Para tanto, as paredes desse sistema são praticamente adiabáticas, isto é, reduzem consideravelmente as trocas de calor entre o seu conteúdo e o meio externo.

Com a finalidade de isolar termicamente o conteúdo de uma garrafa térmica do ambiente, adotam-se os seguintes procedimentos:

- as paredes internas são feitas de vidro, que, por ser mau condutor, atenua as trocas de calor por condução;
- as paredes internas são duplas, separadas por uma região de vácuo, cuja função é tentar evitar a condução do calor que passa pelas paredes de vidro;
- o vidro de que são feitas as paredes internas da garrafa é espelhado, para que o calor radiante seja refletido, atenuando assim as trocas por radiação.

Para evitar possíveis trocas de calor por convecção, basta fechar a garrafa, pois dessa forma as massas fluidas internas não conseguem sair do sistema.

É evidente que não existe o isolamento térmico perfeito; assim, apesar dos cuidados citados, após um tempo relativamente grande (várias horas), o conteúdo da garrafa térmica acaba atingindo o equilíbrio térmico com o meio ambiente.

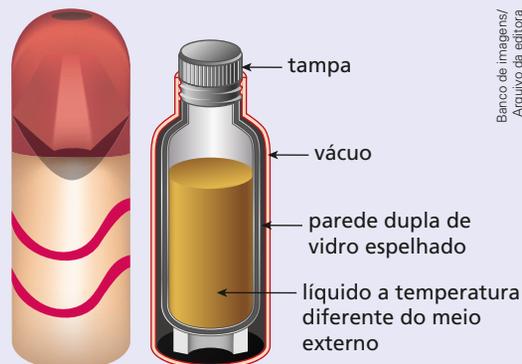
Estufas

Estufas são recintos fechados com paredes e teto de vidro, utilizadas, principalmente em países de inverno rigoroso, para o cultivo de verduras, legumes e mesmo flores.

// Representação de uma estufa.



Reprodução/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora



Luis Fernando R. Tucillo/Arquivo da editora

O vidro é transparente à luz visível e parcialmente opaco às **ondas de calor** (infravermelho).

As radiações **infravermelhas** na realidade se constituem de uma gama de ondas de certo intervalo de frequências; aquelas que possuem menor frequência (portanto, maior comprimento de onda) não conseguem passar pelo vidro, mas as de maior frequência (portanto, menor comprimento de onda), as mais próximas das radiações correspondentes à cor vermelha, conseguem passar juntamente com a luz visível e outras radiações. Uma parcela dessa energia é absorvida pelas plantas que estão no interior da estufa. Essas plantas se aquecem e emitem parte da energia absorvida em forma de infravermelho, só que agora com comprimentos de onda maiores, que não consegue passar pelo vidro e fica retida no interior da estufa. Desse modo, a temperatura permanece relativamente estável, mesmo que esteja nevando na parte externa.

O efeito estufa na atmosfera terrestre

A atmosfera terrestre é formada principalmente por nitrogênio (78%), oxigênio (20,9%) e argônio (0,9%), aparecendo ainda em quantidades bem pequenas o neônio, o hélio, o hidrogênio e outros gases. A essa composição, devemos acrescentar os chamados gases estufa, que dificultam a dispersão dos raios solares que incidem na Terra. São eles o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os compostos de clorofluorcarbono (CFC) provenientes da queima de carvão, petróleo (na forma de seus derivados), florestas e pastagens e da decomposição da madeira e de materiais orgânicos (como dejetos humanos e de outros animais). Além desses gases, o vapor de água na atmosfera também contribui para o efeito estufa.

A forma de retenção do calor na atmosfera é semelhante à de uma estufa de paredes e teto de vidro: permite que a energia radiante penetre, mas dificulta a dissipação das radiações emitidas pelas superfícies aquecidas da Terra. Um grupo de cientistas americanos calculou em 1 W/m^2 a diferença entre a energia por metro quadrado que a Terra absorve de radiação solar e a energia que ela emite de volta para o espaço, por segundo. Essa energia retida é importante para que haja vida animal e vegetal na Terra, porém o crescimento da população humana, o desmatamento de florestas (que absorvem parte do CO_2) e o ritmo acelerado da industrialização estão provocando um desequilíbrio, com aquecimento acima do normal. Geleiras estão derretendo; correntes marinhas de água quente (no oceano Atlântico) estão mais aquecidas que o normal, provocando mais furacões que a média do último século; chuvas intensas inundam locais antes secos e estiagens ocorrem em locais antes castigados por intensas chuvas. Segundo o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas, a temperatura global aumentou $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ no século XX e pode elevar-se mais $1 \text{ }^\circ\text{C}$ até 2030, sendo projetado um aumento de $4 \text{ }^\circ\text{C}$ até 2090, caso medidas de prevenção não sejam tomadas.



Sunny Forest/Shutterstock

// A visão maravilhosa de um céu azul é possível graças ao nitrogênio que faz parte da atmosfera terrestre.



Denis Beilitsky/Shutterstock

// A industrialização produz gases como o dióxido de carbono, o metano e os compostos de clorofluorcarbono, que poluem e funcionam como gases estufa.

16. Em cada uma das situações descritas a seguir **ER** você deve reconhecer o processo de transmissão de calor envolvido: condução, convecção ou radiação.

- I. As prateleiras de uma geladeira doméstica são grades vazadas para facilitar a ida da energia térmica até o congelador por (...).
- II. O único processo de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo é a (...).
- III. Numa garrafa térmica, é mantido vácuo entre as paredes duplas de vidro para evitar que o calor saia ou entre por (...).

Na ordem, os processos de transmissão de calor que você usou para preencher as lacunas são:

- a) condução, convecção e radiação;
- b) radiação, condução e convecção;
- c) condução, radiação e convecção;
- d) convecção, condução e radiação;
- e) convecção, radiação e condução.

Resolução:

Vamos analisar as situações descritas:

- I. Convecção: na geladeira doméstica convencional, as grades das prateleiras são vazadas para permitir a livre subida do ar quente, aquecido pelos corpos do interior do refrigerador, e a livre descida do ar frio, resfriado pelo congelador.
- II. Radiação: na radiação, a energia desloca-se de um local para outro na forma de ondas eletromagnéticas, que podem se propagar no vácuo. A condução e a convecção necessitam de meio material para ocorrer.
- III. Condução: o vácuo mantido entre as paredes duplas de vidro de uma garrafa térmica evita que a energia térmica saia ou entre no sistema através das partículas do meio, isto é, por condução.

Resposta: alternativa **e**.

17. Usando os seus conhecimentos de transmissão de calor, analise as proposições e indique a que você acha correta.

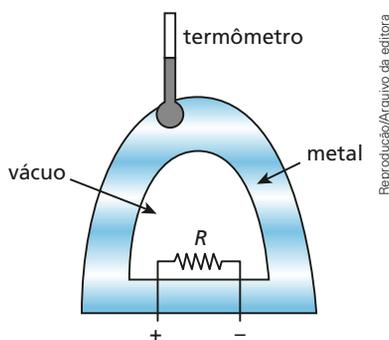
- a) A condução térmica é a propagação do calor de uma região para outra com deslocamento do material aquecido.
- b) A convecção térmica é a propagação de calor que pode ocorrer em qualquer meio, inclusive no vácuo.
- c) A radiação térmica é a propagação de energia por meio de ondas eletromagnéticas e ocorre exclusivamente nos fluidos.
- d) A transmissão do calor, qualquer que seja o processo, sempre ocorre, naturalmente, de um ambiente de maior temperatura para outro de menor temperatura.
- e) As correntes ascendentes e descendentes na convecção térmica de um fluido são motivadas pela igualdade de suas densidades.

18. (UFRN) Matilde é uma estudante de Arquitetura que vai fazer o seu primeiro projeto: um prédio a ser construído em Natal (RN). Ela precisa prever a localização de um aparelho de ar-condicionado para uma sala e, por ter estudado pouco Termodinâmica, está em dúvida se deve colocar o aparelho próximo do teto ou do piso. Ajude Matilde, dando-lhe uma sugestão sobre a escolha que ela deve fazer nesse caso. (Justifique a sua sugestão.)

19. Na praia, você já deve ter notado que, durante o dia, a areia esquentava mais rápido que a água do mar e, durante a noite, a areia esfria mais rápido que a água do mar. Isso ocorre porque o calor específico da água é maior que o da areia (a água precisa receber mais calor, por unidade de massa, para sofrer o mesmo aquecimento da areia). Esse fato explica a existência da brisa:

- a) do mar para a praia, à noite;
- b) da praia para o mar, durante o dia;
- c) do mar para a praia, durante o dia;
- d) sempre do mar para a praia;
- e) sempre da praia para o mar.

20. (UFV-MG) Um resistor R é colocado dentro de um recipiente de parede metálica – no qual é feito vácuo – que possui um termômetro incrustado em sua parede externa. Para ligar o resistor a uma fonte externa ao recipiente, foi utilizado um fio, com isolamento térmico, que impede a transferência de calor para as paredes do recipiente. Essa situação encontra-se ilustrada na figura abaixo.



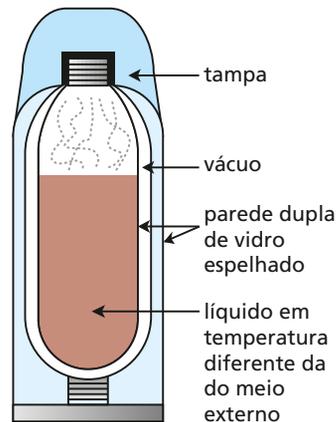
Reprodução/Arquivo da editora

Ligando o resistor, nota-se que a temperatura indicada pelo termômetro aumenta, mostrando que há transferência de calor entre o resistor e o termômetro. Pode-se afirmar que os processos responsáveis por essa transferência de calor, na ordem correta, são:

- a) primeiro convecção e depois radiação;
- b) primeiro convecção e depois condução;
- c) primeiro radiação e depois convecção;
- d) primeiro radiação e depois condução;
- e) primeiro condução e depois convecção.

21. Ao contrário do que se pensa, a garrafa térmica não foi criada originalmente para manter o café quente. Esse recipiente foi inventado pelo físico e químico britânico James Dewar (1842-1923) para conservar substâncias biológicas em bom estado, mantendo-as a temperaturas estáveis. Usando a observação do físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), que descobriu ser o vácuo um bom isolante térmico, Dewar criou uma garrafa de paredes duplas de vidro que, ao ser lacrada, mantinha vácuo entre elas. Para retardar ainda mais a alteração de temperatura no interior da garrafa, ele espelhou as paredes, tanto nas faces externas como nas faces internas. Dewar nunca patenteou sua invenção, que considerava um

presente à Ciência. Coube ao alemão Reinhold Burger (1866-1954), um fabricante de vidros, diminuir o seu tamanho, lançando-a no mercado em 1903.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Indique a alternativa correta.

- a) Na garrafa térmica, o vácuo existente entre as paredes duplas de vidro tem a finalidade de evitar trocas de calor por **convecção**.
- b) As paredes espelhadas devem evitar que as ondas de calor saiam ou entrem por **condução**.
- c) Apesar de o texto não se referir ao fato de que a garrafa deve permanecer bem fechada, isso deve ocorrer para evitar perdas de calor por **convecção**.
- d) O vácuo existente no interior das paredes duplas de vidro vai evitar perdas de calor por **radiação**.
- e) As paredes espelhadas não têm função nas trocas de calor; foram apenas uma tentativa de tornar o produto mais agradável às pessoas que pretendessem comprá-lo.

22. Analisando um refrigerador doméstico convencional, podemos afirmar:

- I. O congelador fica na parte superior para favorecer a condução do calor que sai dos alimentos e vai até ele.
- II. As prateleiras são grades vazadas (e não chapas inteiriças), para permitir a livre convecção das massas de ar quentes e frias no interior do refrigerador.
- III. A energia térmica que sai dos alimentos chega até o congelador, principalmente, por radiação.
- IV. As paredes dos refrigeradores normalmente são intercaladas com material isolante, com o objetivo de evitar a entrada de calor por condução.

Quais são as afirmativas corretas?

- a) Apenas a afirmativa I.
- b) Apenas as afirmativas I, II e III.
- c) Apenas as afirmativas I e III.
- d) Apenas as afirmativas II e IV.
- e) Todas as afirmativas.

23. (Fuvest-SP) Em uma sala fechada e isolada termicamente, uma geladeira, em funcionamento, tem, num dado instante, sua porta completamente aberta. Antes da abertura dessa porta, a temperatura da sala é maior que a do interior da geladeira. Após a abertura da porta, a temperatura da sala,

- a) diminui até que o equilíbrio térmico seja estabelecido;
- b) diminui continuamente enquanto a porta permanecer aberta;
- c) diminui inicialmente, mas, posteriormente, será maior do que quando a porta foi aberta;
- d) aumenta inicialmente, mas, posteriormente, será menor do que quando a porta foi aberta;
- e) não se altera, pois se trata de um sistema fechado e termicamente isolado.

24. (Enem) A refrigeração e o congelamento de alimentos são responsáveis por uma parte significativa do consumo de energia elétrica numa residência típica.

Para diminuir as perdas térmicas de uma geladeira, podem ser tomados alguns cuidados operacionais:

- I. Distribuir os alimentos nas prateleiras deixando espaços vazios entre eles, para que ocorra a circulação do ar frio para baixo e do ar quente para cima.
- II. Manter as paredes do congelador com camada bem espessa de gelo, para que o aumento da massa de gelo aumente a troca de calor no congelador.
- III. Limpar o radiador ("grade" na parte de trás) periodicamente, para que a gordura e a poeira que nele se depositam não reduzam a transferência de calor para o ambiente.

Para uma geladeira tradicional, é correto indicar, apenas,

- a) a operação I;
- b) a operação II;
- c) as operações I e II;
- d) as operações I e III;
- e) as operações II e III.

25. (Enem) A padronização insuficiente e a ausência de controle na fabricação podem também resultar em perdas significativas de energia através das paredes da geladeira. Essas perdas, em função da espessura das paredes, para geladeiras e condições de uso típicas, são apresentadas na tabela.

Espessura das paredes (cm)	Perda térmica mensal (kWh)
2	65
4	35
6	25
10	15

Considerando uma família típica, com consumo médio mensal de 200 kWh, a perda térmica pelas paredes de uma geladeira com 4 cm de espessura, relativamente a outra de 10 cm, corresponde a uma porcentagem do consumo total de eletricidade da ordem de:

- a) 30%.
- b) 20%.
- c) 10%.
- d) 5%.
- e) 1%.

26. A comunidade científica há tempos anda preocupada com o aumento da temperatura média da atmosfera terrestre. Os cientistas atribuem esse fenômeno ao chamado efeito estufa, que consiste na "retenção" da energia térmica junto ao nosso planeta, como ocorre nas estufas de vidro, que são usadas em locais onde em certas épocas do ano a temperatura atinge valores muito baixos. A explicação para esse acontecimento é que a atmosfera (com seus gases naturais mais os gases poluentes emitidos por automóveis, indústrias, queimadas, vulcões, etc.) é pouco transparente aos raios solares na faixa:

- a) das ondas de rádio;
- b) das ondas ultravioleta;
- c) das ondas infravermelhas;
- d) das ondas correspondentes aos raios gama;
- e) das ondas correspondentes aos raios X.

27. (UFRRN) O efeito estufa, processo natural de aquecimento da atmosfera, é essencial para a existência de vida na Terra. Em tal processo, uma parcela da radiação solar refletida e da radiação térmica emitida pela superfície terrestre interage com determinados gases presentes na atmosfera, aquecendo-a.

O principal mecanismo físico responsável pelo aquecimento da atmosfera devido à ação do efeito estufa resulta da

- a) absorção, por certos gases da atmosfera, de parte da radiação ultravioleta recebida pela Terra.
- b) reflexão, por certos gases da atmosfera, da radiação visível emitida pela Terra.
- c) absorção, por certos gases da atmosfera, de parte da radiação infravermelha proveniente da superfície da Terra.
- d) reflexão, por certos gases da atmosfera, de parte da radiação de micro-ondas recebida pela Terra.
- e) refração das radiações infravermelhas e ultravioletas na atmosfera terrestre.

28. (Enem) As cidades industrializadas produzem grandes proporções de gases como o CO_2 , o principal gás causador do efeito estufa. Isso ocorre por causa da quantidade de combustíveis fósseis queimados, principalmente no transporte, mas também em caldeiras industriais.

Além disso, nessas cidades concentram-se as maiores áreas com solos asfaltados e concretados, o que aumenta a retenção de calor, formando o que se conhece por “ilhas de calor”. Tal fenômeno ocorre porque esses materiais absorvem o calor e o devolvem para o ar sob a forma de radiação térmica. Em áreas urbanas, devido à atuação conjunta do efeito estufa e das “ilhas de calor”, espera-se que o consumo de energia elétrica

- a) diminua devido à utilização de caldeiras por indústrias metalúrgicas.
- b) aumente devido ao bloqueio da luz do sol pelos gases do efeito estufa.
- c) diminua devido à não necessidade de aquecer a água utilizada em indústrias.
- d) aumente devido à necessidade de maior refrigeração de indústrias e residências.
- e) diminua devido à grande quantidade de radiação térmica reutilizada.

Exercícios Nível 3

29. (Uepa) A área total das paredes externas de uma geladeira é $4,0 \text{ m}^2$ e a diferença de temperatura entre o exterior e o interior da geladeira é $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Se a geladeira tem um revestimento de poliestireno com 25 mm de espessura, determine a quantidade de calor que flui através das paredes da geladeira durante $1,0 \text{ h}$, em watt-hora. A condutividade térmica do revestimento de poliestireno é $0,01 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$.

30. Numa sauna, para separar a sala de banho do escritório, usou-se uma parede de tijolos com 12 cm de espessura. A parede foi revestida do lado mais quente com uma camada de madeira com 6 cm de espessura e, do lado mais frio, com uma camada de cortiça com 3 cm de espessura. A temperatura da sauna é mantida a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a do ambiente do escritório, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine as temperaturas nos pontos de separação madeira/tijolo e tijolo/cortiça, após ser estabelecido o regime permanente.

Dados: $k_{\text{madeira}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cal/s cm } ^\circ\text{C}$;

$k_{\text{tijolo}} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ cal/s cm } ^\circ\text{C}$;

$k_{\text{cortiça}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ cal/s cm } ^\circ\text{C}$.

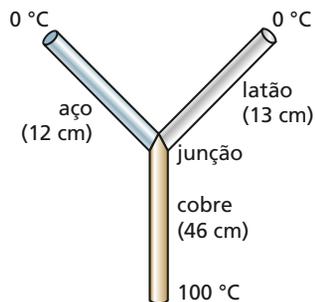
31. (Fuvest-SP) Um contêiner com equipamentos científicos é mantido em uma estação de pesquisa na Antártida. Ele é feito com material de boa isolamento térmica e é possível, com um pequeno aquecedor elétrico, manter sua temperatura interna constante, $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, quando a temperatura externa é $T_e = -40 \text{ }^\circ\text{C}$. As paredes, o piso e o teto do contêiner têm a mesma espessura, $\varepsilon = 26 \text{ cm}$, e são de um mesmo material, de condutividade térmica $k = 0,05 \text{ J/(s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C)}$. Suas dimensões internas são $2 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$. Para essas condições, determine

- a) a área A da superfície interna total do contêiner;
- b) a potência P do aquecedor, considerando ser ele a única fonte de calor;
- c) a energia E , em kWh, consumida pelo aquecedor em um dia.

Note e adote:

A quantidade de calor por unidade de tempo (ϕ) que flui através de um material de área A , espessura ε e condutividade térmica k , com diferença de temperatura ΔT entre as faces do material, é dada por: $\phi = kA\Delta T/\varepsilon$.

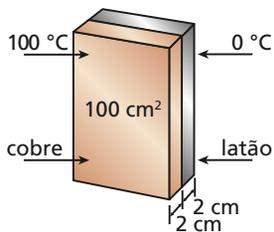
32. (UPM-SP) Tem-se três cilindros de secções transversais iguais de cobre, latão e aço, cujos comprimentos são, respectivamente, 46 cm, 13 cm e 12 cm.



Reprodução/Arquivo da editora

Soldam-se os cilindros, formando o perfil em Y, indicado na figura. O extremo livre do cilindro de cobre é mantido a 100 °C e o dos cilindros de latão e aço, a 0 °C. Supor que a superfície lateral dos cilindros esteja isolada termicamente. As condutividades térmicas do cobre, latão e aço valem, respectivamente, 0,92, 0,26 e 0,12, expressas em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. No regime estacionário de condução, qual a temperatura na junção?

33. A condutividade térmica do cobre é aproximadamente quatro vezes maior que a do latão. Duas placas, uma de cobre e outra de latão, com 100 cm^2 de área e 2,0 cm de espessura, são justapostas como ilustra a figura ao lado.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Considerando-se que as faces externas do conjunto sejam mantidas a 0 °C e 100 °C, qual será a temperatura na interface da separação das placas quando for atingido o regime estacionário?

34. (UPM-SP) A figura I mostra uma barra metálica de secção transversal quadrada. Suponha que 10 cal fluam em regime estacionário através da barra, de um extremo para outro, em 2 minutos. Em seguida, a barra é cortada ao meio no sentido transversal e os dois pedaços são soldados como representa a figura II. O tempo necessário para que 10 cal fluam entre os extremos da barra assim formada é:



figura I

- a) 4 minutos.
b) 3 minutos.
c) 2 minutos.
d) 1 minuto.
e) 0,5 minuto.

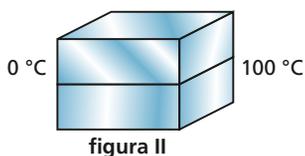


figura II

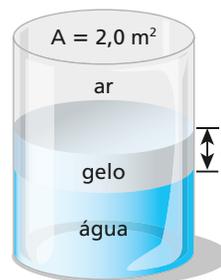
Reprodução/Arquivo da editora

35. (Unicamp-SP) Nas regiões mais frias do planeta, camadas de gelo podem se formar rapidamente sobre um volume de água a céu aberto. A figura a seguir mostra um tanque cilíndrico de água cuja área da base é $A = 2,0 \text{ m}^2$, havendo uma camada de gelo de espessura L na superfície da água. O ar em contato com o gelo está a uma temperatura $T_{\text{ar}} = -10 \text{ °C}$, enquanto a temperatura da água em contato com o gelo é $T_{\text{ág}} = 0,0 \text{ °C}$.

O calor é conduzido da água ao ar através do gelo. O fluxo de calor ϕ_{cal} , definido como a quantidade de calor conduzido por unidade de tempo, é dado por

$$\phi_{\text{cal}} = kA \frac{T_{\text{ág}} - T_{\text{ar}}}{L}, \text{ em que } k = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{°C}}$$

é a condutividade térmica do gelo. Qual é o fluxo de calor ϕ_{cal} quando $L = 5,0 \text{ cm}$?

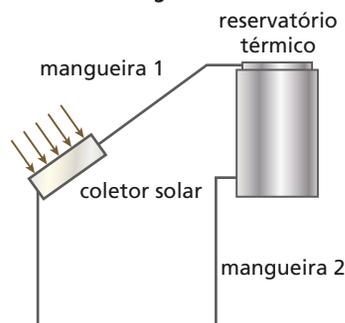


Reprodução/Arquivo da editora

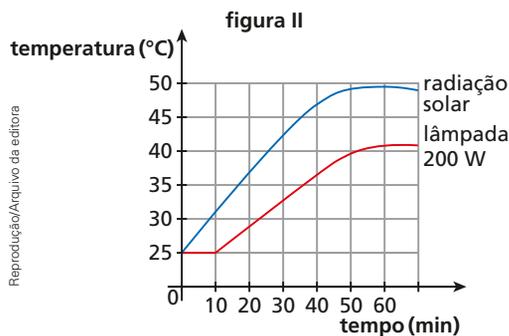
36. (UFPA) Para obter água aquecida, um estudante montou o seguinte sistema, esquematizado na figura I, a seguir: no coletor solar, feito de uma cuba de vidro, com fundo metálico preto-fosco, a água é aquecida pela radiação e, através de um ciclo convectivo usando as mangueiras 1 e 2, é armazenada no reservatório térmico.

O estudante realizou dois experimentos: primeiro o coletor foi exposto à ação do sol e depois, nas mesmas condições, apenas à luz de uma lâmpada de 200 W. Os resultados da variação de temperatura do reservatório em função do tempo, nos dois experimentos, estão representados no gráfico da figura II a seguir.

figura I



Reprodução/Arquivo da editora



Com base na interpretação das figuras I e II, é correto afirmar:

- Ao se usar a lâmpada, observa-se que o processo de aquecimento da água foi mais eficiente do que com o uso da radiação solar.
 - No intervalo de 10 min a 40 min, observa-se que a radiação solar aqueceu a água a uma taxa 1,5 vez maior do que a lâmpada.
 - O aquecimento da água com o uso da lâmpada é menos eficiente; no entanto, nesse caso, a resposta ao aquecimento é mais rápida.
 - Acima de 40 °C, o aquecimento com a radiação solar torna-se mais rápido.
 - O fundo preto-fosco não serve somente para absorver a radiação incidente, mas, principalmente, para produzir efeito estufa dentro do coletor solar.
- 37.** (Uepa) O efeito estufa é um fenômeno natural, característico de planetas onde existe atmosfera. Ele acontece na atmosfera da Terra e também na de Vênus, onde o efeito é muito acentuado e a temperatura alcança valores de cerca de 460 °C. Embora importante para a manutenção da vida no planeta, hoje é uma preocupação para muitos ambientalistas e cientistas. Com base em seus conhecimentos sobre o efeito estufa, analise as seguintes afirmativas:

- Existem materiais, como o vidro, que permitem a passagem de luz, mas dificultam a passagem de radiação térmica. Numa estufa com cobertura de vidro, por exemplo, parte da luz que entra é absorvida pelas plantas. Estas, sendo aquecidas, emitem radiação infravermelha, que tem dificuldade para atravessar o vidro e aquece o interior da estufa. Esse efeito é semelhante ao que acontece na atmosfera da Terra, daí o nome "efeito estufa".
- O efeito estufa é importante porque retém o calor na Terra, possibilitando a vida de animais e vegetais. Sua intensificação é que é danosa, ocasionando o aumento da temperatura do planeta. Como consequência disso, dentre outras ocorrências, parte da ilha do Marajó poderá ser inundada e os furacões no Caribe poderão ser mais frequentes e devastadores.
- No efeito estufa, a radiação solar atravessa a atmosfera, parte é absorvida pela Terra e parte é refletida. Uma parcela da radiação absorvida é reemitida na forma de raios ultravioleta (ondas de calor), que têm pequeno comprimento de onda e dos quais uma pequena parte é absorvida, principalmente pelo gás carbônico, vapor de água e metano, nas altas camadas atmosféricas, criando um manto quente na superfície da Terra.
- Na Lua, não há ocorrência de efeito estufa em virtude de não existir atmosfera. Isso é uma das causas de as temperaturas no nosso satélite variarem entre -150 °C durante a noite e 100 °C durante o dia.

Estão corretas somente as afirmativas:

- I, II e IV.
- I, II e III.
- I, III e IV.
- I e II.
- II e IV.

DESCUBRA MAIS

- Pesquise e cite (com a devida explicação) um fator positivo e outro negativo do efeito estufa na atmosfera da Terra.
- Em 10 de dezembro de 1997, vários países assinaram, no Japão, um acordo que foi denominado Protocolo de Kyoto. Qual a relação do efeito estufa na nossa atmosfera com esse acordo?
- O Brasil é o país que mais recicla latas de alumínio, 98%. No entanto, quando se trata de garrafas PET (politereftalato de etileno), apenas pouco mais da metade é reciclada. O que podemos fazer para evitar que essas embalagens e o lixo que produzimos contribuam para o aumento do aquecimento global?

Aquecimento global

O planeta esquenta, os polos derretem, as secas intermináveis ocorrem onde antes chovia abundantemente, a mata queima com violência em razão da falta de chuvas, há inundações onde chovia pouco, furacões surgem em maior quantidade e mais intensos com o passar dos anos; enfim, o clima parece ter enlouquecido: faz frio quando devia estar quente, faz calor quando devia estar frio. Tudo isso é o reflexo do chamado aquecimento global.

Muitos cientistas e estudiosos desse assunto por décadas alertaram para o que deveria acontecer no futuro, só que o futuro chegou. Tudo o que lemos no primeiro parágrafo parece uma chamada para o noticiário que vamos assistir hoje à noite na TV. A humanidade precisa acordar e, o mais rápido possível, buscar soluções para minimizar os impactos desses fenômenos.

O esforço deve ser total e todos os países do mundo devem dar sua contribuição. Os mais ricos, que se beneficiaram até aqui com a industrialização e o consumo desenfreado, agora devem ser os mais interessados, já que a manutenção de suas conquistas para a qualidade de vida do ser humano moderno depende da ajuda da natureza, e ela parece estar ferida, reagindo violentamente contra as agressões sofridas durante esses anos.

Nas imagens a seguir podemos observar a mesma região do Alasca (EUA) retratada em dois diferentes momentos e verificar a diminuição do gelo com o passar do tempo e a mudança da paisagem.

Reprodução/USGOV.GOV, EUA



// Região do Alasca fotografada em 1892.



Bruce F. Molnia/USGOV.GOV, EUA

// A mesma região do Alasca fotografada em 2005.

Não podemos nos deixar enganar com a aparente desaceleração do aquecimento global detectada pelo estudo recente da Nasa, publicado na revista *Science*, um dos mais importantes canais de divulgação científica. De acordo com esse estudo, a energia térmica resultante do aquecimento global mudou de lugar. No entanto, mais energia continua chegando e sendo absorvida pelos gases contidos na atmosfera.

Leia a seguir um artigo a respeito desse “hiato” no aquecimento global. Pesquise mais a respeito e discuta com seus colegas a importância da conscientização das pessoas em relação a esse tema.

O aquecimento global desacelerou?

Estudo da Nasa publicado na revista *Science* explica o suposto “hiato” do aquecimento: o calor absorvido pelos oceanos teria se transferido de águas rasas do Pacífico para camadas mais profundas dos oceanos Índico e Antártico. É esse fenômeno que faz com que haja uma aparente redução no ritmo das mudanças climáticas que afetam a Terra.

O planeta está esquentando, não há como negar. Desde 1880, quando começaram os registros formais, a temperatura subiu 0,8 grau, e dois terços desse aumento aconteceu nos últimos 40 anos. Não só treze

dos catorze anos mais quentes já documentados ocorreram neste começo de século, como 2014 bateu o recorde dos registros. Detecta-se hoje, porém, um fenômeno que intriga cientistas. Apesar de o calor planetário crescer ano a ano, o ritmo desse aumento vem diminuindo. Isso vai na contramão das previsões de climatologistas, que apontavam que quanto maior fosse a emissão de gás carbônico (o CO₂) na atmosfera, índice que só sobe, maior seria também o fator de elevação da temperatura da Terra. A esse estranho acontecimento foi dado o nome de “hiato”, justamente por representar uma aparente pausa no aquecimento. [...] a Nasa finalmente achou uma resposta para esse fenômeno que negaria as estimativas catastróficas de ambientalistas, e poderia jogar uma pá de cal nos esforços conservacionistas para tentar limitar os efeitos negativos das mudanças climáticas. Em resumo, os pesquisadores descobriram que é só aparente a redução no ritmo do aquecimento global.

O hiato era utilizado por estudiosos “céticos” como o principal argumento contrário à ideia da existência de aquecimento global. Diferentemente do que é mais aceito pela comunidade científica, esse grupo não acredita as mudanças climáticas à atividade humana, que tem lotado a atmosfera com gases de efeito estufa por meio, por exemplo, da queima de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão. Para os céticos, fatores naturais explicariam a oscilação de temperatura, como ciclos esperados do clima da Terra, ou ainda a inconstante atividade do Sol.

O estudo da Nasa publicado na revista americana *Science* acaba com esses argumentos. Segundo cálculos da agência espacial americana, o calor acumulado nos últimos anos na atmosfera e pela água dos mares se deslocou para camadas mais profundas dos oceanos. Esse calor, porém, deve voltar à superfície a curto prazo, aumentando bruscamente a temperatura global. Ou seja, não é que o aquecimento passa por um hiato. As mudanças climáticas continuam a todo vapor, só não se sabia onde estava armazenada parte substancial do calor acumulado nas últimas duas décadas.

Uma análise de dados coletados por satélites da Nasa mostrou que os oceanos têm absorvido grande quantidade de calor ao longo do tempo. Os pesquisadores analisaram a distribuição de calor no planeta e descobriram que, ao menos desde 2003, as águas quentes que ocupavam os primeiros 100 metros a partir da superfície do Oceano Pacífico resfriaram – o que condiz com a teoria da pausa do aquecimento. Porém, e aí está a novidade, essa perda de calor foi compensada com o aquecimento de águas mais profundas, de até 300 metros a partir da superfície, nos oceanos Índico, Antártico e do próprio Pacífico.

“Ainda não entendemos esse mecanismo por completo. Mas podemos afirmar que o resfriamento da superfície nos iludiu. Nos próximos anos o calor regressará às águas rasas e à atmosfera”, disse [...] a espanhola Veronica Nieves, física da Nasa e uma dos autores do estudo. “A oscilação, combinada ao fato de que estamos fornecendo calor extra para a atmosfera por meio das emissões de gases estufa, indica que o aquecimento vai acelerar novamente” [...]

A descoberta deve ser agora incluída nos modelos climáticos utilizados por cientistas para prever o aquecimento e seus efeitos em diferentes cenários de emissões de gases estufa. A conclusão é importante ainda por revelar com mais detalhes como os oceanos agem como reguladores da temperatura do planeta. “Se não fosse pelos mares, a atmosfera teria aquecido mais de 1,5 grau nos últimos 150 anos, e não 0,8 grau, agravando a situação já ruim”, diz o climatologista Paulo Artaxo, da Universidade de São Paulo. “O problema é que, ao absorver o calor excessivo da atmosfera, os oceanos também estão sendo fortemente afetados, com alterações nas correntes oceânicas, na salinidade e na acidez da água.” [...]

A questão do “hiato”, porém, ainda se mostrava como um desafio para os ambientalistas. Não havia explicações críveis para a aparente pausa do aquecimento global nas últimas duas décadas. A descoberta da Nasa, portanto, é fundamental. Sim, há aquecimento global, e seu ritmo deve voltar de forma ainda mais intensa justamente em consequência desse “hiato”, que acabou por armazenar calor em áreas mais profundas dos oceanos.

Com isso, os céticos terão de repensar seus argumentos – ou mudar de opinião. Como fez, em 2012, o climatologista e físico Richard Muller, pesquisador que até então integrava o grupo de descrentes, mas que reconheceu, em artigo publicado no *New York Times*, que a melhor explicação para o aquecimento do planeta é mesmo a emissão de gases de efeito estufa pelo homem.

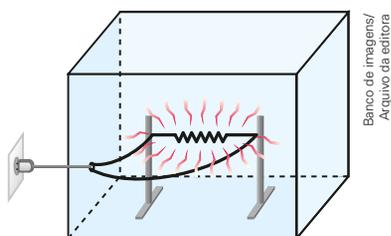
[...]

BEER, Raquel. O aquecimento global desacelerou. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/ciencia/o-aquecimento-global-desacelerou>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

Para raciocinar um pouco mais

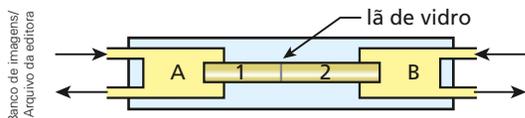
38. Uma forma experimental de medir a condutividade térmica de um material usado como isolante é construir uma caixa com esse material. No seu interior, é colocado um aquecedor elétrico de potência conhecida que mantém a temperatura interna superior à externa.

Suponha que foi construída uma caixa com determinado material isolante. A área total externa tem $4,0 \text{ m}^2$ e a espessura das paredes é de $5,0 \text{ mm}$. O aquecedor elétrico desenvolve uma potência constante de 300 W , mantendo a temperatura interna da caixa $50 \text{ }^\circ\text{C}$ acima da temperatura externa.



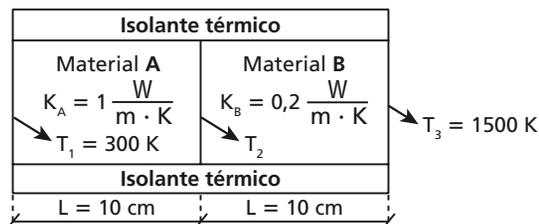
- Desprezando possíveis efeitos de bordas, determine o coeficiente de condutividade térmica do material em questão.
- Se essa caixa fosse cúbica, qual seria o fluxo de calor através de uma de suas faces?

39. O esquema a seguir representa o aparelho de Searle, no qual se notam duas câmaras, **A** e **B**, por onde circulam fluidos a temperaturas constantes e respectivamente iguais a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Duas barras metálicas, 1 e 2, de mesma seção transversal, são associadas como se indica; as extremidades da associação adentram as câmaras **A** e **B**. Os comprimentos das barras 1 e 2 valem, respectivamente, 10 cm e 16 cm e os coeficientes de condutibilidade térmica, na mesma ordem, são $1,0 \text{ cal}/(\text{s cm } ^\circ\text{C})$ e $0,4 \text{ cal}/(\text{s cm } ^\circ\text{C})$.



- Estabelecido o regime permanente de condução, qual é a temperatura na junção da associação das barras?
- Construa o gráfico da temperatura ao longo das barras. Considere a origem do gráfico na extremidade esquerda da barra 1.

40. [IME-RJ] A figura composta por dois materiais sólidos diferentes **A** e **B**, apresenta um processo de condução de calor, cujas temperaturas não variam com o tempo. É correto afirmar que a temperatura T_2 da interface desses materiais, em kelvins, é:



Observações:

T_1 : Temperatura da interface do material **A** com o meio externo.

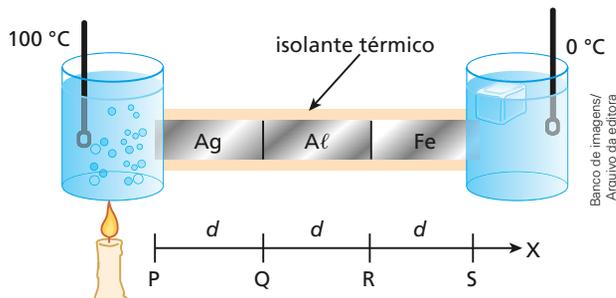
T_3 : Temperatura da interface do material **B** com o meio externo.

K_A : Coeficiente de condutividade térmica do material **A**.

K_B : Coeficiente de condutividade térmica do material **B**.

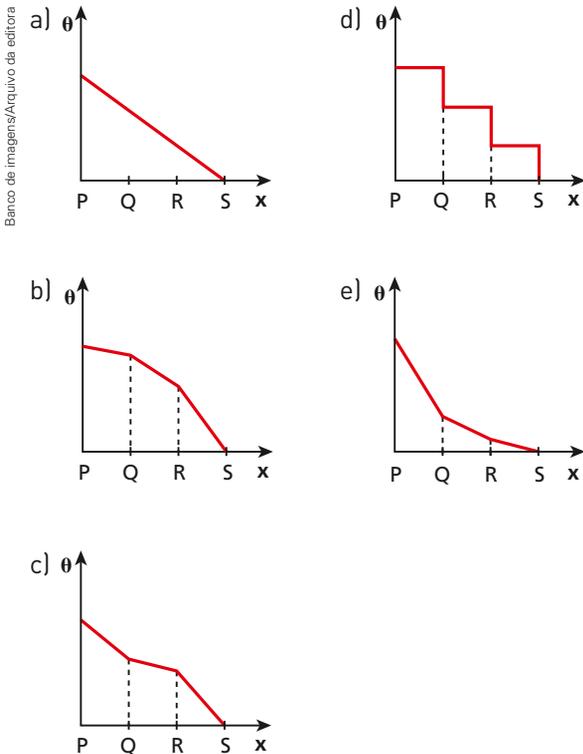
- 400
- 500
- 600
- 700
- 800

41. Três barras, de prata, alumínio e ferro, geometricamente iguais, estão soldadas e envolvidas por um isolante térmico, permitindo um fluxo de calor entre os recipientes mantidos sob temperatura constante.



Sabe-se que as barras metálicas foram colocadas, da esquerda para a direita, na ordem decrescente das condutividades térmicas, isto é, a prata é melhor condutora de calor do que o alumínio, que por sua vez é melhor condutor do que o ferro.

O gráfico que melhor representa a variação da temperatura (θ) em função da posição (x) é:



42. Um vestibulando estava na cozinha de sua casa quando resolveu realizar uma experiência de trocas de calor que seu professor de Física havia proposto. Para isso, utilizou um caldeirão, uma garrafa de vidro, água e sal. Colocou água no caldeirão e no interior da garrafa de vidro. O caldeirão foi colocado sobre a chama do fogão e a garrafa, que estava aberta, teve seu gargalo preso a um barbante, que, esticado, a mantinha afastada do fundo do caldeirão, porém mergulhada na água.

Após alguns minutos, ele observou que a água do caldeirão entrou em ebulição (a $100\text{ }^\circ\text{C}$), mas a água do interior da garrafa (que também estava a $100\text{ }^\circ\text{C}$) não fervia. Esperou mais alguns minutos e colocou um punhado de sal na água do caldeirão; pouco tempo depois, notou que a água no interior da garrafa entrava em ebulição.

- Por que, mesmo estando a $100\text{ }^\circ\text{C}$, a água da garrafa não fervia?
- O que ocorre com a temperatura de ebulição da água quando acrescentamos sal?
- Por que, depois de ser acrescentado sal à água do caldeirão, a água do interior da garrafa também entrou em ebulição?

43. Uma massa m de água e um bloco metálico de massa M são aquecidos em um laboratório durante um intervalo de tempo Δt , ambos sofrendo a mesma variação de temperatura $\Delta\theta$. Usando-se a mesma fonte térmica, com a mesma potência, dentro de um elevador em queda livre, a mesma água precisou de um intervalo de tempo Δt_A e o mesmo bloco metálico precisou de um intervalo de tempo Δt_B para sofrerem a mesma variação de temperatura $\Delta\theta$. Se as demais condições não se alterarem, é verdade que:

- $\Delta t = \Delta t_B < \Delta t_A$.
- $\Delta t < \Delta t_A = \Delta t_B$.
- $\Delta t > \Delta t_A = \Delta t_B$.
- $\Delta t = \Delta t_A = \Delta t_B$.
- $\Delta t < \Delta t_A < \Delta t_B$.

44. (IJSO) A radiação solar chega até a atmosfera terrestre a uma taxa de $1353\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, sendo que 36% da radiação é refletida de volta para o espaço e outros 18% é absorvido pela atmosfera. A potência de radiação de um corpo é dada por σT^4 , onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura na escala absoluta. Qual a máxima temperatura que um corpo negro na superfície da Terra pode atingir? ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

- $120\text{ }^\circ\text{C}$.
- $63,9\text{ }^\circ\text{C}$.
- $50,7\text{ }^\circ\text{C}$.
- $31,4\text{ }^\circ\text{C}$.

45. (IME-RJ) Um meteorologista mediu por duas vezes em um mesmo dia a umidade relativa do ar e a temperatura do ar quando estava em um pequeno barco a remo no meio de um grande lago. Os dados encontram-se apresentados na tabela a seguir:

Medida	Período do dia	Umidade relativa	Temperatura do ar
1	Manhã	40%	300 K
2	Tarde	70%	300 K

Diante do exposto, a razão entre as taxas de evaporação de água do lago calculadas na primeira e na segunda medida de umidade relativa do ar é:

- $\frac{16}{13}$
- $\frac{17}{14}$
- 2
- $\frac{7}{4}$
- 4

Calor sensível e calor latente

Alamy/Fotorena



// Na foto acima, em uma região de águas termais no Alasca, a água encontra-se em três estados físicos: no estado sólido (a neve), no estado líquido (a água do lago) e no estado gasoso (o vapor de água no ar).

No tópico anterior, vimos que o calor é energia térmica em trânsito de um corpo para outro. A principal causa dessa transferência é a diferença de temperatura entre os corpos.

Estudaremos neste tópico como a temperatura de diferentes corpos varia quando absorvem a mesma quantidade de calor. Veremos que esse comportamento é caracterizado por grandezas como massa e calor específico. Exploraremos também as grandezas físicas que estão relacionadas às mudanças de estado de uma substância.

1. Introdução

Quando um corpo recebe ou cede certa quantidade de energia térmica, podemos observar, como consequência, uma variação de sua temperatura ou uma mudança em seu estado físico.

A variação de temperatura corresponde a uma variação no estado de agitação das partículas do corpo. Nesse caso, a energia térmica transferida é denominada **calor sensível**. A mudança de estado físico corresponde a uma alteração no estado de agregação das partículas do corpo, fazendo com que um sólido, por exemplo, transforme-se em líquido. A energia térmica responsável pelas mudanças de estado denomina-se **calor latente**.

Quando ocorre uma mudança de estado em um corpo, a energia térmica armazenada na forma de energia potencial de agregação aumenta (ou diminui). Assim, **calor latente** é a denominação que damos à energia térmica quando ela, ao ser recebida, se transforma em energia potencial de agregação e, ao ser cedida, vem da energia potencial de agregação das partículas, provocando uma mudança no estado físico do corpo.

2. Capacidade térmica (C) e calor específico (c)

Se tomarmos um corpo de massa m e temperatura inicial θ_1 e fornecermos a ele uma quantidade de calor Q , sua temperatura passa a ser θ_2 , sofrendo uma variação correspondente a $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

Define-se **capacidade térmica (C) ou capacidade calorífica** desse corpo como sendo:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} \quad \text{Unidade usual: } \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

A **capacidade térmica (C)** de um corpo indica a quantidade de calor que ele precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.

Suponha, por exemplo, que um corpo precise receber 100 calorias de energia térmica para que sua temperatura aumente em $5,0^\circ\text{C}$. Dividindo esses dados, vamos encontrar para a capacidade térmica desse corpo o valor $20 \text{ cal}/^\circ\text{C}$. Isso significa que, para variar 1°C , ele precisa receber (ou ceder) 20 calorias. A capacidade térmica por unidade de massa do corpo é denominada **calor específico (c)**, dada usualmente pela unidade $\frac{\text{cal}}{\text{g } ^\circ\text{C}}$.

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta\theta}$$

O **calor específico (c)** indica a quantidade de calor que cada unidade de massa do corpo precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.



// A energia térmica fornecida pela chama do fogão foi utilizada inicialmente para aquecer a água e a chaleira. Quando ocorre a ebulição, observamos vapor de água saindo pelo bico da chaleira. Esse vapor é parte da água que passou para o estado gasoso.

Supondo-se que o corpo do exemplo anterior (cuja capacidade térmica é 20 cal/°C) tivesse 100 g de massa, seu calor específico seria 0,20 cal/g °C. Para esse cálculo, dividimos sua capacidade térmica pela respectiva massa.

Note que o calor específico não depende da massa do corpo, pois é uma característica da substância, e não do corpo. Nem a capacidade térmica nem o calor específico sensível de uma substância têm valores constantes com a temperatura. No entanto, para efeito de cálculo, costuma-se usar o valor médio de cada um no intervalo de temperatura considerado.

A água é a substância que mais aparece nos exercícios, sendo usado o valor 1,0 cal/g °C para seu calor específico. Isso significa que cada grama de água necessita de 1,0 caloria para sofrer uma variação de temperatura de um grau Celsius.

A tabela a seguir apresenta o calor específico de algumas substâncias.

Substâncias	Calor específico em cal/g °C
Alumínio	0,215
Água	1,000
Álcool	0,590
Bronze (liga metálica)	0,090
Cobre	0,092
Chumbo	0,038
Estanho	0,050
Ferro	0,105
Gelo	0,480
Mercúrio	0,033
Ouro	0,031
Prata	0,057
Vapor de água	0,481
Vidro	0,200
Zinco	0,093

Fonte: <www2.ucdsb.on.ca/tiss/stretton/database/specific_heat_capacity_table.html>. Acesso em: 18 jun. 2018.

3. O calor sensível e o seu cálculo

Calor sensível é o calor que, recebido ou cedido por um corpo, provoca nele uma variação de temperatura.

Para calcular a quantidade de calor sensível que um corpo recebe (ou cede), usamos a definição de calor específico sensível:

$$c = \frac{Q}{m\Delta\theta} \Rightarrow Q = mc\Delta\theta$$

Essa equação é também denominada **Equação Fundamental da Calorimetria**. Observe que a variação de temperatura é dada por:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{final}} - \theta_{\text{inicial}}$$

Dessa forma, se a temperatura aumenta, $\theta_f > \theta_i$ e $\Delta\theta > 0$; nesse caso, a quantidade de calor Q é positiva. Se a temperatura diminui, $\theta_f < \theta_i$ e $\Delta\theta < 0$; nesse caso, Q é negativa.

Considerando o calor específico (c) uma constante relativa à substância de que é feito o corpo, podemos concluir que, para uma mesma variação de temperatura ($\Delta\theta$), a quantidade de calor (Q) é diretamente proporcional à massa do corpo.

Ainda levando em conta a hipótese anterior, podemos concluir que:

- Para um mesmo corpo, a variação de temperatura é proporcional à quantidade de calor recebido ou cedido por ele.
- Para que corpos constituídos de igual substância sofram a mesma variação de temperatura ($\Delta\theta$), a quantidade de calor recebido ou cedido deve ser proporcional à massa.



JÁ PENSOU NISTO?

Por que não queima?

As diversas tecnologias de soldagem disponíveis têm grande importância na indústria, sendo empregadas em larga escala na fabricação de automóveis, navios e aviões, por exemplo. A soldagem consiste em unir duas ou mais peças, estabelecendo, nas regiões de contato, ligações químicas de natureza similar às existentes no interior dos próprios materiais.

Na foto ao lado, uma artesã usando equipamento de segurança está soldando partes de uma estrutura metálica produzindo uma profusão de faíscas luminosas. Uma determinada faísca, cuja massa é muito pequena, lançada em temperatura da ordem de $500\text{ }^\circ\text{C}$, não é capaz de queimar com gravidade os corpos que estão à sua volta. Isso ocorre devido à sua baixa capacidade térmica. Ao atingir um desses corpos, ela sofre um brusco resfriamento, que ocorre mediante o desprendimento de uma pequena quantidade de calor.



Alamy/Fotoarena

Exercícios Nível 1

1. (Uerj) Observe na figura, um ferreiro que aquece uma ferradura e a esfria, em seguida, em um balde cheio de água, à temperatura ambiente.



Quando o equilíbrio térmico é atingido, a água se aquece de poucos graus Celsius, enquanto a

ferradura se resfria de algumas centenas de graus, na mesma escala de temperatura.

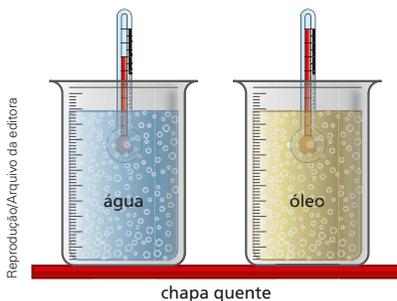
A grandeza física que determina essa diferença de comportamento entre a água e a ferradura é:

- a) o peso.
- b) o volume.
- c) o calor específico.
- d) a capacidade térmica.

2. (UFRN) Em uma aula prática de Termologia, o professor realizou a demonstração a seguir:

I. Colocou massas iguais de água e óleo, à mesma temperatura, respectivamente, em dois recipientes de vidro pirex, isolados termicamente em suas laterais e respectivas partes superiores.

- II. Pegou dois termômetros idênticos e colocou um em cada recipiente.
- III. Em seguida, colocou esses recipientes sobre uma chapa quente. Passado algum tempo, o professor mostrou para seus alunos que o termômetro do recipiente com óleo exibia um valor de temperatura maior que o do recipiente com água, conforme ilustrado na figura abaixo.



Considerando-se que a água e o óleo receberam a mesma quantidade de calor da chapa quente, é correto afirmar que a temperatura do óleo era mais alta porque:

- a) a condutividade térmica da água é igual à do óleo.
- b) a condutividade térmica da água é maior que a do óleo.
- c) o calor latente da água é igual ao do óleo.
- d) o calor específico da água é maior que o do óleo.

3. (Fazu-MG) Tia Anastácia é famosa por sua habilidade na cozinha. Um de seus pratos mais famosos é o risoto de camarão feito em panela de pedra. Inácia, sobrinha de Tia Anastácia, ao tentar reproduzir o famoso prato, frustrou-se, pois, apesar de todos os cuidados e da bela aparência do prato, quando do momento da retirada do fogo, surpreendeu-se com o fato de que, posto à mesa, o arroz acabou por queimar. Ao questionar Tia Anastácia sobre o ocorrido, esta lhe respondeu que o segredo do cozimento dos alimentos em panela de pedra, para que a comida não queime, está no fato de se retirar a panela do fogo um pouco antes que o prato esteja totalmente cozido. Nas palavras de tia Anastácia: *“A quentura da panela acaba por cozer os alimentos mesmo que ela já não esteja mais no fogo.”*

Dentre as afirmações a seguir, qual a que explica corretamente a “quentura” da panela de pedra salientada por Tia Anastácia?

- a) A capacidade térmica da panela de pedra é muito pequena, fazendo com que a temperatura se mantenha elevada por muito tempo.

- b) A capacidade térmica da panela é grande, permitindo que seu resfriamento se dê com rapidez, passando todo o calor para o alimento, fazendo-o queimar.
- c) A capacidade térmica da panela é grande, o que significa que, para uma pequena variação de temperatura no resfriamento, a panela irradia grande quantidade de calor, podendo acarretar a queima do alimento.
- d) A frase de Tia Anastácia é mais uma crença popular. O fato de a comida ter queimado não está relacionado à panela de pedra, e sim ao tempo excessivo à espera do prato na mesa.
- e) A pedra, de que é feita a panela, tem a capacidade de reproduzir calor quando estimulada, acabando por queimar o alimento se o estímulo for muito grande.

4. (Enem)

Em grandes metrópoles, devido a mudanças na superfície terrestre — asfalto e concreto em excesso, por exemplo — formam-se ilhas de calor. A resposta da atmosfera a esse fenômeno é a precipitação convectiva.

Isso explica a violência das chuvas em São Paulo, onde as ilhas de calor chegam a ter 2 a 3 graus centígrados de diferença em relação ao seu entorno.

Revista *Terra da Gente*. Ano 5, nº 60, Abril 2009 (adaptado).

As características físicas, tanto do material como da estrutura projetada de uma edificação, são a base para compreensão de resposta daquela tecnologia construtiva em termos de conforto ambiental. Nas mesmas condições ambientais (temperatura, umidade e pressão), uma quadra terá melhor conforto térmico se

- a) pavimentada com material de baixo calor específico, pois quanto menor o calor específico de determinado material, menor será a variação térmica sofrida pelo mesmo ao receber determinada quantidade de calor;
- b) pavimentada com material de baixa capacidade térmica, pois quanto menor a capacidade térmica de determinada estrutura, menor será a variação térmica sofrida por ela ao receber determinada quantidade de calor;
- c) pavimentada com material de alta capacidade térmica, pois quanto maior a capacidade térmica de determinada estrutura, menor será a variação térmica sofrida por ela ao receber determinada quantidade de calor;

- d) possuir um sistema de vaporização, pois ambientes mais úmidos permitem uma mudança de temperatura lenta, já que o vapor de água possui a capacidade de armazenar calor sem grandes alterações térmicas, devido ao baixo calor específico da água (em relação à madeira, por exemplo);
- e) possuir um sistema de sucção do vapor de água, pois ambientes mais secos permitem uma mudança de temperatura lenta, já que o vapor de água possui a capacidade de armazenar calor sem grandes alterações térmicas, devido ao baixo calor específico da água (em relação à madeira, por exemplo).

5. (Enem) O Inmetro procedeu à análise de garrafas térmicas com ampolas de vidro, para manter o consumidor informado sobre a adequação dos produtos aos Regulamentos e Normas Técnicas. Uma das análises é a de eficiência térmica. Nesse ensaio, verifica-se a capacidade da garrafa térmica de conservar o líquido aquecido em seu interior por determinado tempo. A garrafa é completada com água a 90 °C até o volume total. Após 3 horas, a temperatura do líquido é medida e deve ser, no mínimo, de 81 °C para garrafas com capacidade de 1 litro, pois o calor específico da água é igual a 1 cal/g °C. Atingindo a água 81 °C nesse prazo, a energia interna do sistema e a quantidade de calor perdida para o meio são, respectivamente,
- a) constante e de 900 cal d) maior e de 9 000 cal
 b) maior e de 900 cal e) menor e de 900 cal
 c) menor e de 9 000 cal

6. Uma garrafa térmica contém água a 60 °C. O conjunto garrafa térmica + água possui capacidade térmica igual a 80 cal/°C. O sistema é colocado sobre uma mesa e após algum tempo sua temperatura diminui para 55 °C. Qual foi a perda de energia térmica para o ambiente nesse intervalo de tempo?

Resolução:

$$Q = C\Delta\theta$$

Assim:

$$Q = 80 \cdot (55 - 60)$$

$$Q = -400 \text{ cal}$$

O sinal negativo indica que essa energia foi retirada do sistema.

Assim:

$$|Q| = 400 \text{ cal}$$

7. A massa e o calor específico sensível de cinco amostras de materiais sólidos e homogêneos são fornecidos a seguir.

Amostra	Massa (g)	Calor específico (cal/g °C)
A	150	0,20
B	50	0,30
C	250	0,10
D	140	0,25
E	400	0,15

As cinco amostras encontram-se inicialmente à mesma temperatura e recebem quantidades iguais de calor. Qual delas atingirá a maior temperatura?

8. O chamado leite longa vida é pasteurizado pelo processo UHT (*Ultra High Temperature*), que consiste em aquecer o leite da temperatura ambiente (22 °C) até 137 °C em apenas 4,0 s, sendo em seguida envasado em embalagem impermeável a luz e a micro-organismos. O calor específico do leite é praticamente igual ao da água, 1,0 cal/g °C. Assim, no aquecimento descrito, que quantidade de calor cada litro (1 000 g) de leite precisou receber? Dê sua resposta em quilocalorias (kcal).
9. Uma fonte térmica foi utilizada para o aquecimento de 1,0 L de água (1 000 g) da temperatura ambiente (20 °C) até o ponto de ebulição (100 °C) em um intervalo de tempo igual a 1 min 40 s com rendimento de 100%. Sendo o calor específico da água igual a 1,0 cal/g °C, qual o valor da potência dessa fonte?

10. (Unesp-SP) Os organismos homeotermos devem manter-se aquecidos e, por isso, precisam ingerir alimentos que são transformados em energia. Parte dessa energia mantém a temperatura do corpo compensando a perda de calor para o meio ambiente. Em repouso, o ser humano dissipa cerca de 100 W quando está descansando. Se estiver em atividade física, pode perder bem mais. Um homem ou uma mulher de cerca de 70 kg, que realize atividades físicas consideradas normais, necessita diariamente de 3 500 kcal em média, o que corresponde a ingerir cerca de 2 kg

de alimentos em um dia, algo em torno de 3% da sua massa.

Observe a seguir a quantidade aproximada diária de alimentos a ser consumida por alguns organismos.



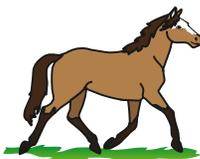
Pássaro: duas vezes sua massa.



Rato: metade de sua massa.



Ser humano: 3% de sua massa.



Cavalo: 1,5% de sua massa.

Reprodução/Arquivo da editora

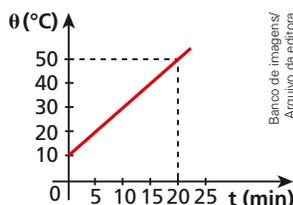
// Elementos sem proporção entre si.

Note que um pequeno rato precisa consumir diariamente uma quantidade de alimentos correspondente a 50% de sua massa. É pela superfície do corpo que se perde a maior parte do calor. Nos cães essa perda ocorre por meio da língua.

Determine, em watt, a taxa média de perda de energia por um corpo humano que consome diariamente 3 500 kcal.

Dado: 1 cal = 4 J

11. Uma fonte térmica de potência constante fornece 50 cal/min para uma amostra de 100 g de uma substância.



Banco de imagens/Arquivo da editora

O gráfico fornece a temperatura em função do tempo de aquecimento desse corpo. Qual o valor do calor específico do material dessa substância?

12. A energia utilizada para a manutenção e o desempenho do corpo humano é obtida por meio dos alimentos que são ingeridos. A tabela a seguir mostra a quantidade média de energia absorvida pelo corpo humano a cada 100 gramas do alimento ingerido.

Alimento	Porções (100 g)	Energia (kcal)
Alface	20 folhas	15
Batata frita	2 unidades	274
Chocolate em barra	1 tablete	528
Coca-cola	1/2 copo	39
Macarrão cozido	7 colheres de sopa	111
Mamão	1 fatia	32
Margarina vegetal	20 colheres de chá	720
Pão	2 fatias	269
Repolho cru	10 folhas	28
Sorvete industrializado	2 bolas	175

Se for preciso, use: 1 caloria = 4,2 joules; calor específico sensível da água = 1,0 cal/g °C.

Analisando a tabela, podemos concluir que, em termos energéticos:

- o chocolate é o alimento mais energético dentre os listados.
- uma fatia de mamão equivale, aproximadamente, a 10 folhas de alface.
- um copo de Coca-cola fornece uma energia de, aproximadamente, 328 J.
- 0,50 kg de sorvete é equivalente a, aproximadamente, 320 g de batatas fritas.
- um sanduíche com 2 fatias de pão, 2 folhas de alface e 2 folhas de repolho equivale a 1 unidade de batata frita.

Exercícios Nível 2

13. Você sabia que uma barra de chocolate de 100 g pode fornecer ao nosso organismo 500 calorias alimentares (kcal)? Usando o dado acima e os seus conhecimentos de Física, responda:

a) Se você pudesse transferir essa energia (da barra de chocolate) para m gramas de água a 0 °C, na fase líquida, e esta atingisse a temperatura de ebulição (100 °C), qual seria o valor de m ?

Dado: calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

b) Se uma pessoa de massa 70 kg ingerisse essa barra de chocolate e utilizasse toda essa energia

para subir uma escada com degraus de 20 cm de altura, quantos degraus poderia subir?

Dados: aceleração da gravidade = 10 m/s²; 1,0 cal = 4,2 J.

14. O aumento do número de pessoas com acesso a recursos que proporcionam uma vida mais confortável torna indispensável o empenho de todos em adquirir hábitos que resultem em uma economia de água e de energia elétrica. Segundo pesquisas, um banho de chuveiro em uma resi-

dência demora em média 15 minutos e são gastos 45 litros de água. Porém, se a pessoa tomar um banho “econômico”, fechando o registro ao se ensaboar, o tempo do chuveiro ligado cai para 5 minutos e o consumo de água para 15 litros. Com base nessas informações e sabendo que a variação de temperatura da água ao passar pelo chuveiro é de 15 °C, determine:

- a) a quantidade de calor, em calorias, utilizada para o aquecimento da água no banho “econômico”;
Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g°C; massa específica da água = 1,0 kg/L.

- b) a economia de energia elétrica, em joules, ao optar pelo banho “econômico”.
Dado: 1 cal = 4,18 J.

15. Um watt é a potência necessária para produzir a energia de um joule em um segundo. Uma caloria é a quantidade aproximada de energia necessária para elevar em 1,0 °C a temperatura de 1,0 grama de água.

Um aquecedor elétrico de potência 1 500 W e capacidade de 135 litros está totalmente cheio com água à temperatura ambiente (20 °C). Quanto tempo o aquecedor gasta para elevar a temperatura dessa água até 60 °C?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C; densidade absoluta da água = 1,0 kg/L; 1 cal = 4 J.

Resolução:

Observe que:

$$\text{Pot} = 1\,500\text{ W} = 1\,500 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 375\text{ cal/s}$$

$$d = \frac{m}{V} \Rightarrow m = dV = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \cdot 135\text{ L}$$

$$m = 135\text{ kg} = 135\,000\text{ g}$$

Usando a **Equação Fundamental da Calorimetria**, temos:

$$Q = mc\Delta\theta$$

Mas:

$$\text{Pot} = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow \text{Pot} \cdot \Delta t = Q$$

Então:

$$\text{Pot} \cdot \Delta t = mc\Delta\theta$$

Substituindo os valores fornecidos, vem:

$$375 \cdot \Delta t = 135\,000 \cdot 1,0 (60 - 20)$$

$$\Delta t = 14\,400\text{ s} = 240\text{ min} = 4,0\text{ h}$$

$$\Delta t = 4,0\text{ h}$$

- 16.** (Ufpel-RS) Um médico, após avaliação criteriosa, recomenda a um paciente uma dieta alimentar correspondente a 1 200 cal/dia, fornecendo-lhe uma lista de alimentos com as respectivas “calorias”. (Espera o médico que, com esse regime, a pessoa, pelo menos, não engorde.)

Os médicos utilizam, na realidade, a “grande caloria”, que vale 1 000 cal utilizadas na Física, ou seja, esse regime é na verdade de 1 200 000 cal/dia. Com base nesses dados e considerando o calor específico da água igual a 1,0 cal/g °C e 1,0 cal igual a 4,2 J, responda:

- a) Qual a potência média mínima (em watts) que a pessoa mencionada deverá dissipar, ao longo das suas atividades diárias, para, pelo menos, não ganhar peso?

- b) Se essa energia pudesse ser empregada para aquecer água de 10 °C a 60 °C, que massa de água (em gramas) seria utilizada?

- 17.** (Unesp-SP) A energia contida nos alimentos

Para determinar o valor energético de um alimento, podemos queimar certa quantidade desse produto e, com o calor liberado, aquecer determinada massa de água. Em seguida, mede-se a variação de temperatura sofrida pela água depois que todo o produto foi queimado, e determina-se a quantidade de energia liberada na queima do alimento. Essa é a energia que tal alimento nos fornece se for ingerido. No rótulo de um pacote de castanha-de-caju, está impressa a tabela a seguir, com informações nutricionais sobre o produto.

Informação nutricional Porção de 15 g	
Quantidade por porção	
Valor energético	90 kcal
Carboidratos	4,2 g
Proteínas	3 g
Gorduras totais	7,3 g
Gorduras saturadas	1,5 g
Gordura trans	0 g
Fibra alimentar	1 g
Sódio	45 mg

(www.brcaju.com.br)

Considere que 150 g de castanha tenham sido queimados e que determinada massa m de água submetida à chama dessa combustão tenha sido aquecida de $15\text{ }^\circ\text{C}$ para $87\text{ }^\circ\text{C}$. Sabendo que o calor específico de água líquida é igual a $1\text{ cal}/(\text{g }^\circ\text{C})$ e que apenas 60% da energia liberada na combustão tenha efetivamente sido utilizada para aquecer a água, é correto afirmar que a massa m , em gramas, de água aquecida era igual a

- a) 10 000
- b) 5 000
- c) 12 500
- d) 7 500
- e) 2 500

18. Um bom chuveiro elétrico, quando ligado na posição "inverno", dissipa uma potência de 6,4 kW, fornecendo essa energia à água que o atravessa com vazão de 50 gramas por segundo. Se a água, ao entrar no chuveiro, tem uma temperatura de $23\text{ }^\circ\text{C}$, qual a sua temperatura na saída?

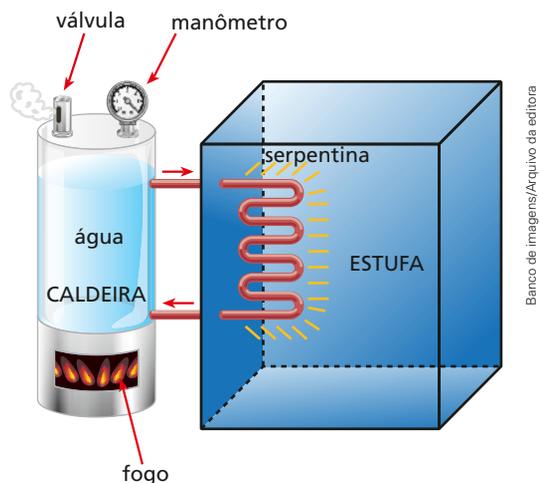
Dado: calor específico da água = $1,0\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$; $1\text{ cal} = 4\text{ J}$.

19. [Fuvest-SP] Num forno de micro-ondas é colocado um vasilhame contendo 3 kg de água a 10 graus Celsius . Após manter o forno ligado por 14 min, verifica-se que a água atinge a temperatura de 50 graus Celsius . O forno é então desligado e dentro do vasilhame de água é colocado um corpo de massa 1 kg e calor específico $0,2\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$ à temperatura inicial de $0\text{ }^\circ\text{C}$. Despreze o calor necessário para aquecer o vasilhame e considere que a potência fornecida pelo forno é continuamente absorvida pelos corpos dentro dele. Determine:

- a) a potência de aquecimento do forno;
- b) o tempo a mais que será necessário manter o forno ligado, na mesma potência, para que a temperatura de equilíbrio final do conjunto retorne a $50\text{ }^\circ\text{C}$.

20. O calor específico do cobre é igual a $0,09\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$. Se em vez de usarmos a escala Celsius usássemos a escala Fahrenheit, quanto valeria esse calor específico?

21. O dispositivo observado a seguir mostra de maneira simples uma estufa utilizada para a secagem de grãos.



Banco de imagens/Arquivo da editora

A água aquecida na caldeira circula através de uma serpentina, irradiando energia térmica para o interior da estufa. A água sai da caldeira a $90\text{ }^\circ\text{C}$ com vazão de 20 litros por minuto, esfria ao circular no interior da estufa e retorna a $65\text{ }^\circ\text{C}$. Sendo para a água o calor específico sensível igual a $1,0\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$ e a densidade absoluta igual a $1,0\text{ kg}/\text{L}$, qual a quantidade de calor fornecida para a estufa, a cada hora?

22. [Unesp-SP] Foi realizada uma experiência em que se utilizava uma lâmpada de incandescência para, ao mesmo tempo, aquecer 100 g de água e 100 g de areia. Sabe-se que, aproximadamente, $1\text{ cal} = 4\text{ J}$ e que o calor específico da água é de $1\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$ e o da areia é $0,2\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$. Durante 1 hora, a água e a areia receberam a mesma quantidade de energia da lâmpada, 3,6 kJ, e verificou-se que a água variou sua temperatura em $8\text{ }^\circ\text{C}$ e a areia em $30\text{ }^\circ\text{C}$. Podemos afirmar que a água e a areia, durante essa hora, perderam, respectivamente, a quantidade de energia para o meio, em kJ, igual a:

- a) 0,4 e 3,0.
- b) 2,4 e 3,6.
- c) 0,4 e 1,2.
- d) 1,2 e 0,4.
- e) 3,6 e 2,4.

23. Para determinar o calor específico de um líquido, usou-se um béquer **A** contendo 250 g desse líquido, a chama de um bico de Bunsen de potência constante e outro béquer **B** contendo 210 g de água pura. Usando o bico de Bunsen alternadamente, o líquido do béquer **A** teve sua temperatura elevada em $10\text{ }^\circ\text{C}$, em 20 s, enquanto a água do béquer **B** teve variação de $8,0\text{ }^\circ\text{C}$ em 24 s. Qual é o calor específico do líquido? Despreze a capacidade térmica do béquer e as perdas de calor para o ambiente. Considere, para o calor específico da água, o valor $1,0\text{ cal}/\text{g }^\circ\text{C}$.

4. Sistema físico termicamente isolado

A busca do equilíbrio térmico é uma lei natural.

Os corpos tendem a ter a mesma temperatura do ambiente em que se encontram. Assim, o mais “quente” cede calor e o mais “frio” recebe calor.

Em alguns casos, porém, as trocas de calor entre o sistema e o meio externo podem ser evitadas. Isso ocorre sempre que o sistema físico é **termicamente isolado**.

Um sistema físico é **termicamente isolado** quando não existe troca de calor entre seus componentes e o meio externo.



// Garrafa térmica e caixa de isopor são utilizadas para reduzir as trocas de calor entre seu conteúdo e o meio em que se encontram.

É importante observar que, na prática, por melhor que seja o isolamento térmico de um sistema, ele sempre troca calor com o meio externo.

Se você colocar, em uma caixa de isopor, algumas latas de refrigerante sem gelo com outras geladas, perceberá que o isopor irá reduzir a participação do meio externo nas trocas de calor. No entanto, após algum tempo, todas as latas estarão à mesma temperatura, pois terão atingido o **equilíbrio térmico**.

Para que isso ocorra, é necessário que os corpos troquem calor entre si, de modo que os de maior temperatura forneçam calor aos de menor temperatura.

Em um sistema termicamente isolado, as trocas de calor ocorrem apenas entre os seus integrantes. Assim, toda a energia térmica que sai de alguns corpos é recebida por outros pertencentes ao próprio sistema, valendo a relação:

$$|\Sigma Q_{\text{cedido}}| = |\Sigma Q_{\text{recebido}}|$$

O somatório das quantidades de calor cedidas por alguns corpos de um sistema tem módulo igual ao do somatório das quantidades de calor recebidas pelos outros corpos desse mesmo sistema.

O uso do módulo na fórmula deve-se ao fato de o calor recebido ser positivo e de o calor cedido ser negativo, podendo-se também escrever essa relação da seguinte forma:

$$\Sigma Q_{\text{cedido}} + \Sigma Q_{\text{recebido}} = 0$$

5. Equivalente em água

No cálculo de quantidades de calor trocadas entre corpos pertencentes a um mesmo sistema, costuma-se usar um artifício que pode facilitar a determinação do resultado final. Teoricamente, pode-se substituir um determinado corpo pela massa de água equivalente a ele nas trocas de calor. Para tanto, essa massa de água deve ter a mesma capacidade térmica do referido corpo:

$$C_{\text{corpo}} = C_{\text{água}} \quad (mc)_{\text{corpo}} = (mc)_{\text{água}}$$

Simbolizando por E a massa da água expressa em gramas e lembrando que o calor específico da água vale $1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$, temos:

$$(mc)_{\text{corpo}} = E \cdot 1$$

Assim, podemos dizer que:

O **equivalente em água** de um corpo é a massa E de água que possui capacidade térmica igual à do corpo considerado, podendo substituí-lo no equacionamento das quantidades de calor trocadas.

Consideremos, por exemplo, um corpo de massa igual a 100 g , constituído de um material de calor específico igual a $0,4 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$. Calculemos a capacidade térmica desse corpo:

$$C_{\text{corpo}} = (mc)_{\text{corpo}} = 100 \cdot 0,4$$
$$C_{\text{corpo}} = 40 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Consideremos também uma porção de água de massa igual a 40 g e calculemos sua capacidade térmica:

$$C_{\text{água}} = (mc)_{\text{água}} = 40 \cdot 1 \therefore C_{\text{água}} = 40 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Disso, concluímos que a capacidade térmica do corpo é igual à da porção de água, o que significa que nas trocas de calor esse corpo comporta-se de modo equivalente a 40 gramas de água. Por isso, dizemos que o equivalente em água do corpo é igual a 40 gramas :

$$E_{\text{corpo}} = 40 \text{ g}$$

Podemos observar que a capacidade térmica do corpo, expressa em $\text{cal/}^\circ\text{C}$, e seu equivalente em água, expresso em gramas, têm o mesmo valor numérico.

6. Calorímetro

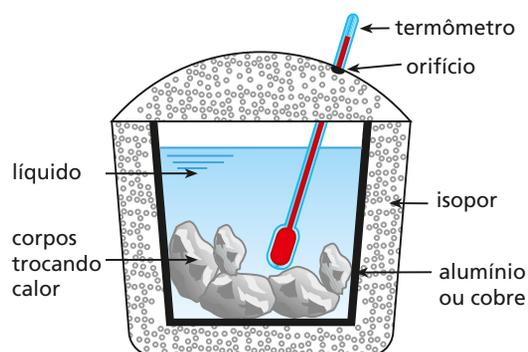
A mistura térmica de dois ou mais corpos, principalmente quando um deles está no estado líquido, requer um recipiente adequado. Alguns desses recipientes possuem aparatos que permitem obter, de forma direta ou indireta, o valor das quantidades de calor trocadas entre os corpos.

A esse tipo de recipiente chamamos de **calorímetro**.

De modo geral, o calorímetro é metálico (de alumínio ou cobre) e isolado termicamente por um revestimento de isopor. Em sua tampa, também de isopor, há um orifício pelo qual se introduz o termômetro, que indica a temperatura da mistura em observação.

O calorímetro representado na figura é o mais usado nos laboratórios escolares. Em experimentos que requerem tratamento especial, são usados calorímetros mais sofisticados.

Não podemos esquecer que o calorímetro, além de servir como recipiente, também participa das trocas de calor, cedendo calor para seu conteúdo ou recebendo calor dele. Geralmente, não são dados o calor específico do material de que é feito nem sua massa, mas é fornecido seu equivalente em água.



Representação de um calorímetro usual.

Do exposto, podemos chegar à relação:

$$C_{\text{calorímetro}} = E c_{\text{água}}$$

Andrei Nekrasov/Shutterstock



// Fotografia de um calorímetro utilizado em laboratórios de Física.

Um calorímetro é denominado **ideal** quando, além de impedir as trocas de calor entre seu conteúdo e o meio externo, não troca calor com os corpos nele contidos. Esse tipo de calorímetro existe somente na teoria, mas aparece com frequência em exercícios. Nesses casos, os enunciados referem-se a ele dizendo que tem **capacidade térmica desprezível** ou **equivalente em água desprezível**.

Exercícios Nível 1

24. (Unesp-SP) Quando uma enfermeira coloca um termômetro clínico de mercúrio sob a língua de um paciente, por exemplo, ela sempre aguarda algum tempo antes de fazer a sua leitura. Esse intervalo de tempo é necessário:

- para que o termômetro entre em equilíbrio térmico com o corpo do paciente.
- para que o mercúrio, que é muito pesado, possa subir pelo tubo capilar.
- para que o mercúrio passe pelo estrangulamento do tubo capilar.
- devido à diferença entre os valores do calor específico do mercúrio e do corpo humano.
- porque o coeficiente de dilatação do vidro é diferente do coeficiente de dilatação do mercúrio.

25. Em um recipiente termicamente isolado e com **ER** capacidade térmica desprezível, misturam-se 200 g de água a 10 °C com um bloco de ferro de 500 g a 140 °C. Qual a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C;
calor específico do ferro = 0,12 cal/g °C.

Resolução:

Como o recipiente tem capacidade térmica desprezível, ele não participa das trocas de calor. E, como é termicamente isolado, é correto afirmar que:

$$Q_{\text{ferro}} + Q_{\text{água}} = 0$$

Uma vez que o calor trocado é sensível, temos:

$$(mc\Delta\theta)_{\text{ferro}} + (mc\Delta\theta)_{\text{água}} = 0$$

$$500 \cdot 0,12(\theta_E - 140) + 200 \cdot 1,0(\theta_E - 10) = 0$$

$$60(\theta_E - 140) + 200(\theta_E - 10) = 0$$

$$60\theta_E - 8400 + 200\theta_E - 2000 = 0$$

$$260\theta_E = 10400 \therefore \theta_E = 40 \text{ °C}$$

26. Em um recipiente termicamente isolado e de capacidade térmica desprezível, são misturados 200 g de água a 55 °C com 500 g também de água a 20 °C. Quando a mistura atingir o equilíbrio térmico, qual será sua temperatura?

27. Em uma garrafa térmica ideal, com 1,0 L de capacidade, são colocados 500 cm³ de leite, à temperatura ambiente (20 °C), e 200 cm³ de café a 90 °C. Admitindo-se que as trocas de calor somente aconteçam entre o café e o leite (cujas densidades e calores específicos podem ser considerados iguais), qual será a temperatura final de equilíbrio térmico do sistema?

28. Um calorímetro ideal contém determinada massa de um líquido **A** na temperatura de 10 °C. Acrescenta-se nesse mesmo recipiente um líquido **B**, inicialmente a 90 °C, de massa duas vezes maior que a do líquido **A**. Sabendo-se que o equilíbrio térmico entre os dois líquidos se estabeleceu a 30 °C e supondo-se o sistema isolado termicamente, qual a relação $\frac{c_A}{c_B}$, entre os calores específicos desses líquidos?

29. Um aluno entrou em uma lanchonete e pediu dois refrigerantes, um “sem gelo”, à temperatura de 25 °C, e o outro “gelado”, à temperatura de 5,0 °C. Ele preencheu $\frac{1}{4}$ da capacidade de um copo grande com o refrigerante “sem gelo” e terminou de completar o copo com o refrigerante “gelado”. Desprezando as trocas de calor que não sejam entre os líquidos, determine a temperatura final de equilíbrio térmico do refrigerante.

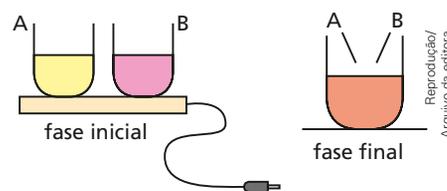


30. (UFTM-MG) Dona Joana é cozinheira e precisa de água a 80 °C para sua receita. Como não tem um termômetro, decide misturar água fria, que obtém de seu filtro, a 25 °C, com água fervente. Só não sabe em que proporção deve fazer a mistura. Re-

solve, então, pedir ajuda a seu filho, um excelente aluno de Física. Após alguns cálculos, em que levou em conta o fato de morarem no litoral, e em que desprezou todas as possíveis perdas de calor, ele orienta sua mãe a misturar um copo de 200 mL de água do filtro com uma quantidade de água fervente, em mL, igual a V . Determine V .

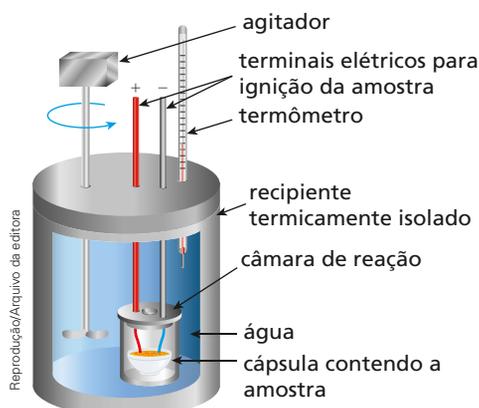
31. (Fuvest-SP) Dois recipientes iguais **A** e **B**, contendo dois líquidos diferentes, inicialmente a 20 °C, são colocados sobre uma placa térmica, da qual recebem aproximadamente a mesma quantidade de calor. Com isso, o líquido em **A** atinge 40 °C, enquanto o líquido em **B**, 80 °C. Se os recipientes forem retirados da placa e seus líquidos misturados, a temperatura final da mistura ficará em torno de:

- 45 °C.
- 50 °C.
- 55 °C.
- 60 °C.
- 65 °C.



Exercícios Nível 2

32. (Unesp-SP) O esquema representa um calorímetro utilizado para a determinação do valor energético dos alimentos.



(<https://quimica2bac.wordpress.com>. Adaptado.)

A tabela nutricional de determinado tipo de azeite de oliva traz a seguinte informação: “Uma porção de 13 mL (1 colher de sopa) equivale a 108 kcal.” Considere que o calor específico da água seja $1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ e que todo o calor liberado na combustão do azeite seja transferido para a água. Ao serem queimados 2,6 mL desse azeite, em um

calorímetro contendo 500 g de água inicialmente a 20,0 °C e à pressão constante, a temperatura da água lida no termômetro deverá atingir a marca de

- 21,6 °C
- 33,2 °C
- 45,2 °C
- 63,2 °C
- 52,0 °C

33. (Unifesp-SP) Um calorímetro de capacidade térmica $10 \text{ cal}/^\circ\text{C}$, contendo 500 g de água a 20 °C, é utilizado para determinação do calor específico de uma barra de liga metálica de 200 g, a ser utilizada como fundo de panelas para cozimento. A barra é inicialmente aquecida a 80 °C e imediatamente colocada dentro do calorímetro, isolado termicamente. Considerando o calor específico da água $1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ e que a temperatura de equilíbrio térmico atingida no calorímetro foi 30 °C, determine:

- a quantidade de calor absorvido pelo calorímetro e a quantidade de calor absorvido pela água;
- a temperatura final e o calor específico da barra.

38. Dois corpos **A** e **B**, de capacidades térmicas iguais, são colocados no interior de um calorímetro ideal. A temperatura inicial do corpo **A** é θ_A e a do corpo **B** é θ_B . Não considerando possíveis perdas de calor, a temperatura final de equilíbrio térmico será dada por:

- a) $\frac{\theta_A + \theta_B}{2}$. c) $\frac{\theta_B - \theta_A}{2}$. e) $|\theta_B - \theta_A|$.
 b) $\frac{\theta_A - \theta_B}{2}$. d) $|\theta_A + \theta_B|$.

39. Três amostras de um mesmo líquido, cujas temperaturas iniciais são 40 °C, 70 °C e 100 °C, são misturadas em um calorímetro. As massas das amostras são iguais. Supondo-se que as trocas de calor ocorrem somente entre as amostras do líquido, qual a temperatura de equilíbrio da mistura, em graus Celsius?

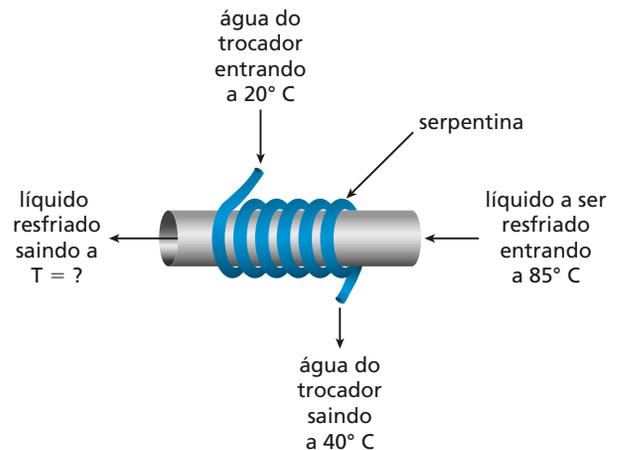
40. (UFTM-MG) Para fazer café, meio litro de água fervente, aquecido em uma chaleira, foi despejado sobre o pó, a 100 °C. O café coado goteja a 90 °C para o interior de uma cafeteira. Após todo o conteúdo do coador ter se esgotado, o café contido na cafeteira, agora a 80 °C, é vertido em uma garrafa térmica onde, após o equilíbrio térmico, permanece sob temperatura de 75 °C.



Considerando desprezível a perda da massa de água por evaporação durante o processo e que no final temos meio litro de café na cafeteira e admitindo que o calor específico sensível da água é igual ao calor específico sensível do café, sendo seu valor igual a 1 cal/(g · °C),

- a) determine a quantidade de calor cedida pelo líquido para os corpos envolvidos na elaboração do café, desde o momento em que a água a 100 °C é vertida sobre o pó, até o momento em que é obtido café já em equilíbrio térmico com a garrafa térmica;
 b) considerando que não houve troca de calor do sistema com o ar, estime a capacidade térmica da cafeteira que recebeu o café passado pelo coador.
Dado: densidade da água = 1 g/mL.

41. (Fuvest-SP) Um trocador de calor consiste em uma serpentina, pela qual circulam 18 litros de água por minuto. A água entra na serpentina à temperatura ambiente (20 °C) e sai mais quente. Com isso, resfria-se o líquido que passa por uma tubulação principal, na qual a serpentina está enrolada. Em uma fábrica, o líquido a ser resfriado na tubulação principal é também água, a 85 °C, mantida a uma vazão de 12 litros por minuto.



Quando a temperatura de saída da água da serpentina for 40 °C, será possível estimar que a água da tubulação principal esteja saindo a uma temperatura T de, aproximadamente,

- a) 75 °C c) 55 °C e) 35 °C
 b) 65 °C d) 45 °C

42. Para avaliar a temperatura de 300 g de água, usou-se um termômetro de 100 g de massa e calor específico sensível igual a 0,15 cal/g °C. Inicialmente, esse termômetro indicava, à temperatura ambiente, 12 °C. Após algum tempo, colocado em contato térmico com a água, o termômetro passa a indicar 72 °C. Supondo não ter havido perdas de calor, determine a temperatura inicial da água.

Dado: calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

43. Um calorímetro de equivalente em água 10 g, **ER** à temperatura ambiente (20 °C), foi utilizado para misturar 200 g de um líquido de calor específico 0,79 cal/g °C, a 35 °C, com um bloco de metal de massa 300 g, a 150 °C. Sabendo que a temperatura final atingida foi de 40 °C, determine o calor específico do metal.

Resolução:

Supondo o sistema termicamente isolado, podemos escrever que:

$$Q_{\text{metal}} + Q_{\text{líquido}} + Q_{\text{calorímetro}} = 0$$

$$(mc\Delta\theta)_{\text{metal}} + (mc\Delta\theta)_{\text{líquido}} + (mc\Delta\theta)_{\text{calorímetro}} = 0$$

$$300c_m(40 - 150) + 200 \cdot 0,79(40 - 35) + [mc(40 - 20)]_{\text{calorímetro}} = 0$$

Como vimos:

$$(mc)_{\text{calorímetro}} = Ec_{\text{água}}$$

Sendo:

$$c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$E = 10 \text{ g (equivalente em água)}$$

Temos:

$$(mc)_{\text{calorímetro}} = 10 \text{ g} \cdot 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} = 10 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

Assim:

$$2300c_m \cdot 110 + 790 + 10 \cdot 20 = 0$$

$$c_m = \frac{790 + 200}{300 \cdot 110}$$

$$c_m = 0,03 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

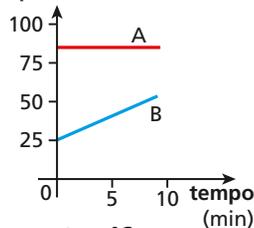
44. Qual é o equivalente em água de um bloco de alumínio de massa 500 g? Sabe-se que o calor específico do alumínio vale $0,22 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ e o da água vale $1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$.
45. Um corpo é colocado em contato com uma fonte térmica que lhe fornece $2,0 \text{ kcal}$ de calor. A temperatura do corpo era igual à do ambiente (20°C) e, ao receber a energia térmica, atingiu a temperatura de 120°C . Se o calor específico da água é igual a $1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$, qual é o equivalente em água do referido corpo?
46. Em um recipiente de capacidade térmica desprezível, encontramos um líquido a 20°C . Misturando 600 g de água a 80°C com esse líquido, obtemos uma temperatura de equilíbrio térmico igual a 60°C . Qual o equivalente em água desse líquido?
47. Um pedaço de cobre de 20 g a 60°C é colocado dentro de um calorímetro que contém 10 g de água a 10°C . Se a temperatura final do sistema (calorímetro + água + cobre) é 15°C , qual é o equivalente em água do calorímetro?
Dados: calor específico do cobre = $0,42 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$; calor específico da água = $4,2 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$.
48. (Vunesp) Um calorímetro (A) contendo água quente foi conectado, por meio de uma barra metálica, a outro calorímetro (B) contendo em seu interior água fria. Em cada um desses calorímetros, foi colocado um termômetro para que a temperatura fosse

medida de minuto em minuto durante 10 minutos. A ilustração a seguir representa o experimento.

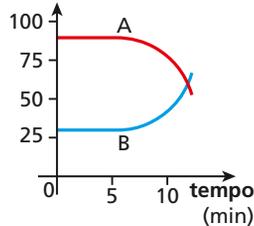


Considerando-se que o volume de água é igual nos dois calorímetros, a partir dos registros de temperatura, foi elaborado um gráfico que registra a temperatura dos dois calorímetros durante os 10 minutos. O gráfico que representa corretamente o resultado do experimento é:

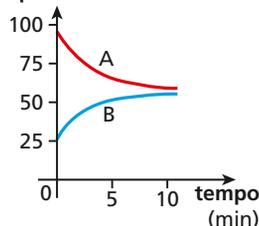
a) temperatura $^\circ\text{C}$



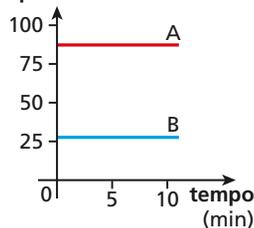
b) temperatura $^\circ\text{C}$



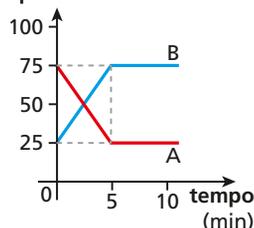
c) temperatura $^\circ\text{C}$



d) temperatura $^\circ\text{C}$



e) temperatura $^\circ\text{C}$



Ilustrações: Reprodução/
Arquivo da editora

7. As mudanças de estado físico

Dependendo do estado de agregação de suas partículas, uma substância pode ser encontrada em três estados físicos fundamentais: sólido, líquido e gasoso.

Banco de imagens/
Arquivo da editora



// Representação da água nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso.

No **estado sólido**, as partículas de uma substância não têm grande liberdade de movimentação e não vão além de vibrações em torno de posições definidas. Assim, os sólidos possuem volume e forma bem definidos.

// As geleiras e os *icebergs*, encontrados em regiões muito frias (próximas dos polos), são exemplos da água no estado sólido.



Christopher Wood/Shutterstock

No **estado líquido**, há maior liberdade de agitação das partículas de uma substância do que no estado sólido, mas elas ainda apresentam uma coesão considerável. Assim, os líquidos possuem volume bem definido, porém forma variável, ou seja, a forma é a do recipiente que os contém.

// A existência da água no estado líquido, em rios e mares, é um fator fundamental para a sobrevivência do ser humano na Terra.



Jakub Barzycki/Shutterstock

No **estado gasoso**, as partículas de uma substância estão afastadas umas das outras o suficiente para que as forças de coesão entre elas sejam muito fracas. Por isso, elas se movimentam com liberdade muito maior do que no estado líquido. Substâncias no estado gasoso (vapores e gases) não possuem volume nem forma definidos.

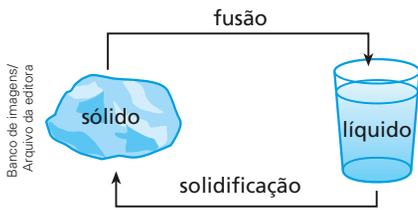
ruzanna/Shutterstock



// Em temperaturas elevadas, a água sofre uma evaporação muito rápida, subindo no estado gasoso. Quando a temperatura diminui, esse vapor se precipita em forma de chuva (água no estado líquido).

Quando uma substância, em qualquer um dos estados físicos, recebe ou cede energia térmica, pode sofrer uma alteração na forma de agregação de suas partículas, passando de um estado para outro. Essa passagem corresponde a uma mudança de seu estado físico.

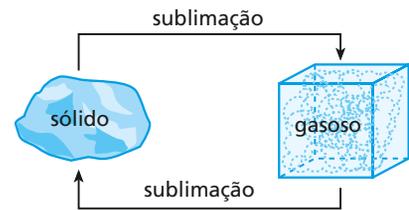
Vejam as possíveis mudanças de estado:



A **fusão** é a passagem do estado sólido para o líquido. A transformação inversa dessa passagem é a **solidificação**.



A **vaporização** é a passagem do estado líquido para o gasoso. A transformação inversa dessa passagem é a **liquefação** (ou **condensação**).



A **sublimação** é a passagem do estado sólido para o gasoso, sem passar pela fase intermediária, a líquida. A transformação inversa também é denominada **sublimação**.

Entre essas transformações, as que ocorrem por recebimento de calor são denominadas **transformações endotérmicas**. São elas: a fusão, a vaporização e a sublimação (sólido \rightarrow gasoso).

A solidificação, a liquefação e a sublimação (gasoso \rightarrow sólido) são **transformações exotérmicas**, já que ocorrem por perda de calor.

É importante observar que a quantidade de calor que cada unidade de massa de uma substância precisa receber para sofrer alteração em sua fase de agregação, mudando seu estado, é igual à que precisa ceder para sofrer a transformação inversa, à mesma temperatura.

JÁ PENSOU NISTO?

Plasma, o quarto estado da matéria?

Na Física, o plasma é considerado o quarto estado da matéria.

Para obtermos o plasma devemos aquecer um gás, provocando a dissociação das suas ligações moleculares, convertendo-o em seus átomos constituintes. Esse aquecimento pode levar à ionização de suas moléculas e de seus átomos, o que corresponde a ganhos ou perdas de elétrons por essas partículas. Assim, o plasma é constituído por elétrons e íons positivos. A presença desses portadores de cargas elétricas torna-o eletricamente condutor, passando a ser fortemente influenciável por campos eletromagnéticos. Como o gás, o plasma não possui forma ou volume definido, moldando-se à forma do recipiente. Sob a influência de um campo magnético ele pode formar filamentos ou descargas elétricas. No Universo, o plasma é o estado mais comum da matéria.

A primeira identificação do plasma foi em um tubo de Crookes, descrito por *Sir William Crookes* (1832-1919) em 1879, que o denominou "matéria radiante". Em 1928, *Irving Langmuir* (1881-1957) o chamou de "plasma", devido à capacidade de se moldar dentro de tubos onde são gerados.



8. Calor latente

Vimos que o calor sensível produz variação de temperatura, enquanto o calor latente causa mudança de estado físico em um corpo.

Assim, podemos afirmar que **calor sensível** é a denominação dada à energia térmica que altera a energia cinética de translação das partículas, estando essa energia cinética diretamente ligada à temperatura do sistema físico.

A denominação **calor latente** é dada à energia térmica que se transforma em energia potencial de agregação. Essa transformação altera o arranjo físico das partículas do sistema e provoca uma mudança de estado – por exemplo, de sólido para líquido (fusão) –, sem, no entanto, alterar a temperatura.

Observemos que **energia térmica** é a energia (cinética) que provoca a agitação das partículas de um corpo mais a energia (potencial) de agregação, que estabelece o estado físico desse corpo.

Para um determinado estado de agregação (líquido, por exemplo), existe um limite para o estado de agitação (temperatura) das partículas de um corpo.

Esse limite corresponde à temperatura de mudança de estado físico, que é função da substância de que é feito o corpo e da pressão exercida sobre ele. A água, por exemplo, sob pressão normal, sofre mudanças de estado físico a 0 °C e a 100 °C. Essas são suas temperaturas de fusão-solidificação e de vaporização-liquefação, respectivamente.

Experimentalmente podemos concluir que a quantidade de calor necessária para provocar uma mudança de estado é diretamente proporcional à massa da porção da substância que sofreu a transformação.

Assim, sendo m a massa de um corpo que necessita de uma quantidade Q de calor para sofrer uma total mudança de estado, vale a expressão:

$$\frac{Q}{m} = L \Rightarrow Q = mL$$

A grandeza L é denominada **calor latente**, sendo característica do material de que é feito o corpo, da mudança de estado pela qual ele passa e da temperatura a que ocorre essa mudança. Para a água, por exemplo, o calor latente de fusão-solidificação a 0 °C vale 80 cal/g, enquanto o de vaporização-liquefação a 100 °C vale 540 cal/g aproximadamente.

Assim, podemos dizer que:

- calor latente de fusão-solidificação de uma substância indica a quantidade de calor que cada unidade de massa precisa receber para que ocorra sua fusão ou ceder para que ocorra sua solidificação;
- calor latente de vaporização-liquefação de uma substância indica a quantidade de calor que cada unidade de massa precisa receber para que ocorra sua vaporização ou ceder para que ocorra sua liquefação.

A denominação sensível ou latente dada ao calor recebido ou cedido por um corpo depende do efeito produzido por ele. A figura representa uma barra de ferro que perde calor sensível (diminui de temperatura) para um bloco de gelo a 0 °C, que derrete. Assim, para o gelo, esse calor recebido é do tipo latente, já que produziu nele uma mudança de estado, e não uma variação de temperatura.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

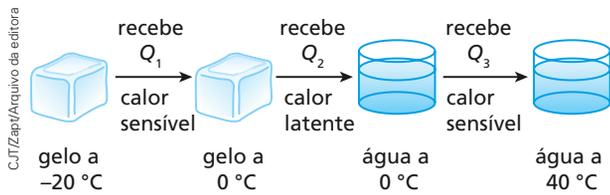
9. Fusão e solidificação

Consideremos um bloco de gelo de massa m , inicialmente a -20 °C, sob pressão normal. Quando fornecemos calor a esse gelo, suas partículas absorvem energia, com conseqüente aumento de temperatura.

Esse processo tem um limite, isto é, existe uma temperatura em que a estrutura molecular da substância não consegue se manter – é a temperatura de fusão. Ao ser atingida tal temperatura, a energia recebida deixa de provocar aumento na agitação das partículas e passa a mudar a estrutura física da substância, tornando-a líquida. Esse processo é denominado **fusão**, e a energia recebida passa a ser armazenada como energia potencial. Se, depois que mudar de estado, a substância continuar a receber calor, sua temperatura aumentará.

É importante destacar que a temperatura de fusão de uma substância pura é bem determinada, dependendo apenas da substância e da pressão a que está sujeita.

Para evitar complicações desnecessárias, admitiremos, em nosso estudo, que a pressão permanece constante durante todo o processo de mudança de estado físico.



Supondo que o bloco de gelo, citado anteriormente, seja aquecido de -20 °C até 40 °C , vamos analisar por partes esse aquecimento.

Para calcular o total de calor (Q) recebido pelo sistema, usamos as fórmulas do calor sensível e do calor latente, já vistas.

Assim, temos:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

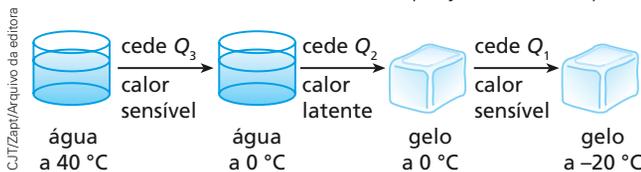
$$Q = (mc\Delta\theta)_{\text{gelo}} + (mL_F)_{\text{gelo}} + (mc)_{\text{água}}$$

Esse processo pode ser representado graficamente pela **curva de aquecimento** ao lado.

O trecho correspondente ao patamar indica a mudança de estado físico (fusão), pois a energia recebida não produziu variação de temperatura, e sim mudança do estado de agregação das partículas do corpo.

Como você já sabe, o processo inverso da fusão é a **solidificação**.

Para entender como se dá essa transformação, vamos retomar o exemplo anterior, considerando que a água (a 40 °C) volte a ser gelo (a -20 °C). Para que isso ocorra, é necessário que seja retirado calor dessa água. Com isso, a energia cinética de translação de suas partículas vai diminuindo, ou seja, sua temperatura vai reduzindo. No entanto, essa redução cessará quando a água atingir 0 °C . A partir daí, se continuarmos a retirar calor, as moléculas se recomporão na estrutura característica do estado sólido, diminuindo a energia potencial de agregação, sem prejuízo da temperatura.



Se, após a recomposição molecular (solidificação), continuarmos a retirar calor da água, a temperatura voltará a diminuir. Esse resfriamento é esquematizado ao lado.

A quantidade total de calor (Q) cedida (ou retirada) é dada por:

$$Q = Q_3 + Q_2 + Q_1$$

$$Q = (mc\Delta\theta)_{\text{água}} + (mL_S)_{\text{água}} + (mc\Delta\theta)_{\text{gelo}}$$

Os módulos de L_S e L_F são iguais, porém convencionaremos L_F positivo (calor recebido) e L_S negativo (calor cedido).

A **curva de resfriamento** é representada ao lado.

Tudo o que foi explicado sobre a fusão-solidificação do gelo vale para a maioria das substâncias.

A tabela ao lado contém os calores latentes de fusão (L_F) e as temperaturas de fusão (θ_F), em pressão atmosférica normal, de algumas substâncias.

Substância	L_F (cal/g)	θ_F (°C)
Água (H ₂ O)	80	0
Alumínio (Al)	94	660
Cobre (Cu)	41	1083
Ferro (Fe)	49	1535
Mercúrio (Hg)	2,8	239
Chumbo (Pb)	5,5	327
Zinco (Zn)	23	420

Fonte: <www.if.ufrgs.br/cref/amees/tabela.html>. Acesso em: 19 jun. 2018.

Banco de imagens/Arquivo da editora

Banco de imagens/Arquivo da editora

Banco de imagens/Arquivo da editora

49. A respeito de mudança de estado físico, indique a alternativa incorreta.

- Se um corpo sólido absorve calor e sua temperatura não varia, isso significa que ele está sofrendo mudança de estado físico.
- Durante uma fusão, sob pressão constante, todo calor absorvido é utilizado para alterar o arranjo molecular da substância.
- Quando um sólido recebe calor, ou o estado de agitação de suas partículas aumenta ou ocorre uma reestruturação no seu arranjo molecular, os fatores que determinam o que acontece são: a temperatura do sólido e a pressão a que ele está sujeito.
- A temperatura em que ocorre determinada fusão depende da substância e da pressão a que o corpo está sujeito.
- Um bloco de gelo nunca pode sofrer fusão a uma temperatura diferente de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

50. Quanto calor devemos fornecer a um bloco de gelo de 300 g de massa, a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob pressão normal, para fundi-lo totalmente?

Dado: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

51. Quanto de calor necessitam receber 100 g de gelo para serem aquecidos de $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$? A pressão atmosférica é constante e normal, e são dados:
 calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
 calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
 calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

Resolução:

Sabemos que o gelo sofre fusão a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; portanto, devemos considerar o aquecimento do bloco de gelo por etapas.

Q_1 = quantidade de calor que o gelo recebeu para atingir $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor sensível).

Q_2 = quantidade de calor que o gelo recebeu para se fundir (calor latente).

Q_3 = quantidade de calor que a água, proveniente da fusão do gelo, recebeu para atingir $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor sensível).

Assim: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$$Q = (mc\Delta\theta)_{\text{gelo}} + (mL_F)_{\text{gelo}} + (mc\Delta\theta)_{\text{água}}$$

Substituindo os valores numéricos fornecidos, temos:

$$Q = 100 \cdot 0,50 [0 - (230)] + 100 \cdot 80 + 100 \cdot 1,0 (10 - 0)$$

$$Q = 100 \cdot 0,50 \cdot 30 + 100 \cdot 80 + 100 \cdot 10$$

$$Q = 1500 + 8000 + 1000$$

$$Q = 10500\text{ cal}$$

52. Deseja-se transformar 100 g de gelo a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em água a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sabe-se que o calor específico do gelo vale $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ e o da água, $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ e que o calor latente de fusão do gelo vale 80 cal/g . Quanto calor, em quilocalorias, devemos fornecer a esse gelo?

53. Uma pedra de gelo de 20 g de massa, inicialmente a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, recebeu 2700 cal . Determine a temperatura atingida, sabendo que essa energia foi totalmente aproveitada pelo sistema.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
 calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
 calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

54. Você tem 100 g de água à temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quanto de calor deve-se retirar dessa água para obter-se um bloco de gelo de 100 g a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
 calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

55. (FMJ-SP) Um calorímetro ideal contém 50 g de água líquida, ambos em equilíbrio térmico a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uma amostra de massa m de gelo, inicialmente a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, é inserida no calorímetro, de modo a trocar calor apenas com a água líquida. Após certo tempo, registra-se uma temperatura de equilíbrio térmico de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, restando apenas água na fase líquida no interior do calorímetro. Sendo o calor específico da água líquida e do gelo iguais a $1,0\text{ cal/(g }^{\circ}\text{C)}$ e $0,5\text{ cal/(g }^{\circ}\text{C)}$, respectivamente, e o calor latente de fusão do gelo igual a 80 cal/g , a massa de gelo inserida no calorímetro foi

- $20,0\text{ g}$
- $10,0\text{ g}$
- $25,0\text{ g}$
- $5,0\text{ g}$
- $15,0\text{ g}$

56. Coloca-se uma massa m de gelo fundente (a $0\text{ }^\circ\text{C}$) em um copo de capacidade térmica desprezível contendo 300 mL de suco a $26,6\text{ }^\circ\text{C}$ e verifica-se no equilíbrio térmico uma temperatura de $2,0\text{ }^\circ\text{C}$.

Dados:

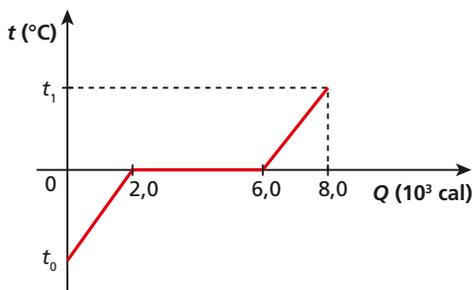
densidade do suco: $1,0\text{ g/cm}^3$;

calor específico sensível do suco: $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor específico latente de fusão do gelo: 80 cal/g .
Não levando em conta as trocas de calor com o ambiente, é correto afirmar que:

- a) $m = 100\text{ g}$ d) $m = 70\text{ g}$
b) $m = 90\text{ g}$ e) $m = 60\text{ g}$
c) $m = 80\text{ g}$

Exercícios Nível 2

57. (UFPI) O gráfico a seguir mostra a curva de aquecimento de certa massa de gelo.



Reprodução/Arquivo da editora

Determine a temperatura inicial do gelo (t_0) e a temperatura final da água (t_1).

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

58. Uma fonte de potência constante e igual a 400 cal/min fornece calor a um bloco de gelo com massa de 200 g , inicialmente à temperatura de $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Sabendo que o sistema é aquecido a $50\text{ }^\circ\text{C}$, calcule o tempo gasto para o aquecimento, desprezando quaisquer perdas de energia.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

59. O que ocorre no final, quando misturamos gelo e água?

Admitindo-se que a água e o gelo só troquem calor entre si e que a pressão atmosférica seja constante e igual a $1,0\text{ atm}$, a resposta a essa pergunta é:

“Dependendo das massas de gelo e de água existentes inicialmente na mistura, na situação final de equilíbrio térmico, cinco situações distintas poderão ocorrer:

- presença exclusiva de gelo abaixo de $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- presença exclusiva de gelo a $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- uma mistura de gelo e água a $0\text{ }^\circ\text{C}$;

- presença exclusiva de água a $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- presença exclusiva de água acima de $0\text{ }^\circ\text{C}$ ”.

Considere, então, que sejam misturados 400 g de gelo a $-10\text{ }^\circ\text{C}$ com 600 g de água a $20\text{ }^\circ\text{C}$ de modo a constituírem um sistema termicamente isolado sob pressão atmosférica normal, de $1,0\text{ atm}$.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor específico latente de solidificação da água: -80 cal/g .

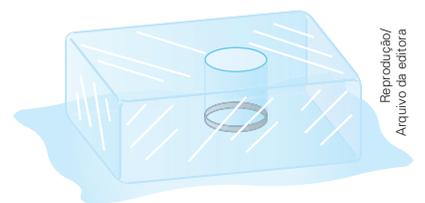
Com base nessas informações, responda:

- a) Qual a temperatura de equilíbrio térmico do sistema, θ , bem como a massa total de água, M_a , observada na situação final?
b) Qual a massa de gelo a $-10\text{ }^\circ\text{C}$, M_g , que deverá ser introduzida na mistura para se verificar no equilíbrio térmico presença exclusiva de gelo a $-2,0\text{ }^\circ\text{C}$?

60. (UPM-SP) Sabendo que uma caixa de fósforos possui em média 40 palitos e que cada um desses palitos, após sua queima total, libera cerca de 85 calorias, para podermos fundir totalmente um cubo de gelo de 40 gramas, inicialmente a $-10\text{ }^\circ\text{C}$, sob pressão normal, quantas caixas de fósforos devemos utilizar, no mínimo?

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

61. (PUC-SP) Um anel metálico de massa 150 g , inicialmente à temperatura de $160\text{ }^\circ\text{C}$, foi colocado em uma



Reprodução/Arquivo da editora

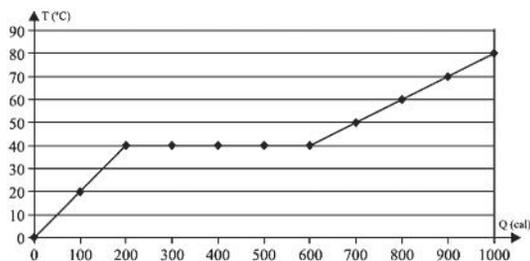
cavidade feita na parte superior de um grande bloco de gelo em fusão, como mostrado na figura.

Após o equilíbrio térmico ser atingido, verificou-se que 30 cm^3 de gelo se fundiram. Considerando o sistema (gelo-anel) termicamente isolado, o calor específico do metal que constitui o anel, em $\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, é:

- a) 0,050. c) 0,096. e) 1,0.
b) 0,092. d) 0,10.

Dados: calor latente de fusão do gelo: 80 cal/g ;
densidade do gelo: $0,92 \text{ g/cm}^3$.

62. (Unifesp) Em uma experiência de Termologia, analisou-se a variação da temperatura, medida em graus Celsius, de 100 g de uma substância, em função da quantidade de calor fornecido, medida em calorias. Durante o experimento, observou-se que, em uma determinada etapa do processo, a substância analisada apresentou mudança de fase sólida para líquida. Para visualizar o experimento, os dados obtidos foram apresentados em um gráfico da temperatura da substância como função da quantidade de calor fornecido.



Reprodução/Unifesp, 2010

Determine:

- a) O calor específico da substância na fase líquida e seu calor latente específico de fusão.
b) Após a substância atingir a temperatura de 80°C , cessou-se o fornecimento de calor e adicionou-se a ela 50 g de gelo a 0°C . Supondo que a troca de calor ocorra apenas entre o gelo e a substância, determine a massa de água, fase líquida, em equilíbrio térmico.

Dados: calor latente de fusão do gelo: $L = 80 \text{ cal/g}$;
calor específico da água: $c = 1,0 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$.

63. (Unesp) Um processo térmico disponibiliza para o interior de um calorímetro 20 kcal de energia. No calorímetro, encontra-se um bloco de gelo de massa 400 g , inicialmente à temperatura de -10°C .

Dados: $L_{\text{fusão do gelo}} = 80 \text{ cal/}^\circ\text{C}$;

$c_{\text{gelo}} = 0,5 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$;

$c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$;

$c_{\text{água}} = 1 \text{ g/mL}$.

Quando atingir o equilíbrio térmico, supondo-se a capacidade térmica do calorímetro desprezível, pode-se esperar que em seu interior se encontre:

- a) gelo, à temperatura abaixo de 0°C .
b) apenas gelo, à temperatura de 0°C .
c) gelo e água, à temperatura de 0°C .
d) apenas água, à temperatura de 0°C .
e) água, à temperatura acima de 0°C .

64. Em um calorímetro ideal, misturam-se 200 g de gelo a -40°C com 100 g de água a uma temperatura θ .

Dados: calor específico do gelo = $0,50 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$.

Determine:

- a) a temperatura θ , para que no equilíbrio térmico coexistam massas iguais de gelo e de água;
b) a temperatura da água quando o gelo atinge 0°C , considerando as condições do item a.

Resolução:

- a) Se a mistura de gelo e água é feita em um calorímetro ideal, podemos escrever que:

$$Q_{\text{cedido (água)}} + Q_{\text{recebido (gelo)}} = 0$$

Como, no final, deve-se ter coexistência de gelo e de água, o equilíbrio térmico deve ocorrer à temperatura de 0°C .

Portanto, desenvolvendo a equação, temos:

$$(mc\Delta\theta)_{\text{água}} + (mc\Delta\theta)_{\text{gelo}} + (mL_F)_{\text{gelo fundido}} = 0$$

Observe que para termos massas iguais de água e de gelo, no final, é necessário que 50 g de gelo sofram fusão, ficando 150 g de água e 150 g de gelo:

$$100 \cdot 1(0 - \theta) + 200 \cdot 0,50 [0 - (-40)] + 50 \cdot 80 = 0$$

$$-100\theta + 4000 + 4000 = 0$$

$$100\theta = 8000 \therefore \theta = 80^\circ\text{C}$$

- b) Observemos, pela resolução do item a, que o gelo precisou receber 4000 cal para atingir 0°C e mais 4000 cal para sofrer fusão em 50 g .

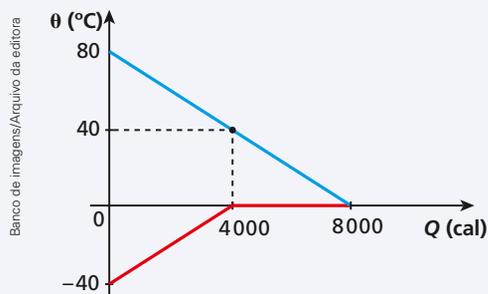
Portanto, a água perdeu apenas 4000 cal até que o gelo atingisse 0°C .

$$Q = m\Delta\theta$$

$$4000 = 100 \cdot 1(80 - \theta_a) \therefore \theta_a = 40^\circ\text{C}$$

Nota:

- Gráficamente, a resposta desse exercício pode ser dada por:



65. Em um recipiente em que não ocorre troca de calor com o meio externo, há 60 g de gelo fundente (0 °C). Colocando-se 100 g de água no interior desse recipiente, metade do gelo se funde. Qual é a temperatura inicial da água?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g.

66. Em um calorímetro ideal, misturam-se 200 g de gelo a 0 °C com 200 g de água a 40 °C.

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g.

Determine:

- a) a temperatura final de equilíbrio térmico da mistura;
- b) a massa de gelo que se funde.

67. (UPM-SP)

Calor específico da água líquida = 1 cal/(g °C)
Densidade da água líquida = 1,0 g/cm ³
Calor específico da água sólida (gelo) = 0,50 cal/(g °C)
Calor latente de fusão da água = 80 cal/g
Capacidade térmica do recipiente = 50 cal/°C

Durante a realização de certo experimento, um pesquisador necessitou de água líquida a 0 °C. Para obtê-la, pegou um recipiente contendo 400 cm³ de água, que estava no interior de um refrigerador, à temperatura de 5 °C. Em seguida, dispoñdo de “pedrinhas” de gelo (água sólida) a -20 °C, com 5,0 g de massa cada uma, misturou algumas delas à água do recipiente e atingiu o seu objetivo. Desprezando-se as possíveis trocas de calor com o meio ambiente e considerando os

dados da tabela anterior, conclui-se que o número mínimo de “pedrinhas” de gelo misturadas à água do recipiente foi

- a) 4
- b) 5
- c) 15
- d) 36
- e) 45

68. No interior de um calorímetro ideal, são colocados 40 g de água a 40 °C e um bloco de gelo de massa 10 g, à temperatura de -20 °C. Qual a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor específico do gelo = 0,50 cal/g °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

Resolução:

Nas questões que envolvam uma mistura de água com gelo, podemos utilizar um roteiro para facilitar a resolução. Para isso, vamos estabelecer a temperatura de 0 °C como referência, isto é, vamos levar o sistema (água + gelo) para 0 °C e, em seguida, saímos dessa temperatura para o resultado final. É importante lembrar que calor cedido (que sai do sistema) é negativo, e calor recebido (que entra no sistema) é positivo.

Atenção para o roteiro:

1) Resfriar a água até 0 °C

$$Q_1 = mc\Delta\theta = 40 \cdot 1,0 \cdot (0 - 40) \text{ cal}$$

$$Q_1 = -1600 \text{ cal}$$

O valor de Q_1 indica o calor que a água fornece para chegar a 0 °C.

2) Aquecer o gelo até 0 °C

$$Q_2 = mc\Delta\theta = 10 \cdot 0,50 \cdot [0 - (-20)] \text{ cal}$$

$$Q_2 = +100 \text{ cal}$$

O valor de Q_2 indica o calor que o gelo recebe para chegar a 0 °C.

Observe que a soma $Q_1 + Q_2$ é igual a -1500 cal. Isso quer dizer que a água e o gelo estão à temperatura de 0 °C e ainda estão sobrando 1500 cal.

Lembre-se de que o sistema está em um calorímetro ideal e, assim, não pode ceder calor para o exterior nem receber calor dele.

3) Derreter o gelo (ou solidificar a água)

$$Q_3 = mL_F = 10 \cdot 80 \text{ cal}$$

$$Q_3 = +800 \text{ cal}$$

A soma $Q_1 + Q_2 + Q_3$ é igual a -700 cal (observe que o sinal negativo indica calor cedido, retirado do sistema). Então, ainda sobram 700 cal para retornar.

4) Aquecer toda a água usando a energia que sobrou

Se tivesse faltado calor, isto é, se a soma de $Q_1 + Q_2 + Q_3$ fosse um valor positivo, em vez de aquecer a água deveríamos esfriar todo o gelo. Nesse caso, no item 3, a água teria sido solidificada, liberando calor.

$$Q_4 = mc\Delta\theta$$

Atenção: o valor de Q_4 é a soma $Q_1 + Q_2 + Q_3$ com o sinal trocado, pois o calor foi cedido (negativo) e agora está "voltando", sendo calor recebido (positivo).

$$+700 = (40 + 10) \cdot 1,0 \cdot (\theta_f - 0)$$

$$\theta_f = 14 \text{ }^\circ\text{C}$$

69. Em um calorímetro ideal são colocados 200 g de gelo fundente ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) com 200 g de água, também a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Após algum tempo, podemos afirmar que:

- a) no equilíbrio térmico, vamos ter apenas água a $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- b) o gelo, sempre que entra em contato com a água, sofre fusão;
- c) no final vamos ter apenas gelo a $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- d) as massas de água e gelo não se alteram, pois ambos estando a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ não haverá troca de calor entre eles.
- e) quando o calor sai da água, provoca sua solidificação; esse calor, no gelo, provoca fusão.

70. No interior de um vaso de Dewar de capacidade térmica desprezível, são colocados 500 g de água a $78,4 \text{ }^\circ\text{C}$ com 100 g de gelo fundente ($0 \text{ }^\circ\text{C}$). No equilíbrio térmico, qual será a temperatura do sistema?

Dados: calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

71. Em um calorímetro ideal, são colocados 100 g de água a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e 200 g de gelo fundente. Se as trocas de calor ocorrem apenas entre o gelo e a água, no final ainda vamos ter gelo? Em caso afirmativo, que massa de gelo restará?

Dados: calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

72. (Vunesp) Desejando uma segunda opinião, o médico legista, após remover o cérebro de um crânio, mediu sua massa, que era de $1,6 \text{ kg}$, envolveu-o em um saco plástico e em seguida colocou-o em uma caixa térmica contendo 2 kg de gelo à temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. A caixa térmica foi então enviada para o segundo médico legista, longe dali. Ao recebê-la, o segundo médico constatou a presença de 100 g de água no interior da caixa, obtidas do derretimento de parte do gelo em função do calor cedido pelo cérebro até que se estabelecesse o equilíbrio térmico. Considerando que a caixa térmica era ideal e que o ar e o plástico não participaram das trocas de calor, a temperatura do cérebro, no momento em que foi colocado dentro da caixa, em graus Celsius, era de:

- a) $8,0$
- b) $5,0$
- c) $10,0$
- d) $12,0$
- e) $3,0$

Dados: calor específico do cérebro = $1 \text{ cal/(g }^\circ\text{C)}$; calor latente de fusão de gelo = 80 cal/g ; pressão atmosférica = $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

73. Em um recipiente adiabático, de capacidade térmica desprezível, são colocados 400 g de água a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e 200 g de gelo a $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Se após algum tempo, estabelecido o equilíbrio térmico, introduzirmos nesse recipiente um termômetro ideal, que temperatura ele irá registrar?

Dados: calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

74. Quando são misturados 40 g de água a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e 360 g de gelo a $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, qual é a temperatura final de equilíbrio térmico? Suponha que o gelo e a água não troquem calor com o recipiente nem com o meio externo.

Dados: calor específico do gelo = $0,50 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ; calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

10. Liquefação e vaporização

Em nosso dia a dia, é comum observarmos fenômenos que envolvam liquefação ou vaporização, principalmente da água.

Lembremo-nos de que:

Liquefação ou **condensação** é a passagem de uma substância do estado gasoso para o estado líquido. Esse processo é **exotérmico**, isto é, ocorre com liberação de calor.

Como exemplos desse tipo de fenômeno, podemos citar os azulejos molhados de um banheiro depois que tomamos um banho quente; uma garrafa de refrigerante, que fica molhada em sua superfície externa após ter sido retirada da geladeira; a “fumaça” que se forma perto de nossa boca quando falamos em um dia muito frio; os vidros embaçados de um automóvel quando estão fechados em um dia de chuva.

JÁ PENSOU NISTO?

Por que os copos e jarras “transpiram”?

Quando você coloca um líquido bem gelado em um copo ou jarra de vidro, na face externa do recipiente aparecem gotas de água que escorrem. O recipiente que estava seco apresenta agora uma “transpiração”. Como isso ocorre?

O ar que respiramos apresenta vapor de água em sua composição, cujo percentual é indicado pela umidade relativa do ar.

Se você pegar uma jarra de vidro seco e colocar água bem gelada em seu interior, a parede externa da jarra será resfriada. O ar em contato com essa superfície fria perderá calor e o vapor de água nele existente vai se condensar.

Portanto, a água que escorre pela parte externa do recipiente é o vapor que estava no ar e foi condensado.



Elena Shashkina/Shutterstock

Lembremo-nos ainda de que:

Vaporização é a passagem de uma substância do estado líquido para o estado gasoso. Esse processo é **endotérmico**, isto é, ocorre com recebimento de calor.

Como exemplos desse fenômeno, podemos lembrar da água fervendo em uma chaleira, quando vamos preparar um café; do álcool, que, se for colocado em uma superfície, lentamente vai “desaparecendo”; do éter em um recipiente de vidro destampado, que se volatiliza rapidamente.

Os dois principais processos de vaporização são a **ebulição** e a **evaporação**.

Ebulição

Quando fornecemos calor a uma substância que se encontra no estado líquido, aumentamos a energia de agitação de suas partículas, isto é, elevamos sua temperatura. Entretanto, dependendo da substância e da pressão a que está sujeita, existe um limite de aumento de temperatura, além do qual a estrutura molecular do líquido sofre mudanças. A partir dessa temperatura-limite, a energia recebida

pelo líquido é usada para a mudança na estrutura molecular, e o líquido é transformado em vapor. A esse fenômeno chamamos de **ebulição**.

A maior parte da massa líquida participa desse processo, ocorrendo rápida produção de vapores em muitos pontos desse líquido. Esses vapores e gases existentes no interior do líquido se expandem e, ao escaparem pela superfície, proporcionam a agitação violenta que é observada.

É importante destacar que existe uma temperatura determinada para a ebulição de um líquido. Essa temperatura depende apenas da natureza do líquido e da pressão a que ele está sujeito.

Pode-se afirmar que a ebulição de um líquido ocorre quando sua pressão de vapor iguala-se à pressão externa, aplicada em sua superfície. A partir dessa situação os vapores conseguem escapar do seu interior, fato que caracteriza a ebulição. Lembrar que a pressão de vapor de um líquido é função da sua temperatura, assim, em temperaturas diferentes temos diferentes valores para a sua pressão de vapor. A combinação da temperatura do líquido (que determina sua pressão de vapor) e a pressão externa em sua superfície provoca a ebulição, que ocorre quando ambas se igualam. Dessa forma, um mesmo líquido pode entrar em ebulição em diferentes temperaturas, desde que a pressão externa seja alterada.

É de verificação experimental que a pressão atmosférica varia de local para local, diminuindo quando a altitude aumenta. Por isso, a temperatura de ebulição de uma substância, que depende da pressão, também varia de local para local, aumentando conforme aumenta a pressão. Esse fato ocorre porque, sob pressões maiores, o escape dos vapores torna-se mais difícil.

A água, por exemplo, entra em ebulição em Santos (SP), ao nível do mar, a 100 °C, mas, no pico do Monte Everest (altitude = 8 882 m), ela ferve a 71 °C; em Brasília (DF) (altitude = 1 152 m), a 96 °C; e, ao nível do Mar Morto (altitude = -395 m), a 101 °C.

Da observação desse fato, o ser humano inventou a panela de pressão, que, por causa do aumento de pressão, faz a água ferver a uma temperatura mais elevada do que se estivesse em um recipiente destampado, permitindo assim o cozimento mais rápido dos alimentos.



Gordon Tenney/Arquivo da editora

Como o astronauta está praticamente no vácuo, a pressão existente é insuficiente para conter as partículas do líquido, que entra em um estado de ebulição violenta.

JÁ PENSOU NISTO?

Por que a panela de pressão cozinha mais rápido os alimentos?

A panela de pressão cozinha muito mais rápido os alimentos porque a água, confinada no interior da panela, fica sujeita a uma pressão maior do que a pressão atmosférica, entrando em ebulição a temperaturas superiores a 100 °C. Estando a uma temperatura maior, o alimento cozinha mais depressa.

O inventor dessa panela foi o físico francês Denis Papin (1647-1712), que, em 1679, ao ser empossado como membro da Sociedade Real de Ciências da Inglaterra, preparou um jantar com uma panela diferente, fechada, para impressionar seus futuros colegas. Papin sabia do perigo de aquecer água em um recipiente fechado, pois a força exercida pelo vapor aquecido poderia “explodir” o recipiente. Por isso, ele criou uma válvula que permitia o escape de parte desse vapor, evitando que a pressão passasse de certo valor-limite. Evidentemente, esse sistema era rústico, mas serviu de modelo para as panelas que utilizamos atualmente.

Nas modernas panelas de pressão, a válvula permite a saída de vapor de água quando a pressão interna de vapor atinge valores próximos de 2,0 atm. Essa pressão interna é mantida quase constante, e a água entra em ebulição por volta de 120 °C. Isso traz economia no tempo de cozimento dos alimentos.



Lucas Lacerz/RuizFotoarena

A fusão dos sólidos de estrutura cristalina e a ebulição dos líquidos em geral obedecem a três leis básicas:

1ª Lei

Para uma determinada pressão, cada substância pura possui uma temperatura de fusão e outra de ebulição.

Sob pressão normal, por exemplo, a água sofre fusão a 0 °C e entra em ebulição a 100 °C, enquanto o álcool se solidifica a -117,3 °C e entra em ebulição a 78,5 °C.

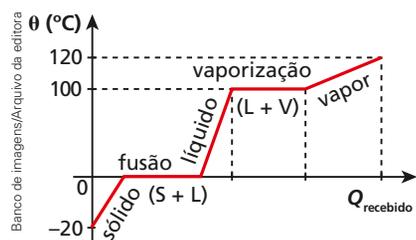
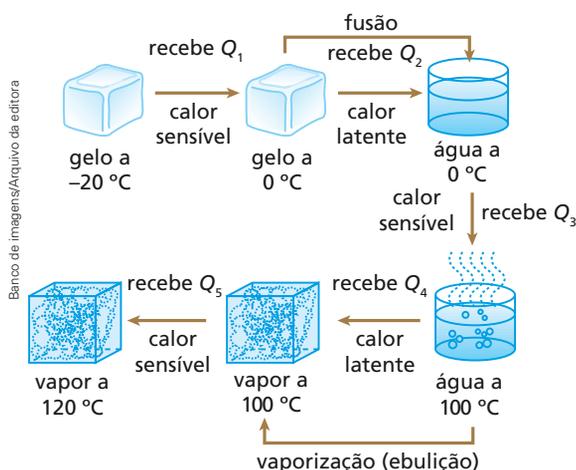
2ª Lei

Para uma mesma substância pura, as temperaturas de fusão e de ebulição variam com a pressão.

A água ao nível do mar (altitude zero), por exemplo, entra em ebulição a 100 °C e, em São Paulo (altitude = 731 metros), a aproximadamente 98 °C.

3ª Lei

Se durante a fusão ou a ebulição de uma substância pura a pressão permanecer constante, sua temperatura também permanecerá constante.



Salvo instrução em contrário, consideraremos que durante a mudança de estado de uma substância pura a pressão permanece constante e igual à pressão atmosférica normal.

Para melhor entendermos as etapas do aquecimento de uma substância pura qualquer, vamos considerar um bloco de gelo de massa m sendo aquecido de -20 °C a 120 °C, sob pressão normal.

Evidentemente, ao atingir a temperatura de 120 °C, não teremos mais gelo, e sim vapor de água.

Sendo L_F o calor latente de fusão; L_V o calor latente de vaporização; c_g o calor específico do gelo; c_a o calor específico da água e c_v o calor específico do vapor, podemos escrever:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

em que:

$$Q = (mc\Delta\theta)_{\text{gelo}} + (mL_F)_{\text{gelo}} + (mc\Delta\theta)_{\text{água}} + (mL_V)_{\text{água}} + (mc\Delta\theta)_{\text{vapor}}$$

O gráfico ao lado representa a transformação.

Evaporação

A **evaporação**, ao contrário da ebulição, não depende de uma temperatura determinada para acontecer. É um processo lento, que ocorre apenas na superfície livre de um líquido.

Nesse processo, as partículas que escapam são aquelas que têm energia cinética maior que a da maioria, energia suficiente para se livrarem das demais moléculas do líquido. Por causa disso, a energia média das partículas remanescentes e a temperatura do líquido diminuem.

A rapidez com que ocorre a evaporação de um líquido depende de cinco fatores:

1º) Natureza do líquido

Os líquidos mais voláteis evaporam mais rapidamente. O éter, por exemplo, nas mesmas condições, evapora mais rápido que a água.

2º) Temperatura

O aumento da temperatura favorece a evaporação. Apesar de a evaporação não depender da temperatura para acontecer (a água, por exemplo, evapora tanto a 5 °C como a 30 °C ou a 80 °C), podemos observar que a 80 °C a água evapora mais depressa do que a 30 °C, e mais ainda do que a 5 °C.

3º) Área da superfície livre

Já que a evaporação ocorre apenas na superfície livre do líquido, quanto maior for essa superfície livre, mais rápida será a evaporação.

4º) Pressão na superfície livre

Um aumento de pressão na superfície livre dificulta o escape das partículas do líquido, diminuindo a rapidez da evaporação. Sob uma pressão menor, é maior a evaporação.

5º) Pressão de vapor do líquido

A quantidade de vapor do próprio líquido já existente nas proximidades de sua superfície livre influi na rapidez da evaporação, fato que abordaremos no item a seguir.



Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo

// Em regiões quentes, onde existe água em amplas superfícies livres, a precipitação pluviométrica também é grande. A evaporação da água é mais rápida, formando nuvens que se precipitam em forma de chuva. É por isso que nesses locais a vegetação é mais abundante.

Perigo na estrada

A visibilidade nas estradas pode ser prejudicada por nevoeiros, que impedem a visão dos carros e caminhões que trafegam à nossa frente. Esse fato já provocou alguns dos mais graves acidentes automobilísticos, com perdas de muitas vidas. Esses nevoeiros podem aparecer em vários locais do Brasil, dependendo das condições climáticas. No entanto, algumas regiões de serra, principalmente no Sudeste e no Sul, onde encontramos temperaturas mais baixas, a frequência é maior.



Radoslaw Leczy/Shutterstock

// O nevoeiro proporciona um efeito magnífico nesta fotografia da ponte Golden Gate, localizada em São Francisco, Estados Unidos.



Cesar Diniz/Pulsar Imagens

// Nesta fotografia, podemos observar como um nevoeiro pode prejudicar a visibilidade em uma estrada.

Como são formados esses nevoeiros? Nós sabemos que, durante o dia, os raios solares são absorvidos pela terra e pela água existente, aquecendo-as. Parte dessa água passa para o estado gasoso e sobe. Nos dias normais esse vapor transforma-se em nuvens a uma distância razoável do solo, não prejudicando o trânsito de veículos. No entanto, no alto das serras, em certas épocas do ano, o ar pode estar gelado, proporcionando a condensação de pequenas gotas de água, que, por serem muito leves, permanecem em suspensão, refletindo a luz que nelas incide; é o nevoeiro baixo, ao nível do chão. Portanto, são essas gotículas de água misturadas com o ar as responsáveis pela formação do nevoeiro.

As autoridades recomendam, nesses casos, que você:

- reduza a velocidade do veículo;
- ligue os faróis baixos;
- se não estiver enxergando bem, pare o carro, de preferência em um posto de serviços ou policiamento;
- se precisar parar no acostamento, ligue o pisca-alerta, coloque o triângulo e, se possível, saia do carro, afastando-se da estrada.

JÁ PENSOU NISTO?

Por que a água permanece mais fria em moringas de barro?

Hoje, com a utilização de aparelhos elétricos que refrigeram a água, as moringas de barro estão desaparecendo em regiões de grande densidade populacional, onde a energia elétrica é acessível à grande maioria das pessoas. São geladeiras e bebedouros que refrigeram a água, tornando-a mais fria do que o ambiente.

No entanto, em regiões mais afastadas, aonde a energia elétrica não chega, em geral são usadas moringas de barro para manter a água mais fria.

A argila utilizada na confecção dessas moringas, após cozida em forno especial, resulta em um material poroso, de razoável dureza e rígido suficientemente para não quebrar facilmente. A água penetra pelas porosidades do material até alcançar a superfície externa e evapora.

Como vimos, a evaporação é um processo endotérmico em que apenas as partículas de maior energia escapam. Se ficam as partículas de menor energia, a água no interior da moringa apresenta temperatura menor do que a do ambiente. Se em vez de barro a moringa fosse feita de vidro, a água do seu interior estaria em equilíbrio térmico com o meio.

Usando o mesmo princípio, você pode resfriar uma latinha de suco usando papel toalha molhado. Basta envolver a latinha no papel toalha molhado e colocá-la em local fresco. Enquanto a água evapora, o líquido do interior da latinha fica mais frio.



/// Moringa de barro.

Fernando Favoretto/Criar Imagem

11. Pressão de vapor

Considere um recipiente cilíndrico, transparente e dotado de um êmbolo. Vamos supor que a temperatura do sistema seja constante.

Imaginemos que haja, dentro desse recipiente, um líquido bastante volátil, o éter, por exemplo. Inicialmente, o êmbolo está em contato direto com a superfície livre do líquido.

Quando levantamos o êmbolo, a região de vácuo que se forma entre ele e o líquido começa a ser ocupada por partículas desse líquido, que vaporiza. Algumas dessas partículas, no entanto, acabam sendo recapturadas pelo líquido. No início, o número de partículas que saem é maior que o das que voltam. A partir de um determinado instante, entretanto, o aumento da concentração de vapor vai provocar um equilíbrio dinâmico, quando o número de partículas que voltam para o líquido torna-se igual ao das que saem, em cada unidade de tempo.

Atingida a situação de equilíbrio, o ambiente gasoso fica saturado desse vapor, denominado **vapor saturante**, e sua pressão para de aumentar, sendo chamada de **pressão máxima de vapor** (p_m).

Se levantarmos um pouco mais o êmbolo, observaremos que o equilíbrio vapor-líquido será rompido. Voltará a acontecer vaporização, uma vez que a quantidade de líquido torna a diminuir. Isso se dá até que novamente se estabeleça o equilíbrio dinâmico entre o vapor e o líquido, e a pressão, que temporariamente diminuiu, volte ao seu valor máximo.

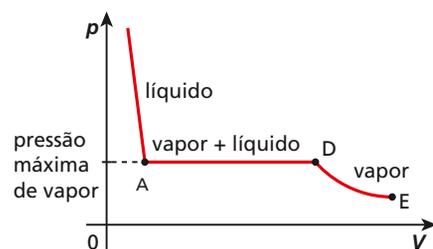
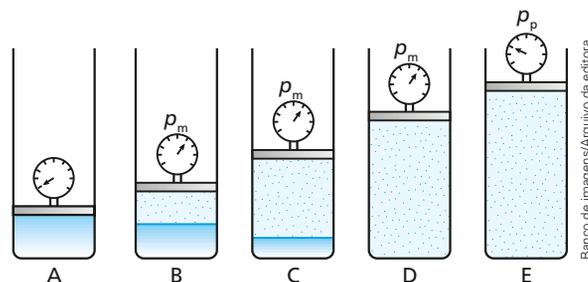
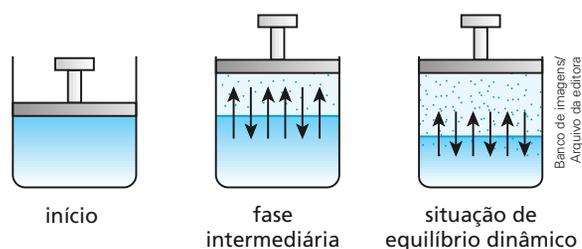
É evidente que, se o tubo for suficientemente longo, quando levantarmos o êmbolo, a situação descrita se repetirá até que a última gota de líquido evapore. A partir daí, a elevação do êmbolo provocará uma queda da pressão, e ela não voltará mais ao valor máximo, já que não existe mais líquido para vaporizar. O vapor, nessas condições, é denominado **vapor não saturante**.

Resumindo e esquematizando o experimento descrito com o éter, a uma temperatura θ constante, temos:

- A – Situação inicial.
- B – Situação de equilíbrio entre vapor e líquido. O vapor é saturante e a pressão é a pressão máxima de vapor (p_m).
- C – Situação idêntica à anterior (observe que a quantidade de líquido diminuiu).
- D – Supondo que esta seja a situação em que a última gota de líquido vaporiza, temos pressão máxima de vapor e vapor saturante seco, uma vez que não existe mais a fase líquida.
- E – Situação a partir da qual a pressão do vapor passa a diminuir quase na razão inversa do volume. Temos aí vapor não saturante. A pressão é menor que a máxima, sendo denominada pressão parcial de vapor (p_p).

No gráfico ao lado, representamos a variação da pressão (p) do vapor, em função do respectivo volume (V).

O valor da pressão máxima de vapor depende de dois fatores: da substância e da temperatura em que foi realizado o experimento. Essa pressão máxima de vapor se eleva com a temperatura.



NOTAS!

- Observe que a rapidez de evaporação anula-se quando o ambiente gasoso torna-se saturado pelo vapor do líquido. Contudo, essa rapidez é tanto maior quanto menor é a pressão do vapor já existente.
- A ebulição ocorre à temperatura em que a pressão máxima de vapor do líquido iguala-se à pressão ambiente. A pressão máxima do vapor de água, por exemplo, é igual a 760 mmHg a 100 °C. Por isso, em pressão atmosférica normal (760 mmHg), a água entra em ebulição a 100 °C. Já no pico do Monte Everest, por exemplo, onde a pressão atmosférica vale aproximadamente 240 mmHg (devido à altitude), a água entra em ebulição a 71 °C, temperatura em que sua pressão máxima de vapor também é de 240 mmHg.

Note, então, que um líquido entra em ebulição sempre que a pressão externa exercida em sua superfície torna-se igual à sua pressão máxima de vapor.

Se, a partir da situação **E**, em que temos vapor não saturante, resolvermos comprimir o vapor, descendo o êmbolo, notaremos que a pressão aumentará, quase na razão inversa do volume. Entretanto, isso será observado somente até a situação **D**, quando a pressão atingirá seu valor máximo. A partir daí, por mais que o vapor seja comprimido, sua pressão não mais aumentará, mantendo-se igual à máxima (p_m). Ocorrerá liquefação, até que, na situação **A**, todo o vapor terá se transformado em líquido. Se continuarmos a compressão, a variação de volume do líquido será insignificante, uma vez que os líquidos são praticamente incompressíveis.

Ampliando o olhar

A chuva e a umidade relativa do ar

A chuva é uma precipitação atmosférica constituída de gotas de água, que podem limpar o ar poluído, refrescar um dia muito quente ou mesmo promover o desenvolvimento de plantas, como as flores que embelezam o mundo ou aquelas com as quais nós e outros animais nos alimentamos.

Quando em excesso, a chuva pode provocar inundações, capazes de destruir o que foi construído pelo ser humano e causar a morte de diversos seres vivos.

Afinal, como ocorre esse fenômeno físico chamado chuva?

Na superfície da Terra, existe uma grande quantidade de água nos mares, rios e lagos. Na evaporação, o vapor é misturado ao ar existente na região. A concentração desse vapor define o estado higrométrico ou umidade da atmosfera.

A **umidade relativa do ar (U)** é a razão entre a massa de vapor de água (m) existente em certo volume de ar e a massa de vapor de água (M) que provocaria a saturação desse volume de ar, na mesma temperatura. O valor da grandeza U também pode ser determinado por meio da razão entre a pressão exercida pelo vapor existente no ar e a pressão (ou tensão) máxima possível de vapor, na temperatura considerada. Essa pressão máxima de vapor é bem definida e pode ser encontrada em uma tabela, como a que está ao lado.

Observemos que o máximo valor de U é a unidade. Isso ocorre quando o ar está saturado de vapor de água e $m = M$. Se $U = 0,30$, por exemplo, devemos entender que o vapor de água existente naquele volume de ar corresponde a 30% do vapor que ocasionaria sua saturação.

Ao ocorrer a saturação de certo volume de ar, o vapor de água excedente se condensa e se precipita em forma de neblina ou de pequenas gotas de água, a chuva. A quantidade de água que o ar é capaz de absorver, antes da saturação, depende da temperatura, aumentando progressivamente com ela.

Temperatura (°C)	Pressão máxima de vapor de água (mmHg)
0	4,58
5	6,54
10	9,21
15	12,79
20	17,54
25	23,77
30	31,84
40	55,36
50	92,60
60	149,51
70	223,85
80	355,34
90	525,94
100	760,00

Fonte: <[https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/8554681/00000000/Tabelasdepropriedadestermodinamicas\(lagua\).pdf](https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/8554681/00000000/Tabelasdepropriedadestermodinamicas(lagua).pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2018.



// Criança divertindo-se com as gotas da chuva.

É interessante observar que o ser humano sente-se melhor em local de baixa umidade, mesmo em temperaturas elevadas. Em um ambiente onde o ar é mais seco (baixa umidade), a sudorese é muito menor e a evaporação do suor é mais rápida, causando um maior resfriamento da pele. Nessas condições, a pessoa pode suportar temperaturas superiores a 37 °C. Já em um ambiente de grande umidade, a sudorese é maior e o suor demora a evaporar, ocasionando bastante desconforto. Nessas condições, uma temperatura de 25 °C pode parecer sufocante para as pessoas. O conforto, portanto, depende tanto da temperatura quanto da umidade relativa do ar.



Cesar Diniz/Pulsar Imagens

// Ruas alagadas pelo excesso de chuva.

Exercícios Nível 1

75. No interior de Minas Gerais, em uma pequena escola, Felisberto é um aluno muito atento. Ele observa tudo e pergunta aos seus professores. Na aula de Física, ele fez uma observação interessante. Disse: “Professor, lá em casa não temos geladeira. Minha mãe coloca a água que bebemos em uma moringa de barro. Essa água sempre está fresquinha, a uma temperatura menor do que o ambiente. Por que isso ocorre?”.
- O professor respondeu: “Felisberto, isso ocorre porque a moringa é feita de barro. Como você sabe o barro...”.
- Assinale a alternativa que completa, corretamente, o texto anterior.
- a) possui um maior calor específico, absorvendo o calor que deveria ser absorvido pela água;
 - b) possui uma menor condutividade térmica, isolando o calor que vem do meio externo, deixando a água mais fria.
 - c) é poroso, por isso permite que uma pequena fração de água atravesse suas paredes, e ao evaporar utiliza calor do interior da moringa, diminuindo a temperatura da água.
 - d) reflete na superfície todo o calor que recebe por radiação vindo do meio externo.
 - e) é isolante térmico.

76. Analise as afirmativas dadas a seguir:

- E.R.** (01) A temperatura de ebulição da água é sempre 100 °C, independentemente de outras condições.
- (02) No interior de uma panela de pressão fechada, a água entra em ebulição a uma temperatura maior que 100 °C.

- (04) No Rio de Janeiro (altitude zero), a água entra em ebulição a 100 °C em uma panela sem tampa; em São Paulo (altitude 731 m), a mesma água ferveria a uma temperatura maior que 100 °C.
- (08) O aumento de pressão na superfície da água dificulta a evaporação, mas não altera sua temperatura de ebulição.
- (16) Na evaporação de um líquido, são as partículas de maior nível de energia que saem pela superfície livre, provocando uma diminuição de temperatura.

Dê como resposta a soma dos números associados às proposições corretas.

Resolução:

- (01) **Incorreta.** A temperatura de ebulição da água pode ser de 100 °C, menor do que 100 °C ou maior do que 100 °C, dependendo da pressão exercida em sua superfície.
- (02) **Correta.** Pressão maior, temperatura de ebulição maior.
- (04) **Incorreta.** Aumentando-se a altitude, a pressão atmosférica diminui. Assim, em São Paulo, a água entra em ebulição a uma temperatura menor do que 100 °C.
- (08) **Incorreta.** O aumento de pressão na superfície da água dificulta sua evaporação e aumenta sua temperatura de ebulição.
- (16) **Correta.**

Resposta: 18.

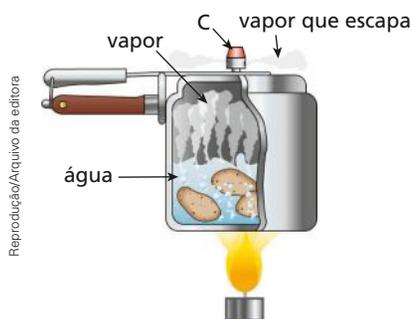
77. [Cefet-MG] As temperaturas de ebulição da água nas cidades **A** e **B** são, respectivamente, 96 °C e 100 °C. É correto afirmar que:

- a) a altitude de **B** é maior que a de **A**.
- b) as duas cidades estão ao nível do mar.
- c) a cidade **A** está acima do nível do mar.
- d) a pressão atmosférica em **A** é maior que em **B**.
- e) as duas cidades possuem a mesma pressão atmosférica.

78. Na coluna da esquerda temos alguns locais com suas respectivas altitudes; na da direita, temperaturas de ebulição da água nesses locais, porém fora de ordem. Associe as duas colunas e identifique a alternativa correta.

- | | |
|----------------------------|-------------|
| (A) Quito (2851 m) | (I) 101 °C |
| (B) Monte Everest (8882 m) | (II) 90 °C |
| (C) Mar Morto (-395 m) | (III) 71 °C |
| (D) Brasília (1 152 m) | (IV) 96 °C |
- a) AI; BII; CIII; DIV.
 - b) AII; BIII; CI; DIV.
 - c) AIII; BII; CI; DIV.
 - d) AII; BIII; CIV; DI.
 - e) AIV; BIII; CI; DII.

79. [Unimontes/Paes-MG] As chamadas “panelas de pressão” são quase totalmente fechadas, a não ser por uma pequena abertura, sobre a qual encaixamos um pequeno corpo **C** (ver figura) que faz com que a pressão interna seja maior que a pressão atmosférica. Quando colocamos a panela sobre a chama, inicialmente ocorre a evaporação da água, fazendo com que, aos poucos, vá aumentando a pressão do vapor e, conseqüentemente, a pressão interna, que pode chegar até a 2 atm.



Nessas condições de pressão, começa a ebulição a uma temperatura que é

- a) igual a 100 °C.
- b) menor que 100 °C.
- c) 80 °C.
- d) maior que 100 °C.

80. Durante uma aula experimental, o professor de Física mostrou uma situação, envolvendo a ebulição de água, que intrigou seus alunos. Pegou um recipiente de vidro refratário, que pode ser

aquecido e resfriado sem que se quebre, e de boca estreita, que pode ser bem fechado com uma rolha. Introduziu água em seu interior, ocupando pouco mais de 70% do seu volume interno. Fazendo manuseio de forma adequada, deixando aberto o recipiente, passou a aquecer a água na chama de um pequeno fogão. Quando a água entrou em ebulição, o sistema foi retirado da fonte térmica e bem fechado por uma rolha. Os alunos observaram que a água parou de ferver. Em seguida, o professor abriu a torneira da pia e colocou o recipiente fechado em contato com a água fria. Para a surpresa dos alunos, a água existente no interior da vasilha voltou a entrar em ebulição.



João Anselmo/Arquivo da editora

O professor esperou algum tempo para que os alunos conversassem, tentando explicar o ocorrido, e cobrou de três deles uma explicação. A seguir, encontramos as respostas dadas pelos alunos **A**, **B** e **C**.

Aluno **A**: Quando a água ferveu, o vapor liberado expulsou todo o ar do interior do recipiente que foi hermeticamente fechado. Na ausência de ar, os líquidos fervem facilmente.

Aluno **B**: Na realidade a água não ferveu. No resfriamento sofrido, bolhas de ar quente que estavam no interior do líquido escaparam, provocando uma falsa ebulição.

Aluno **C**: No resfriamento do sistema, a pressão de vapor no seu interior diminuiu mais rapidamente do que a temperatura da água. Com pressão menor na sua superfície, a água voltou a ferver. Considerando a letra **V** para uma afirmativa verdadeira e **F** para uma falsa, assinale o conjunto correto de letras, na sequência de **A** para **C**.

- a) FFF
- b) FVF
- c) VFV
- d) FFV
- e) VVF

81. [Ufes] Os cozinheiros sabem que um bom pudim deve ser cozido em banho-maria: a forma contendo o pudim é mergulhada em um recipiente no qual se mantém água fervendo. A razão física para esse procedimento é que:

- a) o cozimento se dá à pressão controlada.
- b) o cozimento se dá à temperatura controlada.
- c) a água é um bom isolante térmico.
- d) o peso aparente do pudim é menor, devido ao empuxo (princípio de Arquimedes).
- e) a expansão volumétrica do pudim é controlada.

82. Em um calorímetro ideal, encontramos 30 g de água a 20 °C, sob pressão normal. Calcule a quantidade de calor que esse sistema deve receber até que toda a água se transforme em vapor.

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C; calor latente de vaporização da água = 540 cal/g.

83. (Fuvest-SP) Um quilograma de gelo a -50 °C é aquecido, transformando-se em vapor a 100 °C. São conhecidos: calor específico do gelo = 0,5 cal/g °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; calor específico da água = 1 cal/g °C; calor latente de vaporização da água = 540 cal/g.

As diversas fases do processo são: aquecimento e fusão do gelo; aquecimento e vaporização da água. Atribuindo o algarismo 1 ao processo que requer o maior número de calorías, o algarismo 2 ao que vem em segundo lugar e assim por diante, de cima para baixo, forma-se o número:

- a) 1 234. c) 2 413. e) 1 324.
- b) 4 231. d) 4 321.

84. Quando alguém vai tomar um café muito quente, costuma assoprar a superfície do líquido. Com isso, o café esfria mais depressa, porque:

- a) o ar expelido pela pessoa é mais frio que o café e retira calor do sistema.
- b) o ar expelido pela pessoa evita que o calor saia pela superfície livre, forçando-o a sair pelas faces da xícara.
- c) o ar expelido retira o vapor de água existente na superfície do café, reduzindo a pressão de vapor e, desse modo, favorecendo a evaporação.
- d) o ar expelido combina quimicamente com o vapor de água, retirando energia térmica do café.
- e) é um costume que vem do século XVII, da Corte dos reis da França, quando os nobres descobriram o café.

85. (UFF-RJ) Ao usar um ferro de passar roupa, uma pessoa, em geral, umedece a ponta do dedo em água antes de encostá-lo rapidamente na base aquecida do ferro, para testar se ela já está suficientemente quente. Ela procede dessa maneira,

com a certeza de que não queimará a ponta de seu dedo. Isso acontece porque, em relação aos demais líquidos, a água tem:

- a) um baixo calor específico.
- b) um comportamento anômalo na sua dilatação.
- c) uma densidade que varia muito ao se evaporar.
- d) uma elevada temperatura de ebulição.
- e) um elevado calor latente de vaporização.

86. (UFV-MG) Colocando água gelada no interior de um copo de vidro seco, observa-se, com o passar do tempo, a formação de gotículas de água na parede externa do copo. Isso se deve ao fato de que:

- a) a água gelada atravessa a parede do copo.
- b) as gotas d'água sobem pela parede interna do copo alcançando a parede externa, onde se depositam.
- c) a água fria cria microfissuras na parede do copo de vidro, pelas quais a água passa para fora.
- d) o vapor de água presente na atmosfera se condensa.
- e) o copo é de vidro.

87. (Fatec-SP) Aviões a jato, ao voarem em altitudes aproximadas de 25 mil pés, geram rastros chamados de *contrails* (ou trilhas de condensação), que nada mais são do que os rastros do ar, ejetados das turbinas das aeronaves.

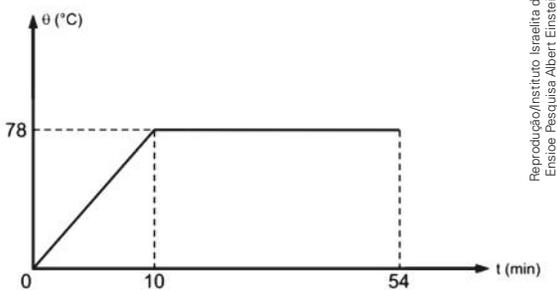


Reprodução/Fatec, 2016

A formação desses *contrails* ocorre devido

- a) ao choque térmico entre o ar frio (a cerca de -20 °C), que sai da turbina, e o ar à temperatura ambiente (a cerca de 25 °C), atrás da aeronave.
- b) à rápida sucção das nuvens à frente da aeronave, e à rápida ejeção delas para trás do avião.
- c) ao gelo-seco, despejado no ar pelo acionamento intencional do piloto.
- d) à rápida sucção de partículas de poeira à frente da aeronave, e à rápida ejeção destas para trás do avião.
- e) ao choque térmico entre o ar quente (a cerca de 300 °C), que sai da turbina, e o ar à temperatura muito baixa (a cerca de -25 °C) atrás da aeronave.

88. (FICSAE-SP) Sabe-se que um líquido possui calor específico igual a $0,58 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$. Com o intuito de descobrir o valor de seu calor latente de vaporização, foi realizado um experimento onde o líquido foi aquecido por meio de uma fonte de potência uniforme, até sua total vaporização, obtendo-se o gráfico abaixo.



O valor obtido para o calor latente de vaporização do líquido, em cal/g , está mais próximo de:

- a) 100
b) 200
c) 540
d) 780
89. (Enem) Num dia em que a temperatura ambiente é de $37 \text{ }^\circ\text{C}$, uma pessoa, com essa mesma temperatura corporal, repousa à sombra. Para regular sua temperatura corporal e mantê-la constante, a pessoa libera calor através da evaporação do suor. Considere que a potência necessária para manter seu metabolismo é 120 W e que, nessas condições, 20% dessa energia é dissipada pelo suor, cujo calor de vaporização é igual ao da água (540 cal/g). Utilize 1 cal igual a 4 J . Após duas horas nessa situação, que quantidade de água essa pessoa deve ingerir para repor a perda pela transpiração?
- a) $0,08 \text{ g}$
b) $0,44 \text{ g}$
c) $1,30 \text{ g}$
d) $1,80 \text{ g}$
e) $80,0 \text{ g}$
90. (PUC-SP) Um cubo de gelo de massa 100 g e temperatura inicial $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ é colocado no interior de um micro-ondas. Após 5 minutos de funcionamento, restava apenas vapor de água. Considerando que toda a energia foi totalmente absorvida pela massa de gelo (desconsidere qualquer

tipo de perda) e que o fornecimento de energia foi constante, determine a potência utilizada, em W .

São dados:

Pressão local = 1 atm

Calor específico do gelo = $0,5 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Calor específico da água líquida = $1,0 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Calor latente de fusão da água = $80 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$

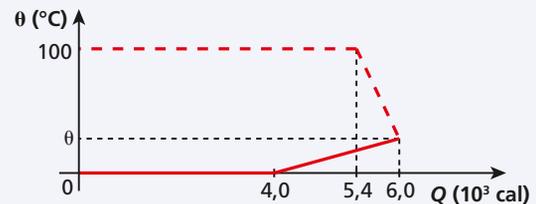
Calor latente de vaporização da água = $540 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$

$1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$



- a) 1008
b) 896
c) 1015
d) 903
e) 1512

91. Em um calorímetro ideal, colocam-se as massas m_v de vapor de água a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e m_g de gelo a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, sob pressão normal. O gráfico mostra como variaram as temperaturas dessas massas em função das quantidades de calor trocadas:



Sendo o calor latente de fusão do gelo 80 cal/g , o de vaporização da água 540 cal/g e o calor específico de água $1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$, determine:

- a) a massa m_v de vapor de água;
b) a massa m_g de gelo;
c) a temperatura θ de equilíbrio térmico.

Resolução:

No gráfico, o patamar superior representa a liquefação do vapor de água, enquanto o patamar inferior representa a fusão do gelo. Sendo assim:

a) $Q = m_v L_v \Rightarrow 5,4 \cdot 10^3 = m_v \cdot 540$

$m_v = 10 \text{ g}$

$$b) Q = m_g L_F \Rightarrow 4,0 \cdot 10^3 = m_g \cdot 80$$

$$m_g = 50 \text{ g}$$

c) Na observação do gráfico, notamos que a água proveniente do derretimento do gelo recebeu $2,0 \cdot 10^3$ cal para atingir a temperatura θ . Daí, temos:

$$Q = mc\Delta\theta$$

$$2,0 \cdot 10^3 = 50 \cdot 1 (\theta - 0) \therefore \theta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

92. Considere 1,0 kg de gelo a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma massa x de vapor de água a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, colocados em um recipiente de capacidade térmica desprezível. A temperatura final de equilíbrio térmico é $0 \text{ }^\circ\text{C}$, e o sistema está totalmente no estado líquido. Qual o valor de x em quilogramas?

Dados: calor específico latente de vaporização da água = 540 cal/g ;

calor específico latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico sensível da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

93. (Unifesp) Considere um copo de vidro de 100 g contendo 200 g de água líquida, ambos inicialmente em equilíbrio térmico a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

O copo e a água líquida foram aquecidos até o equilíbrio térmico a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, em um ambiente fechado por paredes adiabáticas, com vapor de água inicialmente a $120 \text{ }^\circ\text{C}$. A tabela apresenta valores de calores específicos e latentes das substâncias envolvidas nesse processo.

calor específico da água líquida	$1 \text{ cal/(g} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$
calor específico do vapor de água	$0,5 \text{ cal/(g} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$
calor específico do vidro	$0,2 \text{ cal/(g} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$
calor latente de liquefação do vapor de água	-540 cal/g

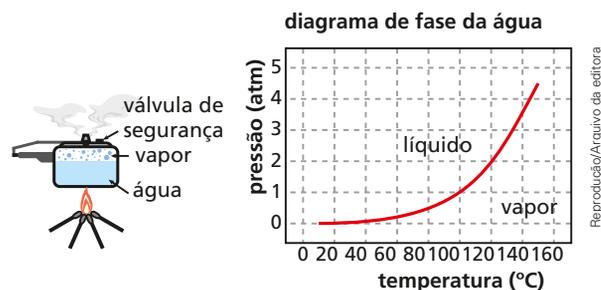
Considerando os dados da tabela, que todo o calor perdido pelo vapor tenha sido absorvido pelo copo com água líquida e que o processo tenha ocorrido ao nível do mar, calcule:

- a quantidade de calor, em cal, necessária para elevar a temperatura do copo com água líquida de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ para $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- a massa de vapor de água, em gramas, necessária para elevar a temperatura do copo com água líquida até atingir o equilíbrio térmico a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

94. (UEL-PR) Um calorímetro de capacidade térmica $50 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ contém 50 g de gelo e 200 g de água em equilíbrio térmico, sob pressão normal. Se introduzirmos 50 g de vapor de água a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ no calorímetro, qual será a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$;
calor latente de vaporização da água = 540 cal/g .

95. (Unimep-SP) A panela de pressão permite que os alimentos sejam cozidos em água muito mais rapidamente do que em panelas comuns. A seguir, a figura mostra esquematicamente uma panela de pressão e o diagrama de fase da água. Qual das afirmações não é verdadeira?

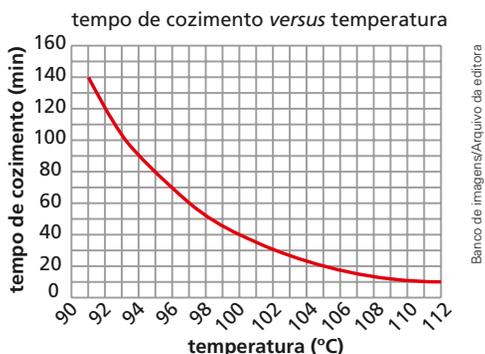


- A vantagem do uso da panela de pressão é a rapidez para o cozimento devido à quantidade adicional de calor que é transferida para a panela.
- Quando a pressão no interior da panela atinge 2 atm, a água entra em ebulição a $120 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Para 4 atm no interior da panela, a água ferve a uma temperatura acima de $140 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Em Santos, em uma panela comum, a água ferve aproximadamente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Em uma panela comum, em um local a grande altitude, a água entra em ebulição abaixo de $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

96. (Enem) Se, por economia, abaixarmos o fogo sob uma panela de pressão logo que se inicia a saída de vapor pela válvula, de forma simplesmente a manter a fervura, o tempo de cozimento:

- será maior porque a panela "esfria".
- será menor, pois diminui a perda de água.
- será maior, pois a pressão diminui.
- será maior, pois a evaporação diminui.
- não será alterado, pois a temperatura não varia.

97. O gráfico a seguir fornece o tempo de cozimento, em água fervente, de uma massa m de feijão em função da temperatura.



Sabe-se que a temperatura de ebulição da água, em uma panela sem tampa, é função da pressão atmosférica local. Na tabela a seguir, encontramos a temperatura de ebulição da água em diferentes pressões. Ao nível do mar (altitude zero), a pressão atmosférica vale 76 cmHg e ela diminui 1,0 cmHg para cada 100 metros que aumentamos a altitude.

Temperatura de ebulição da água em função da pressão	
Pressão em cmHg	Temperatura em °C
60	94
64	95
68	97
72	98
76	100
80	102
84	103
88	105
92	106
96	108
100	109
104	110
108	111

Fonte: RUMBLE, John. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 98 ed. CRC Press.

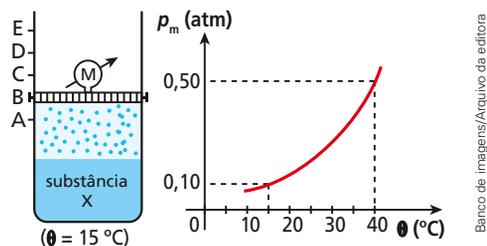
Analise as afirmações.

- I. Ao nível do mar, essa massa m de feijão irá demorar 40 minutos para o seu cozimento.
- II. O Mar Morto encontra-se aproximadamente 400 metros abaixo do nível dos mares (altitude -400 m). Nesse local, o mesmo feijão demoraria 30 minutos para o seu cozimento.
- III. O tempo de cozimento desse feijão seria de 1,0 hora em um local de altitude aproximadamente igual a 1,0 km.
- IV. Se esse feijão estivesse no interior de uma panela de pressão fechada, cuja válvula mantém a pressão interna a 1,42 atm (1,0 atm equivale a 76 cmHg), independentemente do local, o tempo de cozimento seria de aproximadamente 10 minutos.

É (São) verdadeira(s):

- a) somente I.
- b) somente I e III.
- c) somente I, II e IV.
- d) somente II, III e IV.
- e) I, II, III e IV.

98. Na figura a seguir, o êmbolo está travado no ponto **B**. O recipiente contém uma substância **X** e sabe-se que sua pressão máxima de vapor varia de acordo com o gráfico



Analise as proposições seguintes:

- I. Se o manômetro **M** indicar 0,08 atm de pressão, o sistema não atingiu seu equilíbrio dinâmico, e o vapor é não saturante.
- II. Quando o sistema atingir o equilíbrio dinâmico líquido-vapor, o manômetro acusará 0,10 atm.
- III. Elevando-se o êmbolo lentamente, observar-se-á que a pressão se manterá constante enquanto existir líquido. Se, terminando o líquido, o êmbolo continuar a subir, a pressão não se manterá constante e o vapor passará a ser não saturante seco.
- IV. Com o êmbolo travado em **B** e aquecendo-se o sistema a 40 °C, o manômetro indicará 0,50 atm se existir líquido.

Quais são as proposições verdadeiras (**V**) e quais são as falsas (**F**)?

12. Sublimação

Sólidos cristalinos podem liberar vapor de modo bastante lento em diversas temperaturas. É o caso, por exemplo, de cristais de naftalina sob condições normais de pressão e temperatura. Esse processo é semelhante ao da evaporação de um líquido.

Se, porém, a pressão máxima de vapor do cristal iguala-se à pressão externa, essa liberação de vapor passa a ser bastante rápida. Esse processo é, de certo modo, análogo à ebulição de um líquido.

Os processos citados são tipos de **sublimação**. Daqui por diante, porém, quando falarmos em sublimação, estaremos nos referindo sempre ao segundo processo citado, isto é, ao caso em que a pressão máxima de vapor iguala-se à pressão externa.

É importante lembrar que a sublimação é a passagem do estado físico sólido para o gasoso ou vice-versa, sem que a substância passe pela fase líquida.

JÁ PENSOU NISTO?

Que “fumaça” é essa?

Essa “fumaça” é o resultado da sublimação do dióxido de carbono (CO_2), que, no estado sólido, é chamado de **gelo-seco**. O CO_2 passa para o estado sólido ao ser comprimido e resfriado a $-80\text{ }^\circ\text{C}$. Nas condições de pressão normal, partículas da superfície desse sólido se soltam, passando para o estado gasoso (sublimação).

O efeito observado no espetáculo de dança da fotografia é obtido colocando-se pedaços de gelo-seco em um recipiente que contém água. Partículas gasosas de CO_2 desprendem-se na sublimação e levam pequenas gotas de água. Essas gotas é que criam o efeito de “fumaça”.

O gelo-seco também é utilizado em carrinhos de sorvete, já que sua temperatura é menor do que a do gelo comum e não molha as embalagens, pois não passa para o estado líquido na temperatura em que vivemos.



Alamy/Foroena

13. Ponto crítico e ponto triplo

Ponto crítico

O estado gasoso é constituído de vapores e gases. Qual a diferença entre um vapor e um gás?

Uma substância no estado gasoso é denominada **gás** quando, à temperatura constante, é impossível levá-la ao estado líquido, por maior que seja a pressão exercida sobre ela. O **vapor**, ao contrário, é a substância no estado gasoso que, à temperatura constante, pode sofrer liquefação por aumento de pressão.

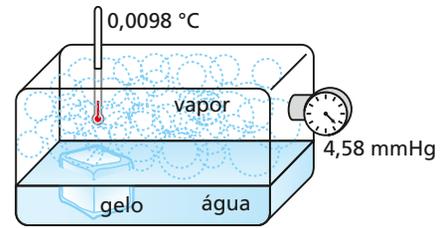
A situação-limite entre vapor e gás é definida por uma temperatura denominada **temperatura crítica**, que, em conjunto com um valor de pressão (pressão crítica), determina o **ponto crítico**.

É importante fixar que acima da temperatura crítica a substância é denominada gás, não podendo ser liquefeita por simples compressão isotérmica. Para a água, por exemplo, a pressão crítica corresponde a 218 atm e a temperatura crítica, a $374\text{ }^\circ\text{C}$.

Ponto triplo

O **ponto triplo** de uma substância é caracterizado por um valor de pressão e outro de temperatura sob os quais essa substância pode coexistir em equilíbrio nos estados físicos sólido, líquido e gasoso (vapor) simultaneamente.

Para a água, o ponto triplo é definido pela temperatura de $0,0098\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão de vapor igual a $4,58\text{ mmHg}$. Nessa situação física, podem coexistir o **gelo**, a **água** e o **vapor de água**, sem que ocorra mudança nas proporções relativas de qualquer um deles.



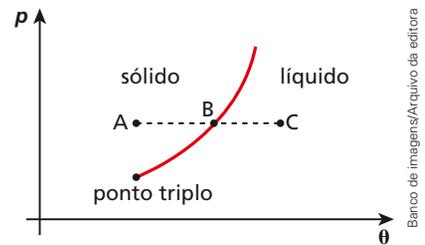
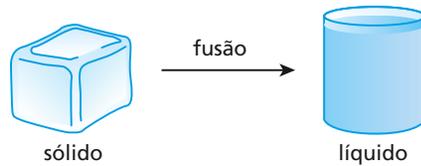
Banco de imagens/Arquivo da editora

14. Curvas de fusão, vaporização e sublimação

Curva de fusão

Curva de fusão de um sólido cristalino é a representação gráfica da pressão ambiente (p) em função da temperatura de fusão (θ) do sólido. Há dois casos a considerar:

- Para a maioria das substâncias, o volume **aumenta** com a fusão. Conseqüentemente, quanto maior é a pressão sobre o sólido, mais difícil é a sua fusão. Em outras palavras, quanto maior a pressão, maior é a temperatura que o sólido precisa atingir para fundir-se. É o que mostra a curva de fusão a seguir.

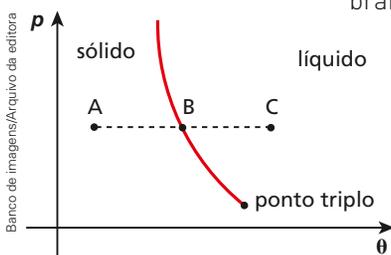


Banco de imagens/Arquivo da editora

- A – Estado sólido
- B – Equilíbrio das fases sólida e líquida
- C – Estado líquido

- Para algumas substâncias (exceções à regra geral), como a água, o bismuto, o ferro e o antimônio, o volume **diminui** com a fusão. Isso acontece porque as ligações químicas características do estado sólido determinam a existência de grandes vazios intermoleculares nesse estado. Com o desmoronamento da estrutura por ocasião da fusão, esses vazios são ocupados pelas próprias moléculas e, conseqüentemente, o volume diminui.

Evidentemente, a solidificação dessas substâncias implica aumento de volume. É o que ocorre com a água presente no interior das células vegetais por ocasião das geadas: a água solidifica-se, aumentando seu volume e rompendo as membranas das células.



Para essas substâncias excepcionais, como a água, a fusão é facilitada pelo aumento de pressão, isto é, quanto maior a pressão, menor a temperatura que o sólido precisa atingir para fundir-se.

É o que representa a curva de fusão ao lado.

- A – Estado sólido
- B – Equilíbrio das fases sólida e líquida
- C – Estado líquido

Cada ponto da curva de fusão faz a correspondência entre uma temperatura de fusão (solidificação) e uma pressão. Assim, em cada um desses pontos, as fases sólida e líquida podem apresentar-se em equilíbrio: obtemos mais líquido quando fornecemos mais calor ao sistema e mais sólido quanto mais retiramos calor do sistema.

Experimento de Tyndall (Regelo)

Como vimos, um aumento de pressão provoca uma diminuição na temperatura de fusão do gelo.

Baseado nesse fato, o físico irlandês John Tyndall (1820-1893) elaborou um experimento que recebeu seu nome. Ele apoiou as extremidades de uma barra de gelo a uma temperatura pouco inferior a 0 °C e colocou sobre ela, na parte central, um fio metálico, em cujas extremidades havia corpos de pesos convenientes.

Após algum tempo, o fio atravessou a barra sem que ela fosse dividida.

A explicação do fenômeno é o regelo.

Dá-se o nome de **regelo** ao fenômeno que consiste na ressolidificação da água por diminuição da pressão.

No experimento de Tyndall, o aumento de pressão provocado pelo fio diminui a temperatura de fusão do gelo, fazendo com que ele se funda. Para isso, a parte que sofre fusão retira calor das partículas que estão ao lado e que, no entanto, não tiveram acréscimo de pressão. Após a passagem do fio, o aumento de pressão é suprimido e a água no estado líquido devolve o calor "emprestado", voltando ao estado sólido, o que constitui o regelo.

Curva de vaporização

Curva de vaporização é a representação gráfica da pressão ambiente (p) em função da temperatura de ebulição (θ) do líquido.

Quanto maior a pressão sobre um líquido, maior a temperatura necessária para que ele entre em ebulição. É o que mostra a curva de vaporização ao lado.

Cada ponto da curva de vaporização representa uma situação de possível equilíbrio entre o líquido e seu vapor. Se mais calor é fornecido, forma-se mais vapor; se o calor é retirado, forma-se mais líquido.

Curva de sublimação

Curva de sublimação é a representação gráfica da pressão ambiente (p) em função da temperatura de sublimação (θ) do sólido.

Quanto maior é a pressão sobre um sólido, maior a temperatura em que ocorre a sublimação. É o que mostra a curva de sublimação ao lado.

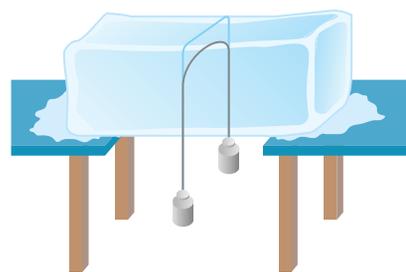
Cada ponto da curva representa uma situação de possível equilíbrio entre o sólido e seu vapor.

Observe que a curva de sublimação estende-se até próximo do zero absoluto, temperatura em que se admite nula a pressão máxima de vapor do sólido.



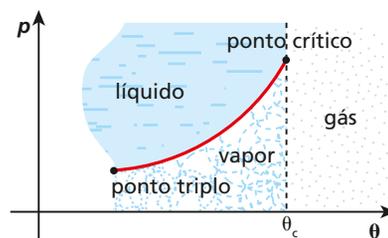
Martyn F. Chilmald/SP/Latinstock

// Na solidificação, a água (uma das exceções à regra geral) tem seu volume aumentado. Na fotografia, a garrafa de vidro quebra-se quando a água existente em seu interior se solidifica.

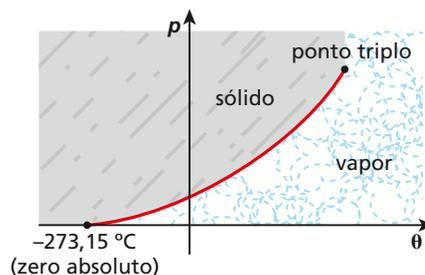


Banco de imagens/Arquivo da editora

// Ilustração do experimento de Tyndall.

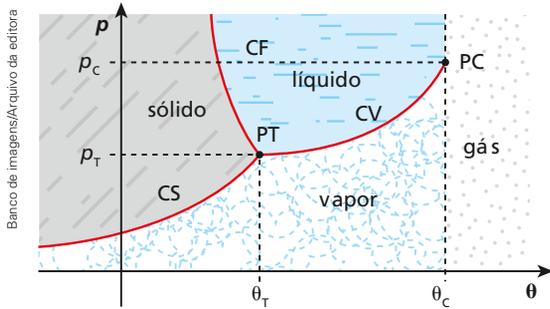
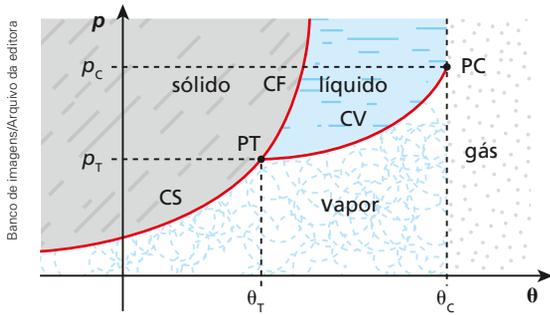


Banco de imagens/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

15. Diagramas de estado



Denomina-se **diagrama de estado** de uma substância o gráfico que representa suas curvas de fusão, vaporização e sublimação.

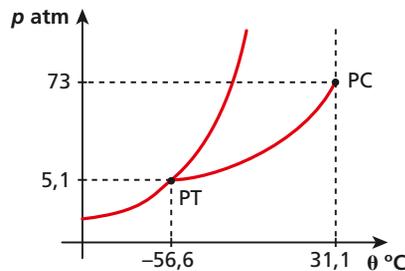
Para a maioria das substâncias, o diagrama de estado é do tipo ao lado.

- CF: curva de fusão
- PT: ponto triplo
- CV: curva de vaporização
- PC: ponto crítico
- CS: curva de sublimação

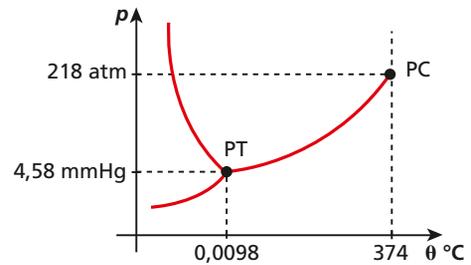
Para as exceções, como a água, o diagrama de estado tem o aspecto ao lado.

Observe que a diferença entre os diagramas encontra-se na curva da fusão-solidificação, quando podemos ter exceções à regra geral.

Veja dois exemplos de diagramas de estado:



// Diagrama de estado do dióxido de carbono (CO_2).



// Diagrama de estado da água (H_2O).

Sobrefusão

No resfriamento de um líquido, eventualmente podem ser atingidas temperaturas abaixo da que corresponde à de solidificação da substância, e ainda assim a substância se manter líquida.

Na **sobrefusão** (ou **superfusão**), uma substância encontra-se no estado líquido abaixo da sua temperatura de solidificação.

A sobrefusão é um estado de equilíbrio metaestável (capaz de perder a estabilidade por meio de pequenas perturbações), ou seja, em que existe aparente equilíbrio, mas há uma passagem muito lenta para outro estado. Uma simples agitação, ou mesmo a introdução de uma pequena porção sólida, perturba o fenômeno e provoca uma brusca solidificação parcial ou total do líquido. A temperatura eleva-se até o ponto de solidificação. Essa elevação de temperatura é provocada pelo calor liberado pela parte do líquido que se solidifica (a solidificação é uma transformação exotérmica).

Veja o gráfico ao lado que representa um resfriamento com sobrefusão: Consideremos uma massa M de um líquido em sobrefusão a uma temperatura θ ($\theta < \theta_s$). Ao agitarmos o recipiente, uma parte m da massa total do líquido solidifica-se, liberando uma quantidade de calor suficiente para o aquecimento de todo o sistema, que volta à temperatura de solidificação (θ_s).

A relação que descreve o fenômeno é:

$$m L_s = M c_{\text{liq}} (\theta_s - \theta)$$

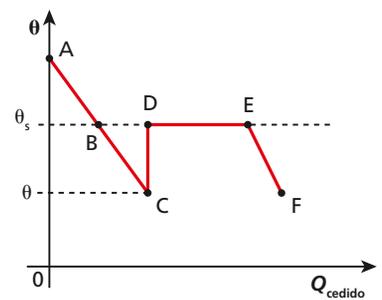
Superebulição

Nos procedimentos comuns de aquecimento de uma porção de água sobre a chama de um fogão ou em um forno a gás (ou elétrico), sob pressão normal, a ebulição acontece na temperatura de 100 °C. Mas se isso ocorre em um forno de micro-ondas, existe a possibilidade de a água atingir uma temperatura maior do que 100 °C sem ebulição.

Quando aquecemos água sobre a chama de um fogão, notamos que primeiro é aquecida aquela em contato com as paredes do recipiente, provocando as correntes de convecção, isto é, uma movimentação ascendente e descendente das partículas do líquido. Em um forno de micro-ondas sem prato giratório, esse aquecimento se dá de maneira quase igual, tanto para as partículas das superfícies como para as do interior do líquido, de maneira que não produza as correntes de convecção. Dessa forma, temperaturas maiores do que a de ebulição podem ser atingidas sem alterações no estado metaestável (de precária estabilidade) do arranjo molecular da água. Porém, qualquer agitação do recipiente pode quebrar essa estabilidade, produzindo uma ebulição violenta.

Experimentalmente observa-se que, para atingirmos esse estado de superaquecimento (quando o líquido se encontra a uma temperatura maior do que a sua temperatura de ebulição), é preciso utilizar um forno de micro-ondas sem o prato giratório (para não agitar o líquido), no interior de um recipiente não metálico (de preferência, vidro refratário). Utilizando água destilada, pode-se conseguir o estado líquido a até 108 °C, aproximadamente. Quando o líquido está superaquecido, uma leve agitação do recipiente pode provocar uma ebulição violenta, quase uma explosão. Como a transição do líquido para o vapor requer uma grande quantidade de calor, assim que a ebulição deixa de ocorrer, a temperatura do líquido que restou fica menor do que sua temperatura de ebulição na pressão existente. Em outras palavras, a uma atmosfera, a água restante estaria a uma temperatura menor do que 100 °C.

Esse fenômeno do superaquecimento pode ocorrer com qualquer líquido; por isso, quando aquecemos água ou leite no micro-ondas, devemos ter muito cuidado ao retirarmos o recipiente do forno, pois, se o líquido estiver superaquecido, uma ebulição violenta pode lançar gotas com temperaturas maiores do que 100 °C em nossas mãos, produzindo graves queimaduras.



Banco de imagens/Arquivo da editora

/// No trecho **BC** da curva de resfriamento, a substância encontra-se em sobrefusão, estando ainda líquida a temperaturas inferiores à de solidificação (θ_s).



Sérgio Dotta Jr./The Next

/// Nesta fotografia observamos água destilada superaquecida. A temperatura registrada no termômetro foi obtida aquecendo-se a água em um forno de micro-ondas sem o prato giratório.

A água

A água é a principal responsável pela existência da vida em nosso planeta. Acredita-se que há 3,5 bilhões de anos tenham surgido, na água, os primeiros compostos orgânicos que originariam os seres vivos: as bactérias. O desenvolvimento da vida sempre esteve ligado à água, que é o elemento predominante na constituição de animais e vegetais. Nos humanos, ela é responsável por quase 75% de sua massa.

Encontramos na Terra cerca de $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ de água nos diferentes estados físicos. Praticamente 97% é salgada (em oceanos e mares) e apenas 3% da água essencial à vida é doce. E, desses 3%, menos de um centésimo está acessível no estado líquido distribuído na superfície do planeta; o restante é gelo nos polos, água subterrânea de difícil acesso ou vapor de água na atmosfera. Então, somente essa pequena porção de água doce encontrada em rios e lagos é que mantém a vida terrestre. Por isso o uso desordenado de produtos químicos, que polui de maneira irreversível a água, pode comprometer o futuro da vida na Terra.

No estudo das características da água, notamos que seu calor específico sensível ($1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$) é bastante alto, fazendo sua presença, em grandes quantidades, um fator de estabilidade da temperatura. Para esfriar a água, libera-se energia térmica; para esquentá-la, absorve-se energia térmica. Por esse motivo, em regiões litorâneas ou onde exista um grande lago, as amplitudes térmicas (variações de temperatura) são pequenas e a vegetação e a fauna costumam ser bastante extensas e diversificadas. Como a água cobre quase $2/3$ da superfície de nosso planeta, o clima global é bastante influenciado por sua presença.

O vapor de água na atmosfera terrestre ajuda o efeito estufa benéfico, aumentando a retenção da energia térmica emitida pela Terra, não deixando a temperatura diminuir muito à noite. Durante o dia, esse vapor reflete e retém parte da energia solar, evitando que a superfície do planeta se aqueça em demasia.

Na solidificação, a água aumenta de volume enquanto a maioria das substâncias diminui. Isso faz a densidade do gelo ser menor do que a da água, o que leva o gelo a flutuar nela. Em regiões de invernos rigorosos, a solidificação de lagos e rios ocorre apenas na superfície, existindo água a uma temperatura maior que $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (zero grau Celsius) em seu fundo. Como o gelo é um bom isolante térmico, a vida, assim, é preservada. E após o degelo, na primavera, a vida animal e vegetal no interior desses lagos e rios volta a se desenvolver normalmente.

O seu calor específico latente de vaporização (540 cal/g) também é um importante fator de regulação do clima. Na evaporação da água, calor é absorvido para a mudança de estado, isto é, em locais com grandes áreas ocupadas por água, como uma represa, a temperatura é mais amena. A evaporação da água retira energia térmica do meio ambiente.

SPL/Fotoarena



/// O gelo (água em estado sólido) flutua na água em estado líquido. Na fotografia, observamos um *iceberg* com aproximadamente nove décimos de seu volume imersos em água.



O experimento de Tyndall

Após a leitura da parte teórica, em que entramos em contato com situações interessantes, como a **sobrefusão**, a **superebulição** e o **regelo**, você deve ter pensado em realizar uma atividade experimental para reproduzir pelo menos um desses fenômenos físicos. O mais fácil de ser reproduzido é o regelo.

Material necessário

- 1 barra grande de gelo;
- 1 fio de aço com aproximadamente 1 metro de comprimento;
- 2 corpos iguais e pesados, como dois halteres pequenos (com 1 kg ou pouco mais).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Procedimento

- I. Amarre cada corpo em uma das extremidades do fio de aço.
- II. Apoie a barra de gelo em dois suportes (como duas mesas pequenas) e coloque o fio sobre

ela de modo que os corpos pesados fiquem pendentes.

- III. Observe o fio de aço descendo lentamente e atravessando o bloco de gelo. Note a "cicatrização" rápida no "corte" deixado pelo fio, que deverá ser retirado por baixo da barra sem que ela seja dividida em duas partes. Cuide para que os corpos pesados não caiam no chão.

Desenvolvimento

1. O que ocorre com a parte do gelo que recebe a pressão do fio de aço?
2. Como o fio consegue passar pelo gelo?
3. Após a passagem do fio, o que ocorre com a água? Explique sua resposta.
4. Procure na parte teórica um diagrama que possa ilustrar o ocorrido e discuta com seus colegas o fenômeno do regelo, tentando explicá-lo por meio desse gráfico.
5. Por que a barra de gelo não se dividiu em duas partes? Converse com seus colegas, levantando hipóteses a respeito.

Exercícios Nível 1

99. Leia as afirmativas a seguir.

- (01) A sublimação de uma substância corresponde à sua passagem do estado sólido para o estado líquido.
- (02) A temperatura de sublimação de uma substância cresce com o aumento de pressão.
- (04) Gelo-seco é a denominação comercial do dióxido de carbono (CO_2 sólido). Quando este é deixado sobre uma mesa, vai "desaparecendo". A explicação é que ele está sublimando.
- (08) A passagem de uma substância do estado sólido para o gasoso, ou vice-versa, sem que se transforme em líquido, é denominada sublimação.
- Dê como resposta a soma dos valores associados às afirmativas corretas.

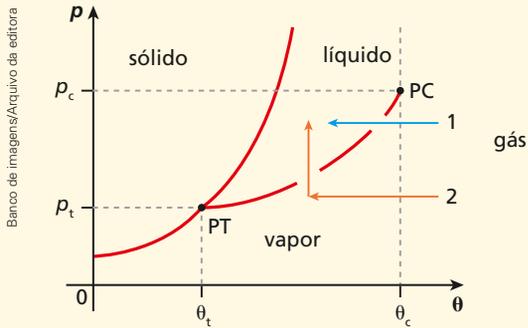
100. A temperatura do ponto triplo corresponde:
- a) ao conjunto do zero absoluto, da temperatura de fusão e da temperatura de ebulição de uma substância.

- b) à temperatura em que uma substância pode ter suas fases líquida, de vapor e de gás coexistindo em equilíbrio.
- c) à temperatura crítica de uma substância.
- d) à coexistência, em equilíbrio, das fases sólida, líquida e de vapor de uma mesma substância.
- e) Nenhuma das afirmações anteriores está correta.

101. Para liquefazer um gás, deve-se:

- E.R.**
- a) comprimi-lo isotermicamente a uma temperatura acima da crítica.
 - b) apenas levá-lo a uma temperatura abaixo da crítica.
 - c) simplesmente comprimi-lo, qualquer que seja sua temperatura.
 - d) diminuir sua temperatura abaixo da crítica e, se necessário, comprimi-lo.
 - e) É impossível liquefazer um gás.

Resolução:

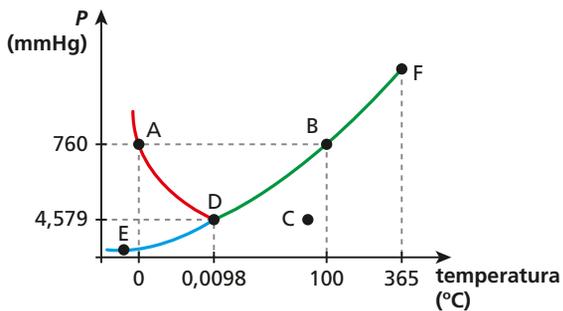


Observando o diagrama de fases acima, se a substância está inicialmente no estado gasoso, há duas possibilidades para liquefazê-la, dependendo da pressão do gás:

1. Se o gás está inicialmente no ponto 1, devemos apenas diminuir a sua temperatura suficientemente para que ele passe do estado gasoso para o estado líquido.
2. Se o gás está inicialmente no ponto 2, devemos primeiramente diminuir sua temperatura abaixo da temperatura crítica (θ_c) e, em seguida, aumentar a pressão do gás. Para aumentar a pressão do gás, é necessário comprimi-lo.

Resposta: alternativa **d**.

- 102.** Experimentos realizados com água levaram à construção do diagrama de estado representado na figura a seguir, que não foi feita em escala correta.



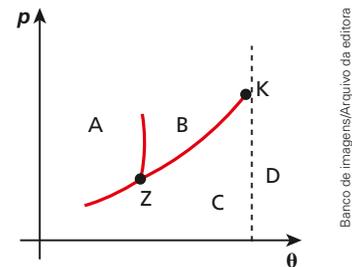
Nesse gráfico podemos observar as curvas da **fusão-solidificação** (linha divisória entre os estados sólido e líquido), da **vaporização-liquefação** (linha divisória entre os estados líquido e vapor) e da **sublimação-ressublimação** (linha divisória entre os estados sólido e vapor). Encontramos ainda o **ponto triplo** (ponto de equi-

líbrio dos estados sólido, líquido e gasoso) e a **temperatura crítica** (acima da qual o vapor torna-se gás).

Podemos afirmar que:

- No ponto **A** encontramos a água nos estados líquido e gasoso.
- No ponto **B** encontramos a água nos estados sólido e gasoso.
- No ponto **C** encontramos a água no estado líquido.
- No ponto **D** a água encontra-se apenas no estado gasoso.
- No ponto **E** encontramos gelo e água no estado de vapor.

- 103.** O diagrama de estado de uma substância é esquematizado abaixo:



Agora, leia as afirmativas:

- (01) Na região **A**, a substância encontra-se no estado sólido.
- (02) Na região **B**, a substância encontra-se no estado líquido.
- (04) Nas regiões **C** e **D**, a substância encontra-se no estado de vapor.
- (08) **K** é o ponto triplo e **Z**, o ponto crítico dessa substância.
- (16) Na região **D**, a substância não pode ser liquefeita por mera compressão isotérmica.
- (32) A curva que liga os pontos **Z** e **K** chama-se curva da sublimação, pois separa as regiões de líquido e vapor.

Dê como resposta a soma dos valores associados às afirmativas corretas.

- 104.** (Unesp-SP) A liofilização é um processo de desidratação de alimentos que, além de evitar que seus nutrientes saiam junto com a água, diminui bastante sua massa e seu volume, facilitando o armazenamento e o transporte. Alimentos liofilizados também têm seus prazos de validade

aumentados, sem perder características como aroma e sabor.

cenoura liofilizada



(www.sublimar.com.br)

kiwi liofilizado



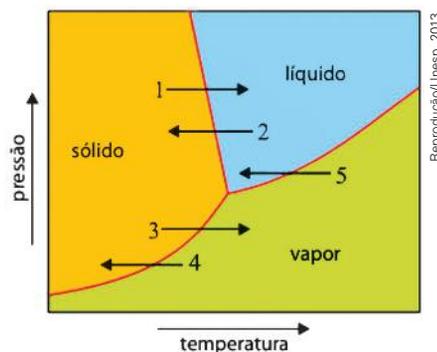
(www.brasile scola.com)

O processo de liofilização segue as seguintes etapas:

- I. O alimento é resfriado até temperaturas abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, para que a água contida nele seja solidificada.
- II. Em câmaras especiais, sob baixíssima pressão (menores do que $0,006\text{ atm}$), a temperatura do

alimento é elevada, fazendo com que a água sólida seja sublimada. Dessa forma, a água sai do alimento sem romper suas estruturas moleculares, evitando perdas de proteínas e vitaminas.

O gráfico mostra parte do diagrama de fases da água e cinco processos de mudança de fase, representados pelas setas numeradas de 1 a 5.



A alternativa que melhor representa as etapas do processo de liofilização, na ordem descrita, é

- | | | |
|----------|----------|----------|
| a) 4 e 1 | c) 2 e 3 | e) 5 e 3 |
| b) 2 e 1 | d) 1 e 3 | |

Exercícios Nível 2

105. *“A cachoeira do Escorrega, observada na foto, está localizada na região de Visconde de Mauá, alto da Serra da Mantiqueira, na divisa com o Parque Nacional de Itatiaia, entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Nessa região, cuja altitude é de 1 200 metros, encontramos diversos rios, cachoeiras e piscinas naturais de águas límpidas e cristalinas. Perfeito para combater o estresse do dia a dia da cidade grande.”*



Após ler o anúncio, um vestibulando passou a sonhar com um passeio por esse lindo local. Fechou os olhos e sentiu a brisa em seu rosto enquanto deslizava pela pedra molhada. No entanto, a necessidade de estudar trouxe-o de volta à realidade. Olhou em seu livro e encontrou um exercício que trazia o seguinte texto, acompanhado de uma tabela.

Sabe-se que a temperatura de ebulição da água, em uma panela sem tampa, é função da pressão atmosfera local. Na tabela da página seguinte, encontramos a temperatura de ebulição da água em diferentes pressões. Ao nível do mar (altitude zero), a pressão atmosférica vale 76 cmHg e ela diminui $1,0\text{ cmHg}$ para cada 100 metros que aumentamos a altitude.

Temperatura de ebulição da água em função da pressão

Pressão em cmHg	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100
Temperatura em °C	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	109

Imediatamente pensou: “a que temperatura a água existente em uma panela destampada ferve em Visconde de Mauá?”. Assinale a temperatura correta, considerando os dados encontrados no texto.

- a) 102 °C
- b) 100 °C
- c) 98 °C
- d) 97 °C
- e) 95 °C

Resolução:

Se a pressão atmosférica é de 1,0 cmHg para cada 100 m de aumento da altitude, a 120 m, temos:

$$p = p_0 - \Delta p$$

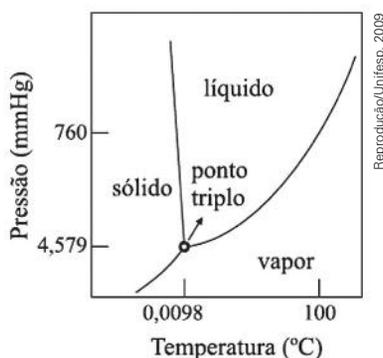
$$p = (76 - 12) \text{ cmHg} \Rightarrow p = 64 \text{ cmHg}$$

Procurando na tabela, encontramos:

$$\theta_E = 95 \text{ °C}$$

Resposta: alternativa **e**.

- 106.** (Unifesp) A sonda *Phoenix*, lançada pela Nasa, detectou em 2008 uma camada de gelo no fundo de uma cratera na superfície de Marte. Naquele planeta, o gelo desaparece nas estações quentes e reaparece nas épocas frias, mas a água nunca foi observada na fase líquida. Com auxílio do diagrama de fase da água, analise as três afirmações seguintes:

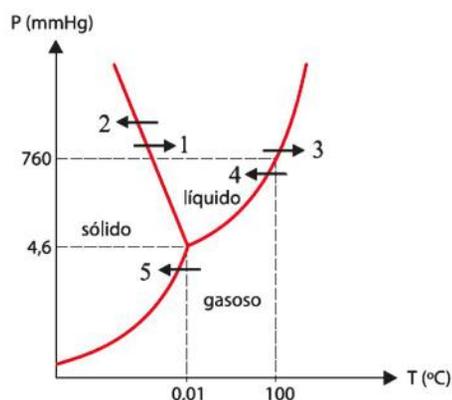


- I. O desaparecimento e o reaparecimento do gelo, sem a presença da fase líquida, sugerem a ocorrência de sublimação.
- II. Se o gelo sofre sublimação, a pressão atmosférica local deve ser muito pequena, inferior à pressão do ponto triplo da água.
- III. O gelo não sofre fusão porque a temperatura no interior da cratera não ultrapassa a temperatura do ponto triplo da água.

De acordo com o texto e o diagrama de fases, pode-se afirmar que está correto o contido em:

- a) I, II e III;
- b) II e III apenas;
- c) I e III apenas;
- d) I e II apenas
- e) I, apenas.

- 107.** (Unesp-SP) Entre 6 e 23 de fevereiro aconteceram os Jogos Olímpicos de Inverno de 2014. Dentre as diversas modalidades esportivas, o *curling* é um jogo disputado entre duas equipes sobre uma pista de gelo, seu objetivo consiste em fazer com que uma pedra de granito em forma de disco fique o mais próximo de um alvo circular. Vassouras são utilizadas pelas equipes para varrer a superfície do gelo na frente da pedra, de modo a influenciar tanto sua direção como sua velocidade. A intensidade da fricção e a pressão aplicada pelos atletas durante o processo de varredura podem fazer com que a velocidade da pedra mude em até 20% devido à formação de uma película de água líquida entre a pedra e a pista. O gráfico apresenta o diagrama de fases da água.



(Tito Miragaia Peruzzo e Eduardo Leite do Canto. *Química na abordagem do cotidiano*, 2006. Adaptado.)

- Com base nas informações constantes no texto e no gráfico, a seta que representa corretamente a transformação promovida pela varredura é a de número
- a) 3
 - b) 2
 - c) 4
 - d) 1
 - e) 5

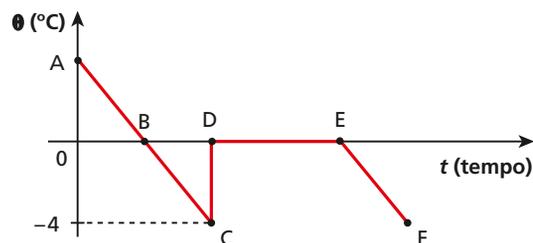
108. Deixam-se cair algumas gotas de água sobre uma chapa muito quente. As gotas "chiam" e deslizam sobre a chapa porque o líquido é imediatamente aquecido, formando-se uma camada de:
- líquido entre a chapa e o vapor.
 - vapor entre a chapa e o ar.
 - água entre a gota e o fogo.
 - vapor entre o fogo e a chapa.
 - vapor entre cada gota e a chapa.

109. As grandes geleiras que se formam no alto das montanhas deslizam porque:
- o gelo é muito liso, ocorrendo pequeno atrito entre o bloco de gelo e o chão.
 - a componente tangencial do peso é a única força atuante sobre as geleiras.
 - o vento as desgruda do chão.
 - o aumento de pressão na parte inferior das geleiras, devido ao seu peso, funde o gelo, soltando-as do chão.

110. O que acontece quando se agita um recipiente contendo água em sobrefusão?
- Necessariamente, toda a água solidifica-se, acarretando uma queda na temperatura do recipiente.
 - Parte da água solidifica-se, acarretando uma queda na temperatura do recipiente.

- A água solidifica-se total ou parcialmente, acarretando um aumento na temperatura do recipiente.
- Necessariamente, toda a água solidifica-se, acarretando um aumento na temperatura do recipiente.
- Nada do que foi dito ocorre.

111. O gráfico a seguir mostra a curva de resfriamento de 100 g de água, em um processo lento e sem agitação.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Sendo o calor latente de fusão do gelo igual a 80 cal/g e o calor específico da água 1,0 cal/g °C, qual a massa de água que se solidifica no trecho CD?

112. A que temperatura encontram-se 100 g de água em sobrefusão, se a solidificação brusca de um quinto dessa água eleva a temperatura do sistema ao ponto de solidificação?

Dados: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

DESCUBRA MAIS

- Pesquise e descubra o que é o **ponto de orvalho**.
- Um dos maiores temores dos agricultores de certas regiões do Brasil é a **geada**, fenômeno meteorológico que pode destruir plantações. Explique como e quando ocorre a geada.
- Em dias muito quentes, é comum observarmos cães grandes e peludos com a boca aberta, a língua de fora e arfando rapidamente. Pesquise e tente explicar por que os cães arfam.

Exercícios Nível 3

113. (Unicamp-SP) O Parque Güell em Barcelona é um dos mais impressionantes parques públicos do mundo e representa uma das obras mais marcantes do arquiteto Antoni Gaudí. Em sua obra, Gaudí utilizou um número imenso de azulejos coloridos.
- Considere que, no Parque Güell, existe um número $N = 2 \cdot 10^6$ de azulejos cujas faces estão perfeitamente perpendiculares à di-

reção da radiação solar quando o sol está a pino na cidade de Barcelona. Nessa situação, a intensidade da radiação solar no local é $I = 1200 \text{ W/m}^2$. Estime a área de um azulejo tipicamente presente em casas e, a partir da área total dos N azulejos, calcule a energia solar que incide sobre esses azulejos durante um tempo $t = 60 \text{ s}$.

b) Uma das esculturas mais emblemáticas do parque Güell tem a forma de um réptil multicolorido conhecido como *EL Drac*, que se converteu em um dos símbolos da cidade de Barcelona. Considere que a escultura absorva, em um dia ensolarado, uma quantidade de calor $Q = 3500 \text{ kJ}$. Considerando que a massa da escultura é $m = 500 \text{ kg}$ e seu calor específico é $c = 700 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, calcule a variação de temperatura sofrida pela escultura, desprezando as perdas de calor para o ambiente.

114. Um jovem apaixonado entrou em uma joalheria e escolheu um anel para presentear sua namorada. O joalheiro garantiu que no anel, de 10 gramas, 90% eram ouro e 10% eram cobre. Para ter certeza, o estudante levou o anel até o laboratório de Física da sua escola e realizou um experimento de calorimetria, a fim de determinar a massa real de ouro. O anel foi aquecido em uma estufa até atingir a temperatura de $522 \text{ }^\circ\text{C}$ e, em seguida, foi colocado no interior de um calorímetro com água. O sistema calorímetro-água tem capacidade térmica equivalente à de 100 gramas de água e está à temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura final de equilíbrio térmico foi de $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sabe-se que:

I. o calor específico da água vale $1,00 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; o do ouro, $0,030 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$; e o do cobre, $0,090 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

II. o calor específico de uma liga metálica é igual à média ponderada dos calores específicos dos metais integrantes da liga, sendo as respectivas massas os pesos da média.

Dessa forma, o estudante determinou que a massa real de ouro no anel era, aproximadamente, igual a:

- | | |
|----------------|----------------|
| a) 5,0 gramas. | d) 9,0 gramas. |
| b) 7,5 gramas. | e) 9,8 gramas. |
| c) 8,3 gramas. | |

115. (Unesp-SP) As pontes de hidrogênio entre moléculas de água são mais fracas que a ligação covalente entre o átomo de oxigênio e os átomos de hidrogênio. No entanto, o número de ligações de hidrogênio é tão grande (bilhões de moléculas em uma única gota de água) que estas exercem grande influência sobre as propriedades da

água, como, por exemplo, os altos valores do calor específico, do calor de vaporização e de solidificação da água. Os altos valores do calor específico e do calor de vaporização da água são fundamentais no processo de regulação de temperatura do corpo humano. O corpo humano dissipa energia, sob atividade normal por meio do metabolismo, equivalente a uma lâmpada de 100 W . Se em uma pessoa de massa 60 kg todos os mecanismos de regulação de temperatura parassem de funcionar, haveria um aumento de temperatura de seu corpo. Supondo que todo o corpo é feito de água, em quanto tempo, aproximadamente, essa pessoa teria a temperatura de seu corpo elevada em $5 \text{ }^\circ\text{C}$?

Dado: calor específico da água $\cong 4,2 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

- a) 1,5 h
- b) 2,0 h
- c) 3,5 h
- d) 4,0 h
- e) 5,5 h

116. (Enem) O Sol representa uma fonte limpa e inesgotável de energia para o nosso planeta. Essa energia pode ser captada por aquecedores solares, armazenada e convertida posteriormente em trabalho útil. Considere determinada região cuja insolação – potência solar incidente na superfície da Terra – seja de 800 watts/m^2 . Uma usina termossolar utiliza concentradores solares parabólicos que chegam a dezenas de quilômetros de extensão. Nesses coletores solares parabólicos, a luz refletida pela superfície parabólica espelhada é focalizada em um receptor em forma de cano e aquece o óleo contido em seu interior a $400 \text{ }^\circ\text{C}$. O calor desse óleo é transferido para a água, vaporizando-a em uma caldeira. O vapor em alta pressão movimenta uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica.

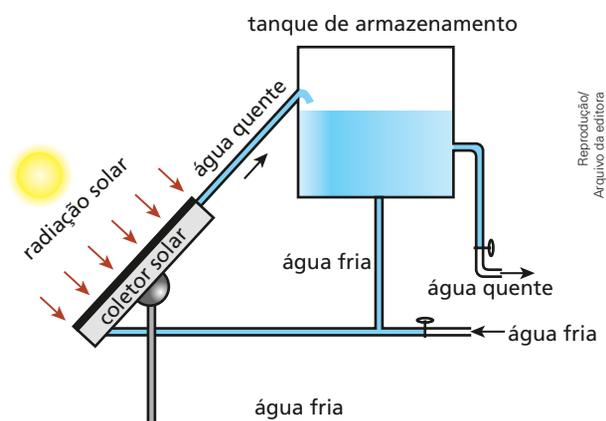


Reprodução/Enem, 2008

Considerando que a distância entre a borda inferior e a borda superior da superfície refletora tenha 6 m de largura e que focaliza no receptor os 800 W/m^2 de radiação provenientes do Sol, e que o calor específico da água é $1 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, então o comprimento linear do refletor parabólico necessário para elevar a temperatura de 1 m^3 (equivalente a 1 t) de água de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ para $100 \text{ }^\circ\text{C}$, em uma hora, estará entre

- a) 15 m e 21 m.
- b) 22 m e 30 m.
- c) 105 m e 125 m.
- d) 680 m e 710 m.
- e) 6700 m e 7150 m.

117. (Faap-SP) Em um **coletor solar**, uma folha metálica de cor negra absorve a radiação solar, que se transforma em calor, utilizado no aquecimento da água contida no **tanque de armazenamento**.



Em um certo local, a intensidade média da radiação solar incidente é de $500 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ (ou seja,

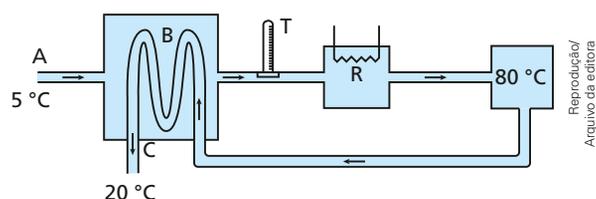
500 J de energia solar atingem 1 m^2 da superfície da Terra a cada segundo). Deseja-se aquecer 200 litros de água de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ em 8 h. Sabendo-se que esse processo tem rendimento de 40%, a área útil do **coletor solar** deve ter um valor mais próximo de:

- a) 20 m^2 .
- b) 27 m^2 .
- c) 13 m^2 .
- d) 6 m^2 .
- e) 2 m^2 .

Dados para a água: $c = 4 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}^\circ}$;
 $d = 1 \text{ kg/L}$

118. (Fuvest-SP) O processo de pasteurização do leite consiste em aquecê-lo a altas temperaturas, por alguns segundos, e resfriá-lo em seguida. Para isso, o leite percorre um sistema, em **fluxo constante**, passando por três etapas:

- I. O leite entra no sistema (através de **A**), a $5 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo aquecido (no trocador de calor **B**) pelo leite que já foi pasteurizado e está saindo do sistema.
- II. Em seguida, completa-se o aquecimento do leite, por meio da resistência **R**, até que ele atinja $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Com essa temperatura, o leite retorna a **B**.
- III. Novamente em **B**, o leite quente é resfriado pelo leite frio que entra por **A**, saindo do sistema (através de **C**), a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



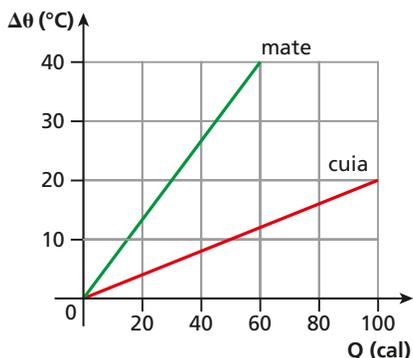
Em condições de funcionamento estáveis, e supondo que o sistema seja bem isolado termicamente, pode-se afirmar que a temperatura indicada pelo termômetro **T**, que monitora a temperatura do leite na saída de **B**, é aproximadamente de:

- a) $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- b) $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- c) $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- d) $65 \text{ }^\circ\text{C}$.
- e) $75 \text{ }^\circ\text{C}$.

119.



Observe o gráfico a seguir, que mostra o desempenho térmico de uma cuia e do mate que serão utilizados para servir um chimarrão. Dentro da cuia vão ser introduzidos $100,0 \text{ mL}$ de água quente, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto todos os demais elementos e aparatos – cuia, mate e bomba de prata – encontram-se em equilíbrio térmico com o ambiente, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Sabendo-se que a massa da bomba de prata (utilizada para sorver a bebida) é igual a 50,0 g, que os calores específicos sensíveis da água e da prata valem, respectivamente, 1,00 cal/g °C e 0,05 cal/g °C e que a densidade da água é igual a 1,0 g/mL, desprezando-se quaisquer trocas de calor entre o sistema e o ambiente, pede-se determinar:

- A relação, R , entre as capacidades térmicas da cuia e do mate.
- O valor aproximado da temperatura de equilíbrio térmico, θ , que será estabelecida no sistema.

120. (Unip-SP) Um bloco de gelo de massa M está a uma temperatura inicial θ . O bloco de gelo recebe calor de uma fonte térmica de potência constante. Admita que todo o calor fornecido pela fonte é absorvido pelo bloco.

O intervalo de tempo para o gelo atingir a sua temperatura de fusão é igual ao intervalo de tempo que durou sua fusão completa.

Considere os seguintes dados:

- calor específico sensível do gelo: 0,50 cal/g °C;
- temperatura de fusão do gelo: 0 °C;
- calor específico latente de fusão do gelo: 80 cal/g.

O valor de θ :

- não está determinado, porque não foi dada a massa M do bloco de gelo.
- não está determinado, porque não foi dada a potência da fonte térmica que forneceu calor ao bloco de gelo.
- é -160 °C.
- é -80 °C.
- é -40 °C.

121. (UFF-RJ) Um grupo de amigos se reúne para fazer um churrasco. Levam um recipiente térmico adiabático contendo uma quantidade de gelo a

-4 °C e 60 latas com 350 mL de refrigerante, cada uma. As latas são de alumínio e quando foram colocadas no recipiente estavam a uma temperatura de 22 °C.

Considere que a densidade e o calor específico do refrigerante sejam, aproximadamente, iguais aos da água.

Sabendo-se que, no equilíbrio térmico, a temperatura no interior do recipiente adiabático é 2 °C, calcule:

- a quantidade de calor cedida pelas latas e pelo refrigerante;
- a massa de gelo, em quilogramas, que foi colocada no recipiente.

Dados: calor específico do gelo: $c_g \cong 0,50$ cal/g °C; calor específico da água: $c_a \cong 1,0$ cal/g °C; calor específico do alumínio: $c_{Al} \cong 0,22$ cal/g °C; calor latente de fusão do gelo: $L \cong 80$ cal/g; massa de alumínio em cada lata: $m_{lata} \cong 30$ g; densidade da água: $\rho_a \cong 1,0$ g/cm³.

122. (Fuvest-SP) Um forno solar simples foi construído com uma caixa de isopor, forrada internamente com papel-alumínio e fechada com uma tampa de vidro de 40 cm × 50 cm.

Dentro desse forno, foi colocada uma pequena panela contendo 1 xícara de arroz e 300 mL de água à temperatura ambiente de 25 °C. Suponha que os raios solares incidam perpendicularmente à tampa de vidro e que toda a energia incidente na tampa do forno a atravesse e seja absorvida pela água. Para essas condições, calcule:

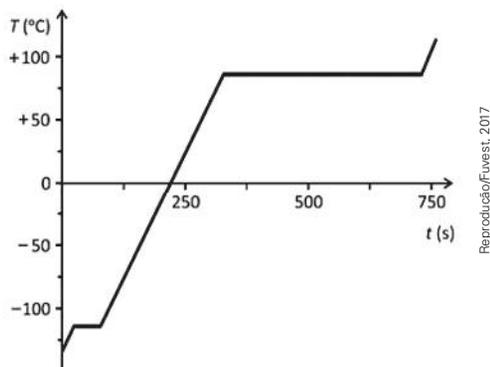
- A potência solar total P absorvida pela água.
- A energia E necessária para aquecer o conteúdo da panela até 100 °C.
- O tempo total T necessário para aquecer o conteúdo da panela até 100 °C e evaporar $\frac{1}{3}$ da água nessa temperatura [cozer o arroz].

Note e adote:

Potência solar incidente na superfície da Terra: 1 kW/m²;
 Densidade da água: 1 g/cm³;
 Calor específico da água: 4 J/(g · °C);
 Calor latente de evaporação da água: 2 200 J/g.

Desconsidere as capacidades caloríficas do arroz e da panela.

123. (Fuvest-SP) Um cilindro termicamente isolado tem uma de suas extremidades fechadas por um pistão móvel, também isolado, que mantém a pressão constante no interior do cilindro. O cilindro contém uma certa quantidade de um material sólido à temperatura $T_i = -134\text{ }^\circ\text{C}$. Um aquecedor transfere continuamente $3\,000\text{ W}$ de potência para o sistema, levando-o à temperatura final $T_f = 114\text{ }^\circ\text{C}$. O gráfico e a tabela apresentam os diversos processos pelos quais o sistema passa em função do tempo.



Processo	Intervalo de tempo (s)	$\Delta T (^\circ\text{C})$
I	0 - 24	20
II	24 - 78	0
III	78 - 328	200
IV	328 - 730	0
V	730 - 760	28

- Determine a energia total, E , fornecida pelo aquecedor desde $T_i = -134\text{ }^\circ\text{C}$ até $T_f = 114\text{ }^\circ\text{C}$.
- Identifique, para esse material, qual dos processos (I, II, III, IV ou V) corresponde à mudança do estado sólido para o estado líquido.
- Sabendo que a quantidade de energia fornecida pelo aquecedor durante a vaporização é $1,2 \times 10^6\text{ J}$, determine a massa, M , do material.
- Determine o calor específico a pressão constante, c_p , desse material no estado líquido.

Note e adote:

Calor latente de vaporização do material = 800 J/g .

Desconsidere as capacidades térmicas do cilindro do pistão.

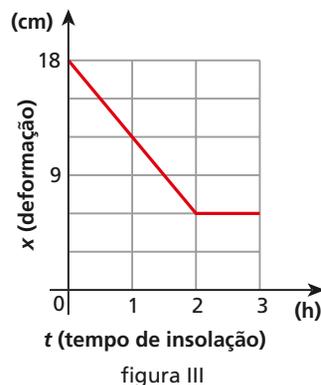
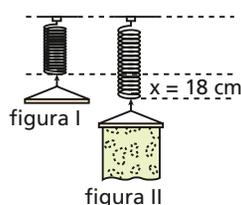
124. (Unifesp) Os líquidos podem transformar-se em vapor por evaporação ou ebulição. Enquanto a evaporação é um fenômeno espontâneo, restrito à superfície do líquido e que pode ocorrer à temperatura e pressão ambientes, a ebulição ocorre em todo o líquido sob condições de pressão e temperatura determinadas para cada líquido. Mas ambas as transformações, para se efetivarem, exigem o consumo da mesma quantidade de calor por unidade de massa transformada.

a) Quando as roupas são estendidas nos varais, ou a água no piso molhado de um ambiente é puxada pelo rodo, tem-se por objetivo apressar a secagem – transformação da água em vapor – dessas roupas ou do piso. Qual a causa comum que se busca favorecer nesses procedimentos? Justifique.

b) Avalia-se que a área da superfície da pele de uma pessoa adulta seja, em média, da ordem de $1,0\text{ m}^2$. Suponha que, ao sair de uma piscina, uma pessoa retenha junto à pele uma camada de água de espessura média $0,50\text{ mm}$. Qual a quantidade de calor que essa camada de água consome para evaporar? Que relação tem esse cálculo com a sensação de frio que sentimos quando estamos molhados, mesmo em dias quentes? Justifique.

Dados: densidade da água = $1\,000\text{ kg/m}^3$; calor latente de vaporização da água = $2\,300\text{ kJ/kg}$.

125. (Fuvest-SP)



A figura I representa um cabide dependurado na extremidade de uma mola de constante elástica $k = 50\text{ N/m}$. Na figura II, tem-se a nova situação de equilíbrio logo após a roupa molhada ser colocada no cabide e ser exposta ao Sol para secar, provocando na mola uma deformação inicial $x = 18\text{ cm}$. O tempo de insolação foi mais do que suficiente para secar a roupa completamente.

A variação da deformação da mola (em cm) em função do tempo (em horas) em que a roupa ficou sob a ação dos raios solares está registrada no gráfico da figura III ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Considere que cada grama de água para vaporizar absorve 500 cal de energia e determine:

- o peso da água que evaporou;
- a potência média de radiação solar absorvida pela roupa supondo ser ela a única responsável pela evaporação da água.

126. (FGV-SP) O vaporizador é um aparelho que permite aumentar a umidade do ar em um ambiente. A vaporização ocorre por intermédio de um resistor, que permanece ligado enquanto estiver em contato com a água. Uma vez esgotada essa água, o aparelho se desliga automaticamente. Um desses vaporizadores, contendo 200 mL de água, inicialmente a 20°C , permaneceu funcionando, ininterruptamente, por 2 h até se desligar. Considerando que toda energia dissipada pelo resistor é transferida para a água, que todo o vapor produzido é lançado para o ambiente e que a vaporização ocorre à temperatura de ebulição, pode-se concluir que a potência do aparelho, medida em W, é, aproximadamente:

Dados: calor específico da água = $1 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; calor latente de vaporização da água = 540 cal/g ; densidade da água = 1 g/mL ; temperatura de vaporização da água = 100°C ; $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$.

- 32.
- 46.
- 69.
- 78.
- 84.

127. (Unifesp) Atualmente, o *laser* de CO_2 tem sido muito aplicado em microcirurgias, onde o feixe luminoso é utilizado no lugar do bisturi de lâmina. O corte com o *laser* é efetuado porque o feixe provoca um rápido aquecimento e a evaporação do tecido, que é constituído principalmente de água. Considere um corte de 2,0 cm de comprimento, 3,0 mm de profundidade e 0,5 mm de largura, que é aproximadamente o diâmetro do feixe. Sabendo que a massa específica da água é 10^3 kg/m^3 , o calor específico é $4,2 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ e o calor latente de evaporação é $2,3 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$:

- estime a quantidade de energia total consumida para fazer essa incisão, considerando que, no processo, a temperatura do tecido se eleva 63°C e que este é constituído exclusivamente de água.

- se o corte é efetuado a uma velocidade de $3,0 \text{ cm/s}$, determine a potência do feixe, considerando que toda a energia fornecida foi gasta na incisão.

128. (Fuvest-SP) Quando água pura é cuidadosamente resfriada, nas condições normais de pressão, pode permanecer no estado líquido até temperaturas inferiores a 0°C , em um estado instável de "superfusão".

Se o sistema é perturbado, por exemplo, por vibração, parte da água se transforma em gelo e o sistema se aquece até estabilizar em 0°C . O calor latente de fusão do gelo é igual a 80 cal/g . Considerando um recipiente termicamente isolado e de capacidade térmica desprezível, contendo 1 L de água a $-5,6^\circ\text{C}$, à pressão normal, determine:

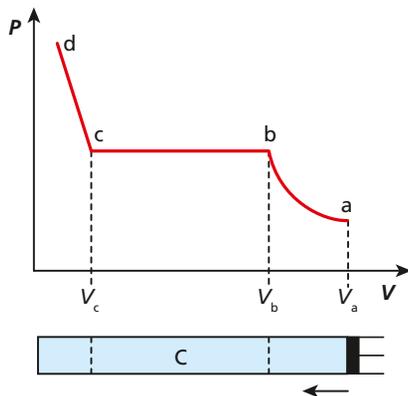
- a quantidade, em gramas, de gelo formada, quando o sistema é perturbado e atinge uma situação de equilíbrio a 0°C ;
- a temperatura final de equilíbrio do sistema e a quantidade de gelo existente (considerando o sistema inicial no estado de "superfusão" a $-5,6^\circ\text{C}$), ao colocar-se no recipiente um bloco metálico de capacidade térmica igual a $400 \text{ cal/}^\circ\text{C}$, à temperatura de 91°C .

129. (Unifesp) Sobrefusão é o fenômeno em que um líquido permanece nesse estado a uma temperatura inferior à de solidificação, para a correspondente pressão. Esse fenômeno pode ocorrer quando um líquido cede calor lentamente, sem que sofra agitação. Agitado, parte do líquido solidifica, liberando calor para o restante, até que o equilíbrio térmico seja atingido à temperatura de solidificação para a respectiva pressão. Considere uma massa de 100 g de água em sobrefusão à temperatura de -10°C e pressão de 1 atm, o calor específico da água de $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ e o calor latente de solidificação da água de -80 cal/g . A massa de água que sofrerá solidificação se o líquido for agitado será:

- 8,7 g.
- 10,0 g.
- 12,5 g.
- 50,0 g.
- 60,3 g.

130. (Ufla-MG) A figura a seguir é usada para mostrar uma experiência de laboratório. No cilindro **C**, provido de êmbolo, coloca-se certa quantidade de vapor (CO_2 , por exemplo); mantendo-se

constante a temperatura, o volume do cilindro é diminuído gradativamente, empurrando-se o êmbolo para a esquerda. O gráfico do cilindro mostra como varia a pressão no cilindro em função do volume. Baseados nessa experiência apresentamos três proposições.



- I. A pressão P_c ou P_b corresponde à maior pressão que o vapor pode oferecer, a determinada temperatura, antes de começar a condensação.
- II. De V_b a V_c (patamar) coexistem, no cilindro, uma mistura de líquido e vapor.
- III. Quando o êmbolo atinge o volume V_c , todo vapor se condensou e, a partir daí, uma pequena diminuição de volume acarreta um grande aumento da pressão.

Indique a alternativa correta.

- a) Apenas a proposição I é correta.
- b) Apenas as proposições I e II são corretas.
- c) Apenas as proposições I e III são corretas.
- d) Apenas as proposições II e III são corretas.
- e) As proposições I, II e III são corretas.

Para raciocinar um pouco mais

- 131.** (UFC-CE) N recipientes, $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$, contêm, respectivamente, massas m a uma temperatura $T, \frac{m}{2}$ a uma temperatura $\frac{T}{2}, \frac{m}{4}$ a uma temperatura $\frac{T}{4}, \dots, \frac{m}{2^{N-1}}$, de um mesmo líquido. Os líquidos dos N recipientes são misturados, sem que haja perda de calor, atingindo uma temperatura $\frac{T}{2^{N-1}}$ final de equilíbrio T_f .
- a) Determine T_f , em função do número de recipientes N .
 - b) Determine T_f , se o número de recipientes for infinito.
- 132.** (ITA-SP) Calcule a área útil das placas de energia solar de um sistema de aquecimento de água, para uma residência com quatro moradores, visando manter um acréscimo médio de $30,0^\circ\text{C}$ em relação à temperatura ambiente. Considere que cada pessoa gasta 30,0 litros de água quente por dia e que, na latitude geográfica da residência, a conversão média mensal de energia é de 60,0 kWh/mês por metro quadrado de superfície coletora. Considere ainda que o reservatório de água quente com capacidade para 200 litros apresente uma perda de energia de 0,30 kWh por mês para cada litro. É dado o calor específico da água $c = 4,19 \text{ J/g}^\circ\text{C}$.

- 133.** A unidade de medida de calor no sistema inglês é a **Btu** (*British Thermal Unit*) e a unidade de medida de calor que utilizamos com frequência no Brasil é a **caloria** (cal). Sabe-se que 1 cal é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 g de água pura de $14,5^\circ\text{C}$ até $15,5^\circ\text{C}$ e que 1 Btu é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 lb (uma libra) da mesma água de 39°F até 40°F . Sabendo-se que $1 \text{ g} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ lb}$, qual a relação entre as unidades caloria e Btu?
- 134.** (Unicamp-SP) Em 2015, estima-se que o câncer será responsável por uma dezena de milhões de mortes em todo o mundo, sendo o tabagismo a principal causa evitável da doença. Além das inúmeras substâncias tóxicas e cancerígenas contidas no cigarro, a cada tragada, o fumante aspira fumaça a altas temperaturas, o que leva à morte células da boca e da garganta, aumentando ainda mais o risco de câncer.
- a) Para avaliar o efeito nocivo da fumaça, $N_0 = 9,0 \cdot 10^4$ células humanas foram expostas, em laboratório, à fumaça de cigarro à temperatura de 72°C , valor típico para a fumaça tragada pelos fumantes. Nos primeiros instantes, o número de células que perma-

Usando essas informações, determine a **umidade relativa** do ar no interior de uma sala de 5,0 metros de comprimento, 4,0 metros de largura e 3,0 metros de altura que contém 441 gramas de vapor de água misturados com o ar, na temperatura de 20 °C.

- a) 23%
- b) 35%
- c) 42%
- d) 58%
- e) 71%

139. Observe as informações:

- I. A umidade relativa do ar corresponde à razão entre a pressão parcial de vapor existente no local e a pressão de vapor saturado na temperatura local.
- II. O ser humano sente-se confortável quando a umidade relativa do ar está por volta de 50%. Uma umidade maior que 50% reduz a evaporação do suor da pele, provocando desconforto. Uma umidade menor que 50% tem um efeito secante na pele e na mucosa.
- III. A tabela a seguir mostra a pressão máxima de vapor de água em função da temperatura.

θ (°C)	0	5	10	15	20
p (mmHg)	4,58	6,54	9,21	12,8	17,5
θ (°C)	25	30	40	50	60
p (mmHg)	23,8	31,8	55,3	92,5	149

Fonte: LIDE, David R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2004. p. 6-8.

Uma pessoa encontra-se em um ambiente onde a temperatura é de 25 °C e a pressão de vapor de água é de 16,2 mmHg. Pode-se afirmar que:

- a) nesse local está chovendo.
- b) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é menor que 50%.
- c) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é igual a 89%.
- d) essa pessoa pode estar sentindo sua pele ressecada.
- e) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é aproximadamente igual a 68%.

140. (Unicamp-SP) Pressão parcial é a pressão que um gás pertencente a uma mistura teria se o mesmo gás ocupasse sozinho todo o volume disponível. Na temperatura ambiente, quando a umidade relativa do ar é de 100%, a pressão parcial de vapor de água vale $3,0 \cdot 10^3$ Pa. Nesta situação, qual seria a porcentagem de moléculas de água no ar?

- a) 100%.
- b) 97%.
- c) 33%.
- d) 3%.

Dados: a pressão atmosférica vale $1,0 \cdot 10^5$ Pa. Considere que o ar se comporta como um gás ideal.

141. (OBF) Uma arma dispara um projétil de chumbo (calor específico $c_{pb} = 0,031$ cal/°C) de massa 20,0 g, que se move de encontro a um grande bloco de gelo fundente (calor latente de fusão $L = 80$ cal/g). No impacto, o projétil tem sua velocidade reduzida de 100 m/s para 0 m/s se entra em equilíbrio térmico com o gelo. Não havendo dissipação de energia, ocorre a fusão de 2,25 g de gelo. Qual era a temperatura do projétil no momento do impacto?

Dado: 1 cal = 4 J.

142. Sabe-se que a energia contida em um fóton é estabelecida pela relação:

$$E = hf$$

onde h é a constante de Planck e f , a frequência da radiação. A equação fundamental da Ondulatória é:

$$v = \lambda f$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação e v é a velocidade de propagação da onda.

Resolva a questão dada a seguir.

Um volume de 0,5 mL de água é aquecido por radiação de comprimento de onda igual a $1,0 \cdot 10^4$ Å, absorvendo $4,2 \cdot 10^{18}$ fótons por segundo. Considerando que toda a energia de cada fóton é absorvida pela água, determinar o intervalo de tempo necessário para que esse volume sofra a elevação de 1,0 K em sua temperatura.

Dados: densidade da água = $1,0 \cdot 10^3$ kg/m³; calor específico sensível da água = $4,2 \cdot 10^3$ J/(kg · K); constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js; velocidade da luz no vácuo = $3,0 \cdot 10^8$ m/s.

Gases perfeitos



Reprodução/World View Enterprises, Inc

// Balões de alta altitude, como o da imagem, são capazes de voar até o limite da atmosfera. Eles são muito utilizados para o monitoramento climático, além de serem úteis para pesquisas. Esse tipo de balão possui um revestimento para a sua proteção contra as baixas temperaturas existentes no espaço que poderiam desinflá-lo.

Vimos em tópicos anteriores que gás é um dos estados da matéria. Macroscopicamente, matéria em estado gasoso não apresenta forma ou volume definidos. Já microscopicamente, o estado gasoso é caracterizado por partículas (átomos, moléculas, íons, elétrons, etc.) que se movimentam de maneira aproximadamente aleatória. Apesar disso, é possível estudar a maioria dos gases com base em um modelo teórico chamado gás perfeito. A partir desse modelo, podemos estabelecer relações entre as variáveis que caracterizam o gás (pressão, volume e temperatura) e entender o movimento microscópico das partículas que compõem o gás que determinam as grandezas temperatura e energia do gás.

1. Introdução

Quando se pensa em um gás, o primeiro exemplo que costuma vir à cabeça de quase todo mundo é o ar que respiramos. Esse ar, que forma a atmosfera terrestre, é uma mistura de vários gases, na qual predominam o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%). Em razão dos campos gravitacional e magnético de nosso planeta, esses gases são atraídos e formam uma fina cobertura, com praticamente 99% da atmosfera contida em uma faixa que vai da superfície terrestre a pouco mais de 30 km de altitude. Essa camada gasosa é essencial à vida por conter o oxigênio e filtrar grande parte das radiações nocivas aos seres vivos, como a ultravioleta. O oxigênio é consumido pela respiração de alguns organismos, os quais expõem um subproduto desse processo, o gás carbônico. Este, por sua vez, é absorvido por plantas, que, pela fotossíntese, o transformam em oxigênio.

O peso da atmosfera produz uma pressão sobre a superfície da Terra, evitando que a água líquida de oceanos, mares, rios e lagos se transforme rapidamente em vapor.

Os gases sempre fizeram parte de nosso dia a dia. Assim, a partir do século XVII, vários cientistas, ao iniciarem estudos sobre as propriedades dos gases, notaram que deveriam fazer uma simplificação, já que não havia uma uniformidade no comportamento de todos os gases. Daí o surgimento do modelo teórico que foi denominado **gás perfeito** ou **gás ideal**. Faremos, a seguir, um estudo desse modelo que será muito útil mais adiante.

2. Modelo macroscópico de gás perfeito

No Tópico 3, fizemos a distinção entre vapor e gás, que constituem o estado gasoso. Lembremos que gás é a situação física de uma substância que se encontra a uma temperatura maior que a sua temperatura crítica.

Os diferentes gases reais (hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, hélio, etc.), devido às suas características moleculares, em geral apresentam comportamentos diferentes. Quando são colocados sob baixas pressões e altas temperaturas, entretanto, passam a se comportar, macroscopicamente, de maneira semelhante.

Assim, para iniciar o estudo dos gases, é conveniente adotarmos um modelo teórico, simples, sem existência prática, de comportamento apenas aproximado ao comportamento dos gases reais. Essa aproximação será tanto melhor quanto menor for a pressão e maior for a temperatura. A esse modelo chamamos de **gás perfeito**.

As regras do comportamento dos gases perfeitos foram estabelecidas por Robert Boyle, Jacques Charles, Louis Joseph Gay-Lussac e Paul Emile Clapeyron entre os séculos XVII e XIX, como veremos adiante.

Diremos, então, que um gás se enquadra no modelo teórico de gás perfeito se obedece às leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac – que veremos oportunamente com detalhes. Tais leis estabelecem as regras do comportamento “externo” do gás perfeito, levando-se em conta as grandezas físicas a ele associadas – temperatura, volume e pressão –, denominadas **variáveis de estado** do gás.



Antonio S/Shutterstock

Por que o céu visto nesta paisagem é azul? A resposta vem do fato de a atmosfera ser constituída de gases que provocam a dispersão da luz branca do Sol.

3. As variáveis de estado de um gás perfeito

Sempre que considerarmos determinada massa de um gás, estaremos estabelecendo uma quantidade N de partículas desse gás. Esse número N , entretanto, é sempre muito grande, da ordem de 10^{20} partículas por centímetro cúbico.

No local onde você se encontra, há aproximadamente, em cada centímetro cúbico, 10^{20} moléculas dos componentes do ar (oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, etc.).

Por ser mais cômodo, costuma-se quantificar uma porção de gás por meio do seu **número de mols** (n).

Um mol de um gás constitui-se de um número de moléculas desse gás, dado pelo **número de Avogadro** ($A = 6,02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol). O número de mols é obtido dividindo-se a massa do gás (m) pela sua massa molar ou molécula-grama (M), ambos na mesma unidade.

$$n = \frac{\text{massa do gás}}{\text{mol}} = \frac{m}{M}$$

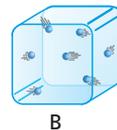
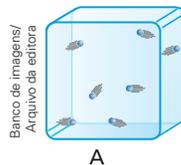
Vimos que, para determinada massa de gás perfeito, as variáveis de estado são as grandezas físicas temperatura (T), volume (V) e pressão (p).

A **temperatura** é a grandeza física que está relacionada à energia cinética de translação das partículas do gás, como veremos oportunamente.

Como usaremos para temperatura a escala absoluta Kelvin, o símbolo adotado será T . Lembremos que:

$$T(\text{K}) = \theta_c(^{\circ}\text{C}) + 273$$

Sendo os gases extremamente expansíveis, suas moléculas ocupam todo o espaço disponível no recipiente que os contém. Assim, o **volume** do gás corresponde à capacidade do recipiente.



// Duas porções iguais (mesmo número de partículas) de um mesmo gás perfeito, colocadas em dois recipientes de capacidades diferentes, ocupam volumes diferentes ($V_A > V_B$).

As unidades de volume que encontraremos com maior frequência são o metro cúbico (m^3) e o litro (L).

Atenção:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

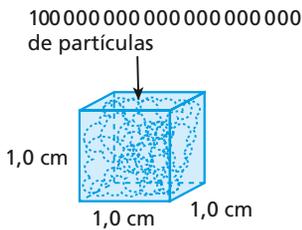
$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$$

A **pressão** é uma grandeza escalar, definida como a razão entre a intensidade da força resultante, aplicada perpendicularmente a uma superfície, e a área dessa superfície.

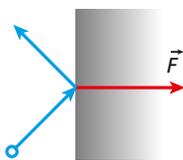
A pressão numa superfície de área A , quando nela aplicamos uma força resultante normal (perpendicular) de módulo F , é definida pela relação:

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

Banco de imagens/
Arquivo da editora



Banco de imagens/
Arquivo da editora



// Observe que cada partícula de gás exerce uma pequena força na superfície. Deve-se considerar apenas as componentes perpendiculares à superfície onde estão ocorrendo as colisões.

As unidades mais usadas para pressão são o pascal (Pa), a atmosfera técnica métrica (atm), a atmosfera normal (At) e o milímetro de mercúrio (mmHg), valendo as equivalências:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ At} = 760 \text{ mmHg} \cong 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ kgf/cm}^2 \cong 10^5 \text{ Pa}$$

A pressão média que o gás exerce nas paredes internas do recipiente é devida aos choques de suas moléculas com essas paredes. Por ocasião desses choques, as moléculas aplicam força nas paredes.

Considere uma superfície **S** de área unitária contida em uma das paredes do recipiente.

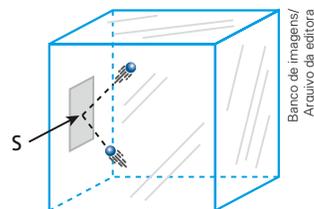
A cada instante, a força total aplicada em **S** pelas *N* moléculas que sobre ela estão incidindo determina a pressão média exercida pelo gás. É previsível que essa pressão não deva variar, se forem mantidas as condições do gás, pois teremos, a cada instante, o mesmo número *N* de moléculas chocando-se contra **S** e exercendo a mesma força total. Se, porém, introduzirmos mais gás no recipiente ou diminuirmos o seu volume, sem variarmos a temperatura, o número *N* de choques em **S** a cada instante aumentará. Com isso, a pressão média exercida pelo gás também aumentará, apesar de não se ter alterado a violência de cada choque.

Experimentos mostram, porém, que, se aquecermos o gás a volume constante, a pressão média também aumentará. Isso evidencia que a temperatura do gás está relacionada com a energia cinética de translação de suas moléculas. Nesse experimento, a pressão média aumenta porque tanto o número *N* de moléculas que se chocam contra **S** como a força exercida ali pelas moléculas aumentam.

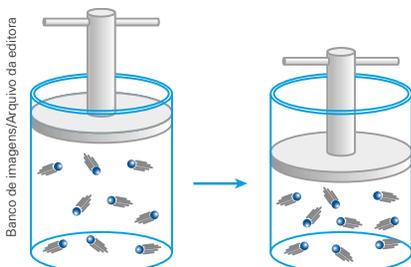
Destaquemos que:

- a pressão média exercida por um gás está relacionada a dois fatores: a quantidade de moléculas que colidem por unidade de área e a força exercida em cada choque;
- a temperatura está relacionada de fato com a energia cinética de translação das moléculas do gás.

Aí estão as grandezas físicas temperatura, volume e pressão de um gás perfeito, suas variáveis de estado, que em conjunto definem o comportamento macroscópico do gás. Para determinada massa, a variação de pelo menos duas dessas variáveis de estado caracteriza uma **transformação** sofrida pelo gás.



Banco de imagens/
Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

// No exemplo ilustrado acima, mesmo que a temperatura não se altere, a diminuição de volume produz um aumento de pressão. Esse fato caracteriza uma **transformação** sofrida pelo gás.



Vadim Petrakov/Shutterstock

// O ar existente no interior de um balão é aquecido e se expande, tornando-se menos denso que o ar externo. Esse fato faz com que o balão seja empurrado para cima, pelo empuxo aplicado pelo ar externo, ganhando altitude.



// Retrato de Robert Boyle.

4. Lei de Boyle

Robert Boyle (1627-1691), físico e químico irlandês, foi o responsável pela lei que rege as transformações sofridas por determinada massa de gás perfeito quando sua temperatura se mantém constante (transformação isotérmica).

É de fácil compreensão que uma redução de volume de um gás aumentará a concentração de partículas, aumentando o número de colisões nas paredes do recipiente, provocando um aumento na pressão do gás. Em contrapartida, o aumento do volume irá “espalhar” mais as partículas, diminuindo a concentração de choques nas paredes do recipiente, diminuindo assim a pressão do gás.

Para o modelo de gás perfeito vale o enunciado a seguir.

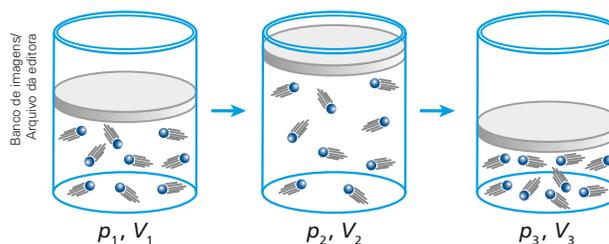
Quando determinada massa de um gás perfeito sofre uma **transformação isotérmica**, sua pressão varia de maneira inversamente proporcional ao volume por ele ocupado.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$pV = K_1$$

em que p é a pressão, V o volume e K_1 uma constante que depende da massa, da temperatura e da natureza do gás.

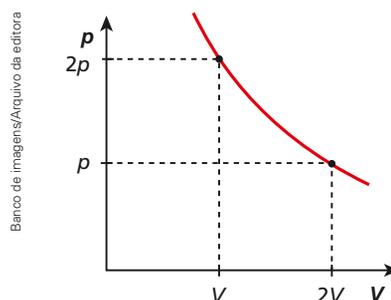
Isso significa, por exemplo, que, à temperatura constante, para dobrarmos o valor da pressão devemos reduzir o valor do volume à metade.



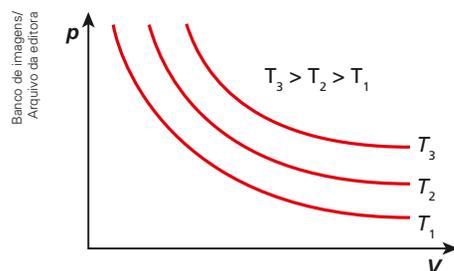
Nessas transformações, a massa e a temperatura do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Boyle** garante a validade da relação:

$$p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3$$

Num diagrama pressão (p) \times volume (V), a representação gráfica da Lei de Boyle é um **ramo de hipérbole**.



Para cada valor da temperatura absoluta do gás obtemos uma hipérbole diferente. Quanto maior a temperatura, mais afastada da origem dos eixos encontra-se a hipérbole.



5. Lei de Charles e Gay-Lussac

A lei que rege a **transformação isobárica**, em que determinada massa de gás perfeito se mantém sob pressão constante, foi estabelecida pelo físico e químico francês Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850). Antes, entretanto, Jacques A. C. Charles (1746-1823), físico francês, já havia apresentado trabalhos a respeito. Por isso, a lei que rege as transformações isobáricas é denominada **Lei de Charles e Gay-Lussac**.

No início deste tópico vimos que a pressão média exercida por um gás depende de dois fatores: da quantidade de partículas que colidem com a unidade de área da superfície interna do recipiente e da força exercida em cada colisão. Assim, se aumentamos o volume de um gás, suas partículas ficam mais espalhadas, diminuindo o número de colisões com a unidade de área. Para compensarmos isso, devemos aumentar a intensidade das colisões, isto é, aumentar a temperatura do gás para manter a pressão constante. Se diminuirmos o volume do gás, as partículas ficarão mais concentradas, aumentando a frequência de colisões nas unidades de área. Para a manutenção da pressão devemos diminuir a intensidade das colisões, isto é, diminuir a temperatura do gás.

Assim, a Lei de Charles e Gay-Lussac pode ser enunciada da seguinte forma:

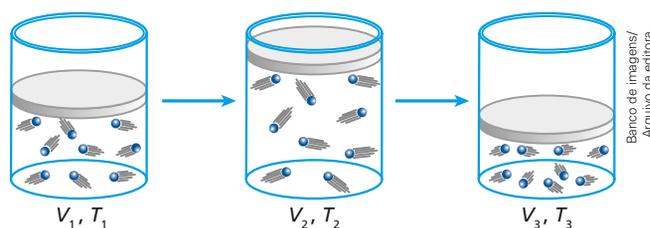
Quando determinada massa de gás perfeito passa por uma **transformação isobárica**, seu volume deve variar, mantendo-se diretamente proporcional à temperatura absoluta desse gás.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$V = K_2 T$$

em que V é o volume ocupado pelo gás, T sua temperatura absoluta e K_2 uma constante que depende da massa, da pressão e da natureza do gás, sendo inversamente proporcional ao valor da pressão, que permanece constante.

Dessa forma, para mantermos constante a pressão de um gás perfeito, ao dobrarmos o valor de sua temperatura absoluta, devemos dobrar a capacidade do recipiente que o contém.



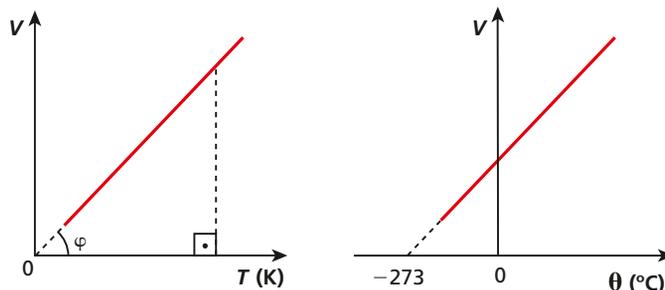
Retrato de Gay-Lussac.

SPL/Lainstock

Nessas transformações, a massa e a pressão do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Charles e Gay-Lussac** garante a validade da relação:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$$

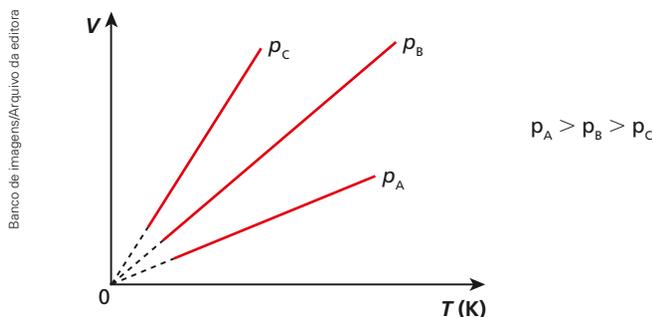
Num diagrama volume (V) \times temperatura (T ou θ), a **Lei de Charles e Gay-Lussac** é representada por um segmento de reta oblíquo aos eixos.



É importante observar que, sendo o gás perfeito um modelo teórico constituído de partículas de volume desprezível, à temperatura correspondente ao zero absoluto, o volume desse gás praticamente se anula.

Para três pressões p_A , p_B e p_C diferentes, sendo $p_A > p_B > p_C$, uma mesma massa de um mesmo gás perfeito apresenta três valores diferentes para K_2 , de forma que $K_{2A} < K_{2B} < K_{2C}$. Observe que K_2 é inversamente proporcional à pressão, sendo que, para a maior pressão, temos o menor valor de K_2 e, portanto, o menor ângulo de declividade φ .

Assim, temos:



// O físico francês Jacques Alexandre Cesar Charles (1746–1823) foi o primeiro a ter a ideia de usar hidrogênio para encher balões aerostáticos.

6. Lei de Charles

Recebe a denominação de **Lei de Charles** a lei que rege as transformações a volume constante de determinada massa de gás. As transformações a volume constante são chamadas de **isovolumétricas**, **isométricas** ou **isocóricas**.

A partir do estudo que fizemos da pressão média exercida por um gás, podemos inferir que, mantendo-se o volume constante, ao aumentarmos a temperatura absoluta, aumentaremos a força média das colisões na unidade de área e a frequência de colisões, já que as partículas estarão mais rápidas. Assim, a pressão do gás aumentará. Por outro lado, se diminuirmos a temperatura absoluta, a intensidade e a frequência das colisões diminuirão, diminuindo a pressão desse gás.

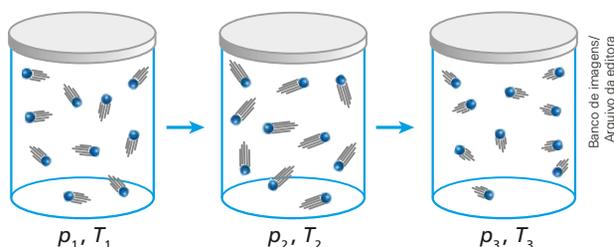
Para nosso modelo de gás perfeito, a **Lei de Charles** pode ser enunciada da seguinte forma:

Quando determinada massa de gás perfeito sofre uma **transformação isométrica**, sua pressão mantém-se diretamente proporcional à sua temperatura absoluta.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$p = K_3 T$$

em que p é a pressão do gás, T a sua temperatura absoluta e K_3 uma constante que depende da massa, do volume e da natureza do gás, sendo inversamente proporcional ao valor do volume, que permanece constante.



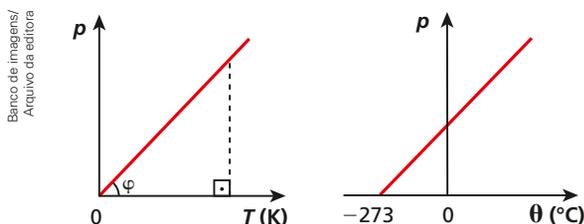
Nessas transformações, a massa e o volume do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Charles** garante a validade da relação:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$$

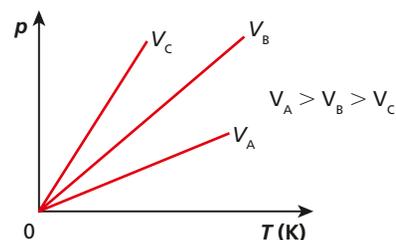
Assim, mantendo-se o volume constante, ao aumentarmos a temperatura absoluta de um gás perfeito, aumentaremos a intensidade de cada choque das partículas nas paredes do recipiente, elevando a pressão na mesma proporção da temperatura absoluta.

Admitindo que no zero absoluto cessa o movimento de translação das moléculas do gás, podemos concluir que a essa temperatura as partículas não mais se chocam com as paredes do recipiente, anulando-se a pressão.

Num diagrama pressão (p) \times temperatura (T ou θ), a Lei de Charles é representada por um segmento de reta oblíquo aos eixos.



Para três volumes V_A , V_B e V_C diferentes, sendo $V_A > V_B > V_C$, uma mesma massa de um mesmo gás perfeito apresenta três valores diferentes para K_3 , de forma que $K_{3A} < K_{3B} < K_{3C}$. Observe que K_3 é inversamente proporcional ao volume, sendo que, para o maior volume, temos o menor valor de K_3 e, portanto, o menor ângulo ϕ .



Faça você mesmo

Enchendo um balão com gás obtido de uma reação química

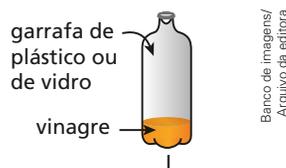
Na teoria deste tópico, aprendemos que a pressão exercida por um gás ocorre pelas colisões de suas partículas com as paredes internas do recipiente. A comprovação desse fato pode ser observada por meio de uma atividade experimental simples e de fácil realização.

Material necessário

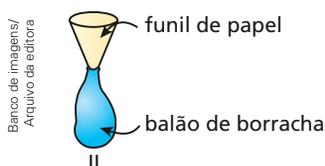
- 1 garrafa plástica de 1 L, transparente e de gargalo estreito, como as embalagens de água mineral;
- 200 mL de vinagre, aproximadamente o equivalente a quatro xícaras de café bem cheias;
- 1 funil, que pode ser feito com uma folha de papel;
- 1 colher de chá bem cheia de bicarbonato de sódio (NaHCO_3), usado como antiácido estomacal e encontrado em qualquer farmácia;
- 1 balão de borracha, desses usados em festas de aniversário.

Procedimento

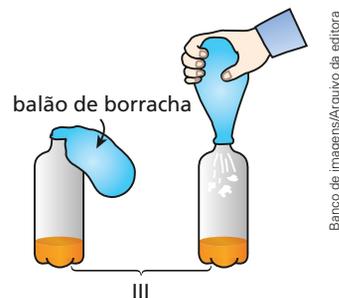
- I. Coloque vinagre no interior da garrafa até aproximadamente um quinto da sua capacidade.



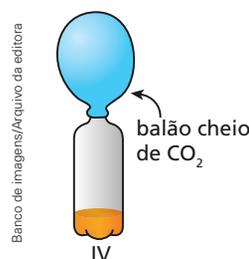
- II. Usando um funil feito com uma folha de papel, coloque o bicarbonato de sódio no interior do balão de borracha.



- III. Em seguida, prenda o bico do balão no gargalo da garrafa e levante-o, de modo que o bicarbonato de sódio caia no interior da garrafa já com o vinagre.



- IV. A reação causada pela mistura de bicarbonato de sódio com vinagre libera uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2) gasoso, que irá provocar a expansão do balão de borracha.



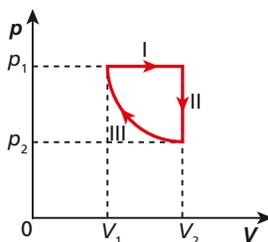
Desenvolvimento

1. A reação causada pela mistura de bicarbonato de sódio com o vinagre libera uma grande quantidade de gás. Que gás é esse? Converse com seu professor de Química e equacione essa reação.
2. Por que o gás liberado pela reação química provoca a expansão do balão?
3. No final da atividade, amarre bem a boca do balão. Retire-o do gargalo da garrafa e leve-o ao interior de um freezer ou do congelador de sua geladeira. Após 30 minutos, observe o balão. Você saberia explicar o que aconteceu com ele?
4. Reúna-se com um grupo de colegas e façam uma pesquisa sobre balonismo. Descubram a função do ar quente na elevação dos balões.

Exercícios Nível 1

- (UFRGS-RS) Um gás encontra-se contido sob a pressão de $5,0 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ no interior de um recipiente cúbico cujas faces possuem uma área de $2,0 \text{ m}^2$. Qual é o módulo da força média exercida pelo gás sobre cada face do recipiente?
- Determinada massa de gás perfeito sofre as transformações indicadas a seguir:
 - Compressão à temperatura constante.
 - Expansão à pressão constante.
 - Aquecimento a volume constante.
 Nessa ordem, as transformações podem ser chamadas também de:
 - isobárica, adiabática e isocórica;
 - isométrica, isotérmica e isobárica;
 - isotérmica, isobárica e adiabática;
 - isométrica, isocórica e isotérmica;
 - isotérmica, isobárica e isométrica.

- (Uneb-BA) Uma amostra de gás ideal sofre as transformações I, II e III, identificadas no gráfico pressão *versus* volume apresentado ao lado.



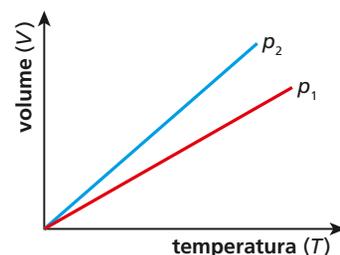
Sabe-se que a transformação III é adiabática.

As transformações I e II são, respectivamente:

- isobárica e isotérmica.
 - isobárica e isométrica.
 - isométrica e isotérmica.
 - isométrica e isobárica.
 - isotérmica e isobárica.
- O diagrama representa três isotermas T_1 , T_2 e T_3 , referentes a uma mesma amostra de gás perfeito. A respeito dos valores das temperaturas absolutas T_1 , T_2 e T_3 , pode-se afirmar que:

- $T_1 = T_2 = T_3$.
- $T_1 < T_2 < T_3$.
- $T_1 > T_2 > T_3$.
- $T_1 = T_2 < T_3$.
- $T_2 > T_1 < T_3$.

- O diagrama mostra duas transformações isobáricas sofridas por uma mesma amostra de gás perfeito.



Com base nesses dados, pode-se afirmar que:

- $p_2 > p_1$.
 - $p_2 < p_1$.
 - $p_2 = p_1$.
 - $p_2 = 2p_1$.
- Num diagrama volume *versus* temperatura absoluta, não se pode comparar diferentes valores da pressão.

- Em um recipiente indeformável, aprisiona-se certa massa de gás perfeito a 27°C . Medindo a pressão exercida pelo gás, obtemos o valor 90 cmHg . Se elevarmos a temperatura para $170,6^\circ\text{F}$, qual será a nova pressão do gás?

Resolução:

Uma vez que o volume permanece constante, podemos aplicar a Lei de Charles, que é expressa da seguinte forma:

$$p = KT \Rightarrow \frac{p}{T} = K$$

Assim, temos:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (I)$$

São dados:

$$p_1 = 90 \text{ cmHg}$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$$

Transformando $170,6^\circ\text{F}$ em unidades da escala Kelvin, temos:

$$\frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{T - 273}{5} \Rightarrow \frac{170,6 - 32}{9} = \frac{T_2 - 273}{5}$$

$$15,4 = \frac{T_2 - 273}{5} \therefore T_2 = 350 \text{ K}$$

Substituindo os valores conhecidos na relação (I), encontramos:

$$\frac{90}{300} = \frac{p_2}{350} \therefore p_2 = 105 \text{ cmHg}$$

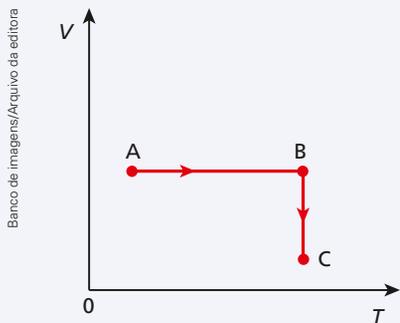
7. Na superfície da Terra, um balão apresenta um volume de 50 m^3 , temperatura de $54 \text{ }^\circ\text{C}$ e pressão de 80 cmHg . Ao subir sua temperatura permanece constante e, em determinada altura, seu volume atinge 1000 m^3 . Qual é a nova pressão suportada pelo balão, em cmHg ?
8. No interior de um cilindro, provido de êmbolo, uma amostra de gás ideal pode sofrer transformações à pressão constante. Determinada massa desse gás foi confinada no interior do recipiente ocupando $0,5 \text{ m}^3$ a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Aquecendo-se o sistema, observou-se o êmbolo subindo até atingir o volume interno de $1,0 \text{ m}^3$. Em graus Celsius, qual é a temperatura do gás no final do experimento?
9. (PUC-SP) Determinada massa de gás perfeito sofre uma transformação isométrica. A pressão

inicial vale $4,0 \text{ atm}$ e a temperatura inicial é de $47 \text{ }^\circ\text{C}$. Se a temperatura final é de $127 \text{ }^\circ\text{C}$, qual é o valor da pressão final?

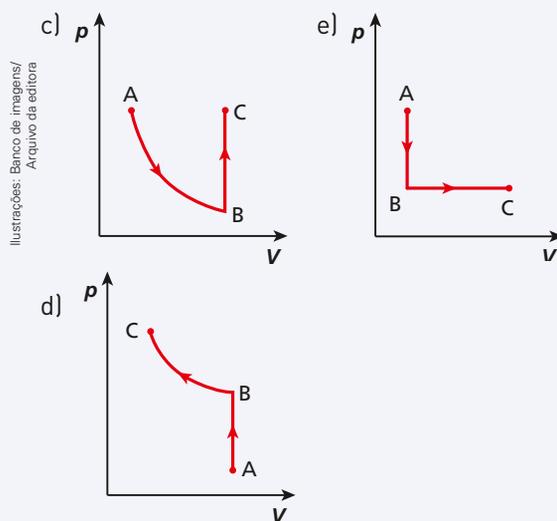
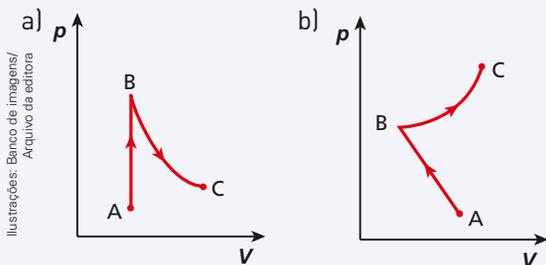
10. (UFPR) O trecho da BR-277 que liga Curitiba a Paranaguá tem sido muito utilizado pelos ciclistas curitibanos para seus treinos. Considere que um ciclista, antes de sair de Curitiba, calibrou os pneus de sua bicicleta com pressão de $30 \text{ libras por polegada ao quadrado (lb/pol}^2\text{)}$, a uma temperatura inicial de $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Ao terminar de descer a serra, ele mediu a pressão dos pneus e constatou que ela subiu para $36 \text{ libras por polegada ao quadrado}$. Considerando que não houve variação do volume dos pneus, calcule o valor da temperatura dos pneus dessa bicicleta nesse instante.

Exercícios Nível 2

11. Um gás perfeito tem como variáveis de estado as grandezas: pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T). O diagrama volume (V) \times temperatura absoluta (T) representa as transformações **AB** e **BC** sofridas por determinada massa de gás perfeito.



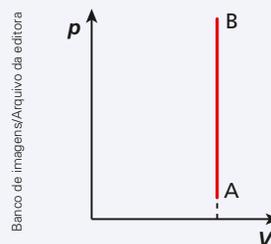
Num diagrama pressão (p) \times volume (V), essas transformações poderiam ser representadas por:



Resolução:

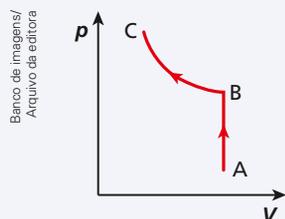
Transformação **AB** (isométrica):

Se a temperatura T do gás aumenta, sua pressão também aumenta.



Transformação **BC** (isotérmica):

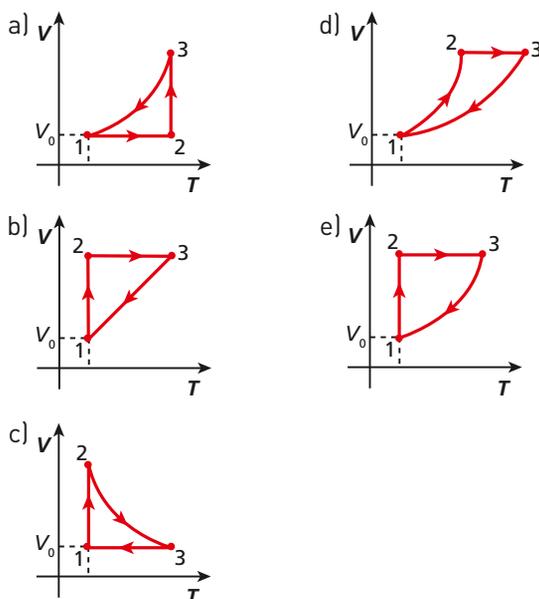
Em um diagrama $p \times V$, a transformação isotérmica é representada por uma hipérbole.



Resposta: alternativa **d**.

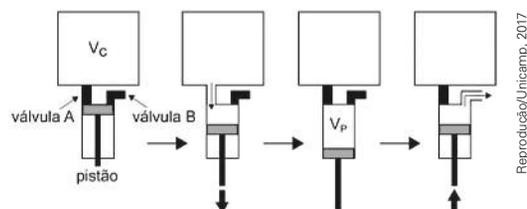
12. (UFMA) Um determinado gás perfeito, contido dentro de um recipiente, ocupa inicialmente um volume V_0 . O gás sofre então uma expansão isotérmica, atingindo o estado 2, a partir do qual passa por um processo de aquecimento isovolumétrico, atingindo o estado 3. Do estado 3, o gás retorna ao estado 1 (inicial) por meio de uma compressão isobárica. Indique qual dos diagramas a seguir representa a sequência dos processos acima:

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora



13. (Unicamp-SP) Fazer vácuo significa retirar o ar existente em um volume fechado. Esse processo é usado, por exemplo, para conservar alimentos ditos embalados a vácuo ou para criar ambientes controlados para experimentos científicos. A figura a seguir representa um pistão que está sendo usado para fazer vácuo em uma câmara de volume constante $V_c = 2,0$ litros. O pistão, ligado à câmara por uma válvula **A**, aumenta o volume que pode ser ocupado pelo ar em $V_p = 0,2$ litros.

Em seguida, a válvula **A** é fechada e o ar que está dentro do pistão é expulso através de uma válvula **B**, ligada à atmosfera, completando um ciclo de bombeamento. Considere que o ar se comporte como um gás ideal e que, durante o ciclo completo, a temperatura não variou.

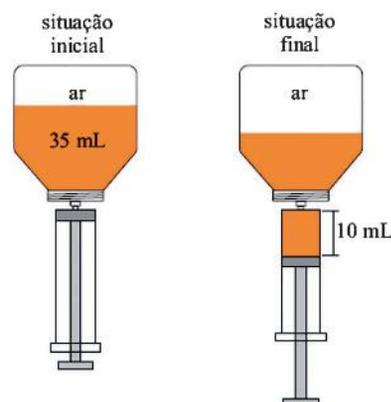


Reprodução/Unicamp, 2017

Se a pressão inicial na câmara é de $P_i = 33$ Pa, a pressão final na câmara após um ciclo de bombeamento será de:

- a) 30,0 Pa.
- b) 330,0 Pa.
- c) 36,3 Pa.
- d) 3,3 Pa.

14. (Unesp-SP) Um frasco para medicamento com capacidade 50 mL contém 35 mL de remédio, sendo o volume restante ocupado por ar. Uma enfermeira encaixa uma seringa nesse frasco e retira 10 mL do medicamento, sem que tenha entrado ou saído ar do frasco. Considere que durante o processo a temperatura do sistema tenha permanecido constante e que o ar dentro do frasco possa ser considerado um gás ideal.



Reprodução/Unesp, 2012

Na situação final em que a seringa com o medicamento ainda estava encaixada no frasco, a retirada dessa dose fez com que a pressão do ar dentro do frasco passasse a ser, em relação à pressão inicial:

- a) 60% maior.
- b) 40% maior.
- c) 60% menor.
- d) 40% menor.
- e) 25% menor.

15. (Fuvest-SP) Uma garrafa tem um cilindro afixado em sua boca, no qual um êmbolo pode se movimentar sem atrito, mantendo constante a massa de ar dentro da garrafa, como ilustra a figura. Inicialmente, o sistema está em equilíbrio à temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. O volume de ar na garrafa é igual a 600 cm^3 e o êmbolo tem uma área transversal igual a 3 cm^2 . Na condição de equilíbrio, com a pressão atmosférica constante, para cada $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ de aumento da temperatura do sistema, o êmbolo subirá aproximadamente



Reprodução/Fuvest, 2016

- a) $0,7\text{ cm}$ c) $2,1\text{ cm}$ e) $6,0\text{ cm}$
 b) $1,4\text{ cm}$ d) $3,0\text{ cm}$

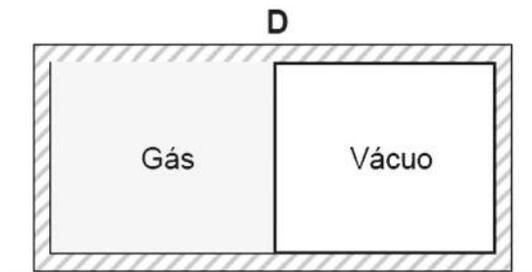
Note e adote:

$$0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$$

Considere o ar da garrafa como um gás ideal.

16. Certa massa de gás perfeito está em um recipiente de volume constante. No início, a temperatura do gás é de $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a pressão registrada é equivalente a 100 mmHg . Qual será a nova pressão do gás se a sua temperatura for alterada para $207\text{ }^{\circ}\text{C}$?
17. Uma garrafa metálica aprisiona ar a uma temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob pressão de $1,2\text{ atm}$. Essa garrafa é colocada no interior de um forno e é aquecida até que sua tampa seja ejetada. Supondo que o ar se comporte como um gás perfeito, a dilatação da garrafa seja desprezível e a condição para a tampa ser ejetada é uma pressão igual a $2,8\text{ atm}$, qual é a temperatura do ar no instante em que ela escapa da garrafa?
18. (UFPE) Um recipiente, feito de um material isolante térmico, consiste de duas partições iguais separadas por uma divisória **D** (ver figura). No lado direito do recipiente, faz-se vácuo e, na partição da esquerda, se introduz um mol de um gás ideal. Quando a divisória é removida, o gás se

expande livremente (isto é, sem realizar trabalho) e atinge um novo estado de equilíbrio termodinâmico. Determine a razão $\frac{P_{\text{antes}}}{P_{\text{depois}}}$ entre as pressões antes e depois da remoção da divisória.



Reprodução/UFPE, 2011

19. (Unesp-SP) Uma panela de pressão com capacidade de 4 litros contém, a uma temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 litros de água líquida à pressão de 1 atm . Em seguida, ela é aquecida até que a temperatura do vapor seja de $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, o volume de água líquida caia para $2,8\text{ litros}$ e o número de moléculas do vapor dobre. A panela começa a deixar escapar vapor por uma válvula, que entra em ação após a pressão interna do gás atingir um certo valor máximo. Considerando o vapor como um gás ideal, determine o valor dessa pressão máxima.
20. (Unifesp) Você já deve ter notado como é difícil abrir a porta de um *freezer* logo após tê-la fechado, sendo necessário aguardar alguns segundos para abri-la novamente. Considere um *freezer* vertical cuja porta tenha $0,60\text{ m}$ de largura por $1,0\text{ m}$ de altura, volume interno de 150 L e que esteja a uma temperatura interna de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, num dia em que a temperatura externa seja de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a pressão, $1,0 \cdot 10^5\text{ N/m}^2$.
- a) Com base em conceitos físicos, explique a razão de ser difícil abrir a porta do *freezer* logo após tê-lo fechado e por que é necessário aguardar alguns instantes para conseguir abri-la novamente.
- b) Suponha que você tenha aberto a porta do *freezer* por tempo suficiente para que todo o ar frio do seu interior fosse substituído por ar a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ e que, fechando a porta do *freezer*, quisesse abri-la novamente logo em seguida. Considere que, nesse curtíssimo intervalo de tempo, a temperatura média do ar no interior do *freezer* tenha atingido $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determine a intensidade da força resultante sobre a porta do *freezer*.

7. A Equação de Clapeyron

Foi o físico francês Benoît Paul Émile Clapeyron (1799-1864) quem estabeleceu a equação que relaciona as variáveis de estado de um gás perfeito: pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T). Equação que nada mais é do que a síntese das leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac.

De acordo com a **Lei de Boyle**, a pressão (p) e o volume (V) de um gás perfeito são inversamente proporcionais. Da **Lei de Charles e Gay-Lussac**, sabemos que o volume (V) é diretamente proporcional à temperatura absoluta (T) do gás. Da **Lei de Charles**, sabemos que a pressão (p) é diretamente proporcional à temperatura absoluta (T) do gás.

Não podemos esquecer ainda que, se a pressão de um gás é produzida pelo choque de suas partículas com as paredes do recipiente, a pressão (p) é função também do número de partículas, isto é, da massa (m) do gás considerado.

Tendo isso em conta, podemos escrever que:

$$p = K \frac{mT}{V}$$

em que K é uma constante que depende apenas da natureza do gás.

Pode-se comprovar que, para diferentes gases, o valor de K é inversamente proporcional à massa molar (M) de cada gás:

$$K = \frac{R}{M}$$

em que R é uma constante de proporcionalidade igual para todos os gases. É por isso que a constante R é denominada **constante universal dos gases perfeitos**.

Assim, a relação anterior fica dada por:

$$p = R \frac{m}{M} \frac{T}{V} \Rightarrow pV = \frac{m}{M} RT$$

Uma vez que o quociente $\frac{m}{M}$ é o número de mols (n) do gás, a Equação de Clapeyron para os gases perfeitos toma seu aspecto definitivo:

$$pV = nRT$$

8. A constante universal dos gases perfeitos (R) e seus valores

Nas denominadas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), quando a temperatura é 0°C e a pressão assume o valor $1,0\text{ atm}$, 1 mol de qualquer gás ocupa um volume correspondente a $22,4\text{ litros}$.

Resumindo (nas CNTP):

$$p = 1,0\text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$$

1 mol de qualquer gás ocupa um volume de $22,4\text{ L}$.

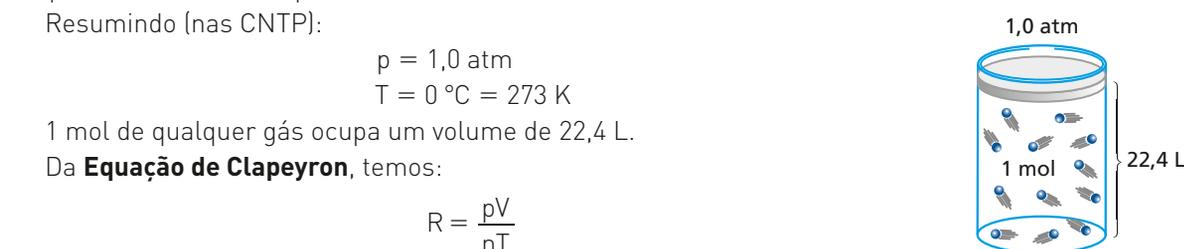
Da **Equação de Clapeyron**, temos:

$$R = \frac{pV}{nT}$$



Reprodução/Wikimedia Commons

Retrato de Benoît Paul Émile Clapeyron, engenheiro e físico francês que estudou os gases perfeitos e ajudou a desenvolver a Termodinâmica.



Banco de imagens/Arquivo da editora



Thinkstock/Getty Images

// Quando uma pessoa assopra o bico de um balão, ela está injetando ar no seu interior (o número de mols n está aumentando). As partículas de ar chocam-se com as paredes internas, forçando-as. Devido à elasticidade da borracha, o balão aumenta de volume. Nessa situação, estão sendo alterados o número de mols, a pressão e o volume do gás.

Substituindo os dados citados, concluímos:

$$R = \frac{1 \text{ atm} \cdot 22,4 \text{ L}}{1 \text{ mol} \cdot 273 \text{ K}}$$

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

A grandeza R é uma constante física; assim, possui unidades que, ao serem mudadas, produzem alteração no valor numérico da constante.

A constante R , dependendo das unidades das demais grandezas, pode assumir os valores:

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} = 8,31 \frac{\text{joules}}{\text{mol K}} \cong 2 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

Ampliando o olhar

A atmosfera terrestre e o oxigênio que respiramos

No entorno da superfície da Terra encontramos gases que formam a nossa atmosfera. O nitrogênio é o principal desses gases participando com 78% do total, o oxigênio é o segundo com 21% e o restante 1% é formado por argônio, dióxido de carbono (CO_2), neônio, hélio, metano (CH_4), criptônio, hidrogênio e xenônio. Todos eles são chamados de gases reais e, rigorosamente, não obedecem às leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac e a equação de Clapeyron. No entanto, sob altas temperaturas e baixas pressões, esses gases se comportam de maneira a se aproximar do comportamento dos gases perfeitos. Assim, **teoricamente** podemos supor que o ar atmosférico (que é a mistura dos gases citados) se comporta dentro dos padrões dos gases perfeitos.

O ar que respiramos possui aproximadamente 21% de oxigênio, gás indispensável para a nossa vida. Quando expiramos devolvemos 16% para a nossa atmosfera e ficamos com 5% do oxigênio inspirado. Esse gás, através dos pulmões, irá se juntar ao nosso sangue e fará parte das reações químicas que irão renová-lo. Uma pessoa em atividades normais respira (inspira e expira) aproximadamente 8 litros de ar a cada minuto, 11500 litros de ar por dia, sendo 5%, quase 600 litros de oxigênio puro, que será absorvido. Claro que, em atividades aeróbicas, seus pulmões “pulsarão” mais rapidamente, recebendo mais ar do que uma pessoa em estado normal.

Quando alguém está internado em um hospital, respirando por aparelhos, receberá o oxigênio por meio de um tubo ligado a um recipiente metálico que contém esse gás sob alta pressão, por volta de 100 atmosferas. Para que o gás não provoque danos ao doente, uma válvula reduz essa pressão para algo em torno de 3 atmosferas. Se o cilindro metálico onde se encontra o oxigênio possui volume de 60 litros e na válvula redutora de pressão o fluxo de gás foi regulado para 5 litros/minuto, mantida constante a temperatura em 27°C , em quanto tempo a pressão no interior do cilindro será reduzida para 40 atmosferas? Essa questão já caiu em um grande vestibular do país, você consegue obter a resposta? Para a resolução, utilize $R = 8 \cdot 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$. **(Resp.: 4,0 h)**

Ruslan Ivantsov/Shutterstock



// A cor azul da atmosfera terrestre é devida ao nitrogênio que nela está presente em grande quantidade. Além de gases, na atmosfera encontramos vapor de água, responsável pela formação de nuvens.

9. Lei Geral dos Gases

Quando determinada massa de gás perfeito (massa constante) sofre uma transformação em que as três variáveis pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T) se modificam, podemos usar a chamada **Lei Geral dos Gases**.

Essa lei é obtida a partir da **Equação de Clapeyron**. Para tanto, suponhamos que certa massa de gás perfeito encontre-se inicialmente num estado definido por p_1 , V_1 e T_1 . Sofrendo uma transformação, essa **mesma** massa de gás passa para o estado definido por p_2 , V_2 e T_2 .

Se aplicarmos a **Equação de Clapeyron** separadamente para essas situações, teremos:

Estado (1):

$$p_1 V_1 = nRT_1 \Rightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = nR \quad (\text{I})$$

Estado (2):

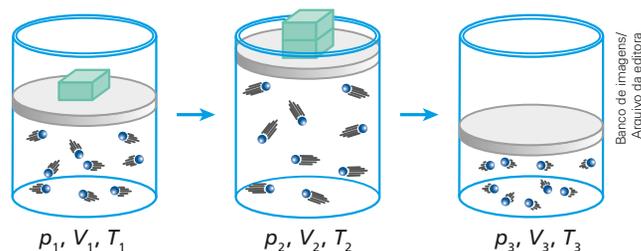
$$p_2 V_2 = nRT_2 \Rightarrow \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR \quad (\text{II})$$

Igualando (I) e (II), obtemos a seguinte relação, denominada **Lei Geral dos Gases**:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Nas transformações do exemplo, a massa do gás perfeito mantém-se constante, variando apenas as demais grandezas: pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T). A **Lei Geral dos Gases** garante a validade da relação:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$



10. Mistura física de gases perfeitos

A **mistura física de gases perfeitos** é a reunião de dois ou mais gases ideais, de forma a não ocorrerem reações químicas entre suas partículas, isto é, as interações existentes são estritamente físicas.

Ao calcular as grandezas físicas associadas à mistura, devemos lembrar que, sempre, numa mistura de e gases perfeitos, o número de mols da associação é igual à soma do número de mols dos gases componentes.

Assim:

$$n_{\text{mistura}} = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_e \quad (\text{I})$$

Mas da Equação de Clapeyron vem:

$$pV = nRT \Rightarrow n = \frac{pV}{RT}$$

Daí, calculando o número de mols de cada gás antes da mistura, temos:

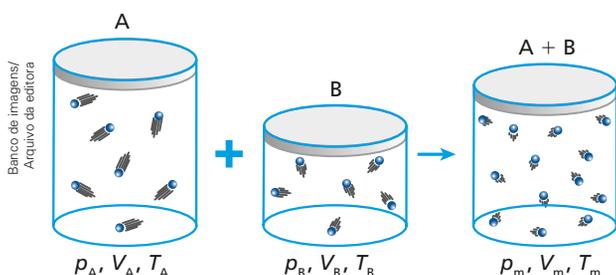
$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{p_1 V_1}{RT_1} \\ n_2 &= \frac{p_2 V_2}{RT_2} \\ n_3 &= \frac{p_3 V_3}{RT_3} \\ &\vdots \\ n_e &= \frac{p_e V_e}{RT_e} \end{aligned}$$

Para a mistura, podemos escrever: $n_m = \frac{p_m V_m}{RT_m}$

Da expressão (I), temos:

$$\frac{p_m V_m}{T_m} = \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \dots + \frac{p_e V_e}{T_e}$$

Portanto, numa mistura de gases ideais, a razão $\frac{pV}{T}$ da mistura é a soma das razões $\frac{pV}{T}$ de cada um dos gases participantes, antes de fazerem parte da mistura.



Na ilustração, os gases perfeitos **A** e **B** são misturados fisicamente em um terceiro recipiente. A mistura terá um número de mols n igual à soma dos números de mols de **A** e **B** ($n = n_A + n_B$). Assim, podemos afirmar que vale a relação:

$$\frac{p_m V_m}{T_m} = \frac{p_A V_A}{T_A} + \frac{p_B V_B}{T_B}$$

JÁ PENSOU NISTO?

Pneus de aviões são especiais?

Em altitudes da ordem de 10000 m, em que voam os grandes aviões, a temperatura atmosférica é bastante baixa, próxima de $-50\text{ }^\circ\text{C}$. Durante o pouso, os pneus desses aviões sofrem uma expressiva elevação de temperatura, de $-50\text{ }^\circ\text{C}$ (em voo) a $+80\text{ }^\circ\text{C}$ (na aterrissagem), devido aos atritos que os pneumáticos recebem da pista, parcialmente responsáveis pelo freamento da aeronave. Esse aumento de temperatura faz a pressão do nitrogênio (que infla os pneus) aumentar, exigindo que os pneus de aviões tenham fabricação especial.



Alamy/Fotorena

21. Colocam-se 160 g de oxigênio, a 27 °C, em **ER** um recipiente com capacidade de 5,0 L. Considerando-se que o oxigênio se comporta como um gás perfeito, qual é o valor da pressão exercida por ele?

Dados: massa molar do oxigênio = 32 g; constante universal dos gases perfeitos

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

Resolução:

Aplicando a Equação de Clapeyron para os gases perfeitos, temos:

$$pV = nRT$$

em que $n = m/M$, R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura absoluta do gás.

Do enunciado, sabemos que: $V = 5,0 \text{ L}$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{160}{32} \therefore n = 5,0 \text{ mol}$$

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

$$T = 27 \text{ °C} = 300 \text{ K}$$

Portanto:

$$p \cdot 5,0 = 5,0 \cdot 0,082 \cdot 300$$

$$p = 24,6 \text{ atm}$$

22. (Enem) Uma pessoa abre sua geladeira, verifica o que há dentro e depois fecha a porta dessa geladeira. Em seguida, ela tenta abrir a geladeira novamente, mas só consegue fazer isso depois de exercer uma força mais intensa do que a habitual.

A dificuldade extra para reabrir a geladeira ocorre porque o(a)

- volume de ar dentro da geladeira diminuiu.
- motor da geladeira está funcionando com potência máxima.
- força exercida pelo ímã fixado na porta da geladeira aumenta.
- pressão no interior da geladeira está abaixo da pressão externa.
- temperatura no interior da geladeira é inferior ao valor existente antes de ela ser aberta.

23. Em um recipiente rígido de 41 L de capacidade, são colocados 10 mols de um gás perfeito, à temperatura de 177 °C. Qual o valor da pressão exercida por esse gás nas paredes internas de um recipiente?

Dado: pressão universal dos gases perfeitos $R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)/(mol} \cdot \text{K)}$.

24. (Fuvest-SP) Um botijão de gás de cozinha contém 13 kg de gás liquefeito, à alta pressão. Um mol desse gás tem massa de, aproximadamente, 52 g. Se todo o conteúdo do botijão fosse utilizado para encher um balão, à pressão atmosférica e à temperatura de 300 K, o volume final do balão seria aproximadamente de:

- 13 m³;
- 6,2 m³;
- 3,1 m³;
- 0,98 m³;
- 0,27 m³.

Note e adote:

Constante dos gases R

$R = 8,3 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ou

$R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)/(mol} \cdot \text{K)}$

$P_{\text{atmosférica}} = 1 \text{ atm} \cong 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$(1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2)$

$1 \text{ m}^3 = 1 \text{ 000 L}$

25. A que temperatura (em graus Celsius) devem-se encontrar 5,0 mols de um gás perfeito para que, colocados em um recipiente de volume igual a 20,5 L, exerçam uma pressão de 4,0 atm?

Dado: $R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)/(mol} \cdot \text{K)}$.

26. Em um recipiente de paredes rígidas e capacidade igual a 10 L, são colocados 8,0 g de hidrogênio à temperatura de -23 °C. Qual a pressão exercida pelo gás, supondo-se que ele se comporte como um gás perfeito?

Dados: $R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)/(mol} \cdot \text{K)}$;

$1 \text{ mol (H}_2) = 2 \text{ g}$.

27. (Fuvest-SP) Um laboratório químico descartou um frasco de éter, sem perceber que, em seu interior, havia ainda um resíduo de 7,4 g de éter, parte no estado líquido, parte no estado gasoso. Esse frasco, de 0,8 L de volume, fechado hermeticamente, foi deixado sob o sol e, após um certo tempo, atingiu a temperatura de equilíbrio $T = 37 \text{ °C}$, valor acima da temperatura de ebulção

do éter. Se todo o éter no estado líquido tivesse evaporado, a pressão dentro do frasco seria:

- a) 0,37 atm. c) 2,5 atm. e) 5,9 atm.
b) 1,0 atm. d) 3,1 atm.

Note e adote:

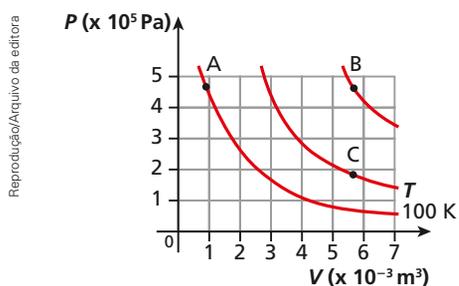
No interior do frasco descartado havia apenas éter.

Massa molar do éter = 74 g

$K = ^\circ C + 273$

R (constante universal dos gases) = 0,082 (atm · L)/(mol · K)

28. (Vunesp) O gráfico indica valores de pressão, volume e temperatura, obedecidos por um gás ideal que, por meio de uma transformação isobárica, passa de **A** para **B**, sofrendo, em seguida, uma transformação isovolumétrica que o leva do ponto **B** para o ponto **C**.



Nessas condições, o valor da temperatura T indicada em Kelvins é:

- a) 320 c) 200 e) 240
b) 600 d) 480

29. Um recipiente provido de êmbolo contém um **ER** gás ideal, de tal forma que $V_1 = 2,0$ L, $p_1 = 3,495$ atm e $T_1 = 233$ K. O êmbolo é comprimido, reduzindo o volume em 40%. Quanto devemos aquecer esse gás para que a pressão se torne igual a 7,825 atm? Dê a resposta na escala Fahrenheit.

Resolução:

Já que a massa do gás não varia, pode-se usar a Lei Geral dos Gases:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Note que:

$$V_2 = V_1 - 0,4 \cdot V_1 = 0,6 \cdot V_1 \Rightarrow V_2 = 0,6 \cdot 2,0$$

$$V_2 = 1,2 \text{ L}$$

Então:

$$\frac{3,495 \cdot 2,0}{233} = \frac{7,825 \cdot 1,2}{T_2} \therefore T_2 = 313 \text{ K}$$

Como a questão pede **quanto** devemos aquecer o gás, temos:

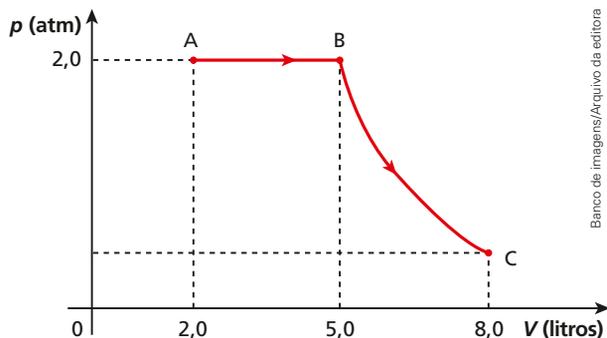
$$\Delta T = T_2 - T_1 \Rightarrow \Delta T = 313 - 233 \therefore \Delta T = 80 \text{ K}$$

Entretanto, a resposta deve ser dada em unidades da escala Fahrenheit; assim:

$$\frac{\Delta T_K}{\Delta \theta_F} = \frac{100}{180} \Rightarrow \frac{80}{\Delta \theta_F} = \frac{100}{180}$$

$$\Delta \theta_F = 144 \text{ } ^\circ F$$

30. Uma amostra de gás perfeito sofre as transformações **AB** (isobárica) e **BC** (isotérmica) representadas no diagrama pressão *versus* volume:



Sabe-se que a temperatura do gás, na situação representada pelo ponto **B**, vale 27 °C. Qual é a temperatura desse gás nas situações **A** e **C**?

31. Certa massa de gás perfeito é colocada, a 27 °C, em um recipiente de 5,0 L de capacidade, exercendo em suas paredes uma pressão equivalente a 2,0 atm. Mantendo-se a massa e transferindo-se o gás para um outro recipiente de 3,0 L de capacidade, quer-se ter esse gás sob pressão de 5,0 atm. Para tanto, a que temperatura deve-se levar o gás?
32. (PUC-SP) Um certo gás, cuja massa vale 140 g, ocupa um volume de 41 litros, sob pressão de 2,9 atmosferas à temperatura de 17 °C. O número de Avogadro vale $6,02 \cdot 10^{23}$ e a constante universal dos gases perfeitos é $R = 0,082$ (atm · L)/(mol · K). Nessas condições, qual o número de moléculas contidas no gás?
33. Em um frasco de paredes indeformáveis e volume interno igual a 5,0 L, encontramos um gás per-

feito à temperatura de $-73\text{ }^\circ\text{C}$. Nessas condições, a pressão exercida equivale a 38 cmHg. Mudando-se esse gás para um reservatório de capacidade igual a 2,0 L, quanto devemos aquecê-lo para que a pressão torne-se igual a 2,0 atm?

Dado: 1 atm = 76 cmHg.

34. Após o término das aulas, a família da aluna Maria Eduarda preparou seu automóvel para as merecidas férias. Calibrou os pneus com uma pressão de $210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$. No momento da calibração a temperatura ambiente e dos pneus era de $27,0\text{ }^\circ\text{C}$. Todos subiram e partiram para a viagem. Chegando ao destino, os pneus apresentaram um aumento de pressão, passando para $240 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$.

Considerando o ar como um gás ideal, determine o que se pede a seguir.

- a) Qual a temperatura do ar (em grau Celsius) no interior dos pneus, no final da viagem, se eles expandiram 5%?
 b) De acordo com o fabricante, os pneus podem aumentar seu volume um máximo de 8%. Se, no final da viagem, essa situação extrema de volume foi atingida, com a temperatura em aproximadamente 378 K, qual o valor limite da pressão dos pneus (em atm)?

Considere:

Equação de Clapeyron: $pV = nRT$;

$1,0 \text{ atm} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$;

Lei Geral dos Gases: $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$;

Conversão Kelvin para Celsius: $\theta_c = T(\text{K}) - 273$.

Exercícios Nível 2

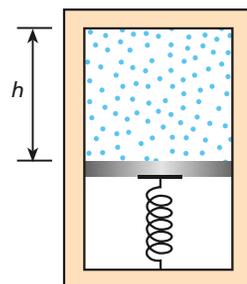
35. Em 1738, o físico matemático Daniel Bernoulli (1700-1782) publicou *Hidrodinâmica*, a base para a teoria cinética dos gases. Nesse trabalho, Bernoulli posicionou seu argumento, ainda sólido até a atualidade, de que os gases consistem em um grande número de moléculas se movendo em todas as direções, colidindo entre si. Esse impacto causa uma pressão na superfície de contato que podemos sentir, assim como o que sentimos como calor é simplesmente a energia cinética do seu movimento. A teoria não foi imediatamente aceita, em parte por causa da conservação de energia que não estava bem estabelecida, e, ainda, não era óbvio aos físicos que as colisões entre as moléculas eram perfeitamente elásticas. Empiricamente, observa-se uma série de relações entre a **temperatura**, a **pressão** e o **volume** que dão lugar à Lei dos Gases Ideais, deduzida pela primeira vez por Émile Clapeyron, em 1834. Utilizando essa equação, determine a pressão no interior de um recipiente cúbico de aresta interna 20 cm, preenchido com 64 g de oxigênio, à temperatura de $327\text{ }^\circ\text{C}$. Utilize $R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)/(mol} \cdot \text{K)}$, $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ e 16 para a massa atômica do oxigênio.

- a) $1,357 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ d) $6,23 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 b) $6,78 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ e) $1,246 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
 c) $2,492 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

36. Considerando-se p a pressão, V o volume, T a temperatura absoluta, M a massa de 1 mol e R a constante universal dos gases perfeitos, qual a relação que representa a densidade absoluta de um gás perfeito?

- a) $d = \frac{MR}{pT}$ d) $d = \frac{RT}{pV}$
 b) $d = \frac{pV}{RT}$ e) $d = \frac{p}{MRT}$
 c) $d = \frac{pM}{RT}$

37. Um cilindro adiabático vertical foi dividido em duas partes por um êmbolo de 2,50 kg de massa, que está apoiado em uma mola ideal de constante elástica igual a $1,04 \cdot 10^5 \text{ N/m}$. Na parte inferior do cilindro, fez-se vácuo e, na parte superior, foram colocados 5 mols de um gás perfeito. Na situação de



Banco de imagens/Arquivo da editora

equilíbrio, a altura h vale 60 cm e a mola está comprimida em 20 cm.

Dados: $g = 10 \text{ m/s}^2$;

$R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

Desprezando-se possíveis atritos, qual a temperatura do gás, em graus Celsius?

38. Um cilindro metálico de paredes indeformáveis contém gás ideal a $-23 \text{ }^\circ\text{C}$. Quando aquecemos lentamente o sistema até $127 \text{ }^\circ\text{C}$, uma válvula deixa escapar gás, a fim de manter a pressão interna constante, durante todo o processo. Determine a fração do gás inicial que escapa.

Resolução:

Do texto, observamos que o volume e a pressão do gás permanecem constantes. Aplicando a **Equação de Clapeyron**, temos:

$$pV = nRT$$

$$n_1RT_1 = n_2RT_2 \Rightarrow n_1T_1 = n_2T_2 \quad (1)$$

São dados:

$$T_1 = -23 \text{ }^\circ\text{C} = 250 \text{ K}$$

$$T_2 = 127 \text{ }^\circ\text{C} = 400 \text{ K}$$

Substituindo esses valores na expressão (1), encontramos:

$$n_1 \cdot 250 = n_2 \cdot 400$$

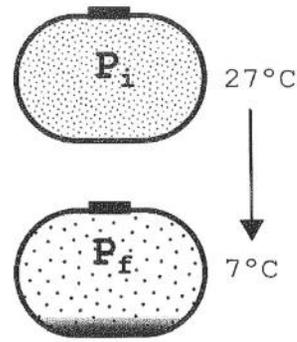
$$n_2 = 0,625n_1 \text{ ou } n_2 = 62,5\%n_1$$

Portanto, o gás que escapa representa 37,5% da massa inicial.

39. (UPM-SP) Em um recipiente hermeticamente fechado e que contém 20 g de CO_2 foi acoplada uma válvula. Inicialmente, a pressão desse gás é de 6,0 atm e sua temperatura, de $77 \text{ }^\circ\text{C}$. Se, através da válvula, permitirmos que 25% do gás escapem, mantendo constante a temperatura, qual será a pressão exercida pelo gás restante?

40. (Unirio-RJ) Um cilindro de capacidade igual a 60 L está cheio de oxigênio sob pressão de 9,2 atm, à temperatura de $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Abre-se a válvula. Qual a massa de gás que escapa? Admite-se que a temperatura permaneça constante e a pressão externa seja normal. Para o oxigênio, $M = 32 \text{ g}$; $R = 0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)} / (\text{mol} \cdot \text{K})$.

41. (CPAEN-RJ) Analise a figura abaixo.



Reprodução/Escola Naval, 2016

Após uma lavagem, certa quantidade de vapor d'água, na temperatura inicial de $27 \text{ }^\circ\text{C}$, permaneceu confinada no interior de um tanque metálico. A redução da temperatura para $7,0 \text{ }^\circ\text{C}$ causou condensação e uma consequente redução de 50% no número de moléculas de vapor. Suponha que o vapor d'água se comporte como um gás ideal ocupando um volume constante. Se a pressão inicial for $3,0 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, a pressão final, em quilopascal, será

- a) 1,4
- c) 2,0
- e) 2,9
- b) 1,5
- d) 2,8

42. Ao ler um livro sobre tecnologia do vácuo, um aluno recebeu a informação de que o melhor "vácuo" que se pode obter no interior de um recipiente, na superfície da Terra, é da ordem de $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ atm}$.

Considerando-se que o ar se comporta como um gás perfeito, aproximadamente quantas moléculas iremos encontrar em 1 mm^3 do interior desse recipiente, onde se fez o vácuo parcial, à temperatura de $27 \text{ }^\circ\text{C}$?

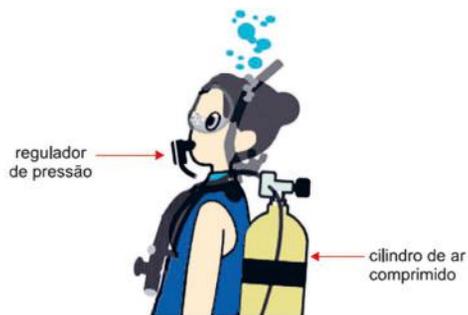
Dados: constante universal dos gases perfeitos = $0,082 \text{ (atm} \cdot \text{L)} / (\text{mol} \cdot \text{K})$;

1 litro = 1 dm^3 ;

número de Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23} \text{ moléculas/mol}$.

- a) zero
- c) 602
- e) $6 \cdot 10^{23}$
- b) 60
- d) 1820

43. (Famerp-SP) Um cilindro de mergulho tem capacidade de 12 L e contém ar comprimido a uma pressão de 200 atm à temperatura de $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Acoplado à máscara da mergulhadora, há um regulador que reduz a pressão do ar a 3 atm, para que possa ser aspirado por ela embaixo d'água. Considere o ar dentro do cilindro como um gás ideal, que sua temperatura se mantenha constante e que $R = 0,08 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{mol} \cdot \text{K}$.



Reprodução/Famerp, 2016

(<http://pt.net-diver.org>. Adaptado.)

Considerando que em um mergulho o ar seja aspirado a uma vazão média de 5 L/min, calcule:

- o número de mols de ar existentes dentro do cilindro no início do mergulho;
- o tempo de duração, em minutos, do ar dentro do cilindro. Expresse os cálculos efetuados.

44. A densidade do nitrogênio, considerado gás ideal, nas condições normais de temperatura e pressão, é de $1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Qual será a massa de 10 L de nitrogênio à pressão de 700 mmHg e a $40 \text{ }^\circ\text{C}$?

45. [Faap-SP] Certa massa de oxigênio tem massa específica de $0,07 \text{ g/cm}^3$ sob pressão de 700 mmHg. Determine a pressão desse oxigênio para que sua massa específica aumente para $0,09 \text{ g/cm}^3$ à mesma temperatura.

46. [UFRJ] Um físico alpinista escalou uma alta montanha e verificou que, no topo, a pressão p do ar era igual a $0,44p_0$, sendo p_0 a pressão ao nível do mar. Ele notou também que, no topo, a temperatura T era igual a $0,88T_0$, sendo T_0 a correspondente temperatura ao nível do mar, ambas as temperaturas medidas em Kelvin.

Considerando o ar no topo e ao nível do mar como um mesmo gás ideal, calcule a razão $\frac{d}{d_0}$ entre a densidade d do ar no topo da montanha e a correspondente densidade d_0 ao nível do mar.

47. Um gás perfeito realiza um ciclo (1, 2, 3, 1) formado por três transformações: (1, 2) isobárica, (2, 3) isovolumétrica e (3, 1) isotérmica. Em 1, suas variáveis de estado são: pressão $p_1 = 2,0 \text{ atm}$, volume $V_1 = 1,5 \text{ L}$ e temperatura $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Na transformação isobárica (1, 2), o volume do gás é duplicado. Calcule os valores das variáveis de estado (pressão, volume e temperatura) em cada um dos dois outros estados (2 e 3).

Resolução:

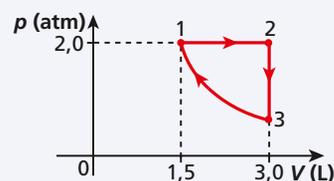
O ciclo (1, 2, 3, 1), formado pelas transformações (1, 2) isobárica (pressão constante), (2, 3) isovolumétrica (volume constante) e (3, 1) isotérmica (temperatura constante), é representado no **diagrama de Clapeyron**, como segue:

No estado (1), as variáveis de estado do gás são dadas por:

$$p_1 = 2,0 \text{ atm}$$

$$V_1 = 1,5 \text{ L}$$

$$\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 293 \text{ K}$$



Banco de imagens/
Arquivo da editora

No estado (2), após ter sofrido uma transformação isobárica ($p = \text{cte.}$) e ter dobrado o volume, as variáveis de estado do gás ficam:

$$p_2 = 2,0 \text{ atm (de 1 para 2} \rightarrow \text{transformação isobárica)}$$

$$V_2 = 3,0 \text{ L (volume dobrou)}$$

$$\theta_2 = ?$$

Usando a **Lei Geral dos Gases**, uma vez que o número de mols permanece constante, temos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{2,0 \cdot 1,5}{293} = \frac{2,0 \cdot 3,0}{T_2}$$

$$T_2 = 586 \text{ K} \Rightarrow \theta_2 = 313 \text{ }^\circ\text{C}$$

No estado (3), após ter sofrido uma transformação isovolumétrica ($V = \text{cte.}$), o gás tem as seguintes variáveis de estado:

$$p_3 = ?$$

$$V_3 = 3,0 \text{ L (transformação isovolumétrica)}$$

$$\theta_3 = \theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C (pois o gás volta ao estado (1) numa transformação isotérmica)}$$

Usando novamente a **Lei Geral dos Gases**, temos:

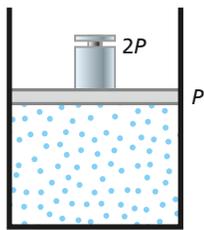
$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} + \frac{2,0 \cdot 3,0}{586} = \frac{p_3 \cdot 3,0}{293}$$

$$p_3 = 1,0 \text{ atm}$$

Assim, os valores das variáveis pedidas são:

$$(2) \begin{cases} p_2 = 2,0 \text{ atm} \\ V_2 = 3,0 \text{ L} \\ \theta_2 = 313 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3) \begin{cases} p_3 = 1,0 \text{ atm} \\ V_3 = 3,0 \text{ L} \\ \theta_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

48. (UPM-SP) Um gás perfeito, a 27°C , está aprisionado em um cilindro indilatável por um êmbolo de peso P . Coloca-se sobre o êmbolo um peso $2P$ e aquece-se o gás a 127°C . Despreze a pressão atmosférica. Sendo V o volume inicial do gás, o seu volume final será:

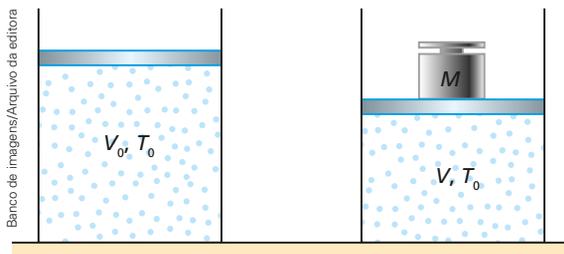


Reprodução/Arquivo da editora

- a) $\frac{V}{2}$ b) $\frac{8V}{9}$ c) $\frac{4V}{9}$ d) $\frac{4V}{3}$ e) $\frac{2V}{3}$

49. Um cilindro contendo uma amostra de gás perfeito, à temperatura ambiente, é vedado por um êmbolo que pode deslizar livremente, sem qualquer atrito. O volume inicialmente ocupado pelo gás é V_0 e a pressão exercida sobre ele, pelo êmbolo e pela coluna de ar acima dele, é igual a 12 N/cm^2 . Colocando-se sobre o êmbolo, cuja área é de 100 cm^2 , um corpo de massa 40 kg , o gás é comprimido, sua pressão aumenta e seu volume passa a ser igual a V .

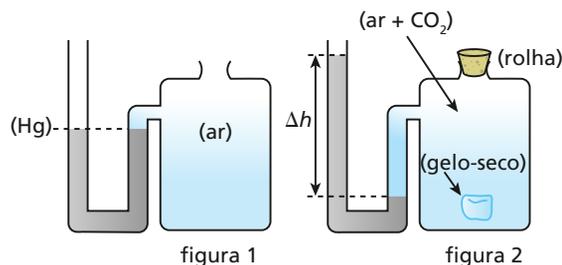
Dado: aceleração da gravidade no local = 10 m/s^2 .



- a) Determine, em N/cm^2 , a pressão adicional exercida sobre o gás pelo peso do corpo de massa 40 kg .
- b) Demonstre que, se a transformação sofrida pelo gás for isotérmica, vale a relação $\frac{V}{V_0} = \frac{3}{4}$.

50. Na figura 1, podemos observar um recipiente de volume 2 litros, que contém ar na pressão atmosférica local (70 cmHg), acoplado a um tubo em forma de U que contém mercúrio. No início, os níveis do mercúrio estão na mesma horizontal. Em seguida, é introduzida no recipiente uma porção de gelo-seco (CO_2). O recipiente é fechado. Após algum tempo, quando todo o gelo-seco passou para a fase gasosa, notamos que o mercúrio apresenta um desnível de 19 cm

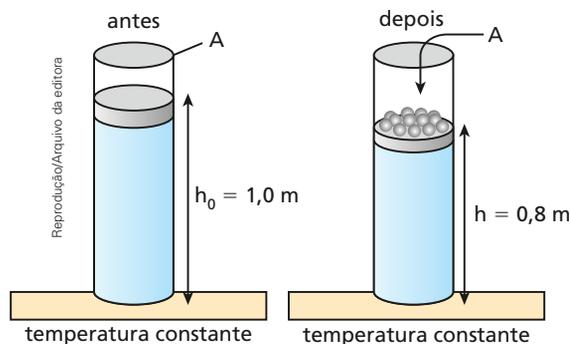
e a situação se estabiliza. Despreze o volume do tubo em comparação com o do recipiente.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Todo o processo ocorre à temperatura do meio ambiente (27°C). Supondo-se que o ar e o CO_2 comportem-se como gases perfeitos, que a pressão atmosférica normal valha 76 cmHg e que a constante universal dos gases perfeitos valha $0,082\text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K}$, qual é o número de mols aproximado de CO_2 existente no recipiente?

51. (Unesp-SP) Em um dia em que se registrava uma temperatura ambiente de 27°C , um balão de festa foi cheio com ar, cuja densidade era de $1,3\text{ kg/m}^3$. Foi medida uma diferença de massa entre o balão vazio e cheio de $7,8\text{ g}$.
- a) Qual o volume, em litros, do balão cheio?
- b) Considerando o ar como um gás ideal, qual seria o seu volume se, depois de cheio, ele fosse guardado numa câmara fria a -23°C , sem variar a pressão e o número de partículas em seu interior?
52. (UFPE) Um cilindro de 20 cm^2 de seção reta contém um gás ideal, comprimido em seu interior por um pistão móvel, de massa desprezível e sem atrito. O pistão repousa a uma altura $h_0 = 1,0\text{ m}$. A base do cilindro está em contato com um forno, de forma que a temperatura do gás permanece constante. Bolinhas de chumbo são lentamente depositadas sobre o pistão até que ele atinja a altura $h = 80\text{ cm}$.



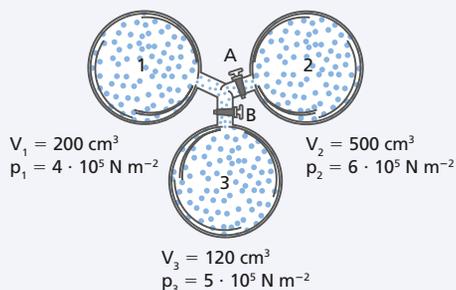
Considere a pressão atmosférica igual a 1 atm . ($1\text{ atm} = 1,0 \cdot 10^5\text{ N/m}^2$)

A massa do chumbo que foi depositada sobre o pistão vale:

- a) 0,50 kg. c) 2,0 kg. e) 50,5 kg.
b) 1,0 kg. d) 5,0 kg.

53. Três recipientes contêm gases sob pressão e volume conforme representado a seguir:

Banco de imagens/Arquivo da editora



As paredes dos recipientes são diatérmicas (permitem trocas de calor com o meio externo). Abrindo-se as válvulas **A** e **B**, os gases misturam-se, sem reações químicas, mantendo-se a temperatura constante (igual à temperatura ambiente). Qual o valor aproximado da pressão final da mistura?

Resolução:

Para uma mistura de gases perfeitos em que não há variação do número de mols dos componentes, temos:

$$\frac{p_m V_m}{T_m} = \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \frac{p_3 V_3}{T_3}$$

Como $T_1 = T_2 = T_3 = T_m = T_{\text{ambiente}}$ e

$V_m = V_1 + V_2 + V_3 \Rightarrow V_m = 820 \text{ cm}^3$, temos:

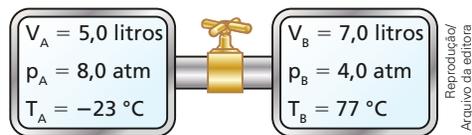
$$p_m \cdot 820 = 4 \cdot 10^5 \cdot 200 + 6 \cdot 10^5 \cdot 500 + 5 \cdot 10^5 \cdot 120$$

$$p_m \cong 5,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

54. Em um recipiente **A** de capacidade igual a 25 L há nitrogênio à temperatura de -23°C , sob pressão de 3,0 atm. Em outro recipiente **B**, com 30 L de capacidade, há oxigênio à temperatura de 127°C sob pressão de 8,0 atm. Ambos os gases são colocados num terceiro reservatório com capacidade de 27 L, no qual se misturam. Admitindo que esses gases não interagem quimicamente e que se comportam como gases perfeitos, qual será a temperatura final da mistura gasosa, sabendo que a pressão passou a ser de 10 atm?

55. Um modelo fenomenológico usado para estudar os gases é considerar que eles são constituídos de um grande número de moléculas cujas distâncias entre si são muito maiores que nos sólidos e líquidos. Nesse modelo, as moléculas de um gás movimentam-se através do espaço como uma saraivada de pequenas partículas, as quais colidem entre si e, eventualmente, com as paredes do recipiente. Essa sucessão de choques momentâneos empurra as paredes do recipiente em que o gás está contido. Sabe-se, ainda, que todos os gases têm o mesmo comportamento quando estão bastante rarefeitos e se encontram a uma temperatura muito maior do que aquela em que se tornam líquidos. Nesse estado, o comportamento dos gases é muito próximo daquele de um gás perfeito, cujo estado é facilmente conhecido utilizando a equação de estado para gases perfeitos. Considere um recipiente cuja capacidade é de 8,0 litros, no qual são colocados 4,0 litros de oxigênio a 17°C sob 2,9 atm de pressão e 10 litros de hidrogênio a 27°C sob aproximadamente 1,5 atm de pressão. Qual é a pressão final da mistura física dos gases, sabendo-se que a temperatura de equilíbrio do sistema é de 47°C ?

56. (UnB-DF)



A figura acima mostra, de forma esquemática, dois recipientes contendo dois gases ideais, conectados por meio de uma válvula, que está fechada inicialmente. Com base nessas informações e nos dados apresentados na figura, julgue os itens subsequentes.

- I. Se a válvula for aberta, a temperatura da mistura a uma pressão de 10 atm deve ser superior a 200 K.
- II. Se a válvula for aberta e a pressão for mantida 10 atm, a temperatura T_A permanecerá constante em torno de 300 K e a temperatura T_B abaixará para 237 K.
- III. Quando dois sistemas gasosos quaisquer em equilíbrio térmico entre si são colocados em contato térmico, tem maior temperatura aquele cuja pressão aumenta a volume constante.

11. O modelo microscópico de gás perfeito

No primeiro item deste tópico, fizemos uma análise macroscópica do gás perfeito, estabelecendo um modelo teórico a partir do seu comportamento “externo”, isto é, do comportamento de seus parâmetros pressão, volume e temperatura.

O estudo do gás perfeito realizado sob a perspectiva microscópica leva-nos à **teoria cinética dos gases**. Nesse modelo teórico, pelo fato de encontrarmos um número muito grande de partículas por unidade de volume (ordem de 10^{20} partículas por cm^3), as hipóteses impostas representam o que deve acontecer, em média, com as partículas do gás.

Vejamos as hipóteses da teoria cinética a respeito dos gases perfeitos:

- Uma porção de gás perfeito é constituída de um grande número de moléculas em movimento caótico (todas as direções são igualmente prováveis).
- As moléculas são consideradas pontos materiais, isto é, suas dimensões são desprezíveis quando comparadas com as distâncias que percorrem entre colisões sucessivas.
- As colisões entre duas moléculas ou entre uma molécula e uma parede do recipiente são supostas perfeitamente elásticas (não há perda de energia cinética).
- Cada colisão tem duração desprezível quando comparada com o tempo decorrido entre colisões sucessivas.
- Entre colisões sucessivas, o movimento das moléculas é retilíneo e uniforme. Isso equivale a desprezar as forças gravitacionais e intermoleculares.
- As forças intermoleculares só se manifestam durante as colisões.
- O estudo das colisões das moléculas do gás pode ser feito com base na mecânica newtoniana.

12. Velocidade média quadrática

No interior de um recipiente em repouso, encontramos partículas de gás que se deslocam em todas as direções e sentidos, fazendo com que a velocidade média das partículas seja nula, ao contrário da energia cinética média (que não é nula).

Assim, sendo N o número de partículas do gás, temos:

$$E_{c_m} = \frac{E_{c_1} + E_{c_2} + \dots + E_{c_N}}{N}$$

$$E_{c_m} = \frac{\frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} + \dots + \frac{mv_N^2}{2}}{N}$$

$$E_{c_m} = \frac{m}{2} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right)$$

Chamando o termo existente no interior do parênteses de \bar{v} (**velocidade média quadrática**), temos:

$$E_{c_m} = \frac{m(\bar{v})^2}{2}$$

Valendo a relação:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N}}$$

13. Equação Fundamental da Teoria Cinética

Para facilitar nosso raciocínio, imagine um recipiente cúbico de aresta L posicionado com um de seus vértices na origem de um sistema de eixos triortogonais. Em seu interior encontramos uma amostra de gás perfeito.

Estudando-se apenas uma das N partículas desse gás, vamos considerá-la dirigindo-se para a face **A** com uma velocidade \vec{v} . Fazendo-se a decomposição de \vec{v} , segundo os eixos, temos:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Após a colisão dessa partícula com a face **A**, notamos que as componentes v_y e v_z não foram alteradas; no entanto, a componente v_x inverteu o sentido de seu movimento. Sua quantidade de movimento sofreu uma alteração dada por:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q_f - Q_i \\ \Delta Q &= -mv_x - (+mv_x) \\ \Delta Q &= -2mv_x\end{aligned}$$

Como a quantidade de movimento total deve ser conservada, podemos afirmar que a face **A** do recipiente sofreu uma variação da quantidade do movimento, dada por:

$$\Delta Q = +2mv_x$$

Aplicando-se o Teorema do Impulso, podemos determinar a intensidade média da força aplicada (perpendicularmente) na face **A**.

$$\begin{aligned}I &= \Delta Q \\ F \Delta t &= \Delta Q \\ F &= \Delta Q \frac{1}{\Delta t}\end{aligned}$$

Supondo que essa partícula, movendo-se de maneira retilínea e uniforme, colida com a face oposta e torne a chocar-se com a face **A**, podemos calcular a frequência de colisões dessa partícula em **A**.

$$\begin{aligned}\Delta s &= v \Delta t \\ (L + L) &= v_x \Delta t \\ \frac{1}{\Delta t} &= \frac{v_x}{2L}\end{aligned}$$

Assim:

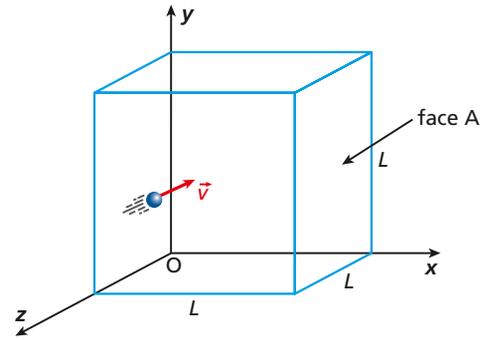
$$\begin{aligned}F &= 2mv_x \frac{v_x}{2L} \\ F &= \frac{mv_x^2}{L}\end{aligned}$$

e a pressão exercida pela partícula em **A** será dada por:

$$\begin{aligned}p &= \frac{F}{A} \Rightarrow p = \frac{mv_x^2}{L^2} \\ p &= \frac{mv_x^2}{L^3}\end{aligned}$$

Se considerarmos que N é o número total de partículas do gás e n é seu número por unidade de volume, teremos:

$$\begin{aligned}n &= \frac{N}{V} \Rightarrow n = \frac{N}{L^3} \\ L^3 &= \frac{N}{n}\end{aligned}$$



Portanto:

$$p = \frac{nmv_x^2}{N}$$

Considerando que esse gás é homogêneo, com todas as partículas de mesma massa (m), a pressão na face **A**, em virtude de todas as partículas do gás, será:

$$p = nm \left(\frac{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + \dots + v_{x_N}^2}{N} \right)$$

Como vimos, a velocidade média quadrática é dada por:

$$(\bar{v}_x)^2 = \frac{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + \dots + v_{x_N}^2}{N}$$

Assim:

$$p = nm(\bar{v}_x)^2$$

No entanto, o gás é constituído por um grande número de partículas e elas se movem ao acaso, fazendo com que os valores médios de $(\bar{v}_x)^2$, $(\bar{v}_y)^2$ e $(\bar{v}_z)^2$ sejam iguais, valendo a relação:

$$(\bar{v}_x)^2 = (\bar{v}_y)^2 = (\bar{v}_z)^2$$

e, sendo:

$$(\bar{v})^2 = (\bar{v}_x)^2 + (\bar{v}_y)^2 + (\bar{v}_z)^2 = 3(\bar{v}_x)^2$$

temos:

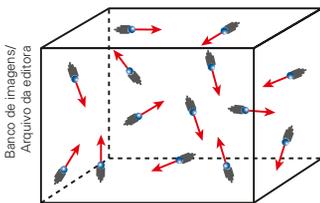
$$(\bar{v}_x)^2 = \frac{(\bar{v})^2}{3}$$

Assim:

$$p = nm \frac{(\bar{v})^2}{3}$$

No entanto, o produto nm é a massa das partículas por unidade de volume, isto é, a densidade volumétrica (μ) do gás.

$$p = \frac{1}{3} \mu (\bar{v})^2$$



Banco de imagens/
Arquivo da editora

// A teoria cinética dos gases leva-nos a "visualizar" uma amostra de gás perfeito formada por um grande número de partículas (10^{20} por cm^3), de dimensões desprezíveis, que se movem em todas as direções de modo aleatório.

Embora o cálculo da pressão tenha sido feito apenas para a face **A**, de acordo com o Princípio de Pascal, a pressão será a mesma nas outras faces.

Portanto:

A pressão (p) exercida por um gás perfeito nas paredes internas de um recipiente é igual a um terço do produto de sua massa específica pelo quadrado da velocidade média quadrática de suas partículas.

14. A temperatura na Teoria Cinética

Como vimos no início, a temperatura de um gás perfeito está relacionada com a energia de movimentação das moléculas. Agora, vamos analisar esse fato utilizando as informações da teoria cinética.

Da Equação Fundamental da Teoria Cinética, vem:

$$p = \frac{1}{3} \mu (\bar{v})^2$$

A massa específica (μ), entretanto, é o quociente da massa total (m) do gás pelo volume (V) ocupado por ele:

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

Dai:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} (\bar{v})^2$$

$$3pV = m(\bar{v})^2 \quad (I)$$

A **Equação de Clapeyron** fornece-nos:

$$pV = nRT \quad (II)$$

Comparando (I) e (II), temos:

$$3nRT = m(\bar{v})^2$$

Mas:

$$n = \frac{m}{M}$$

Portanto:

$$3 \frac{m}{M} RT = m(\bar{v})^2$$

Assim, temos:

$$T = \frac{M}{3R} (\bar{v})^2$$

Do exposto, observamos que a temperatura absoluta de um gás perfeito é função da velocidade média quadrática de suas partículas e da natureza do gás (T depende de M , que é a massa molar do gás).

Essa lei é válida para qualquer gás, desde que seu comportamento seja igual ou aproximadamente igual ao do gás perfeito.

15. A energia interna de um gás perfeito

Das hipóteses do modelo teórico de gás perfeito, sabemos que as suas moléculas são pontos materiais que não interagem entre si. Consequentemente, essas moléculas não possuem energia cinética de rotação nem energia potencial.

Podemos, então, dizer que a energia interna (U) de uma amostra de gás perfeito é a energia cinética de translação de suas moléculas. Assim, vale a expressão:

$$U = \frac{1}{2} m(\bar{v})^2 \quad (I)$$

em que m é a massa total do gás e \bar{v} , a velocidade média quadrática das partículas.

Usando a relação demonstrada no item anterior, temos:

$$T = \frac{M}{3R}(\bar{v})^2$$
$$(\bar{v})^2 = \frac{3RT}{M} \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), segue que:

$$U = \frac{1}{2} \frac{m}{M} 3RT$$

Como $\frac{m}{M} = n$ (número de mols do gás), obtemos:

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

A **energia interna** de um gás perfeito é função exclusiva do número de mols (n) e da temperatura absoluta (T) do gás.

Para um gás real, a expressão deduzida não é válida, uma vez que no **zero absoluto** sua **energia interna não é nula**. Ao valor da energia interna no zero absoluto dá-se o nome de **energia do ponto zero**. Essa expressão, no entanto, é válida, com boa aproximação, para gases reais monoatômicos, em baixas pressões e altas temperaturas. O valor do coeficiente $\frac{3}{2}$ varia com a atomicidade do gás real. No caso de gases biatômicos, por exemplo, o coeficiente assume o valor $\frac{5}{2}$.

Equipartição da energia

Utilizando o nosso modelo teórico de gás, em que cada partícula de gás perfeito é representada por uma esfera de dimensões desprezíveis, sabemos que cada uma delas tem **três graus de liberdade**, que indicam o movimento de translação na direção de cada um dos três eixos **x**, **y** e **z** de um sistema cartesiano de referência. Os gases reais monoatômicos têm comportamento bem próximo do comportamento dos gases perfeitos, sendo que, com boa aproximação, sua energia interna também pode ser expressa por:

$$U = \frac{1}{2}m(\bar{v})^2$$

Sendo $(\bar{v})^2 = \frac{3RT}{M}$, temos:

$$U = \frac{1}{2} m \left(\frac{3RT}{M} \right) = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R T = \frac{3}{2} nRT$$

$$U = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}pV$$

O **teorema da equiparação da energia** estabelece que a divisão dessa energia deve ser feita de maneira igual para cada grau de liberdade. Assim:

$$U_x = U_y = U_z = \frac{1}{3} \left(\frac{3}{2} nRT \right)$$

$$U_x = U_y = U_z = \frac{1}{2} nRT$$

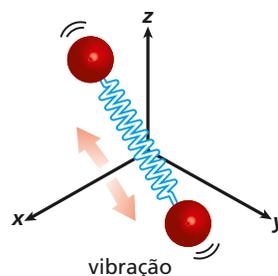
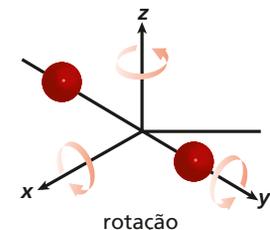
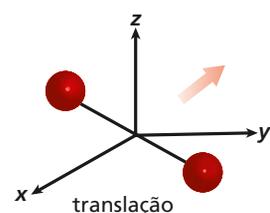
Os gases diatômicos são imaginados como uma “barra” com um átomo em cada ponta (como um haltere), sendo capaz de girar em torno de qualquer um dos eixos ortogonais. Entretanto, a inércia de rotação em torno do eixo, cuja direção coincide com a “barra”, é desprezível em comparação com as duas outras direções. Assim, a partícula diatômica tem três graus de liberdade na translação e dois graus na rotação, sendo que sua energia interna fica expressa por:

$$U = 3\left(\frac{1}{2}nRT\right) + 2\left(\frac{1}{2}nRT\right) = 5\left(\frac{1}{2}nRT\right)$$

$$U = \frac{5}{2}nRT$$

Se mudarmos o modelo, sendo a “barra” trocada por uma “mola”, acrescentaremos à molécula uma vibração. Cada partícula passa a ter translação, rotação e vibração. Passamos a ter mais graus de liberdade, o que faz aumentar a energia interna desse gás. Esse novo modelo, bem como os gases de atomicidade maior que dois (os poliatômicos), tem energia interna maior que $\frac{5}{2}nRT$.

Portanto, o cálculo da energia interna de um gás depende do modelo que vamos adotar. Para o nosso curso, usaremos apenas o modelo clássico de esferas de dimensões desprezíveis para gases perfeitos e reais monoatômicos e de “halteres” para gases diatômicos. Assim, é importante ressaltar que, para todos os gases (perfeitos ou reais), a energia interna (U) é sempre proporcional à temperatura absoluta (T) do gás.



16. A energia cinética média molecular

Considere um recipiente no qual há N moléculas de um gás perfeito, com energia interna igual a U . A **energia cinética média** por molécula é calculada por:

$$E_{cm} = \frac{U}{N}$$

Como a energia interna de um gás perfeito, que é exclusivamente cinética de translação, vale:

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

temos:

$$E_{cm} = \frac{3}{2} \frac{nRT}{N} \quad (I)$$

Cada mol de gás, entretanto, representa uma quantidade de partículas dada pelo número de Avogadro ($A = 6,02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol). Assim:

$$N = nA$$

que, substituído na relação (I), conduz a:

$$E_{cm} = \frac{3}{2} \frac{nRT}{nA} \Rightarrow E_{cm} = \frac{3}{2} \frac{R}{A} T$$

A razão entre as constantes R e A é denominada **constante de Boltzmann**, cujo valor é:

$$k = \frac{R}{A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Dessa forma, a equação da energia cinética média existente em cada partícula de um gás perfeito fica dada por:

$$E_{c_m} = \frac{3}{2}kT$$

Como a constante de Boltzmann (k) não depende da natureza do gás, podemos afirmar que a energia cinética existente, em média, em cada partícula de um gás perfeito é função exclusiva de sua temperatura absoluta.

Faça você mesmo

Desamassando uma garrafa PET

Após aprendermos como as grandezas pressão, volume e temperatura se relacionam em um gás confinado, vamos analisar um experimento simples, mas bem interessante, para colocar esse conhecimento em prática.

Fotografias: Eduardo Santalhestra



Material necessário

- 1 garrafa PET de 1,5 L.
- 1,5 L de bebida gaseificada, por exemplo, água mineral com gás.

Procedimento

- I. Coloque na geladeira a garrafa plástica com a bebida gaseificada. Aguarde algumas horas.
- II. Retire a garrafa, abra-a e derrame metade do seu conteúdo em uma pia.
- III. Aperte o corpo da garrafa com a mão e feche-a bem com a tampa. Observe que a embalagem permanecerá deformada.
- IV. Agite a garrafa por alguns segundos e veja como a embalagem retorna ao seu formato original.

Desenvolvimento

1. Levante hipóteses: por que a garrafa retorna ao seu formato original?
2. Há variação do número de moléculas que estão sobre o líquido? Se sim, por quê?
3. O que acontece se continuarmos a agitar a garrafa fechada?
4. A temperatura do sistema permanece constante durante o processo?

57. A teoria cinética dos gases propõe um modelo para os gases perfeitos, no qual:

- a) a pressão do gás não depende da velocidade das moléculas.
- b) as moléculas são consideradas partículas que podem colidir inelasticamente entre si.
- c) a temperatura do gás está diretamente relacionada com a energia cinética das moléculas.
- d) a pressão do gás depende somente do número de moléculas por unidade de volume.
- e) a temperatura do gás depende somente do número de moléculas por unidade de volume.

Resolução:

Vamos discutir item por item para verificar qual afirmação é a verdadeira e por quê. Neste bloco, elaboramos um raciocínio para encontrar expressões importantes associadas aos gases perfeitos. Para isso, primeiramente levantamos algumas hipóteses a respeito do comportamento microscópico dos gases perfeitos. Uma das hipóteses feitas foi a suposição de que a colisão entre duas moléculas do gás ou entre uma molécula e uma parede do recipiente que o contém são perfeitamente elásticas (não há perda de energia). Essa suposição faz a alternativa **b** não ser verdadeira.

Em seguida, avaliamos a contribuição da colisão de cada partícula para a pressão exercida em uma parede do recipiente, a fim de relacionar quantidade de movimento de uma molécula (massa vezes **velocidade**) à pressão. Após considerarmos a contribuição da colisão de todas as moléculas, obtivemos a equação fundamental da teoria cinética,

$$p = \frac{1}{3} \mu (\bar{v})^2.$$

Vemos que de fato ela relaciona a pressão à velocidade média das partículas (a pressão cresce proporcionalmente ao quadrado da média das velocidades). Logo, as alternativas **a** e **d** também são falsas.

Ao escrevermos a densidade volumétrica μ como a massa total do gás dividida pelo

volume que ele ocupa, nós podemos relacionar a Equação de Clapeyron com a Equação fundamental da teoria cinética e assim escrever a temperatura do gás também sendo proporcional ao quadrado da velocidade média das moléculas:

$$T = \frac{M}{3R} (\bar{v})^2$$

Concluimos, portanto, que a alternativa **e** também é falsa.

Como podemos escrever a energia cinética das moléculas do gás em termos do quadrado da velocidade média, verifica-se que a energia cinética é proporcional à temperatura:

$$T = \frac{2M}{3mR} U$$

Isso significa que a alternativa **c** é a correta.
Resposta: alternativa **c**.

58. O valor da temperatura de uma amostra de gás perfeito é consequência:

- a) da radiação emitida por suas moléculas.
- b) da energia potencial total de suas moléculas.
- c) da energia potencial média de suas moléculas.
- d) da energia cinética média de suas moléculas.
- e) do calor de cada uma de suas moléculas.

59. O valor da energia cinética média das partículas de uma amostra de gás perfeito é diretamente proporcional:

- a) à pressão do gás.
- b) ao volume do gás.
- c) à temperatura absoluta do gás.
- d) à temperatura do gás em graus Celsius.
- e) à variação da temperatura absoluta do gás.

60. Se uma amostra de gás perfeito encontra-se no interior de um recipiente de volume constante e tem a energia cinética média de suas moléculas aumentada:

- a) a pressão do gás aumentará e sua temperatura permanecerá constante.
- b) a pressão permanecerá constante e a temperatura aumentará.

- c) a pressão e a temperatura aumentarão.
- d) a pressão diminuirá e a temperatura aumentará.
- e) Todas as afirmações estão incorretas.

61. Duas amostras de massas iguais de um gás perfeito são colocadas em dois recipientes, **A** e **B**. As temperaturas são diferentes, sendo $T_A > T_B$. Podemos afirmar que:

- a) o gás em **A** possui mais calor que em **B**.
- b) o gás em **A** possui menor velocidade que em **B**.
- c) a energia cinética das moléculas é menor no gás em **A** que em **B**.
- d) a energia cinética média das moléculas do gás é maior em **A** que em **B**.
- e) a temperatura não influencia a energia de movimento das partículas de um gás.

Exercícios Nível 2

62. Uma amostra de gás perfeito é colocada no interior de um recipiente e mantida à pressão constante. Se a temperatura e o volume aumentam:

- {01} o número de choques por centímetro quadrado de parede deve aumentar;
- {02} a distância média entre as moléculas deve aumentar;
- {04} a energia cinética média das moléculas não sofre alteração;
- {08} a velocidade média das moléculas também deve aumentar;
- {16} a pressão tem que aumentar, pois a temperatura do gás aumentou.

Dê como resposta a soma dos números associados às proposições corretas.

63. (UFPI) O ar que respiramos é constituído, entre outros, pelos seguintes gases: O_2 , CO_2 e N_2 . Suponha que, na sala em que você se encontra, o ar esteja em equilíbrio termodinâmico. Com relação ao ar da sala, analise as seguintes afirmativas e coloque **V**, para verdadeiro, ou **F**, para falso.

- 1 () As moléculas de CO_2 têm menor energia cinética média do que as moléculas de O_2 .
- 2 () A energia cinética média das moléculas é a mesma para todos os gases presentes na sala.
- 3 () As velocidades médias das moléculas são as mesmas para todos os gases presentes na sala.
- 4 () A velocidade média das moléculas de CO_2 é menor do que a velocidade média das moléculas de O_2 .

64. (UFRGS-RS) Na tabela abaixo, E_{H_2} e E_{O_2} e V_{H_2} e V_{O_2} são, respectivamente, as energias cinéticas médias e as velocidades médias das moléculas de uma amostra de gás H_2 e de outra, de gás O_2 , ambas em temperatura de $27^\circ C$.

Gás	Temperatura ($^\circ C$)	Energia cinética média	Velocidade média
H_2	27	E_{H_2}	V_{H_2}
O_2	27	E_{O_2}	V_{O_2}

Assinale a alternativa que relaciona corretamente os valores das energias cinéticas médias e das velocidades médias das moléculas de H_2 e de O_2 .

- a) $E_{H_2} > E_{O_2}$ e $V_{H_2} > V_{O_2}$.
- b) $E_{H_2} < E_{O_2}$ e $V_{H_2} < V_{O_2}$.
- c) $E_{H_2} = E_{O_2}$ e $V_{H_2} > V_{O_2}$.
- d) $E_{H_2} = E_{O_2}$ e $V_{H_2} = V_{O_2}$.
- e) $E_{H_2} = E_{O_2}$ e $V_{H_2} < V_{O_2}$.

65. Em um recipiente hermeticamente fechado, encontramos nitrogênio à temperatura de $0^\circ C$. Como o mol do referido gás é igual a 28 g, qual o valor da velocidade média quadrática das suas partículas?

Dado: $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

66. Avaliando a energia interna de 5 mols de gás perfeito, encontramos o valor 24 930 J. Qual a sua temperatura em graus Celsius?

Dado: $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

67. Um gás perfeito ocupa um volume de 2,0 L e possui uma energia interna igual a 600 J. Qual o valor da pressão desse gás, em atmosferas?

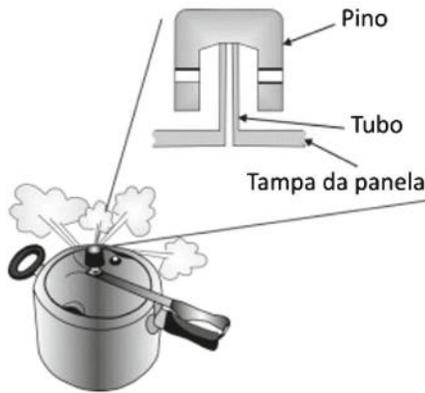
Dados: $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$;

$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$.

Quando um recipiente de 1,5 litro de água mineral com gás é aberto, você pode observar bolhas subindo através do líquido. Essas bolhas aumentam de tamanho, praticamente dobrando seu volume quando atingem as proximidades da superfície. Por que esse aumento de volume ocorre?

Exercícios Nível 3

68. (Fuvest-SP) Para impedir que a pressão interna de uma panela de pressão ultrapasse um certo valor, em sua tampa há um dispositivo formado por um pino acoplado a um tubo cilíndrico, como esquematizado na figura abaixo.



Reprodução/Fuvest, 2014

Enquanto a força resultante sobre o pino for dirigida para baixo, a panela estará perfeitamente vedada. Considere o diâmetro interno do tubo cilíndrico igual a 4 mm e a massa do pino igual a 48 g. Na situação em que apenas a força gravitacional, a pressão atmosférica e a exercida pelos gases na panela atuam no pino, a pressão absoluta máxima no interior da panela é

- | | |
|------------|------------|
| a) 1,1 atm | d) 1,8 atm |
| b) 1,2 atm | e) 2,2 atm |
| c) 1,4 atm | |

Note e adote:

$$\pi = 3$$

$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\text{aceleração da gravidade} = 10 \text{ m/s}^2$$

69. Por que um balão atmosférico é tão grande? Isso ocorre devido à força vertical para cima que lhe permite subir – o empuxo, dado pela Lei de Arquimedes – ter intensidade diretamente proporcional à densidade do ar e ao volume deste

fluido deslocado pelo sistema. Como o ar tem densidade relativamente pequena (cerca de $1,2 \text{ kg/m}^3$, a 27°C), para se obter um empuxo significativo, capaz de superar o peso total, provocando-se a ascensão, deve-se inflar o envelope do balão de modo que este adquira um volume relativamente grande.

Considere um balão atmosférico constituído do envelope, cesta para três passageiros, amarras, queimador e tanque de gás. A massa total do conjunto com os três passageiros e o envelope vazio é de 325 kg. Sabe-se que quando o envelope está totalmente inflado seu volume é de 1250 m^3 . Admitindo-se que no local a intensidade da aceleração da gravidade vale 10 m/s^2 , a pressão atmosférica é praticamente constante e a temperatura ambiente é de 27°C , responda:

- Que massa m_1 de ar caberia dentro do envelope se este fosse totalmente inflado com ar a 27°C ?
- Que massa m_2 de ar caberia dentro do envelope se este fosse totalmente inflado com ar a 127°C ?
- Qual a intensidade a da aceleração do balão quando este for lançado com os três passageiros, estando o ar do envelope a 127°C ? Despreze nos cálculos o empuxo exercido pelo ar nas partes sólidas do sistema.

70. (Fuvest-SP) O sistema de *airbag* de um carro é formado por um sensor que detecta rápidas diminuições de velocidade, uma bolsa inflável e um dispositivo contendo azida de sódio (NaN_3) e outras substâncias secundárias. O sensor, ao detectar uma grande desaceleração, produz uma descarga elétrica que provoca o aquecimento e a decomposição da azida de sódio. O nitrogênio (N_2) liberado na reação infla rapidamente a bolsa, que, então, protege o motorista. Considere a situação em que o carro, inicialmente a 36 km/h (10 m/s), dirigido por um motorista de 60 kg , para devido a uma colisão frontal.

- a) Nessa colisão, qual é a variação ΔE da energia cinética do motorista?
- b) Durante o 0,2 s da interação do motorista com a bolsa, qual é o módulo α da aceleração média desse motorista?
- c) Escreva a reação química de decomposição da azida de sódio formando sódio metálico e nitrogênio gasoso.
- d) Sob pressão atmosférica de 1 atm e temperatura de 27 °C, qual é o volume V de gás nitrogênio formado pela decomposição de 65 g de azida de sódio?

Note e adote:

Desconsidere o intervalo de tempo para a bolsa inflar;

Ao término da interação com a bolsa do *airbag*, o motorista está em repouso;

Considere o nitrogênio como um gás ideal;

Constante universal dos gases: $R = 0,08 \text{ atm L / (mol K)}$;

$0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$.

Elemento	Massa atômica (g/mol)
Sódio	23
Nitrogênio	14

71. Em um laboratório de Física, um estudante realizou um experimento que consistia em pegar um recipiente, vazio, de paredes indeformáveis, dotado de uma válvula que não deixa a pressão interna passar de um valor-limite. Esse estudante injetou hidrogênio gasoso (que se comporta como gás perfeito) no interior do recipiente até que a pressão atingisse o máximo valor e observou que a massa de gás injetada era igual a 10 gramas. Em seguida, ele esfriou o gás, diminuindo a sua temperatura absoluta em 20%. Que massa do mesmo gás, na nova temperatura, o estudante deve injetar no interior do recipiente para restabelecer a pressão máxima suportável pela válvula?
72. (UPM-SP) Num recipiente, fechado por uma tampa hermética, há 10 mols de gás perfeito, sob pressão de 5 atmosferas, à temperatura ambiente e em um local de pressão atmosférica normal. Abrindo a tampa do recipiente, o número de moléculas que escapa é:

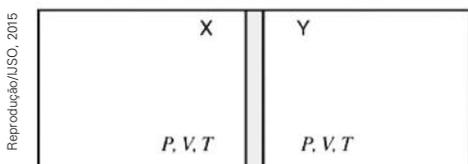
- a) $12 \cdot 10^{23}$.
- b) $24 \cdot 10^{23}$.
- c) $36 \cdot 10^{23}$.
- d) $48 \cdot 10^{23}$.
- e) $60 \cdot 10^{23}$.

Adote:

Número de Avogadro = $6 \cdot 10^{23}$.

73. (Unicamp-SP) Alguns experimentos muito importantes em física, tais como os realizados em grandes aceleradores de partículas, necessitam de um ambiente com uma atmosfera extremamente rarefeita, comumente denominada de ultra-alto-vácuo. Em tais ambientes a pressão é menor ou igual a 10^{-6} Pa.
- a) Supondo que as moléculas que compõem uma atmosfera de ultra-alto-vácuo estão distribuídas uniformemente no espaço e se comportam como um gás ideal, qual é o número de moléculas por unidade de volume em uma atmosfera cuja pressão seja $P = 3,2 \cdot 10^{-8}$ Pa, à temperatura ambiente $T = 300 \text{ K}$? Se necessário, use: Número de Avogadro $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ e a Constante universal dos gases ideais $R = 8 \text{ J/molK}$.
- b) Sabe-se que a pressão atmosférica diminui com a altitude, de tal forma que, a centenas de quilômetros de altitude, ela se aproxima do vácuo absoluto. Por outro lado, pressões acima da encontrada na superfície terrestre podem ser atingidas facilmente em uma submersão aquática. Calcule a razão $\frac{P_{\text{sub}}}{P_{\text{nave}}}$ entre as pressões que devem suportar a carcaça de uma nave espacial (P_{nave}) a centenas de quilômetros de altitude e a de um submarino (P_{sub}) a 100 m de profundidade, supondo que o interior de ambos os veículos se encontra à pressão de 1 atm. Considere a densidade da água como $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.
74. (IJSO) Um tanque é dividido em dois compartimentos **X** e **Y** separados por uma parede termicamente isolante que pode mover-se livre de atrito. **X** e **Y** contêm porções de gás ideal que estão inicialmente a uma mesma pressão P , volume V e temperatura T como mostrado na figura seguinte. Em seguida, a temperatura do compartimento **X** aumenta para um valor igual a $3T$ e o sistema atinge um novo estado de equilíbrio.

A temperatura de **Y** permanece constante e igual a T ao longo do tempo.



Qual é a pressão de **Y** no novo estado de equilíbrio?

- a) P
- b) $1,5P$
- c) $2P$
- d) $3P$

75. (UFC-CE) Um cilindro de área de seção reta S e comprimento L , completamente isolado, é dividido em partições **A** e **B**, ambas de volumes iguais, por uma parede diatérmica, móvel e impermeável. Cada partição é preenchida com um gás ideal, de modo que a partição **A** possui o dobro do número de mols da partição **B**. Ambas as partições encontram-se em uma mesma temperatura T durante o processo. Despreze quaisquer efeitos de atrito e, quando o sistema estiver em equilíbrio, determine:

- a) os volumes das partições **A** e **B** em função de S e L .
- b) o módulo do deslocamento da parede em função de L .

76. (Fuvest-SP) Um balão de ar quente é constituído de um envelope (parte inflável), cesta para três passageiros, queimador e tanque de gás. A massa total do balão, com três passageiros e com o envelope vazio, é de 400 kg. O envelope totalmente inflado tem um volume de $1\,500\text{ m}^3$.

- a) Que massa de ar M_1 caberia no interior do envelope, se totalmente inflado, com pressão igual à pressão atmosférica local (P_{atm}) e temperatura $T = 27^\circ\text{C}$?
- b) Qual a massa total de ar M_2 , no interior do envelope, após este ser totalmente inflado com ar quente a uma temperatura de 127°C e pressão P_{atm} ?
- c) Qual a aceleração do balão, com os passageiros, ao ser lançado nas condições dadas no item **b**) quando a temperatura externa é $T = 27^\circ\text{C}$?

Note e adote:

Densidade do ar a 27°C e à pressão atmosférica local = $1,2\text{ kg/m}^3$.

Aceleração da gravidade na Terra, $g = 10\text{ m/s}^2$.

Considere todas as operações realizadas ao nível do mar.

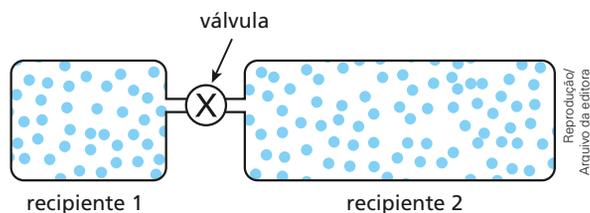
Despreze o empuxo acarretado pelas partes sólidas do balão.

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

Indique a resolução da questão. Não é suficiente apenas escrever as respostas.

77. (UFF-RJ) Um gás ideal estava confinado à mesma temperatura em dois recipientes, 1 e 2, ligados por uma válvula inicialmente fechada. Os volumes dos recipientes 1 e 2 são $4,0\text{ L}$ e $6,0\text{ L}$, respectivamente. A pressão inicial no recipiente 1 era de $4,8\text{ atm}$.

Abriu-se a válvula e os conteúdos dos recipientes atingiram um estado final de equilíbrio à pressão de $2,4\text{ atm}$ e à mesma temperatura inicial.



A porcentagem total de mols de gás que ocupava o recipiente 1 antes da abertura da válvula era:

- a) 60%.
- b) 80%.
- c) 50%.
- d) 40%.
- e) 20%.

78. (UEFS-BA) A experiência mostra que, para todos os gases, as grandezas volume, V , temperatura, T , e pressão, p , obedecem, aproximadamente, a uma equação denominada Equação de Clapeyron, desde que os gases tenham baixas densidades, isto é, as temperaturas não devem ser muito "baixas" e as pressões não devem ser muito "altas". Isso levou os físicos a formularem o conceito de gás ideal, que obedece à Equação de Clapeyron, em quaisquer condições.

Considere um recipiente em que há $3,0$ litros do gás nitrogênio, N_2 , à pressão de $5,0\text{ atm}$ e à temperatura T . Em um segundo recipiente, há $2,0$ litros do gás oxigênio, O_2 , à pressão de $4,0\text{ atm}$ e à mesma temperatura T . Esses gases são misturados em um recipiente de volume

- 10,0 litros, mantido à mesma temperatura T . Com base nessas informações, é correto afirmar:
- A pressão da mistura é igual a 3,2 atm.
 - A fração molar do gás nitrogênio corresponde a 40%.
 - A fração molar do gás oxigênio corresponde a 50%.
 - A massa molecular média da mistura é, aproximadamente, igual a 29,4, sendo as massas moleculares do N_2 e do O_2 iguais, respectivamente, a 28 e 32.
 - A mistura apresenta um número total de oito mols.

79. (Unicamp-SP) Uma sala tem 6 m de largura, 10 m de comprimento e 4 m de altura. Deseja-se refrigerar o ar dentro da sala. Considere o calor específico do ar como sendo $30 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ e use $R = 8 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

- Considerando o ar dentro da sala como um gás ideal à pressão ambiente ($P = 10^5 \text{ N/m}^2$), quantos mols de gás existem dentro da sala a 27°C ?
- Qual é a quantidade de calor que o refrigerador deve retirar da massa de ar do item **a** para resfriá-la até 17°C ?

80. (ITA-SP) Considere uma mistura de gases H_2 e N_2 em equilíbrio térmico. Sobre a energia cinética média e sobre a velocidade média das moléculas de cada gás, pode-se concluir que:

- as moléculas de N_2 e H_2 têm a mesma energia cinética média e a mesma velocidade média.
- ambas têm a mesma velocidade média, mas as moléculas de N_2 têm maior energia cinética média.
- ambas têm a mesma velocidade média, mas as moléculas de H_2 têm maior energia cinética média.
- ambas têm a mesma energia cinética média, mas as moléculas de N_2 têm maior velocidade média.
- ambas têm a mesma energia cinética média, mas as moléculas de H_2 têm maior velocidade média.

81. (ITA-SP) Uma cesta portando uma pessoa deve ser suspensa por meio de balões, sendo cada qual inflado com 1 m^3 de hélio na temperatura local (27°C). Cada balão vazio com seus apetrechos pesa

1,0 N. São dadas a massa atômica do oxigênio $A_O = 16$, a do nitrogênio $A_N = 14$, a do hélio $A_{He} = 4$ e a constante dos gases $R = 0,082 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Considerando que o conjunto pessoa e cesta pesa 1000 N e que a atmosfera é composta de 30% de O_2 e 70% de N_2 , determine o número mínimo de balões necessários.

Dado: $g = 10 \text{ m/s}^2$.

82. (Unicamp-SP) Os reguladores de pressão são acessórios de segurança fundamentais para reduzir a pressão de gases no interior dos cilindros até que se atinja sua pressão de utilização. Cada tipo de gás possui um regulador específico.



Reprodução/Unicamp, 2016

a) Tipicamente, gases podem ser armazenados em cilindros a uma pressão interna de $P_0 = 2,0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ e ser utilizados com uma pressão de saída do regulador de $P_1 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Pa}$. Considere um gás ideal mantido em recipiente fechado a uma temperatura inicial de $T_0 = 300 \text{ K}$. Calcule a temperatura final T_1 do gás se ele for submetido isovolumetricamente à variação de pressão dada acima.

b) Quando os gases saem dos reguladores para o circuito de utilização, é comum que o fluxo do gás (definido como sendo o volume do gás que atravessa a tubulação por unidade de tempo) seja monitorado através de um instrumento denominado fluxômetro. Considere um tanque cilíndrico com a área da base igual a $A = 2,0 \text{ m}^2$ que se encontra inicialmente vazio e que será preenchido com gás nitrogênio. Durante o preenchimento, o fluxo de gás que entra no tanque é medido pela posição da esfera sólida preta do fluxômetro, como ilustra a figura acima. A escala do fluxômetro é dada em **litros/minuto**. A medida do fluxo de nitrogênio e sua densidade $d = 1,0 \text{ kg/m}^3$ permaneceram constantes durante todo o processo de preenchimento, que durou um intervalo de tempo $\Delta t = 12 \text{ h}$. Após este intervalo de tempo, a válvula do tanque é fechada com certa quantidade de gás nitrogênio em repouso no seu interior. Calcule a pressão exercida pelo gás na base do tanque. Caso necessário, use $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Para raciocinar um pouco mais

83. [Fuvest-SP] Um recipiente hermeticamente fechado e termicamente isolado, com volume de 750 L, contém ar inicialmente à pressão atmosférica de 1 atm e à temperatura de 27 °C. No interior do recipiente, foi colocada uma pequena vela acesa, de 2,5 g. Sabendo-se que a massa da vela é consumida a uma taxa de 0,1 g/min e que a queima da vela produz energia à razão de $3,6 \cdot 10^4$ J/g, determine
- a potência W da vela acesa;
 - a quantidade de energia E produzida pela queima completa da vela;
 - o aumento ΔT da temperatura do ar no interior do recipiente, durante a queima da vela;
 - a pressão P do ar no interior do recipiente, logo após a queima da vela.

Note e adote:

O ar deve ser tratado como gás ideal.

O volume de 1 mol de gás ideal à pressão atmosférica de 1 atm e à temperatura de 27 °C é 25 L.

Calor molar do ar a volume constante:

$$C_v = 30 \text{ J/(mol K)}.$$

Constante universal dos gases:

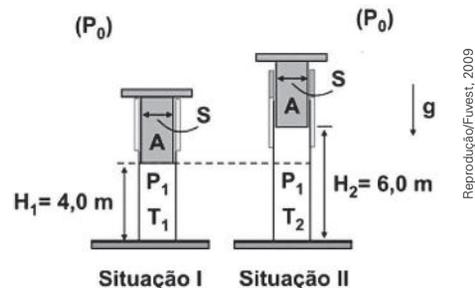
$$R = 0,08 \text{ atm L/(mol K)}.$$

$$0 \text{ °C} = 273 \text{ K}.$$

Devem ser desconsideradas a capacidade térmica do recipiente e a variação da massa de gás no seu interior devido à queima da vela.

84. [Fuvest-SP] Um grande cilindro, com ar inicialmente à pressão P_1 e temperatura ambiente ($T_1 = 300$ K), quando aquecido, pode provocar a elevação de uma plataforma **A**, que funciona como um pistão, até uma posição mais alta. Tal processo exemplifica a transformação de calor em trabalho, que ocorre nas máquinas térmicas, à **pressão constante**. Em uma dessas situações, o ar contido em um cilindro, cuja área da base S é igual a $0,16 \text{ m}^2$, sustenta uma plataforma de massa $M_A = 160$ kg a uma altura $H_1 = 4,0$ m do chão (situação I). Ao ser aquecido, a partir da queima de um combustível, o ar passa a uma temperatura T_2 , expandindo-se e empurrando a plataforma até uma nova altura $H_2 = 6,0$ m (si-

tuação II). Para verificar em que medida esse é um processo eficiente, estime:



- A pressão P_1 do ar dentro do cilindro, em pascals, durante a operação.
- A temperatura T_2 do ar no cilindro, em kelvins, na situação II.
- A eficiência do processo, indicada pela razão $R = \Delta E_p/Q$, onde ΔE_p é a variação da energia potencial da plataforma, quando ela se desloca da altura H_1 para a altura H_2 , e Q , a quantidade de calor recebida pelo ar do cilindro durante o aquecimento.

85. O futebol é uma modalidade esportiva consagrada mundialmente.

A bola para a prática profissional desse esporte, no entanto, deve obedecer a parâmetros rígidos. Segundo o Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), uma bola oficial deve ter diâmetro interno próximo de 20,0 cm, massa entre 410 g e 450 g, exigindo pressões que variam de 0,6 a 1,1 atmosferas (atm) no preenchimento com ar a volume praticamente constante.

Considere nos cálculos $\pi \cong 3$ e $1,0 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$.

- Na expressão máxima de 1,1 atm, determine em kN, a intensidade da força média exercida pelo ar na superfície interna da bola.
- Admitindo-se que o ar que preenche a bola se comporte como um gás perfeito e que, na pressão de 0,6 atm, sua temperatura seja de 15 °C, calcule a temperatura desse ar, em graus Celsius, na pressão de 0,7 atm.
- Adotando-se para constante universal dos gases perfeitos o valor $R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, determine a quantidade de ar, em mol, existente dentro da bola quando esse gás estiver na pressão de 1,0 atm, a 27 °C.

86. Em uma prova de laboratório, um professor de Física pegou três recipientes, **A**, **B** e **C**. Colocou em um deles hidrogênio, em outro, neônio, e, no que restou, dióxido de carbono, todos a 27 °C. Forneceu aos alunos duas tabelas, sendo uma dos mols dos referidos gases e outra associando a velocidade média quadrática das partículas do gás com o recipiente portador.

Tabela I	
Gás	Mol (g)
H ₂	2,0
Ne	20
CO ₂	44

Tabela II	
Recipiente	Velocidade média quadrática das partículas
A	412 m/s
B	1 936 m/s
C	612 m/s

Identifique o gás contido em cada recipiente.

Dado: $3R = 25 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$.

87. (Fuvest-SP) Um cilindro de oxigênio hospitalar (O₂), de 60 litros, contém, inicialmente, gás a uma pressão de 100 atm e temperatura de 300 K. Quando é utilizado para a respiração de pacientes, o gás passa por um redutor de pressão, regulado para fornecer oxigênio a 3 atm, nessa mesma temperatura, acoplado a um medidor de fluxo, que indica, para essas condições, o consumo de oxigênio em litros/minuto. Assim, determine:

Assim, determine:

- o número N_0 de mols de O₂, presentes inicialmente no cilindro;
- o número n de mols de O₂, consumidos em 30 minutos de uso, com o medidor de fluxo indicando 5 litros/minuto.
- o intervalo de tempo t , em horas, de utilização do O₂, mantido o fluxo de 5 litros/minuto, até que a pressão interna no cilindro fique reduzida a 40 atm.

Note e adote:

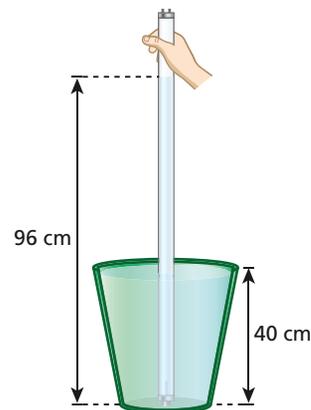
Considere o O₂ como gás ideal.

Suponha a temperatura constante e igual a 300 K.

A constante dos gases ideais:

$$R \cong 8 \cdot 10^{-2} \text{ litros} \cdot \text{atm}/\text{K}.$$

88. (UEL-PR) Um aluno ouviu dizer que as lâmpadas fluorescentes funcionam a baixa pressão. Ao lembrar-se das suas aulas de Física, teve a seguinte ideia para apresentar na feira de ciências do colégio: determinar experimentalmente a pressão no interior de uma lâmpada fluorescente. Para isto, providenciou um balde de 5 litros cheio de água, com uma altura de 40 cm, em cujo interior, e aproximadamente em seu centro, colocou um prego em pé, fixo no fundo do balde. Em seguida, o aluno, com um golpe rápido e num movimento vertical, perfurou uma das pontas da lâmpada, fazendo o prego penetrar nela. Ele observou que a água do balde subiu no interior da lâmpada até uma altura de 0,96 m da base. Com esses dados, determine a pressão interna da lâmpada fluorescente, sabendo que a lâmpada usada era de 40 W de potência e, por isso, tinha um comprimento de 1,20 m. Suponha que o gás no interior da lâmpada fluorescente seja ideal, que a variação no nível da água do balde seja desprezível e que o gás sofra uma transformação isotérmica.

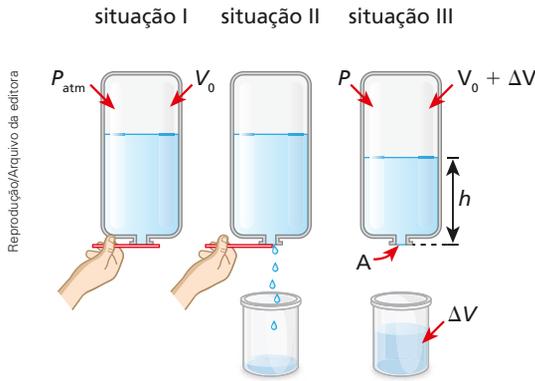


Reprodução/Arquivo da editora

São dadas a pressão atmosférica local $P_0 = 10 \text{ m H}_2\text{O}$ e a aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- 102,2 cm H₂O
- 188,8 cm H₂O
- 199,1 cm H₂O
- 207,4 cm H₂O
- 549,5 cm H₂O

89. (Fuvest-SP)



Valores medidos	
V_0	500 mL
ΔV	25 mL
h	50 cm

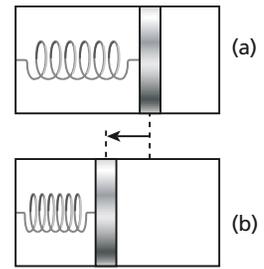
Para se estimar o valor da pressão atmosférica, P_{atm} , pode ser utilizado um tubo comprido, transparente, fechado em uma extremidade e com um pequeno gargalo na outra. O tubo, aberto e parcialmente cheio de água, deve ser invertido, segurando-se um cartão que feche a abertura do gargalo (situação I). Em seguida, deve-se mover lentamente o cartão de forma que a água possa escoar, sem que entre ar, coletando-se a água que sai em um recipiente (situação II). A água para de escoar quando a pressão no ponto **A**, na abertura, for igual à pressão atmosférica externa, devendo-se, então, medir a altura h da água no tubo (situação III). Em uma experiência desse tipo, foram obtidos os valores, indicados na tabela, para V_0 , volume inicial do ar no tubo, ΔV , volume da água coletada no recipiente e h , altura final da água no tubo. Em relação a essa experiência, e considerando a situação III,

- determine a razão $R = P/P_{atm}$, entre a pressão final P do ar no tubo e a pressão atmosférica;
- escreva a expressão matemática que relaciona, no ponto **A**, a P_{atm} com a pressão P do ar e a altura h da água dentro do tubo;
- estime, utilizando as expressões obtidas nos itens anteriores, o valor numérico da pressão atmosférica P_{atm} , em N/m^2 .

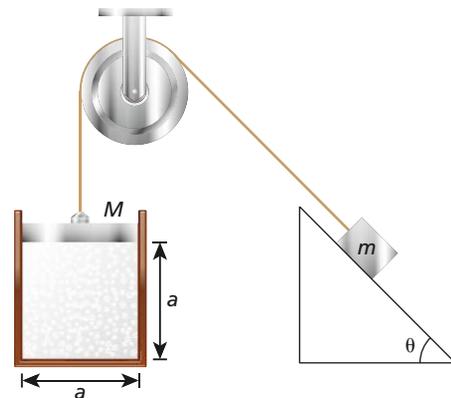
Note e adote:

Considere a temperatura constante e desconsidere os efeitos da tensão superficial.

90. (ITA-SP) Uma parte de um cilindro está preenchida com um mol de um gás ideal monoatômico a uma pressão P_0 e temperatura T_0 . Um êmbolo de massa desprezível separa o gás da outra seção do cilindro, na qual há vácuo e uma mola em seu comprimento natural presa ao êmbolo e à parede oposta do cilindro, como mostra a figura (a). O sistema está termicamente isolado e o êmbolo, inicialmente fixo, é então solto, deslocando-se vagarosamente até passar pela posição de equilíbrio, em que a sua aceleração é nula e o volume ocupado pelo gás é o dobro do original, conforme mostra a figura (b). Desprezando os atritos, determine a temperatura do gás na posição de equilíbrio em função da sua temperatura inicial.



91. (IME-RJ) Em um recipiente, hermeticamente fechado por uma tampa de massa M , com volume interno na forma de um cubo de lado a , encontram-se n mols de um gás ideal a uma temperatura absoluta T . A tampa está presa a uma massa m por um fio que passa por uma roldana, ambos ideais. A massa m encontra-se na iminência de subir um plano inclinado de ângulo θ com a horizontal e coeficiente de atrito estático μ . Considerando que as variáveis estejam no Sistema Internacional e que não exista atrito entre a tampa M e as paredes do recipiente, determine m em função das demais variáveis.



- Dados:** aceleração da gravidade = g ;
constante universal dos gases perfeitos = R ;
pressão atmosférica = P_0 .

Termodinâmica



Richard Croft/Shutterstock

// Uma locomotiva a vapor é um dispositivo que ilustra muito bem uma máquina térmica.

Na fornalha de uma locomotiva a vapor, pela combustão da madeira (ou do carvão), é obtida energia térmica, que é transferida para a água existente na caldeira. Essa água se aquece e entra em ebulição, e o vapor produzido expande-se, realizando trabalho. A expansão do vapor transformou energia térmica em energia mecânica (pela realização de trabalho), o que resulta no movimento do trem.

Neste tópico, vamos continuar os estudos da matéria no estado gasoso através dos conceitos de energia interna, trabalho e calor, as relações com as leis da termodinâmica e como esse conhecimento científico pode ser utilizado no desenvolvimento das máquinas térmicas, dispositivos que revolucionaram os meios de produção e os transportes dos seres humanos.

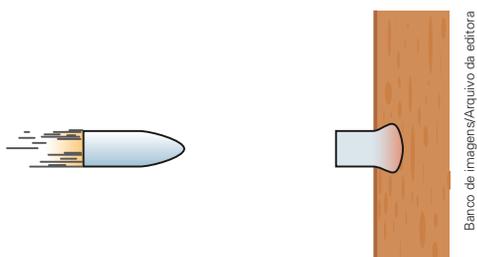
1. Introdução

O estudo da Física envolve quase sempre um conceito primitivo denominado **energia**. Essa energia manifesta-se de várias formas, recebendo em cada caso um nome que a caracteriza: energia mecânica, energia térmica, energia elétrica, energia luminosa e outros.

É importante lembrar que a realização de trabalho pode envolver trânsito ou conversão de energia e que calor também é energia em trânsito.

A **Termodinâmica** estuda as transformações e as relações existentes entre dois tipos de energia: energia mecânica e energia térmica.

Para exemplificar, vamos considerar uma bala de revólver atirada contra um bloco de madeira.



Antes de chocar-se com a madeira, a bala possui uma energia mecânica (cinética). Após o choque, essa energia mecânica converte-se em outras formas de energia, principalmente térmica. Esse fato fica evidenciado pelo aquecimento da bala, em decorrência do choque. Isso significa que a energia (interna) de agitação das suas partículas se intensificou. Assim, houve conversão de energia mecânica em térmica. Essa conversão é medida pelo trabalho realizado pelas forças que se opuseram à penetração da bala.

Vejam, agora, um exemplo um pouco mais complexo: um reator nuclear. Nesse sistema, ocorre fissão de núcleos de urânio (geralmente U^{235} , urânio enriquecido), que liberam calor. O calor é absorvido pela água existente no corpo do reator, que entra em ebulição, vaporizando.

O vapor de água expande-se por uma tubulação, onde encontra, como obstáculo, as partes móveis de uma turbina. Devido à expansão, esse vapor aciona as turbinas, girando-as para a produção de energia elétrica. Observe que parte da energia térmica existente nas partículas do vapor é transformada em energia mecânica na movimentação das partes móveis das turbinas, com a realização de trabalho.

Dos exemplos mais simples (como o impacto e a penetração da bala na madeira) aos mais sofisticados (como o funcionamento de um reator nuclear), é possível converter energia mecânica em térmica e vice-versa.

Em todos os casos em que ocorre essa conversão, há um sistema físico intermediário que transforma um dos dois tipos de energia recebido no outro. No reator nuclear, por exemplo, o sistema intermediário, ou **fluido operante**, é a água, que vaporiza ao receber calor. Seus vapores expandem-se, realizando trabalho.

Nos próximos itens deste tópico, faremos um estudo da **Termodinâmica dos Gases Perfeitos**. Veremos situações em que o sistema físico intermediário na conversão entre energia térmica e energia mecânica é um gás perfeito.

Fissão nuclear: eficiência com menos poluição, mas com altos riscos

A usina de fissão nuclear (na fotografia, usina nuclear em Loire Valley, França), que na década de 1970 representava a grande esperança de geração de energia para uma humanidade que não para de crescer, voltou a ser considerada, após alguns anos sendo tratada como uma grande ameaça para a vida em nosso planeta. Se conseguirmos reduzir os riscos de vazamento radioativo e resolvermos o grande problema da armazenagem dos resíduos originados após a fissão do combustível nuclear, essa forma de geração de energia será muito útil para melhorar o padrão de vida da humanidade. E saiba que ela é a maneira de obtenção de energia que menos polui a Terra!



Alamy/Fotografia

2. Energia interna, trabalho e calor

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, são parâmetros básicos as grandezas físicas **energia interna** (U), **trabalho** (τ) e **quantidade de calor** (Q) associadas a uma transformação sofrida pelo gás perfeito. Vejamos melhor cada uma dessas três grandezas.

Energia interna

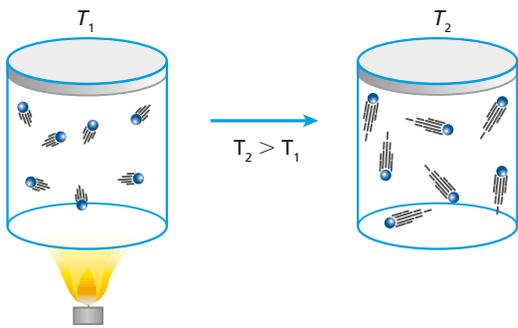
A energia interna de um sistema é o somatório de vários tipos de energia existentes em suas partículas. Nesse cálculo, consideramos as energias cinética de agitação (ou de translação), potencial de agregação, de ligação, nuclear, enfim todas as energias existentes em suas moléculas. Observemos que apenas parte dessa energia (cinética de agitação e potencial de agregação) é térmica. Quando fornecemos energia térmica para um corpo ou a retiramos dele, provocamos a variação de sua energia interna. É essa variação que utilizaremos em Termodinâmica.

No caso do gás perfeito, como vimos nas considerações gerais, as partículas são esferas de dimensões desprezíveis, não existindo energia de ligação, muito menos energia de agregação. Como as dimensões são desprezíveis também não existe energia de rotação. Dessa forma, a energia interna se resume na energia de translação de suas partículas e seu cálculo é feito pela expressão definida pela **Lei de Joule**:

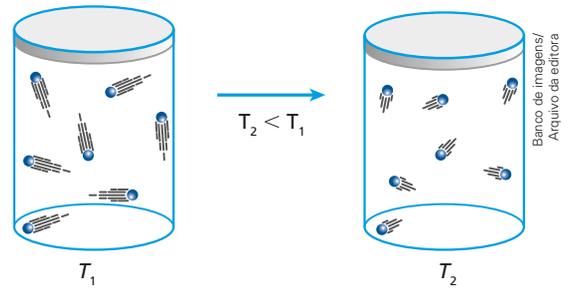
$$U = \frac{3}{2}nRT$$

Observemos que a energia interna (U) de um gás perfeito é função de sua temperatura absoluta (T). Para determinada massa de gás perfeito ($n = \text{constante}$), o aumento da temperatura absoluta corresponde a um aumento da energia interna, e a variação de energia interna ΔU é **positiva** ($\Delta U > 0$).

Se há diminuição de temperatura, a energia interna diminui, e sua variação é **negativa** ($\Delta U < 0$).



// No aumento da energia interna do sistema: $\Delta U > 0$.



// Na diminuição da energia interna do sistema: $\Delta U < 0$.

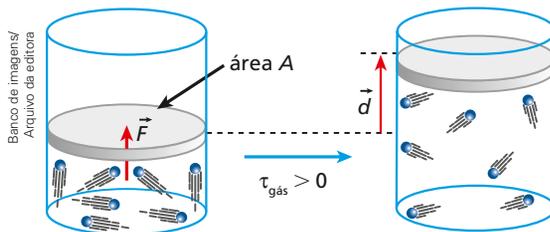
Quando a temperatura permanece constante, a energia interna também se mantém constante. Portanto, sua variação é nula ($\Delta U = 0$).

Relacionando a **Lei de Joule** com a **Equação de Clapeyron**, podemos escrever:

$$U = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}pV$$

Trabalho

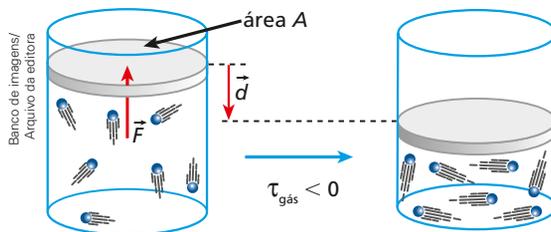
De acordo com o que já foi estudado em Mecânica, sabemos que todo trabalho é realizado por uma força. Vamos, então, considerar a expansão de um gás perfeito, representada na figura abaixo.



// Esquema de expansão de um gás perfeito: volume final maior que volume inicial.

A força (\vec{F}) exercida no êmbolo pelo gás tem o mesmo sentido do deslocamento sofrido pelo êmbolo (\vec{d}). Consequentemente, o trabalho realizado por essa força é **positivo** ($\tau_{\text{gás}} > 0$).

Consideremos agora a compressão de um gás perfeito.



// Esquema de compressão de um gás perfeito: volume final menor que volume inicial.

Nesse caso, a força (\vec{F}) exercida pelo gás tem sentido oposto ao do deslocamento (\vec{d}) do êmbolo. Consequentemente, o trabalho realizado por essa força é **negativo** ($\tau_{\text{gás}} < 0$).

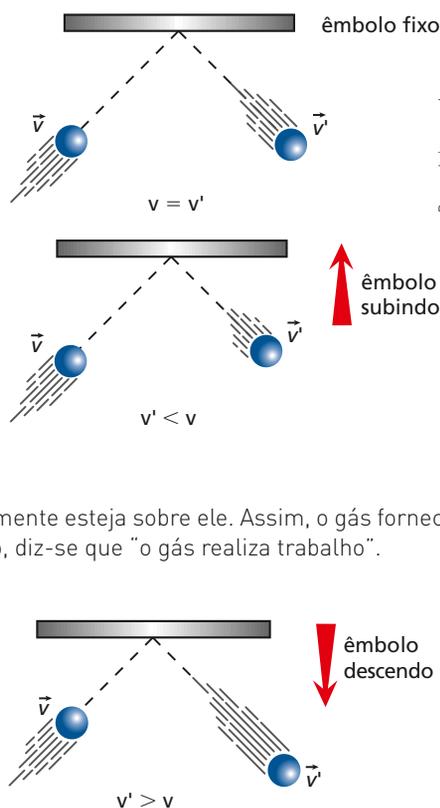
Evidentemente, se o gás não se expande nem é comprimido, temos $\tau_{\text{gás}} = 0$, pois o êmbolo não se desloca.

NOTA!

A expressão da Lei de Joule ($U = \frac{3}{2}nRT$) também é válida aproximadamente para os gases reais rarefeitos monoatômicos. Para os gases de outras atomicidades, entretanto, o cálculo é diferente, já que existem outras parcelas de energia a serem consideradas, como vimos no Tópico 4.

NOTAS!

- Quando o êmbolo representado nas figuras anteriores não muda de posição, as moléculas do gás que se chocam contra ele retornam com a mesma velocidade escalar, uma vez que os choques são supostos perfeitamente elásticos.
- Quando o gás se expande, durante a subida do êmbolo, moléculas do gás chocam-se contra ele e retornam com velocidades escalares menores. Isso significa que, ao expandir-se, o gás perde energia na forma de trabalho. Essa energia perdida corresponde, pelo menos em parte, ao acréscimo de energia potencial gravitacional do êmbolo e de algum corpo que eventualmente esteja sobre ele. Assim, o gás fornece energia durante esse trabalho. Por isso, diz-se que "o gás realiza trabalho".
- Quando o gás é comprimido, durante a descida do êmbolo, moléculas do gás chocam-se contra ele, retornando com velocidades escalares maiores. Nesse caso, o gás recebe energia na forma de trabalho. Por isso, diz-se que "o gás recebe trabalho" na compressão.



Resumindo:

Na **expansão**, $\tau_{\text{gás}} > 0$ e o gás fornece energia na forma de trabalho: o gás realiza trabalho.

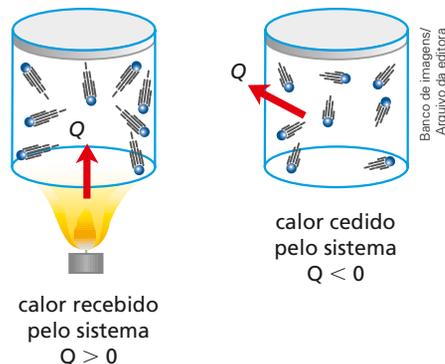
Na **compressão**, $\tau_{\text{gás}} < 0$ e o gás recebe energia na forma de trabalho: o gás recebe trabalho.

Calor

Já vimos que calor é a energia térmica transitando de um sistema para outro. Assim, um dos sistemas **cede** essa energia e o outro a **recebe**. Será conveniado que o calor recebido é **positivo** e o calor cedido, **negativo**.

NOTAS!

- Os sinais atribuídos ao calor recebido e ao calor cedido tornam correta a maneira como equacionaremos a 1ª Lei da Termodinâmica, no item 4.
- É importantíssimo observar que as trocas de energia entre um sistema gasoso e o meio externo podem dar-se tanto pela realização de trabalho como por trocas de calor.

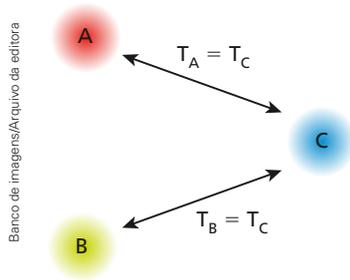


3. Lei Zero da Termodinâmica

A Lei Zero da Termodinâmica trabalha o conceito de **equilíbrio térmico**. Essa lei diz que dois sistemas físicos estão em equilíbrio se, ao serem colocados em contato térmico, não há fluxo de calor entre eles. Como a condição para existir fluxo de calor entre dois locais é que exista uma diferença de temperatura, concluímos que o equilíbrio térmico indica a igualdade das temperaturas dos dois sistemas.

A partir da Lei Zero da Termodinâmica também podemos concluir que, se dois sistemas físicos, **A** e **B**, estão individualmente em equilíbrio térmico com um terceiro sistema **C**, ambos estarão em equilíbrio térmico entre si ($T_A = T_B$).

Assim, se:



vale a conclusão:

$$T_A = T_B$$

4. A 1ª Lei da Termodinâmica

O conhecido **Princípio da Conservação da Energia**, quando aplicado à Termodinâmica, recebe a denominação de **1ª Lei da Termodinâmica**.

Com a aplicação dessa lei, podemos, por meio de uma “contabilidade” energética, saber o que ocorre com um sistema gasoso ao sofrer uma transformação termodinâmica.

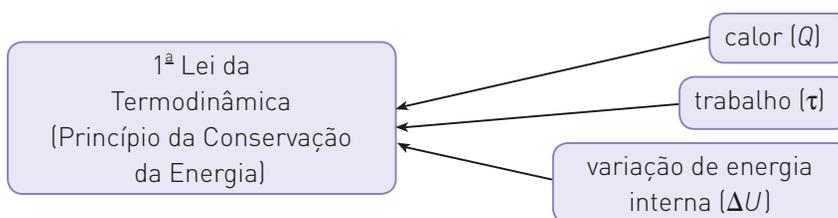
Essa lei pode ser enunciada da seguinte forma:

Para todo sistema termodinâmico existe uma função característica denominada **energia interna**. A variação dessa energia interna (ΔU) entre dois estados quaisquer pode ser determinada pela diferença entre a quantidade de calor (Q) e o trabalho ($\tau_{\text{gás}}$) trocados com o meio externo.

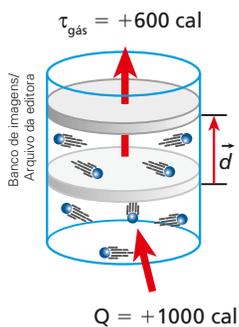
Matematicamente, essa lei pode ser expressa por:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

É importante observar que essas grandezas podem ser positivas, negativas ou nulas. Esquemáticamente, temos:



Para entender o mecanismo de aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica, tomemos como exemplo um sistema gasoso contido em um recipiente provido de êmbolo móvel.



Exemplo 1:

O gás recebe de uma fonte térmica externa uma quantidade de calor igual a 1000 cal ($Q = +1000$ cal). Essa energia, além de produzir um aquecimento no gás, provoca sua expansão, com consequente realização de trabalho equivalente a 600 cal ($\tau_{\text{gás}} = +600$ cal).

Já que a energia fornecida pelo sistema para o ambiente em forma de trabalho é menor que a recebida em forma de calor, pode-se concluir que o restante ficou no gás, na forma de energia interna, produzindo neste um aumento de 400 cal ($\Delta U = +400$ cal).

A aplicação da equação da **1ª Lei da Termodinâmica** leva-nos à mesma conclusão:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

Sendo:

$$Q = +1000 \text{ cal (calor recebido)}$$

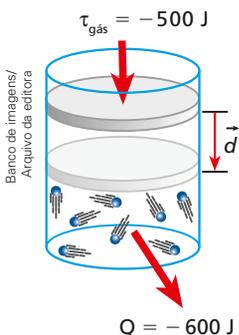
$$\tau_{\text{gás}} = +600 \text{ cal (trabalho realizado)}$$

temos:

$$\Delta U = (+1000) - (+600)$$

$$\Delta U = +400 \text{ cal}$$

O sinal positivo de ΔU indica que o sistema sofreu um **aumento** em sua energia interna.



Exemplo 2:

O gás é comprimido, recebendo um trabalho igual a 500 J ($\tau_{\text{gás}} = -500$ J). Simultaneamente, esse gás perde para o ambiente uma quantidade de calor correspondente a 600 J ($Q = -600$ J).

Como o total de energia deve conservar-se, concluímos que, pelo fato de o calor cedido ser, em módulo, maior que a energia recebida em forma de trabalho, a diferença de 100 J saiu do próprio sistema, diminuindo sua energia interna ($\Delta U = -100$ J).

Matematicamente:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

Sendo:

$$Q = -600 \text{ J (calor cedido)}$$

$$\tau_{\text{gás}} = -500 \text{ J (trabalho recebido)}$$

temos:

$$\Delta U = (-600) - (-500) = -600 + 500$$

$$\Delta U = -100 \text{ J}$$

O sinal negativo de ΔU indica que o sistema sofreu uma **diminuição** em sua energia interna.

NOTA!

Observe que é indiferente usarmos as unidades **caloria** ou **joule**. O que não podemos fazer é misturar as duas unidades.

5. Transformações termodinâmicas particulares

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, encontramos quatro transformações particulares que devem ser analisadas com mais detalhes: a **isotérmica**, a **isométrica**, a **isobárica** e a **adiabática**.

Transformação isotérmica

Nas transformações isotérmicas, a temperatura do sistema gasoso mantém-se constante e, em consequência, a variação de sua energia interna é nula ($\Delta U = 0$). Lembre-se de que a energia interna de um gás perfeito é função de sua temperatura absoluta $\left(U = \frac{3}{2}nRT \right)$.

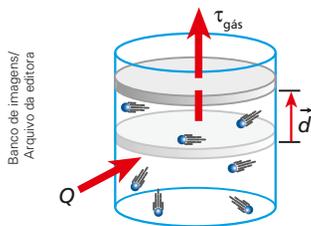
Aplicando a equação da **1ª Lei da Termodinâmica** a essa transformação, temos:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \Rightarrow 0 = Q - \tau_{\text{gás}}$$

$$Q = \tau_{\text{gás}}$$

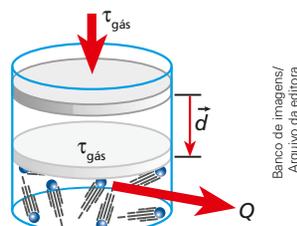
Isso significa que o calor e o trabalho trocados com o meio externo são iguais. Esse fato indica duas possibilidades:

a) Se o sistema gasoso recebe calor ($Q > 0$), essa energia é integralmente utilizada na realização de trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$).



$$Q = \tau_{\text{gás}}, \text{ pois } \Delta U = 0 \\ Q > 0 \text{ e } \tau_{\text{gás}} > 0$$

b) Se o sistema gasoso recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), ele cede para o meio externo igual quantidade de energia em forma de calor ($Q < 0$).



$$\tau_{\text{gás}} = Q, \text{ pois } \Delta U = 0 \\ \tau_{\text{gás}} < 0 \text{ e } Q < 0$$

NOTA!

É importantíssimo observar que a temperatura do gás não varia em uma transformação isotérmica, mas ele troca calor com o meio externo.

Transformação isométrica

Nas transformações isométricas (também denominadas isovolumétricas, ou ainda isocóricas), o volume do gás mantém-se constante e, em consequência, o sistema não troca trabalho com o meio externo ($\tau_{\text{gás}} = 0$). Portanto, nesse tipo de transformação o sistema não realiza nem recebe trabalho.

Utilizando a equação da **1ª Lei da Termodinâmica**, obtemos:

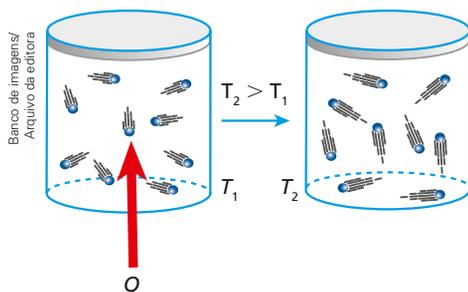
$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \Rightarrow \Delta U = Q - 0$$

$$\Delta U = Q$$

Isso significa que a variação de energia interna sofrida pelo sistema gasoso é igual ao calor trocado com o meio externo.

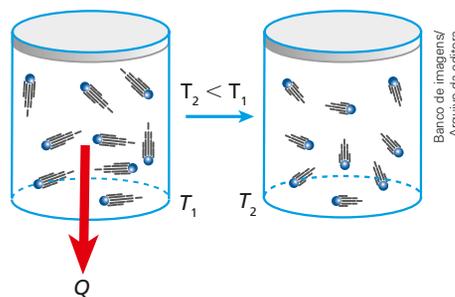
Temos, então, duas situações a considerar:

a) Se o sistema recebe calor ($Q > 0$), sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) em igual valor.



$$\tau_{\text{gás}} = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$$

b) Se o sistema cede calor ($Q < 0$), sua energia interna diminui ($\Delta U < 0$) em igual valor.



$$\tau_{\text{gás}} = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$$

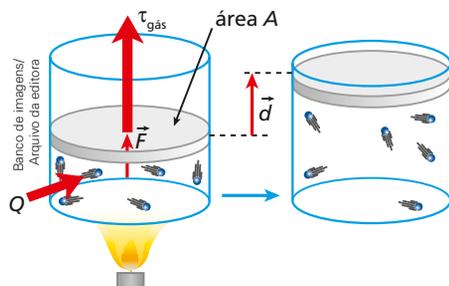
Transformação isobárica

Nas transformações isobáricas, a pressão do sistema gasoso mantém-se constante. Dessa forma, a análise do que ocorre é feita pela **Equação de Clapeyron** (é bom lembrar que estamos utilizando o gás perfeito como sistema físico intermediário):

$$pV = nRT$$

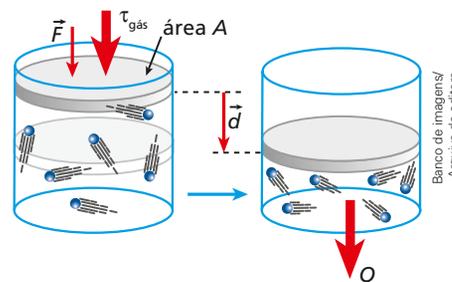
Note que o volume (V) do gás varia na razão direta da temperatura absoluta (T), já que as demais grandezas permanecem constantes nessa transformação. Há, então, duas situações a considerar:

a) Quando a temperatura absoluta do sistema aumenta, seu volume também aumenta. Isso significa que sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) e que o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$). É evidente que toda essa energia entra no sistema na forma de calor.



$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \text{ ou } Q = \tau_{\text{gás}} + \Delta U$$

b) Quando a temperatura absoluta do sistema diminui, seu volume também diminui. Isso significa que sua energia interna diminui ($\Delta U < 0$) e que o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$). É evidente que toda essa energia sai do sistema na forma de calor.



$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \text{ ou } Q = \tau_{\text{gás}} + \Delta U$$

Trabalho de um gás em uma transformação isobárica (τ_p)

Considere um gás em expansão isobárica.

Podemos calcular o trabalho realizado por ele usando a fórmula da definição de trabalho de força constante:

$$\tau_p = Fd \quad (I)$$

em que F é o módulo da força média aplicada pelo gás no êmbolo móvel do recipiente e d é o módulo do deslocamento sofrido por ele.

Sendo A a área da secção transversal do êmbolo, da definição de pressão, temos:

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = pA \quad (II)$$

Substituindo (II) em (I), vem:

$$\tau_p = pAd$$

O produto Ad , contudo, corresponde ao volume varrido pelo êmbolo, isto é, à variação de volume ΔV sofrida pelo gás nessa transformação ($Ad = \Delta V$).

Assim, a equação do trabalho do gás em uma transformação isobárica fica expressa pelo produto da pressão (p), que permanece constante, pela variação de volume ΔV sofrida pelo gás perfeito:

$$\tau_p = p\Delta V$$

Usando a **Equação de Clapeyron**, completamos a relação:

$$\tau_p = p\Delta V = nR\Delta T$$

Essa expressão é válida também na compressão isobárica de um gás perfeito.

Transformação adiabática

Nas transformações adiabáticas, não há troca de calor entre o sistema e o meio externo. Dessa forma, toda a energia recebida ou cedida pelo sistema ocorre por meio de trabalho.

Da equação da **1ª Lei da Termodinâmica**, sendo $Q = 0$, temos:

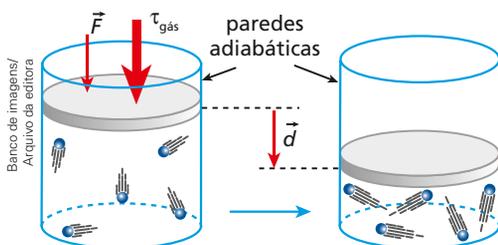
$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \Rightarrow \Delta U = 0 - \tau_{\text{gás}}$$

$$\Delta U = -\tau_{\text{gás}}$$

Isso significa que o módulo da variação de energia interna sofrida pelo sistema é igual ao módulo do trabalho que o sistema troca com o meio externo.

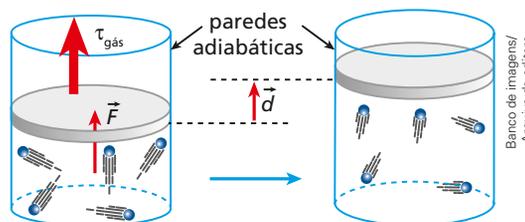
Assim, temos duas situações a considerar:

- a) Quando o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) em igual valor.

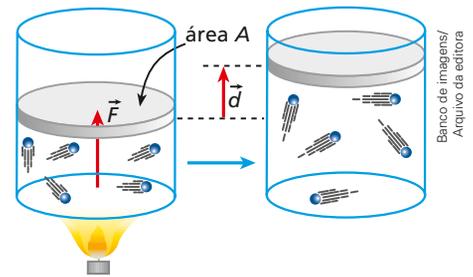


$$\Delta U = -\tau_{\text{gás}}$$

- b) Quando o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), ele o faz retirando essa energia da própria energia interna, que diminui ($\Delta U < 0$).



$$\Delta U = -\tau_{\text{gás}}$$

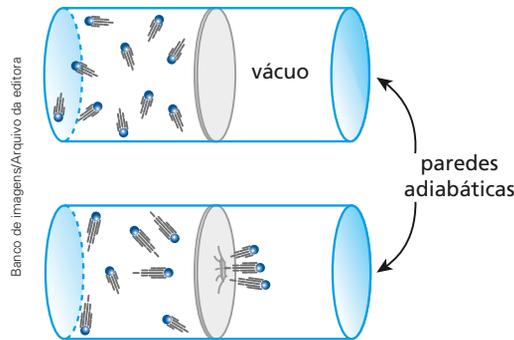


Expansão livre

Para entender melhor, considere um recipiente de paredes rígidas (volume constante) e adiabáticas (não permite trocas de calor através delas), dividido em duas partes por uma fina película. Em uma das partes coloca-se certa massa de gás perfeito, enquanto na outra supõe-se vácuo.

NOTA!

A expansão livre é uma transformação termodinâmica **irreversível**, pois o sistema não consegue voltar à situação inicial espontaneamente, isto é, sem a ajuda de um agente externo. Esse agente deve realizar sobre o gás um trabalho, forçando-o a voltar. Dessa forma, o gás recebe trabalho, o que provoca um aumento em sua energia interna. (Lembremos que a transformação é adiabática.)



Se a película subitamente se rompe, o gás se expande pela região de vácuo, realizando uma expansão livre.

Como o gás não sofreu resistência em sua expansão, ele não realizou trabalho ($\tau_{\text{gás}} = 0$). Pelo fato de o processo ser adiabático, também não há troca de calor ($Q = 0$). Assim, a variação de energia interna é nula ($\Delta U = 0$) e a temperatura mantém-se constante durante todo o processo.

Exercícios Nível 1

1. Você já deve ter notado que ao esfregar as mãos durante algum tempo elas ficam mais quentes. Isso ocorre porque:

- a) aumenta a circulação do sangue, elevando a produção de calor.
- b) o movimento das mãos pode alterar a temperatura do ambiente, devido ao atrito delas com o ar.
- c) o trabalho mecânico realizado pelas forças de atrito existentes entre as mãos se transforma em energia térmica, aumentando sua temperatura.
- d) durante o movimento, as mãos absorvem energia térmica do ambiente, o que aumenta sua temperatura.
- e) a diferença de polaridade existente entre a mão direita e a mão esquerda provoca um aquecimento em ambas.

2. A primeira coluna descreve uma transformação sofrida pelo gás; a segunda contém a denominação utilizada para indicar essa transformação.

- | | |
|--|-----------------------------|
| (A) O gás realiza trabalho e sua energia interna não varia. | (1) Compressão isotérmica. |
| (B) O gás tem sua energia interna aumentada e não troca trabalho com o meio externo. | (2) Compressão adiabática. |
| (C) O gás não troca calor com o meio externo, mas sua temperatura aumenta. | (3) Aquecimento isométrico. |
| (D) O gás recebe trabalho e sua energia interna não varia. | (4) Expansão isotérmica. |

Em qual das alternativas as associações estão corretas?

- a) A-1, B-2, C-3 e D-4.
- b) A-4, B-2, C-1 e D-3.
- c) A-4, B-3, C-2 e D-1.
- d) A-3, B-1, C-4 e D-2.
- e) A-2, B-4, C-1 e D-4.

3. A **1ª Lei da Termodinâmica**, aplicada a uma transformação gasosa, se refere à:
- conservação de massa do gás;
 - conservação da quantidade de movimento das partículas do gás;
 - relatividade do movimento de partículas subatômicas, que constituem uma massa de gás;
 - conservação da energia total;
 - expansão e contração do binômio espaço-tempo no movimento das partículas do gás.

4. Um gás perfeito sofre uma expansão, realizando um trabalho igual a 200 J. Sabe-se que, no final dessa transformação, a energia interna do sistema está com 60 J a mais que no início. Qual a quantidade de calor recebida pelo gás?

Resolução:

A **1ª Lei da Termodinâmica** dá a relação entre as grandezas referidas no problema:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

Do texto, sabemos que:

$$\tau_{\text{gás}} = +200 \text{ J (o sistema realizou trabalho)}$$

$$\Delta U = +60 \text{ J (a energia interna aumentou)}$$

Assim, temos:

$$60 = Q - 200 \therefore \boxed{Q = 260 \text{ J}}$$

5. A **1ª Lei da Termodinâmica** pode ser entendida como uma afirmação do princípio da conservação de energia. Sua expressão analítica é dada por $\Delta U = Q - \tau$, onde ΔU corresponde à variação da energia interna do sistema, Q e τ , respectivamente, calor trocado e trabalho realizado. Um sistema termodinâmico recebe do meio externo uma quantidade de energia em forma de calor equivalente a 200 J. Em consequência o sistema expande, realizando um trabalho equivalente a 140 J. Responda às questões:
- O que ocorre com a energia interna? Ela aumenta, diminui ou permanece a mesma?
 - De quanto foi a variação de energia interna?
6. Uma porção de gás perfeito está confinada por um êmbolo móvel no interior de um cilindro. Ao receber 20 kcal de calor do meio externo, o êmbolo sobe e o gás realiza um trabalho equivalente a 12 kcal. Aplicando a **1ª Lei da Termodinâmica**, determine a variação sofrida pela energia interna desse gás.
7. Um gás perfeito sofre uma expansão isotérmica ao receber do ambiente 250 J de energia em forma de calor. Qual o trabalho realizado pelo gás e qual sua variação de energia interna?

8. Analise as afirmativas a seguir:
- Um gás somente pode ser aquecido se receber calor.
 - Pode-se aquecer um gás realizando-se trabalho sobre ele.
 - Para esfriar um gás, devemos necessariamente retirar calor dele.
 - Um gás pode receber calor do meio externo e sua temperatura permanecer constante.
 - Numa transformação adiabática de um gás, sua temperatura pode diminuir.
- Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.
9. Numa expansão isobárica (pressão constante), o trabalho realizado por um gás é tanto maior quanto:
- maior a pressão e maior a variação de volume.
 - menor a pressão e maior a variação de volume.
 - maior a pressão e maior o volume.
 - menor a pressão e menor o volume.
 - maior a pressão e menor o volume.
10. Analise as proposições dadas a seguir e dê como resposta o somatório dos números que correspondem às afirmativas corretas:
- A energia interna de dada massa de gás é função exclusiva de sua temperatura.
 - Numa expansão isobárica, a quantidade de calor recebida é menor que o trabalho realizado.
 - Numa transformação isocórica, a variação de energia interna do gás é igual à quantidade de calor trocada com o meio exterior.
 - Numa transformação adiabática, o gás não troca trabalho com o meio externo.
 - A energia interna de um sistema gasoso só não varia nas transformações adiabáticas.
 - Numa expansão isobárica, a temperatura do gás aumenta.
11. Um gás perfeito sofre uma expansão isobárica, sob pressão de $5,0 \text{ N/m}^2$. Seu volume aumenta de $0,20 \text{ m}^3$ para $0,60 \text{ m}^3$. Qual foi a variação de energia interna do gás se, durante a expansão, ele recebeu 5,0 J de calor do ambiente?
12. Um sistema gasoso ideal sofre uma transformação isobárica de pressão igual a $5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Seu volume evolui de 3 L para 6 L. Determine o trabalho trocado com o meio externo.

Dado: $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

- 13.** Um sistema gasoso ideal troca (recebe ou **ER**cede) com o meio externo 150 cal em forma de calor. Determine, em joules, o trabalho trocado com o meio, em cada um dos casos:
- expansão isotérmica;
 - compressão isotérmica;
 - aquecimento isométrico.

Dado: 1 cal = 4,18 J

Resolução:

Nas transformações isotérmicas, não há variação de temperatura e, em consequência, a energia interna do sistema mantém-se constante ($\Delta U = 0$).

Da **1ª Lei da Termodinâmica**, $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$, vem:

$$Q = \tau_{\text{gás}}$$

Então, se o sistema recebe calor, realiza um trabalho de igual valor. Se cede calor, é porque recebe igual quantidade de energia em forma de trabalho.

- a) Na expansão, o volume aumenta e o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), recebendo calor ($Q > 0$).

Daí, temos:

$$\tau_{\text{gás}} = Q = 150 \text{ cal}$$

Transformando caloria em joule, vem:

$$\tau_{\text{gás}} = J \cdot Q \Rightarrow \tau_{\text{gás}} = 4,18 \cdot 150$$

$$\tau_{\text{gás}} = 627 \text{ J}$$

- b) Na compressão, o volume diminui e o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), cedendo calor ($Q < 0$).

Daí, temos:

$$\tau_{\text{gás}} = Q = -150 \text{ cal}$$

Transformando caloria em joule, vem:

$$\tau_{\text{gás}} = -627 \text{ J}$$

- c) Nas transformações isométricas, o volume permanece constante e não há trabalho trocado com o meio externo.

Então:

$$\tau_{\text{gás}} = 0$$

- 14.** Um sistema termodinâmico, constituído por um gás perfeito, troca 400 cal de calor com o meio externo. Determine a variação de energia interna do sistema, em cada um dos casos:
- aquecimento isocórico;
 - resfriamento isométrico;
 - expansão isotérmica.

- 15.** Numa transformação termodinâmica, um gás ideal troca com o meio externo 209 J em forma de trabalho. Determine, em calorias, o calor que o sistema troca com o meio externo, em cada um dos casos:

- expansão isotérmica;
- compressão isotérmica;
- expansão adiabática.

Dado: 1 cal = 4,18 J

- 16.** Leia com atenção e identifique a alternativa correta.

- Numa compressão isotérmica de um gás perfeito, o sistema não troca calor com o meio externo.
- Numa compressão isotérmica de um gás perfeito, o sistema cede um valor de calor menor que o valor do trabalho que recebe.
- Numa compressão isotérmica de um gás perfeito, sempre ocorre variação da energia interna do gás.
- Numa compressão isotérmica de um gás perfeito, o sistema realiza trabalho; portanto, não recebe calor.
- Numa compressão isotérmica de um gás perfeito, o sistema recebe trabalho, que é integralmente transformado em calor.

- 17.** Um estudante manuseava uma bomba manual (metálica) de encher bola de futebol. Mantendo o orifício de saída do ar tapado com seu dedo, ele comprimia rapidamente o êmbolo e observava que o ar dentro da bomba era aquecido. Das afirmativas a seguir, qual você usaria para explicar o fenômeno descrito?

- Quando se comprime um gás, sua temperatura sempre aumenta.
- Quando se comprime rapidamente um gás, facilita-se a troca de calor entre o ar que está dentro da bomba e o meio externo.
- Devido à rapidez da compressão, o ar que está dentro da bomba não troca calor com o meio externo; assim, o trabalho realizado provoca aumento da energia interna desse ar.

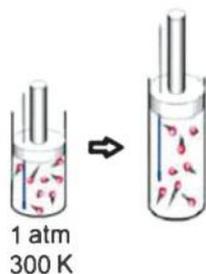
- d) A compressão rápida do ar foi feita isobaricamente, provocando aumento na velocidade de suas partículas.
- e) O fenômeno descrito é impossível de ocorrer, pois, sendo o corpo da bomba metálico, qualquer energia que seja fornecida para o ar interno será imediatamente transferida para o meio externo.

18. (FMJ-SP) Inicialmente, um gás ideal ocupava o volume de 3,5 litros enquanto sua temperatura e pressão eram, respectivamente, 400 K e $2,0 \cdot 10^5$ Pa.

- a) Determine a relação entre o volume e a temperatura para que a pressão desse gás passe a ser mantida em $2,5 \cdot 10^5$ Pa.
- b) Suponha que, a partir das condições iniciais, o gás receba calor de uma fonte térmica, realizando sobre o meio um trabalho de 800 J. Nessas condições, sabendo-se que a transformação sofrida pelo gás foi isobárica, determine seu novo volume.

19. Um gás perfeito sofre uma expansão isobárica, trocando com o meio externo 500 cal em forma de calor e 300 cal em forma de trabalho. Determine a variação da energia interna do sistema.

20. (PUC-SP) Um gás monoatômico submetido a uma pressão de 1 atm possui volume de $1\,000\text{ cm}^3$ quando sua temperatura é de 300 K. Após sofrer uma expansão isobárica, seu volume é aumentado para 300% do valor inicial. Determine a variação da energia interna do gás e o trabalho mecânico, em joules, realizado pelo gás durante essa transformação.



Reprodução/PUC-SP, 2017

- a) $2 \cdot 10^2$ e $3 \cdot 10^2$
- b) $2 \cdot 10^8$ e $2 \cdot 10^8$
- c) $3 \cdot 10^4$ e $2 \cdot 10^4$
- d) $3 \cdot 10^2$ e $2 \cdot 10^2$

Dado: $1\text{ atm} = 1 \cdot 10^5\text{ N/m}^2$

21. (UFMS) Um cilindro, fechado por um êmbolo, encerra o volume de $1,0 \cdot 10^{22}\text{ m}^3$ de um gás ideal à pressão de $2,0 \cdot 10^5$ Pa. O sistema recebe de uma fonte quente $5,0 \cdot 10^3$ J de calor. O êmbolo desloca-se de modo que o volume do gás seja duplicado num processo isobárico.

Ao final do processo, pode-se afirmar que:

- (01) não houve qualquer variação da energia interna do sistema.
- (02) o calor fornecido pela fonte quente foi totalmente armazenado sob a forma de energia interna do sistema.
- (04) o trabalho realizado pelo sistema sobre o meio foi de $2,0 \cdot 10^3$ J.
- (08) o aumento da energia interna do sistema foi de $3,0 \cdot 10^3$ J.
- (16) o calor fornecido pela fonte quente foi totalmente transformado em trabalho realizado pelo sistema sobre o meio.
- Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

22. Na universidade, no interior de um laboratório de Física, um instrutor realizou um experimento diante de uma plateia extremamente atenta. Utilizando um recipiente apropriado, provido de êmbolo móvel, aprisionou determinada massa de um gás monoatômico, que pode ser considerado um gás ideal. Com uma fonte térmica provocou no gás uma transformação quase estática em duas etapas: uma isobárica seguida de outra isométrica. No estado inicial a pressão do gás valia $8,0 \cdot 10^2\text{ N/m}^2$ e o volume $0,40\text{ m}^3$. No final do experimento a pressão valia $4,0 \cdot 10^2\text{ N/m}^2$ e o volume $0,80\text{ m}^3$.

Utilizando estes dados, determine:

- a) a variação de energia interna do gás.
- b) o trabalho realizado pelo gás nesta transformação (desconsidere os atritos).
- c) a quantidade de calor trocada pelo gás com a fonte térmica externa.
- d) Se a transformação isométrica ocorrer antes da isobárica, mantendo-se os mesmos estados inicial e final, qual é o novo trabalho realizado pelo gás?

23. (Unesp-SP) Um pistão com êmbolo móvel contém 2 mol de O_2 e recebe 581 J de calor. O gás sofre uma expansão isobárica na qual seu volume aumentou de 1,66 L, a uma pressão constante de 10^5 N/m^2 . Considerando que nessas condições o gás se comporta como gás ideal, utilize $R = 8,3\text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ e calcule:

- a) a variação de energia interna do gás;
- b) a variação de temperatura do gás.

6. Diagramas termodinâmicos

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, é de grande importância o **Diagrama de Clapeyron**, que representa a relação existente entre a pressão, o volume e a temperatura absoluta de uma massa de gás perfeito.

Uma transformação aberta

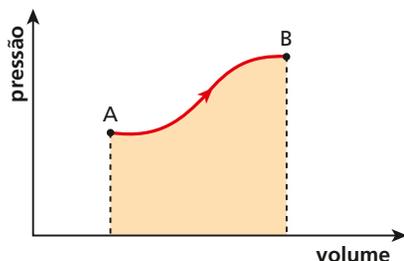
Consideremos um sistema constituído por certa massa de gás perfeito, que sofre uma transformação aberta, passando de um estado definido pelo ponto **A** para outro definido pelo ponto **B**, conforme a indicação do diagrama ao lado.

A “área” destacada sob a curva que representa a transformação, indicada no diagrama pressão X volume, é igual ao módulo do trabalho que esse sistema troca com o meio externo ao executar essa transformação.

Numa transformação aberta, podem ocorrer três situações:

a) Quando um sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), seu volume aumenta.

Banco de imagens/Arquivo da editora



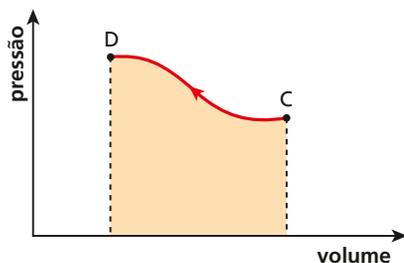
“área” = $|\tau_{AB}|$

Atenção:

$\tau_{AB} > 0$

b) Quando um sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), seu volume diminui.

Banco de imagens/Arquivo da editora



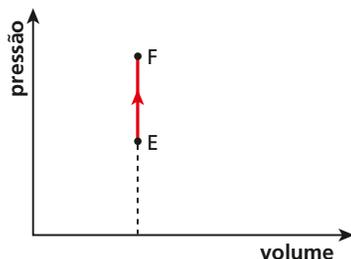
“área” = $|\tau_{CD}|$

Atenção:

$\tau_{CD} < 0$

c) Quando um sistema não troca trabalho com o meio externo, seu volume permanece constante.

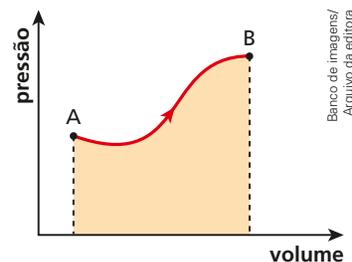
Banco de imagens/Arquivo da editora



“Área” = 0

Atenção:

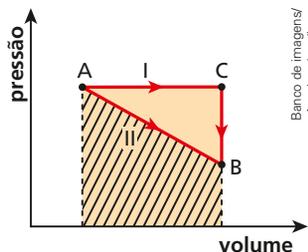
$\tau_{EF} = 0$



NOTAS!

- É importante observar que o trabalho trocado entre o sistema e o meio externo depende não somente dos estados inicial e final, mas também dos estados intermediários, que determinam o “caminho” ao longo da transformação.

O diagrama ao lado mostra, por exemplo, uma transformação aberta sofrida por um sistema gasoso, na qual o estado final **B** pode ser atingido, a partir do estado inicial **A**, por dois caminhos diferentes, I e II. A “área” bege, correspondente ao caminho I, é maior que a “área” hachurada, correspondente ao caminho II. Isso significa que o trabalho realizado pelo sistema ao percorrer o caminho I é maior que o trabalho realizado ao percorrer o caminho II.



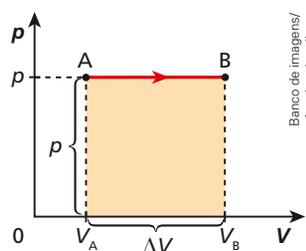
Banco de imagens/
Arquivo da editora

$$\tau_{ACB} > \tau_{AB}$$

- Na transformação isobárica ($p = \text{pressão constante}$), fica fácil demonstrar que a “área” sob o gráfico é igual ao módulo do trabalho trocado pelo sistema.

$$\text{“Área”} = p|\Delta V| = |\tau_{AB}|$$

$$\tau_{AB} = p\Delta V = nR\Delta T$$

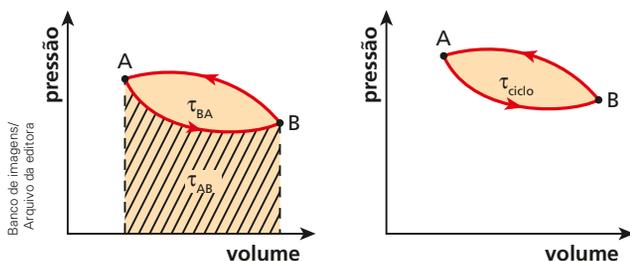


Banco de imagens/
Arquivo da editora

Uma transformação cíclica

Um sistema gasoso sofre uma transformação definida como cíclica (ou fechada) quando o estado final dessa transformação coincide com o estado inicial. Num diagrama pressão \times volume, essa transformação cíclica é representada por uma curva fechada, e o módulo do trabalho total trocado com o meio externo é determinado pela “área interna” à curva fechada representativa do ciclo.

Não é difícil perceber que, ao desenvolver uma transformação cíclica, o sistema geralmente realiza e recebe trabalho, sendo o trabalho total a soma desses trabalhos parciais.



Na transformação **AB**, o módulo do trabalho é dado pela “área” hachurada (trabalho realizado $\Rightarrow \tau_{AB} > 0$) e, na transformação **BA**, é dado pela área bege (trabalho recebido $\Rightarrow \tau_{BA} < 0$). Ao determinarmos o trabalho total, resta apenas a “área interna” à curva fechada.

O trabalho total tem seu módulo determinado pela “área interna” à curva fechada.

É importante observar que:

- Quando o ciclo está orientado no sentido horário, o trabalho realizado é maior que o recebido. Dizemos que o ciclo no sentido horário indica que o sistema realiza trabalho: $\tau_{\text{ciclo}} > 0$.
- Quando o ciclo está orientado no sentido anti-horário, o trabalho recebido é maior que o realizado. Dizemos que o ciclo no sentido anti-horário indica que o sistema recebe trabalho: $\tau_{\text{ciclo}} < 0$.

NOTA!

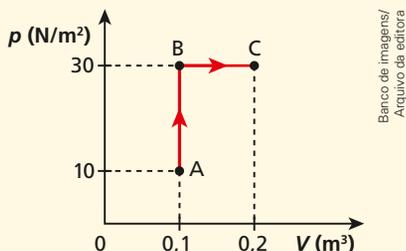
O módulo do trabalho trocado entre o sistema e o meio externo é determinado pela “área” no diagrama pressão \times volume, em joules, quando a pressão é dada em N/m^2 (pascal) e o volume, em m^3 ; caso contrário, deve-se fazer a conversão para essas unidades.

Para isso, é importante lembrar que:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ atm} \cong 760 \text{ mmHg} \cong 10^5 \text{ N/m}^2$$

24. Um gás perfeito passa do estado representado por **A**, no gráfico, para os estados representados por **B** e **C**:



Determine o trabalho realizado pelo gás, em joules, nas transformações:

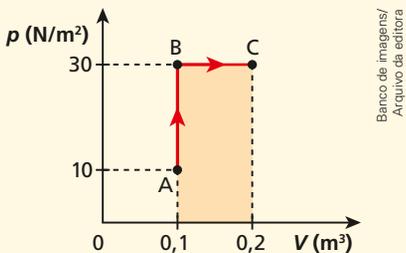
- A para B;
- B para C;
- ABC.

Resolução:

a) Na transformação **AB**, não há troca de trabalho com o meio externo, pois o volume do sistema mantém-se constante:

$$\tau_{AB} = 0$$

b) Na transformação **BC**, o trabalho realizado (o volume do sistema aumenta) pelo gás é igual à "área" sob o gráfico:



$$\begin{aligned} \text{"área"} &= \tau_{BC} \\ \tau_{BC} &= 30 \cdot (0,2 - 0,1) \end{aligned}$$

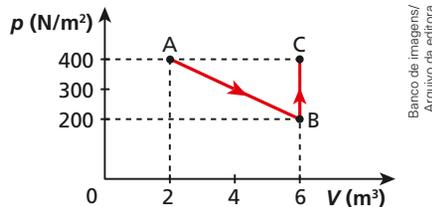
$$\tau_{BC} = 3 \text{ J}$$

c) O trabalho total na transformação **ABC** é a soma algébrica dos trabalhos nas transformações **AB** e **BC**. Assim:

$$\tau_{ABC} = \tau_{AB} + \tau_{BC} \Rightarrow \tau_{ABC} = 0 + 3$$

$$\tau_{ABC} = 3 \text{ J}$$

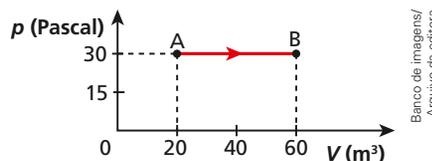
25. Um gás perfeito sofre a transformação **ABC** indicada no diagrama pressão (p) \times volume (V) a seguir:



Determine o trabalho do sistema nas transformações:

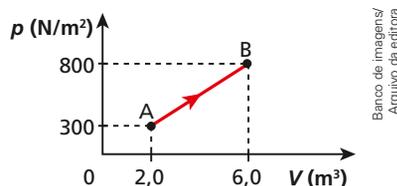
- A para B;
- B para C;
- ABC.

26. No processo isobárico indicado no gráfico, um gás perfeito recebeu 3 000 J de energia do ambiente.



Que variação ocorreu na energia interna desse gás?

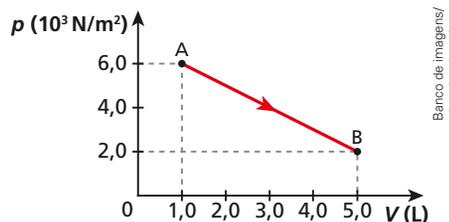
27. Um sistema termodinâmico constituído de certa massa de gás perfeito recebe calor de uma fonte térmica, num total de 8500 J. Em consequência, o gás se expande, sofrendo a transformação **AB** representada no diagrama pressão (p) \times volume (V) a seguir:



A respeito da transformação **AB**, responda:

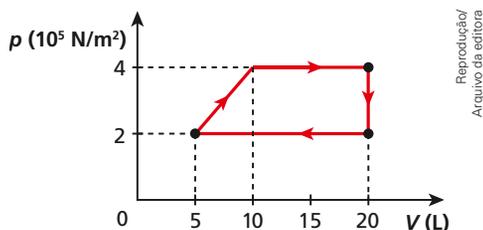
- Qual é o trabalho do sistema? É trabalho realizado ou recebido? Justifique.
- Qual é a variação de energia interna? A energia interna aumentou ou diminuiu? Justifique.

28. No diagrama a seguir observamos a transformação sofrida por uma determinada amostra de gás perfeito.



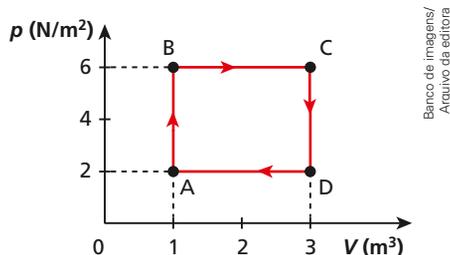
Sabe-se que durante a transformação o gás recebeu de uma fonte térmica energia equivalente a 22,0 joules. A partir desses dados, estabeleça a variação de energia interna dessa amostra gasosa.

29. (PUC-MG) A transformação cíclica representada no diagrama a seguir mostra o que ocorreu com uma massa de gás perfeito.



Qual o trabalho realizado por esse gás em cada ciclo? Dê a resposta em joules.

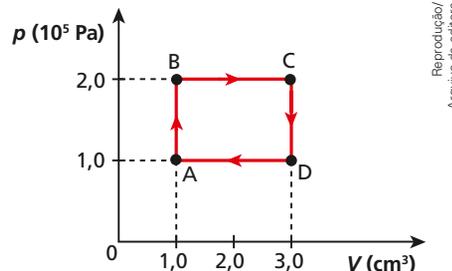
30. Um gás perfeito desenvolve uma transformação cíclica **ABCD**, como mostra a figura abaixo.



Determine:

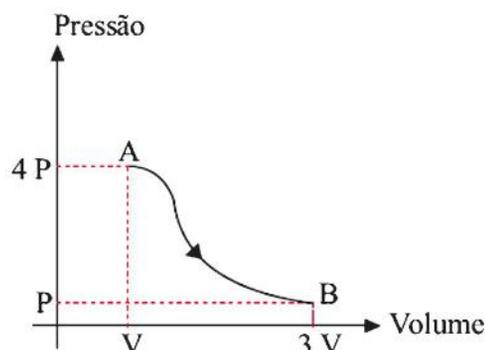
- o trabalho, em joules, realizado pelo gás no ciclo **ABCD**;
- o ponto do ciclo em que a energia interna do sistema é máxima e o ponto onde é mínima.

31. (Fatec-SP) Um sistema termodinâmico, constituído de certa massa de gás perfeito, realiza a cada segundo 100 ciclos **ABCD**. O diagrama a seguir mostra a evolução de um ciclo **ABCD**.



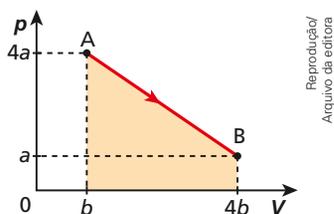
Qual a potência desse sistema? Dê a resposta na unidade watt.

32. (Unesp-SP) Considere o gráfico da pressão em função do volume de certa massa de gás perfeito que sofre uma transformação do estado **A** para o estado **B**. Admitido que não haja variação da massa do gás durante a transformação, determine a razão entre as energias internas do gás nos estados **A** e **B**.



Exercícios Nível 2

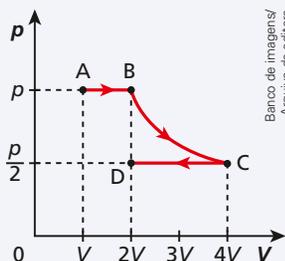
33. (Unip-SP) O gráfico a seguir representa a pressão em função do volume para 1 mol de um gás perfeito:



O gás vai do estado **A** para o estado **B** segundo a transformação indicada no gráfico. Indique a opção correta:

- A transformação indicada é isotérmica.
- A área assinalada na figura mede a variação de energia interna do gás.
- Na transformação de **A** para **B** o gás recebe um calor Q , realiza um trabalho τ , de modo que $|Q| = |\tau|$.
- A transformação de **A** para **B** é adiabática porque não houve acréscimo de energia interna do gás.
- A área assinalada na figura não pode ser usada para se medir o calor recebido pelo gás.

34. Um gás perfeito monoatômico sofre o conjunto de transformações indicadas no esquema:



- a) Sendo T a temperatura absoluta do gás em **A**, qual é a sua temperatura em **D**?
- b) Sendo n o número de mols e R a constante universal dos gases perfeitos, qual é a variação de energia interna do gás ao passar do estado **A** para o **D**?
- c) Qual é a razão entre os trabalhos do gás nas transformações **AB** e **CD**?

Resolução:

- a) Como o número de mols do gás não varia, podemos aplicar a **Lei Geral dos Gases Perfeitos**:

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_D V_D}{T_D}$$

Assim, temos:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p}{2} \frac{2V}{T_D} \Rightarrow \boxed{T_D = T}$$

- b) Como as temperaturas T_A e T_D são iguais, concluímos que a variação de energia interna é nula:

$$\boxed{\Delta U_{AD} = 0}$$

- c) Na transformação **AB**, o volume aumenta e o sistema realiza trabalho ($\tau_{AB} > 0$) igual à "área" encontrada sob o gráfico:

$$\tau_{AB} = +pV$$

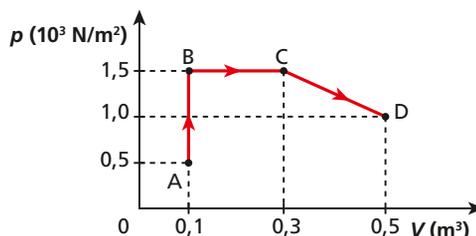
Na transformação **CD**, o volume diminui e o sistema recebe trabalho ($\tau_{CD} < 0$) igual a:

$$\tau_{CD} = -pV \Rightarrow \tau_{CD} = -pV$$

Assim, a razão entre esses trabalhos é dada por:

$$\frac{\tau_{AB}}{\tau_{CD}} = \frac{+pV}{-pV} = -1 \Rightarrow \boxed{\frac{\tau_{AB}}{\tau_{CD}} = -1}$$

35. Um sistema gasoso ideal, ao receber 293 cal, evolui do estado **A** para o estado **D**, conforme o gráfico:

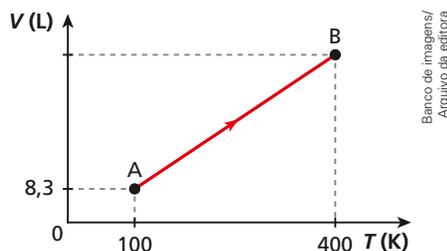


Determine:

- a) o trabalho do gás em cada transformação: **AB**, **BC** e **CD**;
- b) a variação da energia interna na transformação **ABCD**;
- c) a temperatura do gás no ponto **D**, sabendo que no ponto **C** era de -3°C .

Dado: 1 cal = 4,18 J

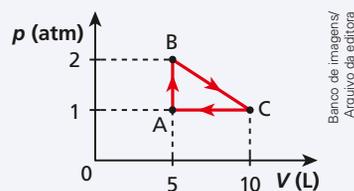
36. O diagrama volume \times temperatura absoluta representado a seguir mostra um processo isobárico ocorrido com uma amostra de gás monoatômico, cujo comportamento pode ser considerado igual ao de um gás ideal.



A pressão é mantida constante em $1,0 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. A constante universal dos gases ideais vale, aproximadamente, $8,3 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$. Sendo assim, determine:

- a) O número de mols do gás.
- b) O trabalho realizado pelo gás no processo **AB**.
- c) A variação de energia interna do gás no processo **AB**.

37. Certa massa de gás ideal desenvolve o ciclo **ER** indicado na figura abaixo:



Determine:

- o trabalho realizado pelo gás ao percorrer o ciclo uma vez;
- a potência desenvolvida, sabendo que a duração de cada ciclo é de 0,5 s;
- o ponto onde a energia interna do sistema é máxima e onde é mínima.

Dados: $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$;

$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$.

Resolução:

- Num ciclo, o trabalho do sistema é igual a sua "área" interna:

$$\tau_{ABC} = \frac{5 \text{ L} \cdot 1 \text{ atm}}{2} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{2}$$

$$\tau_{ABC} = 250 \text{ J}$$

- A potência desenvolvida é dada por:

$$\text{Pot} = \frac{\tau}{\Delta t} \Rightarrow \text{Pot} = \frac{250 \text{ J}}{0,5 \text{ s}} \Rightarrow \text{Pot} = 500 \text{ W}$$

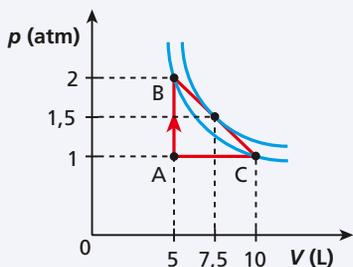
- Como a energia interna de um gás ideal é função de sua temperatura, podemos afirmar:

I. A energia interna é mínima onde a temperatura também é mínima.

Da Equação de Clapeyron, $pV = nRT$, observamos que a temperatura absoluta de um gás perfeito é mínima onde o produto pressão \times volume é mínimo.

Assim, do gráfico temos que a energia interna desse gás ideal é mínima no ponto **A**.

II. A energia interna é máxima onde a temperatura e o produto $p \times V$ são máximos. Do gráfico, notamos que o produto $p \times V$ é o mesmo nos pontos **B** e **C**, o que indica temperaturas iguais, sendo que a mesma isoterma passa por ambos.

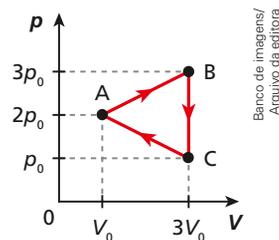


Banco de imagens/Arquivo da editora

Existe, no entanto, outra isoterma mais afastada dos eixos, que toca o ponto médio do segmento **BC**. É nesse ponto que a energia interna do sistema é máxima.

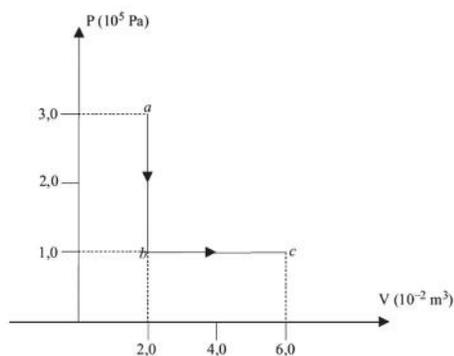
Lembremos que, quanto mais afastada dos eixos se encontra uma isoterma, maior é a temperatura associada a ela.

- 38.** Uma máquina térmica executa o ciclo descrito no diagrama pV abaixo. O ciclo inicia-se no estado **A**, vai para o **B**, segundo a parte superior do diagrama, e retorna para **A**, passando por **C**. Sabendo-se que $p_0V_0 = 13 \text{ J}$, calcule o trabalho realizado por esta máquina térmica ao longo de um ciclo, em joules.



Banco de imagens/Arquivo da editora

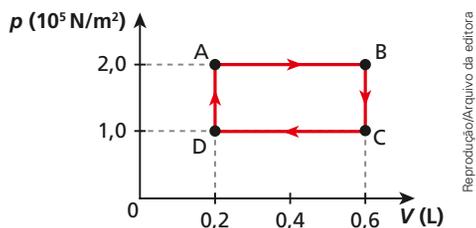
- 39.** (Unifesp) Em um trocador de calor fechado por paredes diatérmicas, inicialmente o gás monoatômico ideal é resfriado por um processo isocórico e depois tem seu volume expandido por um processo isobárico, como mostra o diagrama pressão *versus* volume.



Reprodução/Unifesp, 2011

- Indique a variação da pressão e do volume no processo isocórico e no processo isobárico e determine a relação entre a temperatura inicial, no estado termodinâmico **a**, e final, no estado termodinâmico **c**, do gás monoatômico ideal.
- Calcule a quantidade total de calor trocada em todo o processo termodinâmico **abc**.

40. (AFA-RJ) O diagrama abaixo representa um ciclo realizado por um sistema termodinâmico constituído por n mols de um gás ideal.



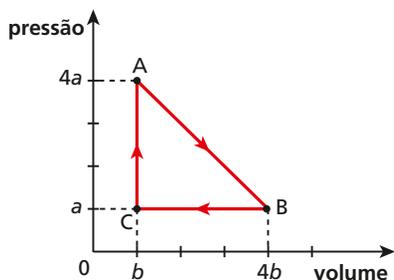
Reprodução/Arquivo da editora

Sabendo-se que em cada segundo o sistema realiza 40 ciclos iguais a este, é correto afirmar que a (o)

- potência desse sistema é de 1 600 W.
 - trabalho realizado em cada ciclo é -40 J.
 - quantidade de calor trocada pelo gás com o ambiente em cada ciclo é nula.
 - temperatura do gás é menor no ponto **C**.
41. (Unip-SP) Para 1 mol de um gás perfeito, submetido a uma pressão p e ocupando um volume V , a temperatura absoluta T e a energia interna U são dadas por:

$$T = \frac{pV}{R} \quad \text{e} \quad U = \frac{3}{2}pV$$

Considere uma amostra de 1 mol de gás perfeito, sofrendo as transformações **AB**, **BC** e **CA** indicadas no diagrama pressão \times volume:



Reprodução/Arquivo da editora

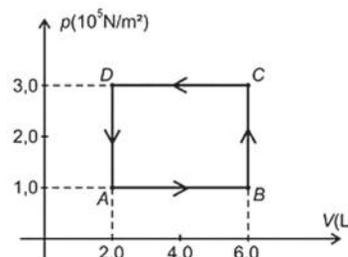
Analisar as proposições que se seguem:

- Nos estados **A** e **B**, a energia interna do gás é a mesma, o que nos leva a concluir que, na transformação **AB**, não ocorreu troca de energia entre o gás e o meio externo.
- Em todo o ciclo, a temperatura é mínima no estado **C**.
- Nos estados **A** e **B**, a temperatura é a mesma.
- Na transformação **BC**, a energia interna do gás vai diminuindo, o que significa que o gás está cedendo energia para o meio externo.

Estão corretas apenas:

- II, III e IV.
- I, II e III.
- I e IV.
- II e III.
- II e IV.

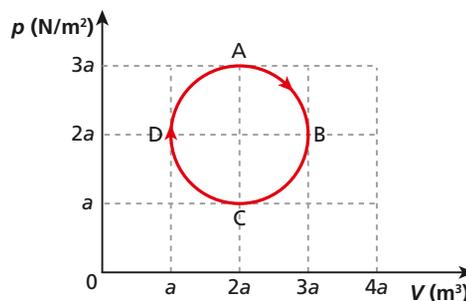
42. (AFA-RJ) Um sistema termodinâmico constituído de n mols de um gás perfeito monoatômico desenvolve uma transformação cíclica **ABCD** representada no diagrama a seguir.



Reprodução/AFA, 2016

De acordo com o apresentado pode-se afirmar que

- o trabalho em cada ciclo é de 800 J e é realizado pelo sistema;
 - o sistema termodinâmico não pode representar o ciclo de uma máquina frigorífica uma vez que o mesmo está orientado no sentido anti-horário;
 - a energia interna do sistema é máxima no ponto **D** e mínima no ponto **B**;
 - em cada ciclo o sistema libera 800 J de calor para o meio ambiente.
43. (Unip-SP) O gráfico a seguir representa a pressão em função do volume para 1 mol de um gás perfeito.



Reprodução/Arquivo da editora

O gás percorre o ciclo **ABCD**, que tem a forma de uma circunferência.

Indique a opção **falsa**.

- As temperaturas nos estados **A** e **B** são iguais.
- As temperaturas nos estados **C** e **D** são iguais.
- O trabalho realizado pelo gás, entre os estados **A** e **C**, é $\frac{4\pi a^2}{2}$.
- O trabalho realizado no ciclo vale (πa^2) joules.
- Na transformação de **A** para **B**, o gás recebeu uma quantidade de calor de $\left(2 + \frac{\pi}{4}\right)a^2$ joules.

7. Calores específicos dos gases perfeitos

A variação de temperatura de certa massa de gás pode ser realizada de três maneiras: a volume constante, a pressão constante e a volume e pressão variáveis. Verifica-se que, em cada um desses processos, cada unidade de massa do gás precisa receber ou ceder quantidades diferentes de calor para que sua temperatura sofra a variação de uma unidade.

Esse fato leva-nos a estudar dois desses casos, que apresentam particular importância. São as transformações a volume constante (isométrica) e a pressão constante (isobárica).

Transformação a volume constante

Suponha o aquecimento **isométrico** de certa massa de gás perfeito. Como vimos no Bloco 2, já que o volume permanece constante, o trabalho trocado é nulo, e todo o calor recebido pelo sistema é integralmente utilizado para aumento de sua energia interna:

$$Q_V = \Delta U_V$$

Transformação a pressão constante

O aquecimento **isobárico** da massa de gás perfeito é acompanhado de uma realização de trabalho, já que o volume do sistema deve aumentar para que a pressão permaneça constante. Dessa forma, o sistema recebe calor, usa parte dessa energia para realizar trabalho e, com o restante, produz aumento em sua energia interna:

$$Q_p = \tau_p + \Delta U_p$$

Comparação entre Q_p e Q_V

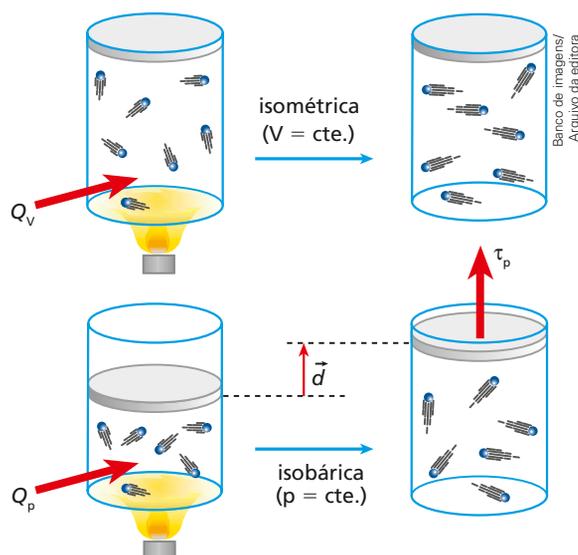
Se o aquecimento sofrido pela massa de gás perfeito foi o mesmo a volume e a pressão constantes ($\Delta U_V = \Delta U_p$), concluímos que sob pressão constante esse sistema recebeu mais calor, pois parte dessa energia foi utilizada para a realização de trabalho, o que não ocorre quando o aquecimento é feito a volume constante:

$$Q_p > Q_V$$

Assim, vale a relação:

$$\tau_p = Q_p - Q_V \quad (I)$$

Note que, para o aquecimento ($\Delta U_V = \Delta U_p$), precisamos fornecer mais calor ao gás quando a transformação é feita a pressão constante do que quando é feita a volume constante.



É importante observar que um mesmo gás tem um calor específico para transformações a pressão constante (c_p) e outro para transformações a volume constante (c_v). Isso porque cada unidade de massa desse gás tem que receber mais calor a pressão constante do que a volume constante para que sua temperatura seja elevada em uma unidade.

Dessa forma:

$$c_p > c_v$$

Valem as relações:

$$Q_p = mc_p \Delta T$$

$$Q_v = mc_v \Delta T$$

que, substituídas em (I), resultam:

$$\tau_p = mc_p \Delta T - mc_v \Delta T$$

Entretanto, como já vimos, o trabalho na transformação isobárica pode ser calculado por:

$$\tau_p = p \Delta V = nR \Delta T = \frac{m}{M} R \Delta T$$

Assim, temos:

$$\frac{m}{M} R \Delta T = mc_p \Delta T - mc_v \Delta T$$

$$\frac{R}{M} = c_p - c_v$$

Essa relação é conhecida como **Relação de Mayer**.

O produto do mol (M) do gás por seu calor específico é denominado **calor específico molar** e indica a capacidade térmica de cada mol desse gás.

Portanto, da Relação de Mayer, temos:

$$R = Mc_p - Mc_v \Rightarrow R = C_p - C_v$$

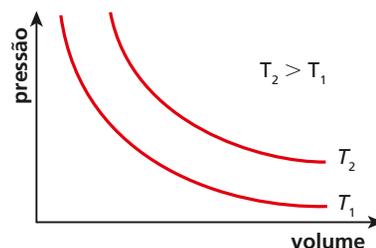
Para um gás perfeito, a diferença entre os calores específicos molares a pressão constante e a volume constante é igual à constante universal dos gases perfeitos:

$$R \cong 2 \text{ cal/K mol} \quad \text{ou} \quad R = 8,3 \text{ J/K mol}$$

Essa expressão foi deduzida para gases perfeitos, mas ela é aproximadamente verdadeira para gases reais, quando em baixas pressões e altas temperaturas.

8. O gráfico da adiabática

Com relação aos gases perfeitos, vimos que as transformações isotérmicas (temperatura constante) de determinada massa de gás são regidas pela equação $pV = K$, em que p é a pressão desse gás, V é o seu volume e K é uma constante. Representada num diagrama pressão \times volume, veja ao lado, essa equação proporciona uma curva denominada hipérbole.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

Photo Researchers/Lainstock



// Julius Robert von Mayer (1814-1878). Físico e químico nascido na Alemanha.

Já a transformação adiabática ($Q = 0$) tem por expressão analítica a **Equação de Poisson**:

$$pV^\gamma = \text{constante}$$

em que p é a pressão do gás, V , o seu volume, e γ , a razão entre os seus calores específicos a pressão constante e a volume constante:

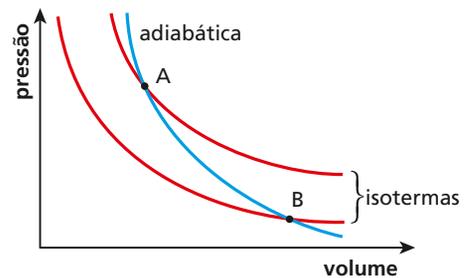
$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{expoente de Poisson})$$

O valor do coeficiente γ depende apenas da atomicidade do gás, variando de acordo com a tabela a seguir:

Atomicidade	γ
Monoatômico	$\cong 1,7$
Diatômico	$\cong 1,4$
Poliatômico	$\cong 1,3$

Notemos que o valor do coeficiente γ é maior que 1. Por isso, a curva representativa dessa função, num diagrama pressão \times volume, é semelhante a uma hipérbole, porém inclinada em relação às isotermas, interceptando-as.

A expansão **AB**, ao longo da adiabática, indica que o trabalho foi realizado pelo gás à custa de sua energia interna (a temperatura diminuiu). A compressão **BA**, ao longo da adiabática, indica que o trabalho recebido pelo sistema produziu aumento em sua energia interna (a temperatura aumentou).



9. A energia mecânica e o calor

A energia mecânica de um sistema pode ser dos tipos cinética ou potencial (gravitacional ou elástica). Muitas vezes, essa energia mecânica transforma-se em energia térmica, produzindo aquecimento do sistema. Quando um corpo cai, por exemplo, a energia potencial gravitacional ($E_p = mgh$) é transformada em energia cinética $\left(E_c = \frac{mv^2}{2}\right)$. No impacto com o chão, pelo menos uma parcela dessa energia cinética transforma-se em térmica, ocorrendo a elevação da temperatura desse corpo.

Geralmente, a energia mecânica é medida em joules (J) e a energia térmica, em calorias (cal). Dessa forma, é importante saber a relação existente entre essas unidades, para possíveis conversões:

$$1 \text{ caloria} = 4,186 \text{ joules}$$

É comum falar em equivalente mecânico da caloria, que é expresso por:

$$J = 4,186 \frac{\text{joules}}{\text{caloria}}$$

Esse valor foi calculado por Joule no seu famoso experimento.



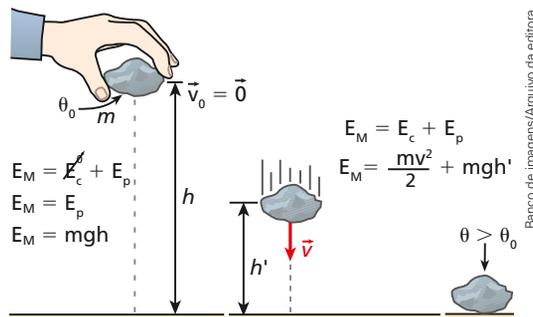
Siméon Denis Poisson (1781-1840). Físico e matemático nascido na França.

NOTA!

O número 4,186 é frequentemente arredondado para 4,19 ou 4,2, ou mesmo 4. Esse arredondamento é feito para facilitar os cálculos nos exercícios.

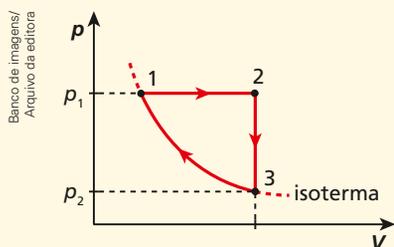
A ilustração ao lado representa a queda de uma pedra em um local onde o campo gravitacional vale g e onde podemos considerar desprezível a influência do ar.

No início, a pedra tem energia potencial gravitacional (como sua velocidade inicial é nula, a energia cinética também é nula). Ao cair, sua energia potencial gravitacional diminui, enquanto sua energia cinética aumenta. Observe que o sistema é conservativo. Ao chegar ao solo, considerando a colisão totalmente inelástica, a energia mecânica (potencial gravitacional mais a cinética) se anula, transformando-se principalmente em energia térmica, o que produz um aumento na temperatura da pedra.



Exercícios Nível 1

44. Um motor, constituído por cilindro e êmbolo, contém 10 g de um gás perfeito, cujas transformações estão esquematizadas na figura:



São dados, para o gás, os calores específicos sob volume constante, $c_v = 0,20 \text{ cal/g K}$, e sob pressão constante, $c_p = 0,34 \text{ cal/g K}$; a temperatura $T_1 = 300 \text{ K}$; as pressões $p_1 = 4,0 \text{ atm}$ e $p_3 = 1,0 \text{ atm}$. Determine:

- a temperatura T_2 ;
- a energia trocada na transformação entre os estados 2 e 3.

Resolução:

- Sendo a transformação $1 \rightarrow 2$ isobárica, temos: (I)

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

Sendo a transformação $3 \rightarrow 1$ isotérmica, temos:

$$p_1 V_1 = p_3 V_3 = p_3 V_2$$

$$\text{ou } \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_3} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{4,0}{1,0} = 4 \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), temos:

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 \Rightarrow T_2 = 4 \cdot 300$$

$$T_2 = 1200 \text{ K}$$

- A transformação $2 \rightarrow 3$ é isométrica e, portanto, o trabalho envolvido é nulo ($\tau = 0$). Nessas condições, a expressão da **1ª Lei da Termodinâmica** fica:

$$\Delta U = Q$$

Isso significa que a energia trocada na transformação é exclusivamente térmica.

Assim:

$$Q = mc_v \Delta T = mc_v (T_3 - T_2)$$

$$Q = 10 \cdot 0,20 \cdot (300 - 1200)$$

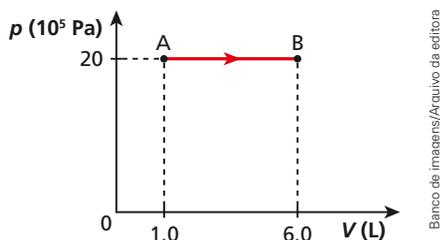
$$Q = -1800 \text{ cal}$$

O sinal negativo indica que o sistema gasoso cede calor ao meio externo e, conseqüentemente, sua energia interna diminui.

45. Uma amostra de 60 g de gás perfeito foi aquecida isometricamente, tendo sua temperatura variado de 200 K para 230 K. O calor específico a volume constante desse gás é igual a 0,25 cal/(g · K) e o calor específico a pressão constante é 0,32 cal/(g · K). Determine:

- o trabalho realizado por esse gás;
- a variação da energia interna desse gás.

46. Uma amostra de 5,0 mols de gás perfeito sofre a expansão isobárica representada no diagrama pressão \times volume a seguir:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Sabe-se que a variação de temperatura do gás foi de 250 °C. Sendo o calor específico molar a pressão constante igual a 5,0 cal/mol °C, qual foi a variação da energia interna desse gás?

Dado: 1 cal = 4 J

47. Uma determinada amostra de gás monoatômico, que se comporta como um gás ideal, recebe de uma fonte térmica o equivalente a 25 joules de calor. Devido a essa energia o gás desenvolve uma expansão isobárica.

Para esse gás, os valores dos calores específicos molares à pressão e à volume constantes:

$$C_p = 5 \text{ cal/(mol} \cdot \text{K)} \text{ e } C_v = 3 \text{ cal/(mol} \cdot \text{K)}$$

Determinar o trabalho realizado pelo gás na referida expansão.

48. Uma quantidade de mercúrio cai de uma altura de 60 m. Supondo que toda a energia potencial se transforme em calor, qual o aumento de temperatura do corpo, em graus Celsius?

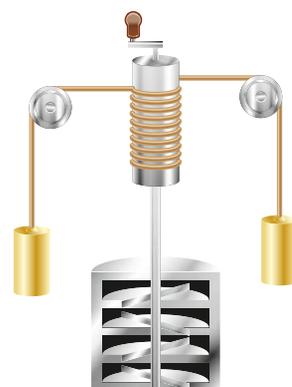
Dados: calor específico do mercúrio = 0,15 J/g °C; $g = 10 \text{ m/s}^2$.

49. (Enem) Um projétil de chumbo é disparado a 200 m/s contra uma parede de concreto. A colisão deforma, aquece e para a bala. Supondo-se que a metade da energia cinética da bala nela permaneça como energia interna, a variação de temperatura do projétil de chumbo é, em °C:

- a) $1,2 \cdot 10^2$ d) 20.
b) 80. e) 8,0.
c) 40.

Dado: calor específico do chumbo = 125 J/kg °C

50. (Vunesp) A figura ilustra o aparato utilizado por James P. Joule (1818-1889) na determinação do equivalente mecânico do calor (1 cal \cong 4 J).



Reprodução/Arquivo da editora

Os corpos suspensos têm massa 1 kg cada e podem realizar uma queda vertical de 1 metro, em um local em que $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Admita que toda a energia potencial correspondente ao movimento de queda dos dois corpos seja utilizada para aquecer 10 gramas de água. Sendo o calor específico da água 1 cal/g °C, a variação de temperatura (em °C) da água foi de:

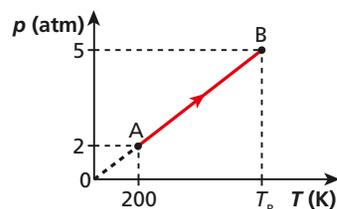
- a) 0,25 d) 1,00
b) 0,50 e) 5,00
c) 0,75

Exercícios Nível 2

51. Um recipiente de paredes indeformáveis, de capacidade $V = 12 \text{ L}$, contém 1,0 mol de um gás perfeito de calor específico molar a volume constante $C_v = 3,0 \text{ cal/mol K}$. Fornecendo-se 900 cal a esse gás, sua temperatura absoluta duplica. Qual a pressão final do gás?

Dado: $R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

52. (EEM-SP) Um gás, constituído por 5 mols, sofre uma transformação, de acordo com o gráfico $p = f(T)$.



Reprodução/Arquivo da editora

Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 2,0 \text{ cal/mol K}$ e o calor molar a volume constante do gás $C_v = 5 \text{ cal/mol K}$, determine:

- a) o tipo de transformação sofrida pelo gás;
b) o calor recebido e a variação de energia interna sofrida pelo gás, nessa transformação.

53. (Ufscar-SP) Mantendo uma estreita abertura em sua boca, assopre com vigor sua mão agora! Viu? Você produziu uma transformação adiabática! Nela, o ar que você expeliu sofreu uma violenta expansão, durante a qual:

- o trabalho realizado correspondeu à diminuição da energia interna desse ar, por não ocorrer troca de calor com o meio externo;
- o trabalho realizado correspondeu ao aumento da energia interna desse ar, por não ocorrer troca de calor com o meio externo;
- o trabalho realizado correspondeu ao aumento da quantidade de calor trocado por esse ar com o meio, por não ocorrer variação da sua energia interna;
- não houve realização de trabalho, uma vez que o ar não absorveu calor do meio e não sofreu variação de energia interna;
- não houve realização de trabalho, uma vez que o ar não cedeu calor para o meio e não sofreu variação de energia interna.

54. No interior de um cilindro provido de êmbolo móvel e volume V_0 são aprisionados n mols de um gás ideal diatômico. Esse gás desenvolve uma expansão adiabática, partindo de uma temperatura T_0 e uma pressão p_0 até atingir a situação final $0,82T_0$ e $\frac{p_0}{2}$. Determine o trabalho realizado pelo gás, nessa expansão.

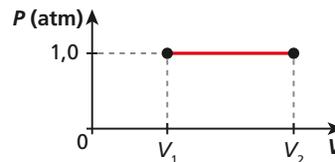
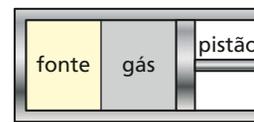
Sabe-se que o calor específico molar a volume constante vale $C_V = \frac{5R}{2}$, sendo R a constante universal dos gases ideais.

55. (OBF) Um recipiente cilíndrico, de área de seção reta de 300 cm^2 contém 3 mols de gás ideal diatômico $\left(C_V = \frac{5R}{2}\right)$ que está à mesma pressão externa. Este recipiente contém um pistão que pode se mover sem atrito e todas as paredes são adiabáticas, exceto uma que pode ser retirada para que o gás fique em contato com uma fonte que fornece calor a uma taxa constante. Num determinado instante o gás sofre um processo termodinâmico ilustrado no diagrama PV a seguir e o pistão se move com velocidade constante de $16,6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

- Qual foi a variação de temperatura do gás depois de decorridos 50 s?

b) Obtenha a quantidade de calor transferida ao gás durante esse intervalo de tempo.

Dados: $1 \text{ atm} \cong 1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$; $R = 8,3 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$



Reprodução/Arquivo da editora

56. (ITA-SP) Certa quantidade de gás ideal expande-se adiabaticamente e quase estaticamente desde uma pressão inicial de 2,0 atm e volume de 2,0 L na temperatura de 21°C até atingir o dobro de seu volume. Sabendo-se que para este gás $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 2,0$ e que a Equação de Poisson para as transformações adiabáticas é dada por: $pV^\gamma = \text{constante}$, pode-se afirmar que a pressão final e a temperatura final são respectivamente:

- 0,5 atm e $10,5^\circ \text{C}$;
- 0,5 atm e -126°C ;
- 2,0 atm e $10,5^\circ \text{C}$;
- 2,0 atm e -126°C .

57. (PUC-RJ) Uma quantidade de gás diatômico $\left(\gamma = 1,4 = \frac{7}{5}\right)$ sofre uma expansão adiabática, onde vale $pV^\gamma = \text{constante}$.

Se $\frac{V_f}{V_i} = 4\sqrt{2}$, qual a razão entre as temperaturas final e inicial $\frac{T_f}{T_i}$?

- 0,1
- 0,2
- 0,3
- 0,4
- 0,5

58. E.R. Uma esfera metálica de 200 g de massa é abandonada do repouso, de uma altura H , sobre um grande bloco de gelo a 0°C . Desprezam-se influências do ar e supõe-se que toda a energia mecânica existente na esfera transforma-se em energia térmica e é absorvida pelo gelo, sem, no entanto, alterar a temperatura do metal. Qual deve ser a altura H para que 1 g de gelo sofra fusão?

Dados: calor específico latente de fusão do gelo = 80 cal/g;
 aceleração da gravidade = 10 m/s²;
 1 cal = 4,2 J.

Resolução:

Para a fusão de 1 grama de gelo, são necessárias 80 cal ou 336 J (1 cal = 4,2 J).

Da conservação da energia, concluímos que essa energia no início estava armazenada no sistema em forma de energia potencial gravitacional. Portanto:

$$E_p = mgH \Rightarrow 336 = 0,2 \cdot 10 \cdot H \therefore H = 168 \text{ m}$$

59. Um bloco de gelo fundente de 12 kg de massa é lançado com velocidade igual a 20 m/s sobre uma pista horizontal também de gelo a 0 °C. Devido ao atrito, o bloco para. Se toda a energia cinética foi transformada em térmica e absorvida pelo gelo, qual a massa de gelo que se funde?

Dados: 1 cal = 4 J;

calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g.

60. [Cefet-PR] Um estudante observou um pequeno aquecimento de 0,1 °C em certa quantidade de massa de modelagem, quando a deixava cair repetidamente vinte vezes de uma altura igual a 1 m no solo firme. Se desprezarmos as trocas eventuais de calor dessa massa com o ambiente e se considerarmos o campo gravitacional igual a 10 m/s², podemos dizer que o calor específico desse material tem valor, em J/kg °C, próximo de:
 a) 250. c) 1 000. e) 4 000.
 b) 500. d) 2 000.

61. [FUCMT-MS] Uma manivela é usada para agitar 100 g de água contida num recipiente termicamente isolado. Para cada volta da manivela é realizado um trabalho de 0,1 J sobre a água. O número de voltas necessário para que a temperatura aumente em 1 °C é:
 a) 2 800. c) 5 500. e) 4 200.
 b) 3 700. d) 3 000.

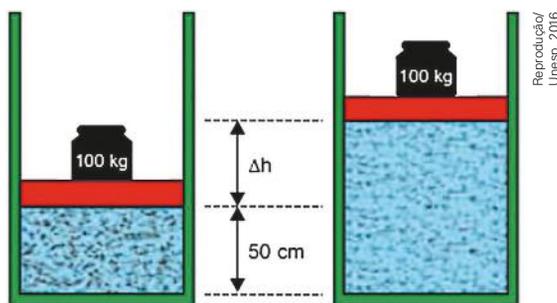
Dados: 1 cal = 4,2 J;

calor específico da água = 1 cal/g °C.

62. Uma bala de chumbo, com velocidade de 100 m/s, atravessa uma placa de madeira e sai com velocidade de 60 m/s. Sabendo que 40% da energia cinética perdida é gasta sob a forma de calor,

determine o acréscimo de temperatura da bala, em graus Celsius. O calor específico do chumbo é $c = 128 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$. Considere que somente a bala absorve o calor produzido.

63. [Unesp-SP] Um cowboy atira contra uma parede de madeira de um bar. A massa da bala de prata é 2 g e a velocidade com que esta bala é disparada é de 200 m/s. É assumido que toda a energia térmica gerada pelo impacto permanece na bala.
 a) Determine a energia cinética da bala antes do impacto.
 b) Dado o calor específico da prata 234 J/kg °C, qual a variação de temperatura da bala, supondo que toda a energia cinética é transformada em calor no momento que a bala penetra na madeira?
64. [UEM-PR] A temperatura de 500 g de um gás perfeito é aumentada de 20 °C para 140 °C. Se o processo é feito primeiramente a pressão e depois a volume constantes, qual o trabalho realizado pelo gás, em calorias? (Considere para o gás perfeito $c_v = 0,18 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ e $c_p = 0,25 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$.)
65. [Unesp-SP] Determinada massa de nitrogênio é armazenada a 27 °C dentro de um cilindro fechado em sua parte superior por um êmbolo de massa desprezível, sobre o qual está apoiado um corpo de 100 kg. Nessa situação, o êmbolo permanece em repouso a 50 cm de altura em relação à base do cilindro. O gás é, então, aquecido isobaricamente até atingir a temperatura de 67 °C, de modo que o êmbolo sofre um deslocamento vertical Δh , em movimento uniforme, devido à expansão do gás.



Desprezando o atrito, adotando $g = 10 \text{ m/s}^2$ e sabendo que a área do êmbolo é igual a 100 cm², que a pressão atmosférica local vale 10⁵ N/m² e considerando o nitrogênio como um gás ideal, calcule o módulo, em N, da força vertical que o gás exerce sobre o êmbolo nesse deslocamento e o trabalho realizado por essa força, em J, nessa transformação.

10. As máquinas térmicas e a 2ª Lei da Termodinâmica

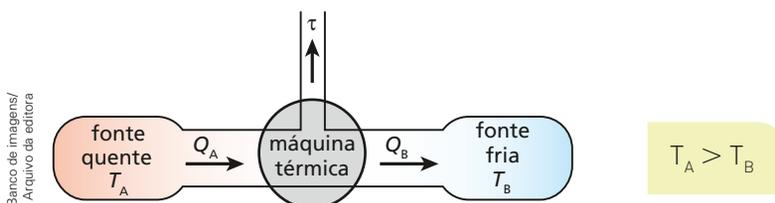
São denominadas **máquinas térmicas** os dispositivos usados para converter energia térmica em energia mecânica.



Uma máquina térmica mais próxima, que faz parte de nosso dia a dia, é o motor de automóvel. A explosão do combustível (gasolina, álcool ou *diesel*) origina gases aquecidos que empurram o pistão, realizando trabalho. O movimento do pistão é transferido para as rodas, que giram e proporcionam o movimento do automóvel.

Desde as máquinas térmicas mais primitivas, que eram usadas para movimentar trens, navios e mesmo os primeiros automóveis, até as mais modernas e sofisticadas, como um reator termonuclear, todas funcionam obedecendo basicamente a um mesmo esquema.

Há duas fontes térmicas, uma “quente” e outra “fria”. Entre elas, coloca-se a máquina térmica. Um fluido operante, geralmente vapor de água, serve de veículo para a energia térmica que sai da fonte quente, passa pelo dispositivo intermediário, que utiliza parte dessa energia na realização do trabalho, e leva o restante para a fonte fria.



Representação esquemática do funcionamento de uma máquina térmica.

A quantidade Q_A de calor que chega à máquina térmica, vinda da fonte quente, geralmente é obtida pela combustão de carvão, óleo, madeira ou mesmo por fissão nuclear, ocorrida nos modernos reatores nucleares. A conservação da energia garante que:

$$\tau = |Q_A| - |Q_B|$$

O trabalho realizado pela máquina térmica é igual à diferença entre os módulos do calor recebido da fonte quente e do calor rejeitado para a fonte fria.

11. A 2ª Lei da Termodinâmica

O **rendimento** de uma máquina térmica é definido pela fração do calor recebido da fonte quente que é usada para a realização de trabalho:

$$\eta = \frac{\tau}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - |Q_B|}{|Q_A|}$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}$$

É importante observar que a máquina térmica ideal seria aquela que tivesse um rendimento de 100% ($\eta = 1$). Para que isso se concretizasse, a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria deveria ser nula ($Q_B = 0$). Na prática, isso é impossível, pois a energia térmica Q_A somente sai da fonte quente devido à existência da fonte fria. Lembremos que calor é energia térmica em trânsito, que se transfere, espontaneamente, de um local de maior temperatura para outro de menor temperatura.

Dessa impossibilidade surgiu o enunciado de Kelvin-Planck para a **2ª Lei da Termodinâmica**:

É impossível construir uma máquina que, operando em transformações cíclicas, tenha como único efeito transformar completamente em trabalho a energia térmica recebida de uma fonte quente.

O fato de a energia térmica fluir da fonte quente para a fonte fria levou Rudolf Clausius (1822-1888) a enunciar essa 2ª Lei da Termodinâmica da seguinte forma:

É impossível uma máquina, sem ajuda de um agente externo, conduzir calor de um sistema para outro que esteja a uma temperatura maior.

A consequência imediata desse enunciado é que o calor só pode passar de um sistema de menor temperatura para outro de maior temperatura se um agente externo realizar um trabalho sobre esse sistema, como nas máquinas frigoríficas.

12. O ciclo de Carnot

Até 1824, acreditava-se que uma máquina térmica poderia atingir o rendimento total (100%) ou algo próximo desse valor. Em outras palavras, acreditava-se na possibilidade de utilização de toda a energia térmica fornecida a uma máquina, que se transformaria integralmente, ou quase, em trabalho.

Coube ao jovem engenheiro francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) demonstrar a impossibilidade desse rendimento. Ele propôs uma máquina térmica teórica, ideal, que funcionaria percorrendo um ciclo particular, denominado **ciclo de Carnot**. Esse dispositivo obedeceria a dois postulados estabelecidos pelo próprio Carnot, antes mesmo do enunciado da 1ª Lei da Termodinâmica. São eles:

1º Postulado de Carnot

Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot, operando entre essas mesmas temperaturas.

2º Postulado de Carnot

Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante.



SPL/Lainstock

// Retrato do físico alemão Rudolf Emmanuel Clausius, um dos fundadores da Termodinâmica.

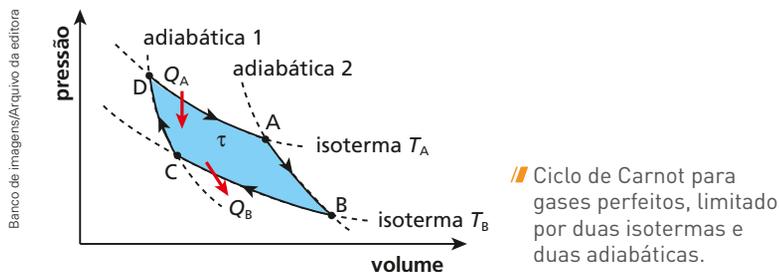


Alg-Images/Lainstock

// Retrato de Nicolas Léonard Sadi Carnot.

Observe que esses postulados garantem que o rendimento de uma máquina térmica é função das temperaturas das fontes fria e quente. Entretanto, fixando-se as temperaturas dessas fontes, a máquina teórica de Carnot é aquela que conseguiria ter o maior rendimento.

Para o caso em que o fluido operante é o gás perfeito, o ciclo de Carnot é composto de duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, intercaladas.



Na expansão isotérmica **DA**, o sistema realiza trabalho utilizando o calor Q_A retirado da fonte quente.

Na expansão adiabática **AB**, o sistema não troca calor, realizando trabalho com diminuição de energia interna e, portanto, de temperatura.

Na compressão isotérmica **BC**, o sistema rejeita Q_B de calor para a fonte fria, utilizando o trabalho recebido.

Na compressão adiabática **CD**, o sistema não troca calor. Recebe trabalho, que serve para aumentar sua energia interna e, portanto, sua temperatura.

No ciclo de Carnot, os calores trocados (Q_A e Q_B) e as temperaturas absolutas (T_A e T_B) das fontes quente e fria são proporcionais, valendo a relação:

$$\frac{|Q_A|}{|Q_B|} = \frac{T_A}{T_B} \quad \text{ou} \quad \frac{|Q_B|}{|Q_A|} = \frac{T_B}{T_A}$$

Substituindo na equação do rendimento de uma máquina térmica, obtemos, para a máquina de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Considerando a temperatura da fonte fria (T_B) igual a zero Kelvin (zero absoluto), temos:

$$\eta = 1 - \frac{0}{T_A}$$

$$\eta = 1$$

ou

$$\eta(\%) = 100\%$$

Entretanto, esse fato contraria a 2ª Lei da Termodinâmica, que garante ser impossível um rendimento de 100% (pois sempre haverá energia sendo transferida para a fonte fria), o que nos leva a concluir que nenhum sistema físico pode estar no zero absoluto.

De qualquer forma, podemos dizer que:

O **zero absoluto** é a temperatura da fonte fria de uma máquina ideal de Carnot, que opere com rendimento de 100%.

13. Transformações reversíveis e irreversíveis

Denomina-se transformação **reversível** aquela em que, após seu término, o sistema pode retornar às suas condições iniciais pelo mesmo caminho, isto é, passando pelos mesmos estados intermediários, na sequência inversa daquela ocorrida na transformação inicial, sem interferência externa. A transformação será **irreversível** se o processo não puder satisfazer às condições citadas acima.

Do exposto, podemos entender que a maioria dos processos naturais são irreversíveis, sendo o processo reversível apenas uma idealização teórica. Quando, por exemplo, misturamos dois gases diferentes, torna-se impossível voltar a separá-los sem uma intervenção externa; quando provocamos a expansão livre de um gás, ele não voltará espontaneamente a ocupar as condições iniciais.

14. Entropia

Sabemos que a temperatura e a energia interna são duas variáveis de estado utilizadas na descrição do estado termodinâmico de um sistema. Em 1865, Rudolf Clausius usou pela primeira vez uma outra variável, que denominou **entropia** (S). Clausius observou que, se as Leis da Natureza puderem atuar, sem interferências, em um sistema, o mais provável é que os integrantes desse sistema tendam a uma disposição desordenada. Se, por exemplo, em uma viagem passamos por um bosque e encontramos árvores alinhadas e separadas por distâncias praticamente iguais, vamos concluir que elas foram plantadas por alguém. Se, no entanto, esse bosque, em sua formação, ficou apenas sob as leis naturais, uma “desordem” no posicionamento das árvores é o que devemos esperar. Na sua mesa de estudo, o normal é encontrarmos seus objetos de uma forma desordenada, e o natural é que essa desordem aumente durante o seu estudo. A partir de observações como essas, Clausius estabeleceu a ideia de entropia como sendo uma medida dessa desordem.

Como a entropia é uma medida da desordem e os sistemas físicos tendem para estados cada vez mais desordenados, podemos inferir que, em processos naturais (sujeitos apenas às Leis da Natureza), a entropia do Universo vem aumentando ao longo do tempo. Essa poderia ser outra maneira de enunciarmos a 2ª Lei da Termodinâmica.

Segundo Clausius, quando estudamos a **entropia** como uma grandeza física na forma potencial, o importante não é sabermos o seu valor absoluto, mas sim a variação dessa grandeza durante uma transformação. Assim, ele definiu que a variação de entropia (ΔS) de um sistema, quando se agrega uma quantidade de calor (Q), mediante um processo reversível (à temperatura absoluta constante T), é dada por:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Caso a temperatura se altere durante o processo, somente poderemos determinar a variação de entropia por meio de cálculo infinitesimal, que foge do nível estabelecido para o nosso curso. No entanto, quando ocorrem pequenas variações de temperatura, podemos mantê-la constante em seu valor médio e utilizar a expressão anterior, com boa aproximação, para o devido cálculo da variação da entropia.

Do exposto, podemos concluir que:

- 1) Se um sistema recebe calor $Q > 0$, sua entropia aumenta e $\Delta S > 0$.
- 2) Se um sistema libera calor $Q < 0$, sua entropia diminui e $\Delta S < 0$.
- 3) Se um sistema não troca calor com o meio externo (transformação adiabática), $Q = 0$, a entropia do sistema não varia e $\Delta S = 0$.



Kauko Heilvuo/Stone/Getty Images

// No Universo, a entropia está aumentando ao longo do tempo.

Máquina térmica

O primeiro dispositivo que funcionava usando a força do vapor data do século I da Era Cristã. Um estudioso de nome Heron, que viveu em Alexandria, Egito, deixou um esboço da primeira “máquina térmica” de que se tem notícia, a eolípila. Essa máquina era uma esfera metálica, oca, encaixada em um cano, através do qual recebia vapor de uma caldeira. Em suas laterais encontravam-se dois canos em forma de **L**. O vapor entrava na esfera e saía pelos canos em **L**. Isso provocava o movimento de rotação do dispositivo. Esse “motor” não realizava trabalho, era apenas uma forma de se demonstrar a “força” do vapor.

// A figura ao lado é uma gravura do século XIX que mostra o “motor” inventado por Heron de Alexandria, a eolípila. Essa é a primeira “máquina a vapor” de que se tem notícia. (Coleção particular)



Granger/Other Images

No século XVIII, mais precisamente em 1712, Thomas Newcomen (1662-1729), nascido em Dartmouth, Inglaterra, mecânico de profissão, aperfeiçoou uma máquina inventada por seu sócio Thomas Savery (1650-1715), que seria utilizada na drenagem de minas. Essa máquina foi instalada com grande sucesso nas minas de carvão em Staffordshire, na Grã-Bretanha, e, por quase cinquenta anos, foi utilizada para evitar a inundação das galerias subterrâneas da área. No entanto, esse dispositivo tinha o inconveniente de gastar muito combustível, sendo usado apenas quando os outros meios de drenagem não estavam em funcionamento.

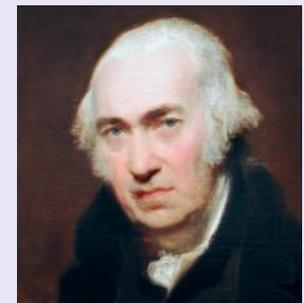
Em 1765, coube ao engenheiro escocês James Watt (1736-1819) aperfeiçoar a máquina de pistão de Thomas Newcomen, criando um dispositivo mais econômico e prático.

Essa nova máquina a vapor passou a substituir a força animal e humana no funcionamento das máquinas industriais, deflagrando o período histórico denominado Revolução Industrial, que transformou toda a estrutura social da Europa. Em 1830, após sua morte, funcionavam, só na Inglaterra, mais de 10 000 máquinas a vapor. Em 1814, o inglês George Stephenson (1781-1848) encontrou outra utilidade para as máquinas térmicas de Watt: movimentar uma locomotiva, revolucionando o transporte de pessoas e de bens produzidos pelas indústrias.

// Na figura ao lado, podemos observar um esquema que representa uma das primeiras máquinas térmicas idealizada por James Watt. A água aquecida na caldeira entra em ebulição e o vapor se expandia, provocando o movimento de um pistão que, acoplado a uma roda, desencadeava o movimento de um eixo. Ligadas a esse eixo, várias máquinas industriais funcionavam e, assim, produziam os bens de consumo da época.



Banco de imagens/Arquivo da editora



// Retrato de James Watt, pintado por Carl Frederick von Breda em 1792. National Portrait Gallery, Londres.

SPL/Latinstock

A geladeira

Há evidências de que, desde muito cedo, os seres humanos que viviam em regiões muito frias observaram que o resfriamento dos alimentos conseguia conservá-los por mais tempo. Com o deslocamento das populações pelo mundo, esse conhecimento se espalhou.

Porém, foi somente no século XIX, precisamente em 1834, que Jacob Perkins (1766-1849) patenteou um compressor que podia solidificar a água, produzindo gelo artificialmente. A utilização desse compressor possibilitou que algumas indústrias prosperassem, como as cervejarias. Os comerciantes de carne agora podiam mandar seus produtos para os mais distantes países. No início do século XX, em 1902, o americano Willis Carrier (1876-1950) instalou em uma gráfica, na cidade de Nova York, o primeiro aparelho de ar condicionado, que permitia resfriar e controlar a umidade do ambiente. No início da década de 1920, surgiram nos Estados Unidos os primeiros refrigeradores domésticos, que logo se popularizaram. Hoje, no Brasil, mais de 80% das residências têm geladeira.

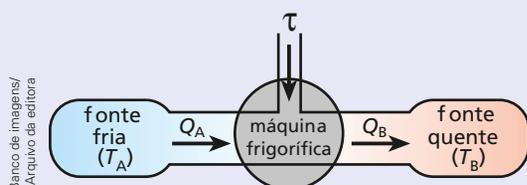
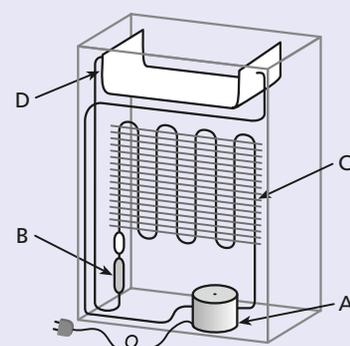
O funcionamento de uma geladeira baseia-se em um processo de transferência de calor de uma fonte fria para uma quente. Esse processo não é espontâneo. É necessária uma energia externa, em forma de trabalho (no compressor), para que essa transferência possa ocorrer. A geladeira possui, portanto, uma fonte fria (o congelador) e outra quente (o radiador), que se encontra na parte externa traseira, em forma de serpentina. O fluido operante usado é o fréon, que vaporiza a baixa pressão no congelador e se condensa a alta pressão no radiador. O mecanismo utilizado para reduzir a pressão no congelador é uma válvula; para aumentar a pressão no radiador, o mecanismo é um compressor, muito parecido com aquele que Perkins inventou. Observe que o fréon retira calor do interior da geladeira ao se vaporizar no congelador e libera calor para o ambiente no radiador, quando se condensa ao ser comprimido pelo compressor.

As partes principais do mecanismo de uma geladeira:

- A. **Compressor:** o fréon entra no estado gasoso com baixa pressão e sai com alta pressão, já condensado.
- B. **Válvula:** um tubo estreito (capilar) que diminui a pressão do vapor.
- C. **Radiador:** serpentina externa (localizada na parte traseira) na qual o vapor se liquefaz, liberando calor para o ambiente.
- D. **Congelador:** o fréon no estado líquido se vaporiza ao absorver calor do interior da geladeira.



/// Fotografia de geladeira do final do século XIX. Na parte superior era colocado gelo, que, ao resfriá-la, fazia o papel do atual congelador. Na parte interna útil, o ar que se aquecia retirando calor dos alimentos subia por convecção e era resfriado na face interna superior.



$$T_A < T_B$$

$$|Q_B| = |Q_A| + \tau$$

/// Este esquema representa uma máquina frigorífica. Espontaneamente, a fonte fria não transfere energia para a fonte quente. Assim, é necessário "forçar" essa transferência pela realização de trabalho sobre o sistema. A energia recebida pela fonte quente é a soma da energia retirada da fonte fria com o trabalho realizado sobre a máquina.

66. Leia as afirmações com atenção:

- (01) A 1ª Lei da Termodinâmica pode ser traduzida pela seguinte afirmação: "A energia não pode ser criada nem destruída, mas somente transformada de um tipo em outro".
 - (02) O calor flui espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
 - (04) A energia interna de dada massa de um gás perfeito não depende da temperatura do gás.
 - (08) O rendimento de uma máquina de Carnot independe das temperaturas da fonte fria e da fonte quente.
 - (16) É impossível transformar calor em trabalho utilizando apenas duas fontes de calor a temperaturas diferentes.
 - (32) O termômetro é um aparelho destinado a medir diretamente o calor de um corpo.
- Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

67. (UFSC) No século XIX, o jovem engenheiro francês Nicolas L. Sadi Carnot publicou um pequeno livro – *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre os meios adequados de desenvolvê-la* –, no qual descrevia e analisava uma máquina ideal e imaginária, que realizaria uma transformação cíclica hoje conhecida como "ciclo de Carnot" e de fundamental importância para a Termodinâmica.

Indique a(s) proposição(ões) correta(s) a respeito do ciclo de Carnot:

- (01) O ciclo de Carnot consiste em duas transformações adiabáticas, alternadas com duas transformações isotérmicas.
- (02) Nenhuma máquina térmica que opere entre duas determinadas fontes, às temperaturas T_1 e T_2 , pode ter maior rendimento do que uma máquina de Carnot operando entre essas mesmas fontes.
- (04) Uma máquina térmica, operando segundo o ciclo de Carnot entre uma fonte quente e uma fonte fria, apresenta um rendimento igual a 100%, isto é, todo o calor a ela fornecido é transformado em trabalho.
- (08) O rendimento da máquina de Carnot depende apenas das temperaturas da fonte quente e da fonte fria.

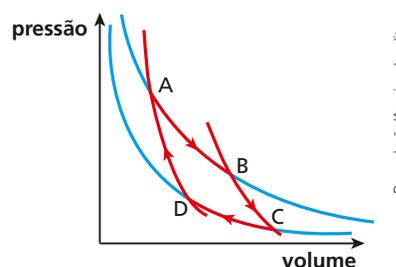
(16) Por ser ideal e imaginária, a máquina proposta por Carnot contraria a segunda lei da Termodinâmica.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

68. (Vunesp) O ciclo de Carnot, de importância fundamental na Termodinâmica, é constituído de um conjunto de transformações definidas. Num diagrama (p, V) , você esboçaria esse ciclo usando:

- a) uma isotérmica, uma isobárica, uma adiabática e uma isocórica (isovolumétrica).
- b) duas isotérmicas e duas adiabáticas.
- c) duas isobáricas e duas isocóricas (isovolumétricas).
- d) duas isobáricas e duas isotérmicas.
- e) uma isocórica (isovolumétrica), uma isotérmica e uma isobárica.

69. (UEL-PR) No gráfico abaixo está representada a evolução de um gás ideal segundo o ciclo de Carnot.



Reprodução/Arquivo da editora

Com relação ao comportamento do gás, é correto afirmar:

- a) A temperatura no ponto **A** é maior que no ponto **B**.
- b) No trajeto **BC**, o gás cedeu calor para a fonte fria.
- c) No trajeto **DA**, o trabalho realizado é negativo.
- d) A temperatura no ponto **C** é maior que no ponto **B**.
- e) No trajeto **CD**, o gás recebeu calor.

70. Uma máquina térmica teórica opera entre duas fontes térmicas, executando o ciclo de Carnot. A fonte fria encontra-se a 127°C e a fonte quente, a 427°C . Qual o rendimento percentual dessa máquina?

Resolução:

O rendimento de uma máquina que executa o ciclo de Carnot é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

em que T_A é a temperatura absoluta da fonte quente e T_B , a da fonte fria.

Sendo:

$$T_B = 127^\circ\text{C} = 400\text{ K}$$

$$T_A = 427^\circ\text{C} = 700\text{ K}$$

Substituindo na expressão, obtemos

$$\eta = 1 - \frac{400}{700} \Rightarrow \eta = \frac{3}{7} \cong 0,43$$

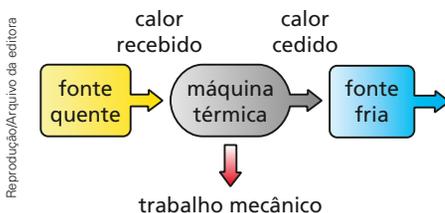
$$\eta(\%) \cong 43\%$$

71. Uma máquina térmica, teórica, opera entre duas fontes de calor, executando o ciclo de Carnot. A fonte fria encontra-se à temperatura de 6°C e a fonte quente, a 347°C . Qual é o maior rendimento teórico dessa máquina?

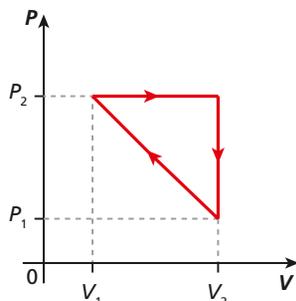
72. Na leitura de uma revista técnica, um aluno encontrou um artigo que descrevia uma máquina térmica utilizada em uma empresa. Essa máquina operava entre duas fontes térmicas de temperaturas 327°C e 27°C , realizando um trabalho equivalente a 200 J , a cada $1\ 000\text{ J}$ recebidos da fonte quente. Como ele estava estudando na escola a parte de Termodinâmica, calculou o rendimento dessa máquina e achou um pouco baixo. Lembrou-se da máquina de Carnot e calculou o novo rendimento que ela teria se pudesse funcionar segundo o ciclo de Carnot. Percentualmente, qual o novo rendimento (teórico)?

Exercícios Nível 2

73. (Vunesp) O esquema representa o fluxo de energia em uma máquina térmica que opera em ciclos, recebendo energia em forma de calor de uma fonte quente. Parte desse calor é convertido em trabalho mecânico útil e a diferença, não utilizada, é cedida para uma fonte fria.



O diagrama $P \times V$ representa o ciclo termodinâmico executado por essa máquina térmica.



Sabendo que o rendimento dessa máquina é de 40% , a quantidade de calor fornecida a ela pela fonte quente, a cada ciclo, é igual a:

- a) $1,25 \cdot (V_2 + V_1) \cdot (P_2 - P_1)$.
- b) $1,25 \cdot (V_2 - V_1) \cdot (P_2 - P_1)$.
- c) $0,40 \cdot (V_2 + V_1) \cdot (P_2 + P_1)$.
- d) $0,40 \cdot (V_2 - V_1) \cdot (P_2 - P_1)$.
- e) $0,50 \cdot (V_2 - V_1) \cdot (P_2 - P_1)$.

74. Até 1824, acreditava-se que uma máquina térmica poderia atingir o rendimento de 100% ou algo muito próximo desse valor. Se isso fosse verdade, poderíamos transformar integralmente, ou quase, a energia térmica recebida pela máquina em trabalho. No entanto, um jovem engenheiro francês, Nicolas Léonard Sadi Carnot, demonstrou a impossibilidade desse rendimento. Ele propôs uma máquina térmica teórica, que foi chamada de ideal e funcionaria percorrendo um ciclo particular, depois denominado **ciclo de Carnot**, constituído de duas isotermas e duas adiabáticas, intercaladas. Esse dispositivo obedeceria a dois postulados estabelecidos pelo próprio Carnot:

1º postulado

Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot, operando entre essas mesmas temperaturas.

2º postulado

Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante.

Assim, imagine uma máquina térmica que funciona de acordo com os postulados de Carnot. Em cada ciclo desenvolvido, o trabalho útil fornecido equivale a 2 000 joules. As temperaturas das fontes térmicas são 500 K e 300 K, respectivamente, fonte quente e fonte fria.

Determine:

- o rendimento dessa máquina;
- a quantidade de calor retirada da fonte quente;
- a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria.

75.



Banco de imagens/Arquivo da editora

O dispositivo acima é a famosa eolípila, inventada no século primeiro por Heron de Alexandria, considerada a primeira máquina a vapor.

As máquinas a vapor começaram a ser utilizadas, com algum sucesso, no século XVII, apesar de sua história ter começado com Heron, cerca de 100 d.C. Desde então, várias máquinas a vapor de diferentes modelos se destacaram pela produtividade e diversidade de uso. O estudo das máquinas térmicas chamou a atenção dos físicos para uma série de transformações que nunca ocorrem, embora não violem a lei da conservação da energia. Essas “proibições” deram origem à segunda lei da Termodinâmica.

Em uma biblioteca, foi encontrado um livro do final do século XVII, em péssimo estado de conservação. Após a verificação da parte que se podia ler, foram feitas adaptações para a realidade das unidades físicas de hoje. Na página 56, podia-se observar o projeto de uma máquina térmica a vapor que retirava o equivalente a 7 000 J de energia da fonte quente, que se encontrava a uma temperatura de 127 °C, e eram rejeitados 5 250 J para a fonte fria. A temperatura dessa fonte fria estava ilegível.

Supondo-se que essa máquina funcionasse como uma máquina de Carnot, o seu rendimento e a temperatura da fonte fria seriam, respectivamente, iguais a:

- 5% e 47 °C
- 10% e -27 °C
- 25% e 27 °C
- 50% e 77 °C
- 75% e 27 °C

76. (Udesc) Uma máquina a vapor foi projetada para operar entre duas fontes térmicas, a fonte quente e a fonte fria, e para trabalhar segundo o ciclo de Carnot. Sabe-se que a temperatura da fonte quente é de 127 °C e que a máquina retira, a cada ciclo, 600 J desta fonte, alcançando um rendimento máximo igual a 0,25. O trabalho realizado pela máquina, por ciclo, e a temperatura da fonte fria são, respectivamente:

- 240 J e 95 °C
- 150 J e 27 °C
- 15 J e 95 °C
- 90 J e 27 °C
- 24 J e 0 °C

77. (CPAEN-RJ) Uma máquina de Carnot, operando inicialmente com rendimento igual a 40%, produz um trabalho de 10 joules por ciclo. Mantendo-se constante a temperatura inicial da fonte quente, reduziu-se a temperatura da fonte fria de modo que o rendimento passou para 60%. Com isso, o módulo da variação percentual ocorrida no calor transferido à fonte fria, por ciclo, é de

- 67%
- 60%
- 40%
- 33%
- 25%

78. (PUCC-SP) A turbina de um avião tem rendimento de 80% do rendimento de uma máquina ideal de Carnot operando às mesmas temperaturas. Em voo de cruzeiro, a turbina retira calor da fonte quente a 127 °C e ejeta gases para a atmosfera, que está a -33 °C.

O rendimento dessa turbina é de:

- 80%.
- 64%.
- 50%.
- 40%.
- 32%.

79. (PUC-SP)

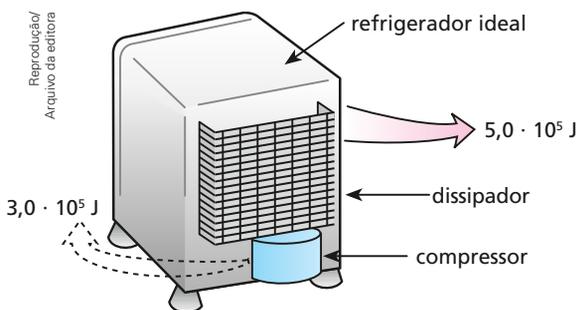
a) Um inventor afirmou ter construído uma máquina térmica cujo desempenho atinge 90% daquele de uma máquina de Carnot. Sua máquina, que trabalha entre as temperaturas de 27 °C e 327 °C, recebe, durante certo período, $1,2 \cdot 10^4$ cal e fornece, simultaneamente, um trabalho útil de $1 \cdot 10^4$ J. A afirmação do inventor é verdadeira? Justifique.

Dado: 1 cal = 4,186 J

b) Se o trabalho útil da máquina térmica do item anterior fosse exercido sobre o êmbolo móvel de uma ampola contendo um gás ideal, à pressão de 200 Pa, qual seria a variação de volume sofrida pelo gás, caso a transformação fosse isobárica?

80. Uma geladeira retira, por segundo, 1 000 kcal do congelador, enviando para o ambiente 1 200 kcal. Considere 1 kcal = 4,2 kJ. Qual a potência do compressor da geladeira?

81. (UFV-MG) Em um refrigerador ideal, o dissipador de calor (serpentina traseira) transferiu $5,0 \cdot 10^5$ J de energia térmica para o meio ambiente, enquanto o compressor produziu $3,0 \cdot 10^5$ J de trabalho sobre o fluido refrigerante.



Calcule:

- a) a quantidade de calor retirada da câmara interna;
- b) o rendimento do sistema de refrigeração.

82. (Unifesp) Costuma-se especificar os motores dos automóveis com valores numéricos, 1.0, 1.6, 1.8 e 2.0, entre outros. Esses números indicam também valores crescentes da potência do motor. Pode-se explicar essa relação direta entre a potência do motor e esses valores numéricos porque eles indicam o volume aproximado, em litros,

- a) de cada cilindro do motor e, quanto maior esse volume, maior a potência que o combustível pode fornecer.
- b) do consumo de combustível e, quanto maior esse volume, maior a quantidade de calor que o combustível pode fornecer.
- c) de cada cilindro do motor e, quanto maior esse volume, maior a temperatura que o combustível pode atingir.
- d) do consumo de combustível e, quanto maior esse volume, maior a temperatura que o combustível pode fornecer.
- e) de cada cilindro do motor e, quanto maior esse volume, maior o rendimento do motor.

83. (UFRN) Em um processo adiabático, a pressão p e o volume V de um gás ideal obedecem à relação $pV^\gamma = \text{constante}$, em que γ é um parâmetro fixo. Considere que uma amostra de gás ideal sofreu uma expansão adiabática na qual o seu volume foi duplicado.

A razão entre a temperatura inicial T_i e a temperatura final T_f da amostra é:

- a) $T_i/T_f = 2^\gamma$.
- b) $T_i/T_f = 2^{1-\gamma}$.
- c) $T_i/T_f = \gamma$.
- d) $T_i/T_f = 2^{\gamma-1}$.
- e) $T_i/T_f = \gamma^2$.

84. (ITA-SP) Uma bolha de gás metano com volume de 10 cm^3 é formada a 30 m de profundidade num lago. Suponha que o metano comporta-se como um gás ideal de calor específico molar $C_v = 3R$ e considere a pressão atmosférica igual a 10^5 N/m^2 . Supondo que a bolha não troque calor com a água ao seu redor, determine seu volume quando ela atinge a superfície.

Dados: densidade da água = $1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$; $\sqrt{2} \cong 1,4$

85. Determine a variação da entropia (ΔS) de um sistema constituído de 200 g de gelo, a 0°C , quando essa amostra sofre fusão.

Dado: calor latente de fusão do gelo = $336 \frac{\text{J}}{\text{g}}$

Resolução:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{mL_f}{T}$$

$$\Delta S = \frac{200 \cdot 336}{[0 + 273]} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\Delta S \cong 246 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

86. (ITA-SP) Calcule a variação de entropia (ΔS) quando, num processo à pressão constante de 1,0 atm, se transformam integralmente em vapor 3,0 kg de água que se encontram inicialmente no estado líquido, à temperatura de 100°C .

Dado: calor de vaporização da água = $5,4 \cdot 10^5 \text{ cal/kg}$

87. Num recipiente de capacidade térmica desprezível e termicamente isolado, são misturados 100 g de água a 10°C com 200 g de água a 40°C .

Dado: calor específico da água = $1 \text{ cal/g } ^\circ \text{C}$

Pede-se determinar a variação de entropia (ΔS) ocorrida nesse sistema, na transformação termodinâmica, do início da mistura até o equilíbrio térmico final.

1. Como funcionam os motores de combustão interna, de quatro tempos, utilizados nos automóveis?
2. Por que as geladeiras tipo *frost free* não precisam ser descongeladas? Por que elas não possuem a grade trocadora de calor em sua parte traseira?

Ampliando o olhar

Motor térmico

E a revolução continua...

No início do século XVIII, a indústria instalada dependia da potência muscular de seus operários, de animais como o cavalo, da força do vento e de quedas-d'água. Com o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, o trabalho de várias pessoas ou de muitos animais pôde ser substituído por um único dispositivo. As máquinas térmicas passaram a substituir em larga escala a força motriz existente, tornando mais ágeis e confiáveis os navios, e foram também responsáveis por novas alternativas de deslocamento, como as locomotivas a vapor, capazes de transportar por terra cargas e pessoas em grandes distâncias.

Com o advento dos primeiros motores de combustão interna, a partir da segunda metade do século XIX, uma nova revolução tecnológica se instalou. Nesses propulsores, uma reação química produzia a queima do combustível e os gases aquecidos empurravam os pistões, realizando a transformação de energia térmica em energia mecânica. No início, vários pesquisadores implementaram projetos para o funcionamento dos motores térmicos; no entanto, as tentativas de construção não lograram êxito. Coube ao alemão Nikolaus August Otto (1832-1891), em 1867, aperfeiçoar e construir tal motor. Ele descobriu acidentalmente que era necessário adicionar ar em certa proporção ao combustível na fase de compressão. E eis que funcionou! O dispositivo desenvolvido por esse engenheiro passou a ser conhecido por **Motor Otto**, e o ciclo termodinâmico que traduz seu funcionamento foi chamado de **Ciclo de Otto**.

Surgia, assim, o motor térmico de quatro tempos...

Ao lado, apresentamos em um diagrama $p \times V$ (pressão *versus* volume) o ciclo ideal de Otto, que traduz o funcionamento teórico dos quatro tempos do funcionamento do motor térmico. O ciclo ideal é um pouco diferente do idealizado. Na prática, os processos são aproximados, ocorrendo interferências externas.

No esquema ao lado, é possível observar o que ocorre em cada pistão nas quatro etapas do ciclo.

Os processos observados no ciclo ideal são:

1. **Admissão** – processo isobárico $0 \rightarrow 1$.

Nesta fase, o pistão desce, a válvula de admissão abre e uma mistura de combustível e ar é injetada na câmara interna.

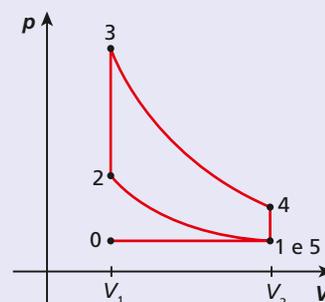
2. **Compressão** – processo adiabático $1 \rightarrow 2$.

As válvulas de admissão e exaustão são fechadas e o pistão sobe, comprimindo a mistura na câmara.

3. **Combustão e Expansão** – processo isométrico $2 \rightarrow 3$, seguido de expansão adiabática $3 \rightarrow 4$.



// Nikolaus August Otto. Este engenheiro alemão ficou fascinado com as possibilidades da tecnologia do gás e do vapor disponíveis em sua época. Desenvolveu o motor térmico de quatro tempos, o que lhe valeu a medalha de ouro na Exposição de Paris, em 1867.



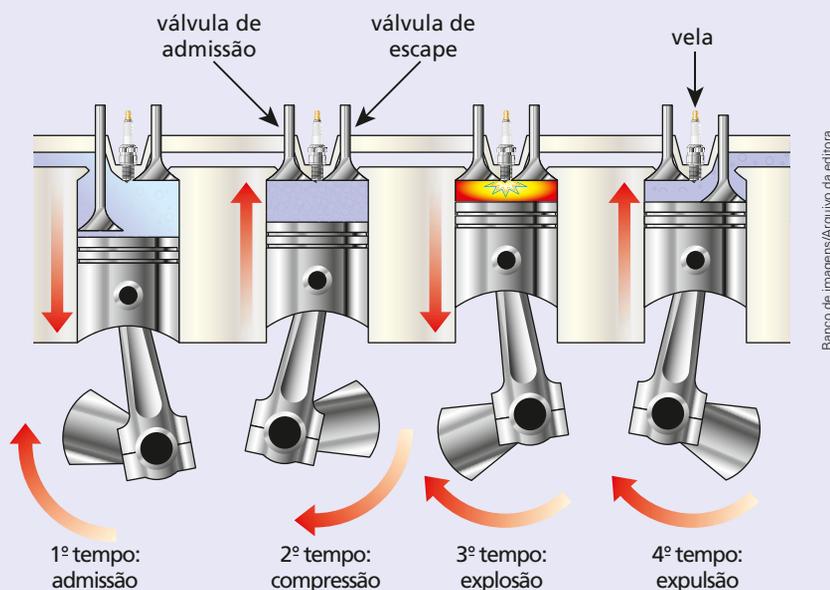
// Diagrama pressão \times volume.

Banco de imagens/Arquivo da editora

Quando o pistão atinge o ponto de compressão máxima, uma faísca elétrica é emitida por uma vela, provocando a explosão da mistura combustível-ar. Gases aquecidos empurram o pistão para baixo, expandindo a câmara interna do cilindro.

4. **Exaustão** ou **Escape** – abertura da válvula de exaustão, 4 → 5, seguida de descompressão isobárica, 5 → 0.

A válvula de escape é aberta, possibilitando a exaustão, isto é, a retirada dos gases formados na explosão.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Os motores são constituídos basicamente por pistões móveis acoplados a um virabrequim ou eixo de manivelas, que transmite o movimento dos pistões às rodas. Nos veículos atuais, os motores de combustão interna são, em sua quase totalidade, de dois tempos (motocicletas) ou de quatro tempos (automóveis, caminhões e ônibus), diferenciando-se apenas quanto ao combustível utilizado (etanol, gasolina, diesel, biodiesel, etc.).

Os motores térmicos fizeram surgir a indústria automobilística, que não para de crescer. Desde os tempos de Henry Ford (1863-1947), visionário empreendedor norte-americano e fundador da *Ford Motor Company*, a primeira fábrica de automóveis em série, essa indústria se expande e se sofisticada. Diariamente, em todos os rincões do planeta, mais e mais veículos são colocados em circulação, exigindo infraestrutura viária e combustíveis diversos para manter a gigantesca frota em circulação. Só na cidade de São Paulo, por exemplo, o número de carros licenciados já passa de 7 milhões, sem falar de motocicletas, ônibus, etc.

Esse número crescente de veículos tem provocado aumento significativo de emissões de CO₂ (gás carbônico), um dos gases que incrementam o efeito estufa.

Por isso, é de grande importância que os veículos movidos a derivados de petróleo sejam gradualmente substituídos por máquinas propulsionadas por combustíveis menos poluentes ou mesmo por eletricidade, tecnologia que já se encontra bastante desenvolvida e em fase de aprimoramento.

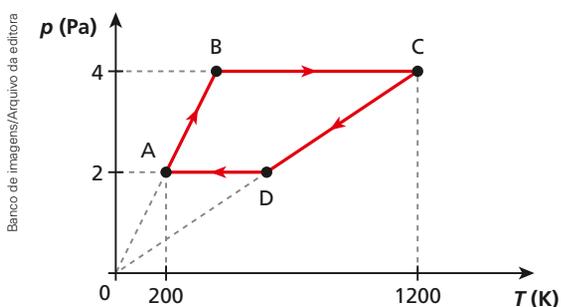


Ross Helen/Shutterstock

// Carro elétrico: alternativa menos poluente que já circula em algumas cidades.

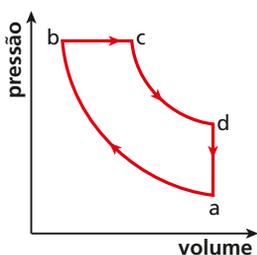
88. (UnB-DF) Quanto aos processos sofridos por gases ideais entre dois estados, julgue os itens a seguir:
- Num processo isotérmico, há troca de calor com o meio exterior.
 - Num processo adiabático, não há transferência de calor para o meio exterior.
 - Um processo adiabático é um processo lento, em que a variação de energia do gás é igual ao trabalho realizado sobre este.
 - Um processo isotérmico é um processo lento, no qual há variação na energia interna do gás.
 - Num processo isotérmico, a energia cinética média das moléculas é a mesma nos estados inicial e final.
 - Num processo isotérmico de compressão de um gás, a pressão exercida sobre as paredes do recipiente que contém o gás aumentará.
 - Num processo adiabático, a variação de energia do gás é nula.
 - A temperatura do gás no estado final depende do processo seguido e da natureza do gás.

89. Uma determinada amostra de gás monoatômico, que se comporta como um gás ideal, desenvolve sucessivas transformações retornando à sua situação inicial, percorrendo o ciclo termodinâmico representado no diagrama a seguir.



Sabendo que o volume inicial do gás era $1,0 \text{ m}^3$, determinar o trabalho realizado ao completar um ciclo.

90. (UFC-CE) O ciclo *diesel*, mostrado na figura ao lado, representa o comportamento aproximado de um motor *diesel*. A substância de trabalho desse motor pode ser considerada um gás ideal. O processo $a \rightarrow b$ é uma compressão adia-



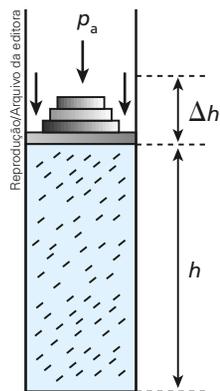
bática, o processo $b \rightarrow c$ é uma expansão a pressão constante, o processo $c \rightarrow d$ é uma expansão adiabática e o processo $d \rightarrow a$ é um resfriamento a volume constante.

Com relação a esses processos, a opção correta é:

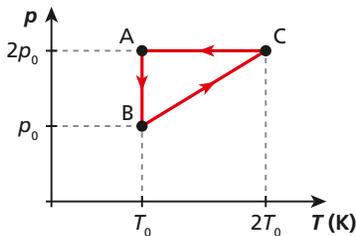
- No processo $a \rightarrow b$ a energia interna do sistema não varia.
 - No processo $b \rightarrow c$ a energia interna do sistema diminui.
 - No processo $c \rightarrow d$ a energia interna do sistema diminui.
 - No processo $d \rightarrow a$ a energia interna do sistema aumenta.
 - No ciclo completo a variação da energia interna é positiva.
91. (IME-RJ) Um gás ideal e monoatômico contido em uma garrafa fechada com $0,1 \text{ m}^3$ está inicialmente a 300 K e a 100 kPa . Em seguida, esse gás é aquecido, atingindo 600 K . Nessas condições, o calor fornecido ao gás, em kJ , foi?
- 5
 - 10
 - 15
 - 30
 - 45

92. (Ufla-MG) A figura mostra, em corte, um cilindro de paredes adiabáticas (não há troca de calor), provido de um êmbolo superior móvel. No interior do cilindro, encontram-se n mols de um gás ideal. A pressão atmosférica p_a local é de 1 atm e a pressão dos pesos sobre o êmbolo móvel é de 5 atm . A área da base do cilindro e do êmbolo móvel é de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Na condição de equilíbrio mostrada, $h = 16 \text{ cm}$ e a temperatura do gás é 300 K . Considerando $1 \text{ atm} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ e $R = 8 \text{ J/molK}$, calcule:

- o número de mols (n) contido no cilindro;
 - a força em newtons que o gás realiza sobre o êmbolo móvel.
- Em seguida, a temperatura do gás é elevada para 420 K , mantendo-se a pressão constante. Calcule:
- o deslocamento Δh (cm) do êmbolo móvel;
 - o trabalho realizado pelo gás, em joules.



93. (IF-UFRJ) Um mol de um gás ideal de capacidade térmica molar a volume constante $C_V = 3\frac{R}{2}$ (onde R é a constante universal dos gases), descreve o ciclo **ABCA** esquematizado na figura abaixo no plano (p, T) . Sejam U_X a energia interna do gás no estado **X**, $W_{X \rightarrow Y}$ o trabalho realizado pelo gás no processo **X** \rightarrow **Y** e $Q_{X \rightarrow Y}$ o calor fornecido ao gás no processo **X** \rightarrow **Y**.



Reprodução/Arquivo da editora

Marque a afirmativa correta.

- a) O processo **AB** é isotérmico e $Q_{A \rightarrow B} = 0$.
 b) O processo **BC** é isovolumétrico e $Q_{B \rightarrow C} = RT_0$.
 c) $W_{B \rightarrow C} > 0$ e $V_C = 2V_A$.
 d) $W_{A \rightarrow B} < 0$ e ΔU no ciclo é nulo.
94. (Cesgranrio) Um cafezinho bem quente, se deixado em cima da mesa, cederá calor para o meio ambiente ao seu redor, até que sua temperatura se iguale à do meio. Nesse processo, há diminuição da temperatura do cafezinho a volume constante, permanecendo sempre constante a temperatura do meio. Este é um exemplo de um processo irreversível onde há uma direção temporal permitida pelas Leis da Termodinâmica. A respeito da variação total de entropia nesse processo, é correto afirmar que a entropia:
- a) aumenta, considerando o café mais o ambiente, por se tratar de processo irreversível;
 b) aumenta no início do processo, tendendo a se estabilizar e a permanecer constante;
 c) se mantém constante, sem que se observe qualquer variação nesse caso;
 d) diminui, considerando o café mais o ambiente, por se tratar de processo irreversível;
 e) diminui, por se tratar de um caso especial.
95. Em 1865, Rudolf Clausius usou pela primeira vez o conceito de **entropia** como sendo uma medida de desordem do sistema físico estudado. Ele estabeleceu a variação de entropia (ΔS) de um sistema, quando se agrega uma quantidade de calor (Q), mediante um processo reversível a uma temperatura absoluta (T), como sendo a razão:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Assim, considere um sistema constituído de 3,0 kg de água líquida a 100 °C. Mantendo-se a pressão constante em 1,0 atm, calcule a variação de entropia do sistema para transformar essa água em vapor, a 100 °C.

Dado: calor de vaporização da água = 540 cal/g

96. (PUC-SP) Um automóvel com motor 1.0 (volume de 1,0 litro), conhecido pelo seu menor consumo de combustível, opera com pressão média de 8 atm e 3300 rpm (rotações por minuto), quando movido a gasolina. O rendimento desse motor, que consome, nessas condições, 4,0 g/s (gramas por segundo) de combustível, é de aproximadamente:
- a) 18% b) 21% c) 25% d) 27% e) 30%

Considere:

Calor de combustão da gasolina = 11 100 cal/kg
 1 atm = 10^5 N/m²; 1 cal = 4J; 1 L = 10^{-3} m³
 1 rotação corresponde a 1 ciclo

97. (UFRGS-RS) Sob condições de pressão constante, certa quantidade de calor Q , fornecida a um gás ideal monoatômico, eleva sua temperatura em ΔT . Quanto calor seria necessário, em termos de Q , para produzir a mesma elevação de temperatura ΔT , se o gás fosse mantido em volume constante?
- a) 3Q b) $\frac{5}{3}Q$ c) Q d) $\frac{3}{5}Q$ e) $\frac{2}{5}Q$

98. (SEPLAG-MG) As primeiras máquinas térmicas, inventadas no século XVIII, além de bastante precárias, apresentavam rendimentos muito baixos, isto é, consumiam grande quantidade de combustível para produzir trabalho relativamente pequeno. Por volta de 1770, o inventor escocês James Watt apresentou um novo modelo de máquina térmica, que veio substituir aquelas então existentes. A máquina de Watt foi inicialmente empregada para movimentar moinhos e acionar as bombas que retiravam água de minas subterrâneas e, posteriormente, nas locomotivas e barcos a vapor. Acerca desse tema, assinale a afirmativa **incorreta**.

- a) O cálculo da eficiência térmica (ϵ) pela expressão, $\epsilon = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$ em que T_F é a temperatura da fonte fria e T_Q é a temperatura da fonte quente, aplica-se a qualquer tipo de máquina.
 b) O enunciado de Clausius afirma ser impossível um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar calor de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de calor para um reservatório quente.

Uma reflexão sobre a energia nuclear

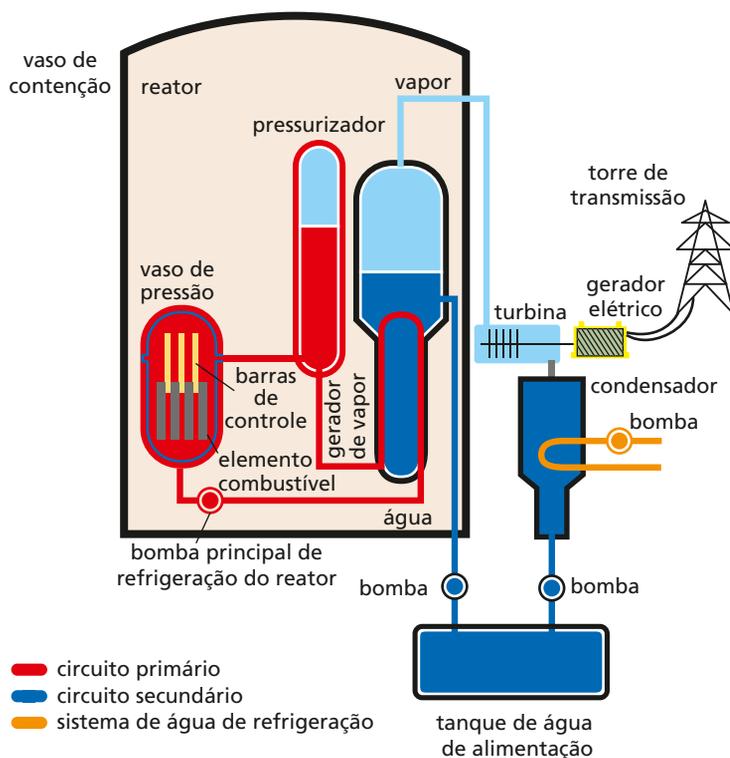
Muito se tem falado e escrito sobre a energia do átomo. Alguns a favor e muitos contra. No entanto, será que todos sabemos realmente os prós e os contras? A real necessidade de a humanidade usar ou não a energia nuclear?

Nós vivemos em uma sociedade que exige cada vez mais a utilização da energia elétrica. Usamos essa energia para iluminação de nossas casas, lojas e ruas; para fazer funcionar nossos aparelhos de cozinha (geladeiras, *freezers*, batedeiras de bolo, fornos elétricos, fornos de micro-ondas, torradeiras, e outros); para nossos televisores (normais, de plasma, de LCD ou de LED), para nossos aparelhos de som, computadores de mesa ou portáteis (*notebooks* e *netbooks*); *tablets*, telefones sem fio ou celulares, enfim uma grande quantidade de aparelhos que exigem energia elétrica para seu funcionamento. Já existem automóveis elétricos que podem ser abastecidos nas tomadas de nossas residências. A indústria que produz todos esses bens funciona com energia elétrica. Sempre que pessoas melhoram de vida passam a consumir mais energia elétrica, mais bens que são produzidos a partir dessa energia. Como vamos gerar tanta energia assim? Muitos podem dizer que existe a energia hídrica (gerada nas hidrelétricas, utilizando o desnível de grandes quantidades de água em represas), a energia eólica (gerada por aqueles grandes “ventiladores” soprados pelos ventos), a energia do carvão e dos óleos combustíveis (petróleo ou vegetais), do etanol, da energia solar, porém a obtenção dessas energias também tem suas limitações, suas vantagens e suas desvantagens.

A seguir vamos entender um pouco da energia nuclear, como obtê-la, os prós e os contras.

A energia utilizada nas centrais termonucleares é obtida a partir da **fissão** controlada de núcleos de urânio 235 (radioativo). Esse urânio U^{235} é um isótopo que possui 92 prótons e 143 nêutrons, e sua massa atômica é 235 (92 + 143). Além do U^{235} , encontramos na natureza o U^{238} , outro isótopo de urânio que contém 92 prótons e 146 nêutrons. O U^{238} é encontrado em maior quantidade, mas só pode sofrer **fissão** se bombardeado por nêutrons “rápidos”, de alta energia cinética. Já o U^{235} , que representa apenas 0,7% do urânio encontrado, pode ser fissionado por nêutrons de qualquer energia cinética, os nêutrons “lentos” (nêutrons térmicos). Como nos reatores do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), os mais usados, precisamos ter aproximadamente 3,2% de concentração de U^{235} , a massa de urânio deve passar por um processo de enriquecimento. Isso é feito retirando-se U^{238} da amostra, já que, após o enriquecimento, devem-se encontrar 32 átomos de U^{235} para cada 968 átomos de U^{238} . Quando o grau de enriquecimento é muito alto (mais de 90% de U^{235}), uma reação em cadeia muito rápida pode ocorrer, é a bomba atômica.

Perfil esquemático de uma usina PWR



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap8.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

A **fissão** de núcleos de urânio e seus isótopos gera uma grande quantidade de energia térmica, que pode ser aproveitada para a geração de energia elétrica, por meio de reatores do tipo PWR. A taxa de liberação de energia, a potência do reator, pode ser mudada, alterando-se a densidade de átomos físséis, alterando-se o fluxo de nêutrons ou ainda o tamanho do núcleo a ser bombardeado. Para se ter uma ideia, se um grama de U^{235} fosse totalmente fissionado, forneceria energia equivalente à combustão de 9 toneladas de carvão.

Comparando uma usina termonuclear com usinas termelétricas e hidrelétricas, observamos que:

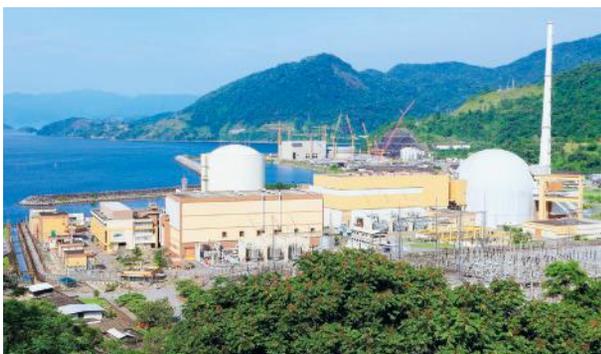
1. As usinas nucleares possuem uma reserva energética muito maior que as termelétricas (que dependem principalmente de combustíveis fósseis, em extinção) e as hidrelétricas (que dependem de reservas hídricas em cotas elevadas, cada vez mais difíceis de se obter).
2. As agressões ao meio ambiente são muito menores nas usinas nucleares. Já as usinas termelétricas são altamente poluidoras, emitindo gases tóxicos gerados pela queima de combustíveis fósseis (como os derivados de petróleo). As usinas hidrelétricas provocam grandes alterações no meio ambiente, como a devastação de grandes áreas úteis à agricultura, alagando-as.

De toda a energia elétrica produzida no mundo, 17% são gerados por usinas termonucleares. O país que mais utiliza essa forma de produção de energia são os Estados Unidos, com 98 usinas gerando 98 784 MWe. O segundo é a França, com 56 usinas que produzem 58 493 MWe. O terceiro é o Japão, com 51 usinas gerando 39 917 MWe. O Brasil possui apenas duas usinas: Angra 1, em operação

desde 1985, que gera 657 MWe, e Angra 2, em operação desde 2001, que produz 1 309 MWe. Hoje, são 34 os países que possuem usinas termonucleares em funcionamento.

Apesar dos riscos representados por usinas termonucleares, observamos que no futuro, se não encontrarmos uma nova maneira de obtenção de energia ou não mudarmos nosso modo de vida (utilizando menos energia), deveremos retornar à construção de novas usinas que utilizam a energia do átomo para obter a preciosa energia elétrica que move nosso mundo.

Alamy/Fotorena



// Na fotografia, observamos, à esquerda, a usina nuclear de Angra 1 com sua cúpula cilíndrica; à direita, a usina de Angra 2 com sua cúpula convexa e a imensa chaminé. O conjunto é denominado Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Angra 1 iniciou seus trabalhos em 1985 e Angra 2 em 2001. Em um futuro próximo, a usina Angra 3 deverá fazer parte desse cenário.

Compreensão, pesquisa e debate

1. A obtenção de energia a partir do átomo pode ser feita de duas maneiras: por fissão nuclear e por fusão nuclear. Pesquise e descubra a diferença entre esses dois processos.
2. A melhora da qualidade de vida das pessoas exige maior consumo de energia, principalmente a elétrica. A obtenção dessa energia sempre agride a natureza. Como podemos equacionar essa questão?
3. Você é a favor da utilização de energia nuclear no Brasil? Discuta com seus colegas essa questão.

Para raciocinar um pouco mais

103. Um dos aparelhos indispensáveis em uma residência é a geladeira. A refrigeração do seu interior é feita de forma não espontânea. Retira-se energia térmica da parte interna e transfere-se essa energia para o ambiente da cozinha. A transferência de energia térmica só é espontânea quando o calor transita no sentido de temperaturas decrescentes.

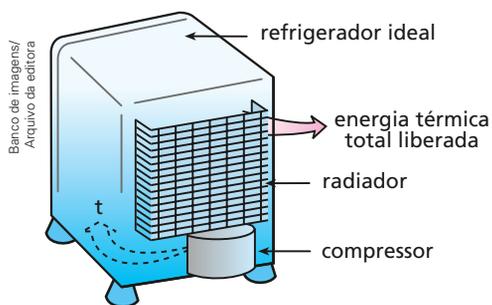
Na parte interna da geladeira, há o congelador, no qual, normalmente, a substância fréon se vaporiza a baixa pressão, absorvendo energia térmica. O fréon, no estado gasoso, expande-se até o radiador (serpentina traseira), no qual, sob alta pressão, se condensa, liberando energia térmica para o meio externo. A pressão do fréon é aumentada no radiador devido a um compressor e diminuída no congelador devido a uma válvula.

A eficiência ε de uma geladeira é determinada pela razão entre a energia térmica Q que é retirada do seu congelador e o trabalho τ que o compressor teve de realizar.

$$\varepsilon = \frac{Q}{\tau}$$

A energia térmica que o radiador transfere para o ambiente é a soma da energia térmica retirada do congelador com o trabalho realizado pelo compressor.

O desenho representa uma geladeira doméstica:



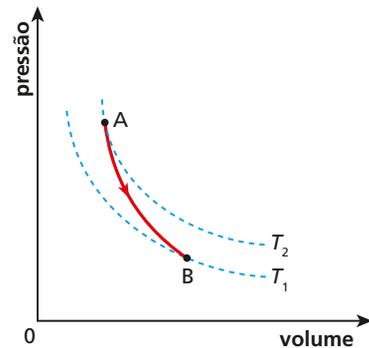
Considere uma geladeira ideal cujo compressor tenha potência útil igual a 5,0 kW.

Se, durante cada minuto de funcionamento desse compressor, o radiador (serpentina traseira) transfere para o meio ambiente $4,5 \cdot 10^5$ J de energia térmica, a eficiência do refrigerador é igual a:

- a) 33%. c) 67%. e) 100%.
b) 50%. d) 75%.

104. O gráfico mostra uma expansão adiabática de 1 mol de gás ideal monoatômico, entre as isotermas $T_2 = 127^\circ\text{C}$ e $T_1 = 27^\circ\text{C}$.

Para a constante universal dos gases perfeitos R , use o valor 2 cal/molK. Sabe-se ainda que o calor específico molar a pressão constante desse gás vale 5 cal/molK.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Determine:

- o trabalho realizado pelo gás durante a expansão adiabática;
- o valor do expoente de Poisson (γ);
- o valor do calor específico molar a volume constante do gás.

105. (UFF-RJ) Considere 4 mols de um gás ideal, inicialmente a 2°C de temperatura e 8,20 atm de pressão, que se submete ao seguinte ciclo de transformações:

- compressão isotérmica, cedendo 860 J de calor, até o volume de 10 L;
- aquecimento isobárico até a temperatura de 57°C ;
- despressurização isovolumétrica até a pressão de 8,20 atm;
- resfriamento isobárico até retornar às condições iniciais.

- Represente este ciclo em um gráfico p (atm) \times V (L), indicando os valores de p , V e T ao final de cada uma das transformações dadas anteriormente.
- Calcule o trabalho realizado pelo gás no ciclo, em joules.
- Calcule o calor absorvido pelo gás no ciclo, em joules.
- Calcule a potência, em watts, de um motor que realiza 10 desses ciclos por segundo.

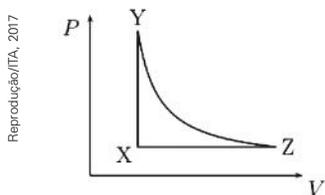
Dados:

R (constante dos gases) = $0,082 \text{ atm L/mol K}$;

$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$;

$0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$.

106. (ITA-SP) Uma transformação cíclica **XYZX** de um gás ideal indicada no gráfico $P \times V$ opera entre dois extremos de temperatura, em que **YZ** é um processo de expansão adiabática reversível. Considere $R = 2,0 \text{ cal/mol} \cdot \text{K} = 0,082 \text{ atm l/mol} \cdot \text{K}$, $P_Y = 20 \text{ atm}$, $V_Z = 4,0 \text{ l}$, $V_Y = 2,0 \text{ l}$ e a razão entre as capacidades térmicas molar, a pressão e a volume constante, dada por $C_p/C_v = 2,0$.



Assinale a razão entre o rendimento deste ciclo e o de uma máquina térmica ideal operando entre os mesmos extremos de temperatura.

- a) 0,38
b) 0,44
c) 0,55
d) 0,75
e) 2,25
107. (OBF) Certa quantidade de gás hélio, inicialmente no estado **A**, em que a pressão e o volume valem $P_A = 32 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ e $V_A = 1 \text{ m}^3$, sofre o processo **A** \rightarrow **B** \rightarrow **C**. O processo **A** \rightarrow **B** é isobárico e **B** \rightarrow **C** é adiabático. Considere o gás ideal e que, para o hélio, $C_v = \frac{3R}{2}$ e $C_p = \frac{5R}{2}$ são os calores específicos molares a volume e a pressão constantes, respectivamente.
- a) Construa o diagrama PV, sabendo que o volume do gás no estado **B** é $V_B = 2 \text{ m}^3$ e a pressão no estado **C** é $P_C = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.
- b) Quanto trabalho foi realizado pelo gás na expansão **A** \rightarrow **C**?
- c) Qual a variação na energia interna do gás de **A** \rightarrow **C**?

Observação: Num processo adiabático, o trabalho realizado (ou recebido) pelo gás entre os estados 1 \rightarrow 2 é dado por:

$$\Delta\tau = \frac{1}{1-\gamma} [P_2V_2 - P_1V_1], \text{ onde } \gamma = \frac{C_p}{C_v} \text{ é o fator de Poisson.}$$

108. (CPAEN-RJ) As turbinas a vapor da propulsão nuclear de um submarino possuem um rendimento de 15% e são capazes de produzir uma potência mecânica constante de 40 MW nos eixos rotativos. Se essa potência é entregue em 3,0 minutos, observa-se que a variação de entropia do sistema vapor-turbinas é $(1/12) \text{ GJ/K}$. A temperatura, em $^\circ\text{C}$, do vapor superaquecido produzido pelo reator nuclear vale, aproximadamente

- a) 327
b) 303
c) 247
d) 207
e) 177

109. (OBF) Imagine que o seguinte processo termodinâmico ocorra espontaneamente: uma sala de aula, fechada e isolada termicamente do ambiente externo, encontra-se inicialmente a uma temperatura T_0 , pressão p_0 e contém ar homogeneamente distribuído por todo o seu volume V_0 . De repente, as moléculas constituintes do ar deslocam-se, sem realização de trabalho, passando a ocupar apenas uma pequena parte,

$V_f = \frac{V_0}{1000}$ do volume total da sala. A pressão

final do ar não é conhecida. Considere que o ar da sala é constituído por n mols de um gás ideal.

- a) Calcule a temperatura final do ar da sala de aula.
- b) Calcule a variação da entropia total do ar da sala e do ambiente, considerando que o processo mencionado tenha ocorrido de forma irreversível. Com base em sua resposta, a existência desse processo é possível? Explique.

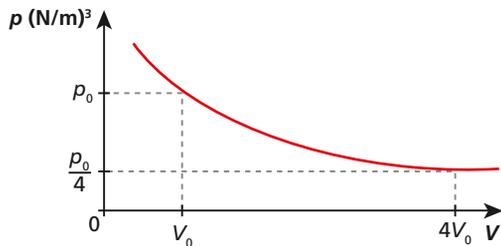
Dado: A variação de entropia de n mols de um gás ideal durante um processo isotérmico reversível com volumes inicial e final respectivamente iguais a V_i e V_f é dada aproximadamente por $\Delta S = 2,3 nR \log_{10} \frac{V_f}{V_i}$, em que R é a constante universal dos gases.

110. Em um recipiente de capacidade térmica desprezível e termicamente isolado, são misturados 100 g de água a 10°C com 200 g de água a 40°C .

Dado: calor específico da água = $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

Pede-se determinar a variação de entropia (ΔS) ocorrida nesse sistema, na transformação termodinâmica, do início da mistura até o equilíbrio térmico final.

111. (Cesgranrio) Em uma expansão isotérmica, o volume de gás aumenta quatro vezes e a energia interna não varia, sendo o trabalho realizado pelo gás igual ao calor recebido.

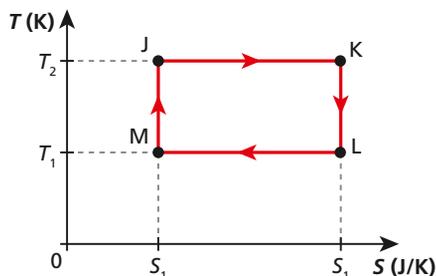


Reprodução/Arquivo da editora

Considerando o gráfico acima, qual a variação de entropia de um mol de um gás ideal, numa expansão isotérmica ($T = \text{cte}$) reversível entre os estados inicial e final?

Dado: $R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, $\ln 4 \cong 1,4$

112. (ITA-SP) Uma máquina térmica opera segundo o ciclo **JKLMJ** mostrado no diagrama T - S da figura.



Reprodução/Arquivo da editora

Pode-se afirmar que:

- o processo **JK** corresponde a uma compressão isotérmica.
 - o trabalho realizado pela máquina em um ciclo é $W = (T_2 - T_1)(S_2 - S_1)$.
 - o rendimento da máquina é dado por $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
 - durante o processo **LM** uma quantidade de calor $Q_{LM} = T_1(S_2 - S_1)$ é absorvida pelo sistema.
 - outra máquina térmica que opere entre T_2 e T_1 poderia eventualmente possuir um rendimento maior que a desta.
113. (ITA-SP) Considerando um buraco negro como um sistema termodinâmico, sua energia interna U varia com a sua massa M de acordo com a famosa relação de Einstein: $\Delta U = \Delta Mc^2$. Stephen Hawking propôs que a entropia S de um buraco negro depende apenas de sua massa e de algu-

mas constantes fundamentais da natureza. Dessa forma, sabe-se que uma variação de massa acarreta uma variação de entropia dada por: $\frac{\Delta S}{\Delta M} = 8\pi GM \frac{k_B}{hc}$. Supondo que não haja realização de trabalho com a variação de massa, indique a alternativa que melhor representa a temperatura absoluta T do buraco negro.

- $T = \frac{hc^3}{GMk_B}$
- $T = \frac{8\pi Mc^2}{k_B}$
- $T = \frac{Mc^2}{8\pi k_B}$
- $T = \frac{hc^3}{8\pi GMk_B}$
- $T = \frac{8\pi hc^3}{GMk_B}$

114. (CPAEN-RJ) Uma máquina de Carnot tem rendimento médio diurno $\eta_0 = 0,6$. No período noturno, as fontes quente e fria têm suas temperaturas reduzidas para a metade e para $3/4$ da temperatura média diurna, respectivamente. Se o rendimento noturno é η_1 , qual a variação percentual, $\frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_0} \times 100\%$, do rendimento dessa máquina de Carnot?

- 16,7%
- 25,0%
- 33,3%
- 41,7%
- 50,0%

115. (IME-RJ) Um soldado em pé sobre um lago congelado (sem atrito) atira horizontalmente com uma bazuca. A massa total do soldado e da bazuca é 100 kg e a massa do projétil é 1 kg.

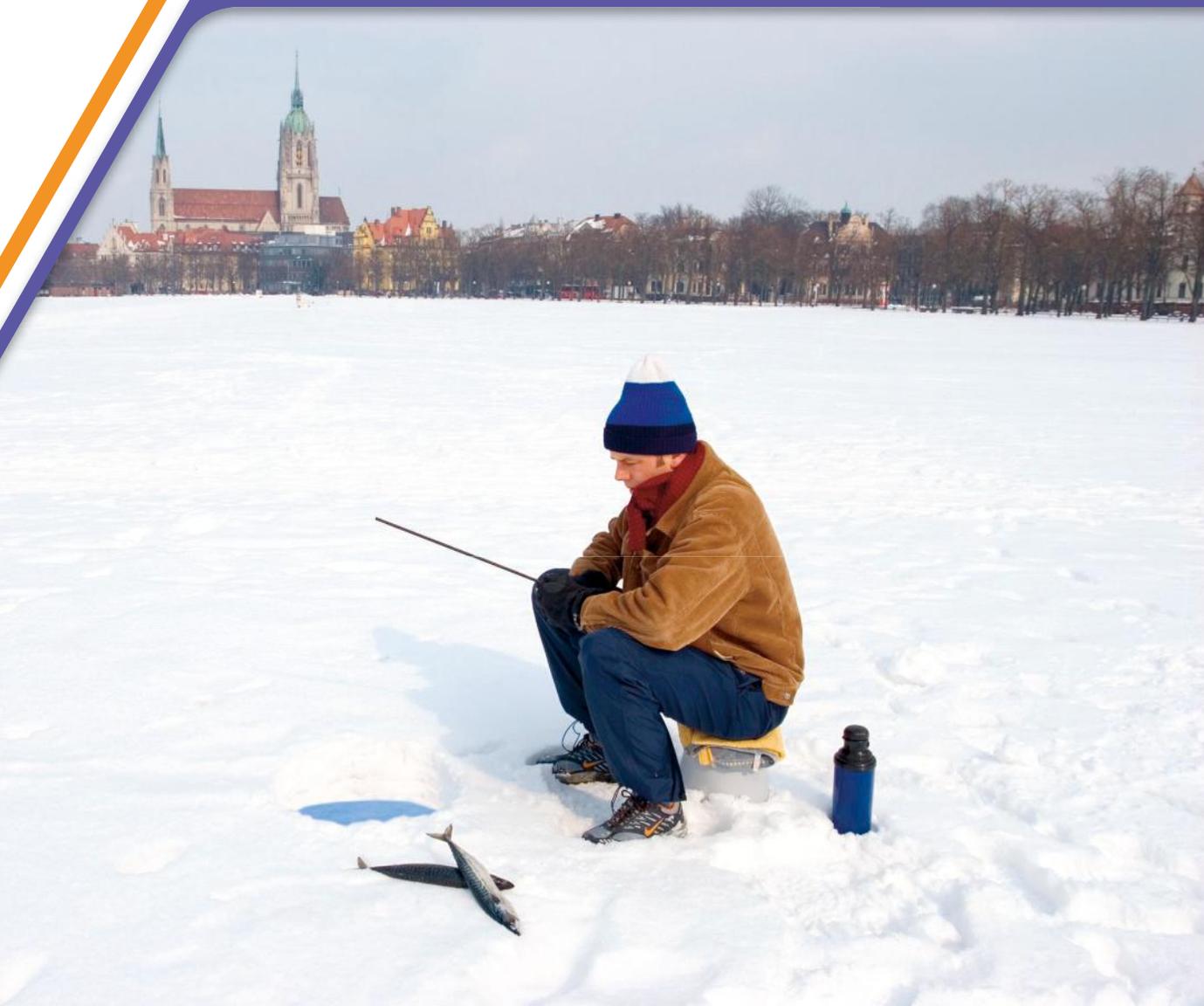
Considerando que a bazuca seja uma máquina térmica com rendimento de 5% e que o calor fornecido a ela no instante do disparo é 100 kJ, a velocidade de recuo do soldado é, em m/s,

- 0,1
- 0,5
- 1,0
- 10,0
- 100,0

116. (ITA-SP) Duas salas idênticas estão separadas por uma divisória de espessura $L = 5,0 \text{ cm}$, área $A = 100 \text{ m}^2$ e condutividade térmica $k = 2,0 \text{ W/m K}$. O ar contido em cada sala encontra-se, inicialmente, às temperaturas $T_1 = 47^\circ \text{C}$ e $T_2 = 27^\circ \text{C}$, respectivamente. Considerando o ar como um gás ideal e o conjunto das duas salas um sistema isolado, calcule:

- o fluxo de calor através da divisória relativo às temperaturas iniciais T_1 e T_2 .
- a taxa de variação de entropia, $\frac{\Delta S}{\Delta T}$, no sistema no início da troca de calor, explicando o que ocorre com a desordem do sistema.

Dilatação térmica dos sólidos e dos líquidos



AlamyFotoarena

// Pescador em um lago congelado. A água na superfície do lago se solidificou, mas a água abaixo da crosta de gelo continua no estado líquido em temperatura maior que 0°C .

Neste tópico vamos fazer um estudo da dilatação dos sólidos e dos líquidos. Vamos estudar as variações das dimensões físicas (comprimento, área, volume e densidade) desses sólidos e líquidos quando eles recebem ou perdem energia térmica. Analisaremos exemplos de situações em que ocorrem dilatações que fazem parte do nosso dia a dia.

Estudaremos também a dilatação anômala da água que, devido ao aumento de volume na solidificação, possibilita que a vida animal e vegetal sejam preservadas no fundo dos lagos e rios congelados. Abaixo da crosta de gelo que se forma na superfície, a água permanece no estado líquido a uma temperatura maior do que 0°C , mesmo que a temperatura externa seja -10°C ou -40°C .

1. Introdução

No seu dia a dia, você pode observar que:

- entre trilhos consecutivos de uma estrada de ferro existe um espaçamento;
- nas pontes e nos viadutos, de construção não muito antiga, há fendas de dilatação para possibilitar a expansão da estrutura, evitando assim o aparecimento de trincas;



// Espaço entre trilhos em uma estrada de ferro.



// Fendas na estrutura de um viaduto.

- quando se mede a temperatura de uma pessoa, o nível do álcool do termômetro varia;
- nas quadras de esportes que ficam ao ar livre, recebendo radiação solar, o piso é feito em blocos quadrados separados por um material elástico, que possibilita a dilatação do concreto, para que não ocorram trincas.



// Termômetro mostrando nível de álcool.



// Piso de uma quadra com o espaço para dilatação.

Situações como essas são explicadas pela **dilatação térmica**.

No Tópico 1, a temperatura foi relacionada com o estado de agitação das partículas de um corpo. Um estado de agitação maior indica uma temperatura maior. Assim, ao aquecermos um corpo, aumentamos a agitação de suas partículas e, conseqüentemente, sua temperatura.

De modo geral, o aumento na temperatura de um corpo provoca um aumento nas suas dimensões, fenômeno denominado **dilatação térmica**. Uma diminuição de temperatura produz, em geral, uma diminuição nas dimensões do corpo, uma **contração térmica**.

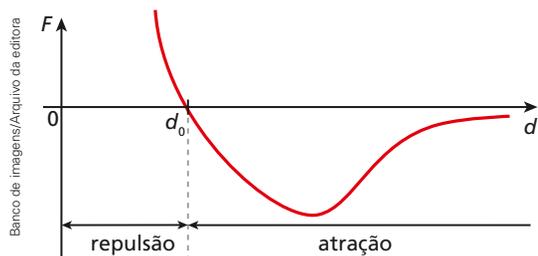
Nos sólidos, observamos que o aumento ou a diminuição da temperatura provoca variações em suas dimensões lineares, bem como nas dimensões superficiais e volumétricas. No estudo da dilatação térmica dos sólidos, faremos uma separação em três partes: dilatação linear, dilatação superficial e dilatação volumétrica.

Para os líquidos, estudaremos apenas a dilatação volumétrica.

2. Forças intermoleculares explicando a dilatação térmica

Quando um corpo é aquecido, suas moléculas passam a apresentar um movimento de agitação mais vigoroso. Nesse movimento, as moléculas conseguem afastar-se mais, mas também conseguem aproximar-se mais.

Será, então, que esse maior afastamento e essa maior aproximação não se compensam, de modo a não alterar as dimensões do corpo? Não! Para entender isso, recordemos como a intensidade das forças intermoleculares varia em função da distância entre as moléculas.



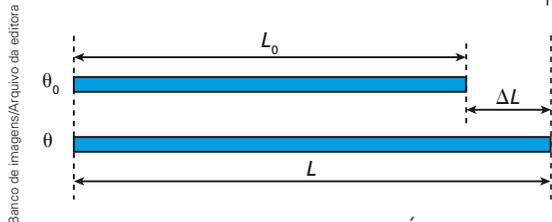
É bom lembrar que d_0 é a distância que separa as moléculas na posição de equilíbrio.

Observemos, no gráfico ao lado, que o módulo da força de repulsão, na aproximação, cresce mais depressa que o módulo da força de atração no afastamento. Conseqüentemente, a aproximação é mais dificultada que o afastamento. A ausência de simetria no gráfico mostra que ocorre um aumento da distância média entre as moléculas e a conseqüente dilatação térmica.

3. Dilatação linear dos sólidos

Para o estudo da dilatação linear dos sólidos, consideremos um fio metálico com comprimento L_0 quando a uma temperatura θ_0 . Aquecendo esse fio até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), observamos que seu comprimento passa a ser L ($L > L_0$).

É fácil compreender que, sendo o fio homogêneo, cada unidade de seu comprimento deve sofrer a mesma dilatação por unidade de variação de temperatura. Em outras palavras, todos os “centímetros” do fio devem sofrer os mesmos aumentos de comprimento, quando aquecidos igualmente.



Do exposto, podemos concluir que a variação total de comprimento ΔL sofrida pelo fio é diretamente proporcional ao seu comprimento inicial L_0 . Se um fio de 10 metros, ao ser aquecido, aumenta 1 centímetro em seu comprimento, outro de mesmo material, com 20 metros, deve aumentar 2 centímetros ao sofrer a mesma variação de temperatura do primeiro.

É evidente, também, que as partículas se afastam de acordo com a variação de temperatura, isto é, para um maior aquecimento, obtém-se uma maior dilatação. Assim, ΔL é também diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta\theta$ sofrida pelo sólido (aproximadamente).

Vale, portanto, a relação:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

em que α é a “constante” de proporcionalidade, denominada **coeficiente de dilatação linear**. O valor de α é uma característica do material e, na prática, não é rigorosamente constante, dependendo da pressão, de eventuais tratamentos térmicos e mecânicos e, principalmente, da temperatura. Entretanto, costuma-se usar o valor médio de α entre as temperaturas inicial e final consideradas.

A unidade de α é o inverso da unidade de temperatura, como $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $^{\circ}\text{F}^{-1}$ e K^{-1} , por exemplo. Tal conclusão é tirada da relação obtida anteriormente:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta\theta}$$

Basta, agora, simplificar as unidades de comprimento relativas a ΔL e a L_0 para obter a unidade de α .

É importante observar que o coeficiente de dilatação linear médio é uma característica da substância e indica sua dilatação média por unidade de comprimento, quando sofre a variação de uma unidade na temperatura.

Lembrando que $\Delta L = L - L_0$, podemos obter a expressão de L em função de $\Delta\theta$:

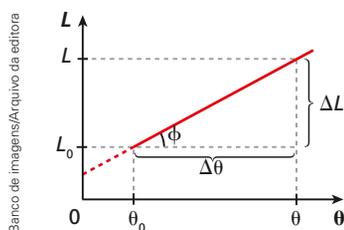
$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L - L_0 = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L = L_0 + L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta\theta)$$

A representação gráfica do comprimento L em função da temperatura θ está feita abaixo.



$$\text{tg } \phi = \frac{\Delta L}{\Delta\theta} = L_0 \alpha$$

Observemos que o gráfico é um segmento de reta oblíquo (função do 1º grau) que não passa pela origem, já que L_0 é diferente de zero.

O ângulo ϕ de inclinação do gráfico está diretamente relacionado ao produto $L_0 \alpha$, sendo que ϕ será tanto maior quanto maior for o produto $L_0 \alpha$. Logo, quanto maior a inclinação da reta, mais susceptível o material será às dilatações em função da temperatura. Uma reta com baixo valor de inclinação, indica um material que sofrerá pouco efeito em suas dimensões em função de grandes variações de temperatura. De fato, como $\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$, para um mesmo $\Delta\theta$, ΔL será tanto maior quanto maior for $L_0 \alpha$. Conseqüentemente, também será maior o ângulo ϕ .

A tabela a seguir fornece os coeficientes de dilatação linear (α) de alguns sólidos:

Substância	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Zinco	$32 \cdot 10^{-6}$
Alumínio	$22 \cdot 10^{-6}$
Latão	$18 \cdot 10^{-6}$
Prata	$19 \cdot 10^{-6}$
Bronze	$18 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$16 \cdot 10^{-6}$
Ouro	$14 \cdot 10^{-6}$
Ferro	$12 \cdot 10^{-6}$
Concreto	$13 \cdot 10^{-6}$
Platina	$9 \cdot 10^{-6}$
Vidro comum	$9 \cdot 10^{-6}$
Vidro pirex	$4 \cdot 10^{-6}$
Porcelana	$4 \cdot 10^{-6}$
Invar*	$1 \cdot 10^{-6}$

Fonte: <www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html>. Acesso em: 19 jun. 2018.

* Liga de níquel e ferro. *Invar* é redução do francês *invariable* (invariável), por causa de seu baixo coeficiente de dilatação térmica.

- Um material é considerado **isótropo** em relação à dilatação térmica quando seu coeficiente de dilatação linear é o mesmo em qualquer direção. O vidro, por exemplo, é isótropo. Assim, se um cubo de vidro for aquecido de modo que em todos os seus pontos ocorra a mesma variação de temperatura, ele se dilatará mantendo sua forma cúbica.
- Quando o coeficiente de dilatação linear (α) de um material for diferente em diversas direções, esse material será considerado **anisótropo** em relação à dilatação térmica.
- Salvo declaração em contrário, admitiremos todos os materiais isótropos na dilatação.

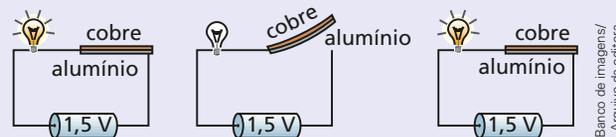
Lâminas bimetálicas

Você já deve ter visto uma árvore de Natal enfeitada com muitas lâmpadas pisca-pisca. Também já deve ter notado que de tempos em tempos a geladeira se desliga automaticamente, voltando a funcionar após alguns minutos.

Nessas duas situações, é uma lâmina bimetálica que liga e desliga os circuitos elétricos.

A lâmina bimetálica é constituída de duas lâminas de materiais diferentes, “coladas” uma à outra, que inicialmente possuem comprimentos iguais. Quando a corrente elétrica passa pela lâmina bimetálica, ela se aquece, o que provoca dilatações diferentes nos metais. Por exemplo, se usássemos alumínio ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) em uma das faces e cobre ($\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) na outra, teríamos uma dilatação maior para o alumínio. A lâmina iria se encurvar, e o alumínio ficaria na face convexa. Isso seria suficiente para interromper a corrente elétrica, apagando as lâmpadas ou desligando a geladeira.

Após algum tempo, a lâmina esfria, diminuindo de tamanho devido à contração térmica. O metal que se dilata mais ao ser aquecido é aquele que se contrai mais ao ser esfriado. Ao voltar ao comprimento inicial, a lâmina fecha o circuito, que volta a ser percorrido por corrente elétrica, até que um novo aquecimento provoque curvatura na lâmina.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

Faça você mesmo



Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do seu professor.

O uso de lâminas bimetálicas

Como vimos, são as lâminas bimetálicas que explicam o funcionamento das lâmpadas pisca-pisca e do termostato da geladeira, que liga e desliga esse aparelho. Existe uma atividade experimental bastante simples e fácil de ser realizada que mostra como esse dispositivo funciona.

Material necessário

- 1 folha que tenha uma face de alumínio e a outra de papel. Folhas como essa podem ser encontradas em algumas embalagens de bombons;
- 1 vela;
- 1 prendedor de roupas.

Procedimento

- I. Recorte uma tira retangular de aproximadamente $12 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$ e alise-a de modo que ela fique plana.
- II. Segure uma das extremidades da tira com um prendedor de roupas. Mantendo-a na horizontal, com a face de alumínio voltada para baixo, aproxime-a da chama da vela com muito cuidado. Não deixe a tira muito perto da chama, pois a face do papel poderá queimar.



Cristina Xavier/Arquivo da editora

Desenvolvimento

1. A tira se curva para cima ou para baixo?
2. Por que essa tira se curva? Isso ocorre se aquecermos uma tira de embalagem 100% alumínio?
3. Para um mesmo aquecimento, quem dilata mais: o papel ou o alumínio?

4. Se deixarmos a face do alumínio voltada para cima, corremos o risco de queimar o papel em contato com a chama da vela. No entanto, até que isso ocorra, a tira irá se curvar para cima ou para baixo?

5. Deixando a tira inicial esfriar, ela perde a curvatura? Por que isso ocorre?
6. Pesquise e descubra outras situações em que a lâmina bimetálica contribui para o funcionamento de um dispositivo de Física aplicada.

Exercícios Nível 1

1. Griselda, uma dona de casa, resolveu fazer uma salada para o jantar com seu marido. Ao tentar abrir o vidro de palmito, que tem tampa metálica, não conseguiu. Porém, lembrando-se de suas aulas de Física do Ensino Médio, mergulhou a tampa da embalagem em água quente durante alguns segundos. Ao tentar novamente abrir a tampa observou que a mesma se soltou facilmente. Isso provavelmente ocorreu porque:

- reduziu-se a força de coesão entre as moléculas do metal e do vidro.
- reduziu-se a pressão do ar no interior do recipiente.
- houve redução da tensão superficial existente entre o vidro e o metal.
- o coeficiente de dilatação do metal é maior que o do vidro.
- o coeficiente de dilatação do vidro é maior que o do metal.

2. Uma barra de cobre, homogênea e uniforme, **ER** mede 20 m, a 0°C . Calcule a variação do comprimento dessa barra, em milímetros, quando aquecida a 50°C .

Dado: coeficiente de dilatação linear do cobre = $= 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução:

Usando a **equação da dilatação linear**, temos:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$$

Substituindo os valores fornecidos, vem:

$$\Delta L = 20 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot (50 - 0)$$

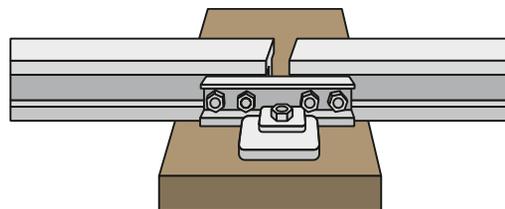
$$\Delta L = 0,016 \text{ m} = 16 \text{ mm}$$

3. Uma régua de alumínio tem comprimento de 200,0 cm a 20°C . Qual o valor, em centímetros, do seu comprimento a 60°C ?

Dado: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $= 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

4. A primeira ferrovia a funcionar no Brasil foi inaugurada em abril de 1854, ligando o Porto de Mauá a Fragoso, no Rio de Janeiro, com 14,5 km de extensão, construída pelo Visconde de Mauá.

Um dos cuidados que se deve ter na colocação dos trilhos em uma ferrovia é deixar uma pequena distância entre dois deles para possibilitar a dilatação térmica que pode ocorrer com a variação de temperatura.



Banco de imagens/
Arquivo da editora

Normalmente os trilhos utilizados possuem 20 m de comprimento. Em sua fixação sobre dormentes, uma distância de 5 mm é deixada entre as peças consecutivas, são as juntas de dilatação que evitam que os trilhos se espremam em dias muito quentes. Considerando um local em que a temperatura varia aproximadamente 25°C entre a mínima no período da noite e a máxima durante o dia, determine o valor do coeficiente de dilatação linear do material dos trilhos, supondo que o espaço deixado é exatamente o necessário.

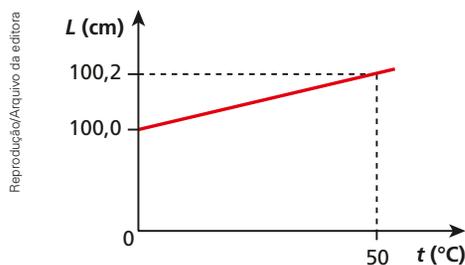
5. Uma barra metálica, inicialmente à temperatura de 20°C , é aquecida até 260°C e sofre uma dilatação igual a 0,6% de seu comprimento inicial. Qual o coeficiente de dilatação linear médio do metal nesse intervalo de temperatura?

6. Um fio de cobre, com 1,000 m de comprimento a 20°C , foi colocado em um forno, dilatando-se até atingir 1 012 mm. Qual é a temperatura do forno, suposta constante?

Dado: coeficiente de dilatação linear do cobre = $= 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

7. (FEI-SP) Um dispositivo que aciona a refrigeração do ambiente é composto de uma barra metálica de 5,0 cm engastada em uma extremidade, e a outra extremidade está a 0,5 mm do contato quando a temperatura é 20 °C. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação linear da barra é $\alpha = 1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e desprezando-se a dilatação do contato, em qual temperatura o dispositivo irá acionar o sistema?
- 22,5 °C
 - 25,0 °C
 - 25,5 °C
 - 27,5 °C
 - 30,0 °C

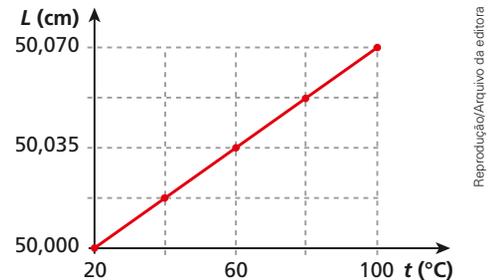
8. (PUCC-SP) A figura abaixo representa o comprimento de uma barra metálica em função de sua temperatura.



A análise dos dados permite concluir que o coeficiente de dilatação linear do metal constituinte da barra é, em $^\circ\text{C}^{-1}$,

- $4 \cdot 10^{-5}$
- $2 \cdot 10^{-5}$
- $4 \cdot 10^{-6}$
- $2 \cdot 10^{-6}$
- $1 \cdot 10^{-6}$

9. (Unilasalle-RS) Em uma experiência para medir o coeficiente de dilatação linear médio de um pedaço de metal desconhecido, obteve-se o seguinte gráfico do comprimento em função da temperatura:



Abaixo segue uma tabela com os coeficientes de dilatação linear média, α , para alguns metais:

Metal	$\alpha \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
Aço	$11 \cdot 10^{-6}$
Ouro	$14,3 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$17,0 \cdot 10^{-6}$
Alumínio	$23,0 \cdot 10^{-6}$
Chumbo	$29,0 \cdot 10^{-6}$

Calculando-se o coeficiente de dilatação linear α partir dos dados experimentais (gráfico), inferimos que o metal em questão se trata provavelmente do:

- chumbo;
- alumínio;
- cobre;
- ouro;
- aço.

Exercícios Nível 2

10. (OBF) É muito comum acontecer, quando copos iguais são empilhados, colocando-se um dentro do outro, de dois deles ficarem emperrados, tornando-se difícil separá-los. Considerando o efeito da dilatação térmica, pode-se afirmar que é possível retirar um copo de dentro do outro se:
- os copos emperrados forem mergulhados em água bem quente.
 - no copo interno for despejada água quente e o copo externo for mergulhado em água bem fria.
 - os copos emperrados forem mergulhados em água bem fria.
 - no copo interno for despejada água fria e o copo externo for mergulhado em água bem quente.

- e) não é possível separar os dois copos emperrados considerando o efeito da dilatação térmica.

11. Uma trena de alumínio foi graduada corretamente a uma temperatura de 30 °C, quando seu comprimento total apresentou 50,000 m. Essa trena possui graduação até o milímetro. Qual a máxima distância que a trena é capaz de medir, num local onde a temperatura ambiente é $-20 \text{ }^\circ\text{C}$?

Dado: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução:

Chamemos de u_0 a unidade em metros na temperatura a que a trena foi graduada e de u a unidade, também em metros, a uma temperatura qualquer.

Observemos que, se elevarmos a temperatura da trena, ela se dilatará e $u > u_0$; porém, se diminuirmos a temperatura, a trena se contrairá e $u < u_0$.

Usando a expressão da dilatação linear:

$$u = u_0(1 + \alpha\Delta\theta)$$

e sendo u_0 a unidade correta (seu valor é 1,000 m), temos:

$$u = 1,000 \cdot [1 + 24 \cdot 10^{-6} \cdot (-50)]$$

$$u = 1,000 \cdot [1 - 0,0012]$$

$$u = 0,9988 \text{ m}$$

À temperatura de -20°C , devido à contração do alumínio, a distância entre duas marcas, que a 30°C era 1,000 m, passa a ser 0,9988 m. Como a trena possui 50 intervalos de metro, podemos afirmar que a máxima distância possível de ser medida com essa trena, a -20°C , é:

$$Z = 50u = 50 \cdot 0,9988 \Rightarrow \boxed{Z = 49,94}$$

12. Uma trena de aço foi graduada corretamente, com precisão, a 0°C , possuindo comprimento total de 20,000 m. Em um dia muito quente, sob Sol intenso, ela se aquece a 40°C , sendo utilizada para fazer medidas.

Coefficiente de dilatação linear do aço = $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Determinar:

- a) a dilatação sofrida pela trena no referido aquecimento;
b) o erro percentual cometido em sua utilização a 40°C .
13. Sabendo que o coeficiente de dilatação linear médio do concreto é $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, estime a variação anual da altura de um prédio de 10 andares em uma cidade do litoral de São Paulo, uma região temperada, devido à variação de temperatura entre o inverno e o verão.
14. (FGV-SP) As linhas de metrô são construídas tanto sob o solo quanto sobre este. Pensando nas variações de temperatura máxima no verão e mínima no inverno, ambas na parte de cima do solo, os projetistas devem deixar folgas de dilatação

entre os trilhos, feitos de aço de coeficiente de dilatação linear $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Em determinada cidade britânica, a temperatura máxima costuma ser de 104°F e a mínima de 24°F . Se cada trilho mede 50,0 m nos dias mais frios, quando é feita sua instalação, a folga mínima que se deve deixar entre dois trilhos consecutivos, para que eles não se sobreponham nos dias mais quentes, deve ser, em centímetros, de

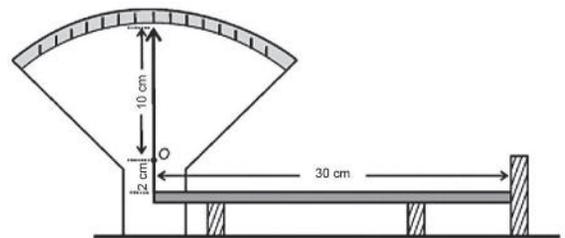
- a) 1,5. c) 3,0. e) 6,0.
b) 2,0. d) 4,5.

15. (UPM-SP) A 20°C , o comprimento de uma haste **A** é 99% do comprimento de outra haste **B**, à mesma temperatura. Os materiais das hastes **A** e **B** têm alto ponto de fusão e coeficientes de dilatação linear respectivamente iguais a $\alpha_A = 10 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $\alpha_B = 9,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

A temperatura em que as hastes terão o mesmo comprimento será:

- a) 970°C c) 1270°C e) 1830°C
b) 1120°C d) 1770°C

16. (Fuvest-SP)



Reprodução/Fuvest, 2012

Para ilustrar a dilatação dos corpos, um grupo de estudantes apresenta, em uma feira de ciências, o instrumento esquematizado na figura acima. Nessa montagem, uma barra de alumínio com 30 cm de comprimento está apoiada sobre dois suportes, tendo uma extremidade presa ao ponto inferior do ponteiro indicador e a outra encostada num anteparo fixo. O ponteiro pode girar livremente em torno do ponto O, sendo que o comprimento de sua parte superior é 10 cm e, o da inferior, 2 cm. Se a barra de alumínio, inicialmente à temperatura de 25°C , for aquecida a 225°C , o deslocamento da extremidade superior do ponteiro será, aproximadamente, de

- a) 1 mm c) 6 mm e) 30 mm
b) 3 mm d) 12 mm

Note e adote: coeficiente de dilatação linear da barra: $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

22. Duas barras **A** e **B**, de coeficientes de dilatação linear α_A e α_B e comprimentos L_A e L_B , são emendadas de modo que constituam uma única barra de comprimento $(L_A + L_B)$. Qual é o coeficiente de dilatação linear dessa nova barra?

Resolução:

O coeficiente de dilatação linear de uma barra é dado pela expressão:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta \theta}$$

Em um aquecimento $\Delta \theta$ qualquer, temos:

$$\Delta L_A = L_A \alpha_A \Delta \theta$$

$$\Delta L_B = L_B \alpha_B \Delta \theta$$

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$$

Portanto:

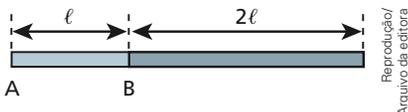
$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta \theta} = \frac{\Delta L_A + \Delta L_B}{(L_A + L_B) \Delta \theta}$$

$$\alpha = \frac{L_A \alpha_A \Delta \theta + L_B \alpha_B \Delta \theta}{(L_A + L_B) \Delta \theta}$$

$$\alpha = \frac{L_A \alpha_A + L_B \alpha_B}{L_A + L_B}$$

Observemos que o coeficiente de dilatação linear dessa nova barra é a média ponderada dos coeficientes de dilatação linear das barras **A** e **B**, sendo os “pesos” os respectivos comprimentos iniciais.

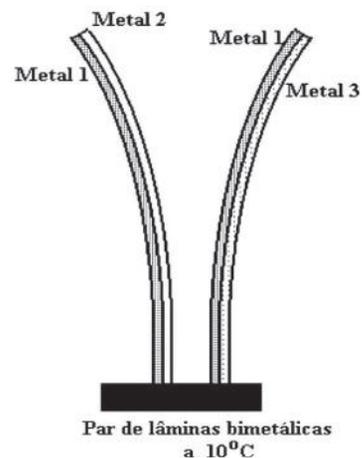
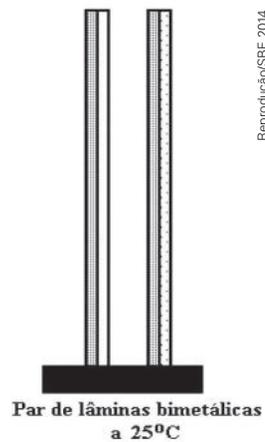
23. (UEL-PR) A barra da figura é composta de dois segmentos: um de comprimento ℓ , e coeficiente de dilatação linear α_A e outro de comprimento 2ℓ e coeficiente de dilatação linear α_B . Pode-se afirmar que o coeficiente de dilatação linear dessa barra, α , é



- a) $\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}$
- b) $\frac{2\alpha_A + \alpha_B}{3}$
- c) $\frac{\alpha_A + 2\alpha_B}{3}$
- d) $\alpha_A + 2\alpha_B$
- e) $3(\alpha_A + \alpha_B)$

24. Três bastões de mesmo comprimento, um de alumínio ($\alpha_{Al} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), outro de latão ($\alpha_{latão} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e o terceiro de cobre ($\alpha_{Cu} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), são emendados de modo que constituam um único bastão de comprimento 3. Determine o coeficiente de dilatação linear do bastão resultante.

25. (SBF) Um par de lâminas bimetálicas se apresenta sem deformação a 25°C conforme a figura. Uma das partes de cada par é constituída pelo mesmo metal (metal 1), sendo a segunda parte de cada lâmina bimetálica constituída por metais diversos (metal 2 e metal 3). Ao baixar a temperatura para 10°C as duas lâminas se deformam em acordo com o que está representando na figura.

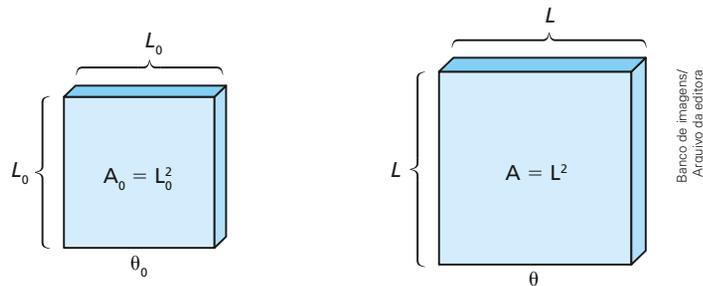


Sendo α_1 , α_2 e α_3 respectivamente os coeficientes de dilatação linear do metal 1, do metal 2 e do metal 3, a relação entre estes coeficientes é:

- a) $\alpha_1 < \alpha_2$ e $\alpha_2 > \alpha_3$
- b) $\alpha_1 > \alpha_3$ e $\alpha_3 < \alpha_2$
- c) $\alpha_2 < \alpha_1$ e $\alpha_1 < \alpha_3$
- d) $\alpha_2 > \alpha_1$ e $\alpha_1 > \alpha_3$

4. Dilatação superficial dos sólidos

Para facilitar o estudo da dilatação superficial dos sólidos, vamos considerar uma placa metálica de forma quadrada, com lado L_0 , a uma temperatura θ_0 e de material cujo coeficiente de dilatação linear vale α .



Aquecendo-se a placa até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), o aumento de suas dimensões lineares produz um aumento na área de sua superfície, que, no entanto, permanece quadrada.

No início, a área da placa é dada por:

$$A_0 = L_0^2 \quad (I)$$

Após o aquecimento, tornou-se:

$$A = L^2 \quad (II)$$

Mas podemos relacionar L e L_0 por:

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta\theta)$$

Elevando-se ao quadrado ambos os membros da equação, temos:

$$L^2 = L_0^2(1 + \alpha\Delta\theta)^2 \quad (III)$$

Substituindo (I) e (II) em (III), temos:

$$A = A_0(1 + \alpha\Delta\theta)^2$$

que, desenvolvendo, fica na forma:

$$A = A_0(1 + 2\alpha\Delta\theta + \alpha^2\Delta\theta^2)$$

Como a ordem de grandeza de α é 10^{-5} , ao ser elevado ao quadrado teremos 10^{-10} , que é desprezível se comparado com 10^{-5} , pois é cem mil vezes menor que 10^{-5} . É bom lembrar que $\Delta\theta$ em geral não ultrapassa a ordem de 10^3 °C, com o corpo ainda no estado sólido. Portanto, o termo $\alpha^2\Delta\theta^2$ é desprezível em comparação com $2\alpha\Delta\theta$.

Assim, a equação da dilatação superficial assume a forma aproximada:

$$A = A_0(1 + 2\alpha\Delta\theta)$$

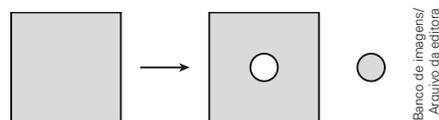
Fazendo-se $2\alpha = \beta$, que chamaremos de **coeficiente de dilatação superficial** do material, segue que:

$$A = A_0(1 + \beta\Delta\theta) \quad \text{ou} \quad \Delta A = A_0\beta\Delta\theta$$

Essa equação pode ser usada para a dilatação superficial, mesmo que a superfície em questão não seja quadrada, podendo ser retangular, circular ou de qualquer outra forma.

Como se comportam os buracos em uma dilatação?

Imagine uma placa metálica, quadrada, de zinco, por exemplo, material usado para a confecção de calhas de uma residência. Com uma tesoura adequada vamos cortar uma parte, no meio dessa placa.



Vamos agora colocar as duas partes no interior de um forno preaquecido. Depois de alguns minutos, usando luvas térmicas apropriadas, tentaremos encaixar no orifício a parte que foi retirada. O que será que vai acontecer? É claro que a parte que foi retirada encaixará certinho no orifício da placa. Isso ocorre porque, na placa, o aquecimento provocará uma dilatação “para fora”, isto é, tudo se passa como se o buraco estivesse preenchido do material da placa. Assim, o pedaço retirado irá se dilatar e o buraco também e, a qualquer temperatura que se aqueça o conjunto, placa e pedaço retirado, o encaixe ocorrerá.

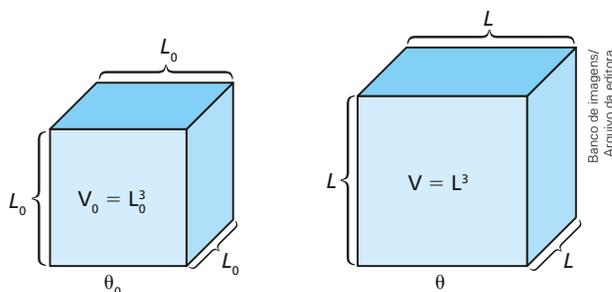
Do exposto, podemos concluir que, no aquecimento, os orifícios encontrados em placas ou blocos aumentarão de tamanho e, no resfriamento, diminuirão de tamanho. Tudo acontecendo como se a placa ou o bloco tivessem os buracos preenchidos do mesmo material existente ao seu redor.

Nos cálculos para se determinar comprimentos, larguras, áreas ou volumes de buracos, usaremos as equações da dilatação e iremos considerar o coeficiente de dilatação do material do corpo que forma o buraco.

5. Dilatação volumétrica dos sólidos

Também aqui, para facilitar o entendimento, consideraremos um sólido de forma particular: um cubo. Depois, generalizaremos para as demais formas dos sólidos.

Assim, vamos considerar um cubo metálico de aresta L_0 , à temperatura θ_0 e feito de um material de coeficiente de dilatação linear igual a α .



Aquecendo-se esse cubo até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), o aumento das suas dimensões lineares provoca, também, um aumento no seu volume. No entanto, o sólido continua com forma cúbica.

No início, o volume do cubo é dado por:

$$V_0 = L_0^3 \quad (\text{I})$$

Após o aquecimento, passa a ser V , tal que:

$$V = L^3 \quad (\text{II})$$

Elevando os dois membros da equação da dilatação linear ao cubo, temos:

$$L^3 = L_0^3(1 + \alpha\Delta\theta)^3 \quad (\text{III})$$

Substituindo (I) e (II) em (III), vem:

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta\theta)^3$$

Desenvolvendo o binômio, temos:

$$V = V_0[1^3 + 3 \cdot 1^2 \cdot \alpha\Delta\theta + 3 \cdot 1 \cdot \alpha^2\Delta\theta^2 + \alpha^3\Delta\theta^3]$$

Pelo exposto no item anterior, $3\alpha^2\Delta\theta^2$ e $\alpha^3\Delta\theta^3$ são desprezíveis em comparação com $3\alpha\Delta\theta$. Assim, a relação passa a ter a forma aproximada:

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta\theta)$$

Fazendo-se $3\alpha = \gamma$, que chamaremos de **coeficiente de dilatação volumétrica** ou **cúbica** do material, obtemos as expressões:

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta\theta) \text{ ou } \Delta V = V_0\gamma\Delta\theta$$

A relação entre os coeficientes de dilatação é dada por:

$$\frac{\alpha}{1} = \frac{\beta}{2} = \frac{\gamma}{3}$$

Da mesma forma que na dilatação superficial, a equação da dilatação volumétrica é válida para todos os sólidos, quaisquer que sejam suas formas.

Se o sólido em questão possuir uma cavidade, com o aquecimento, ela se dilatará, como se estivesse preenchida pela substância de que é constituído o sólido. Portanto, o volume interno de um frasco de vidro irá variar, no aquecimento ou no resfriamento, como se fosse um bloco maciço de vidro. O mesmo ocorre com uma placa que tenha um orifício, que se dilatará ou se contrairá junto da placa, no aquecimento e no resfriamento, como se estivesse preenchido do mesmo material da placa.

Ampliando o olhar

Experimento de Gravezande

Para observarmos a dilatação volumétrica de um corpo, podemos repetir o clássico experimento de Gravezande. Para isso, utilizamos uma esfera metálica maciça, presa na extremidade de uma corrente, um anel metálico de diâmetro um pouco maior que o da esfera e um bico de Bunsen.

Aquecemos a esfera e, em seguida, tentamos fazê-la atravessar o anel. Vamos observar que, devido à dilatação térmica, isso será impossível, pois o diâmetro da esfera ficou maior que o diâmetro interno do anel.

Fotografias: Thales Trigo/Arquivo da editora



// Antes de ser aquecida, a esfera passa folgadoamente pelo anel, já que seu diâmetro é menor que o diâmetro interno do anel.



// Com o aquecimento, a esfera dilata-se e seu diâmetro aumenta, o que a impede de passar pelo anel.

A dilatação térmica em nossa vida

Você já deve ter observado no seu dia a dia algumas situações que envolvem a dilatação térmica. Por exemplo, se uma porção de chá muito quente é colocada no interior de um copo de vidro comum, ele pode trincar. Isso ocorre porque a parte interna do copo é aquecida e se dilata. Como o vidro é péssimo condutor de calor, a face externa do copo demora para ser aquecida. É essa diferença de dilatação entre as partes interna e externa que provoca o trincamento do vidro.

Nas calçadas de cimento, um pedreiro sempre deve dividir o espaço usando ripas de madeira, pois, se a superfície for grande, com o tempo irá apresentar rachaduras, devido à dilatação do concreto. Nas quadras esportivas com piso de cimento também há juntas de dilatação. É comum lajes de concreto apresentarem infiltrações. Isso ocorre porque a laje sofre dilatação quando a temperatura aumenta e contração quando a temperatura diminui. Podem surgir fissuras na laje, por onde a água entra quando chove.

Nas pontes e nos viadutos, devem ser previstas fendas de dilatação para que a estrutura possa dilatar-se quando a temperatura aumenta.

Nem todas as pessoas sabem que líquidos muito gelados e comida muito quente podem provocar sérios danos aos dentes. Como os materiais usados nas obturações e os dentes possuem coeficientes de dilatação diferentes, nas variações de temperatura a dilatação ocorre de forma diversa. Se o material da obturação dilatar mais, poderá ocorrer quebra do dente, se dilatar menos irá se afastar do dente, provocando infiltrações e, conseqüentemente, cáries.

Nas ferrovias, é deixado um pequeno espaço entre dois trilhos consecutivos para permitir sua expansão térmica. Na fotografia ao lado, você pode observar que um grande aumento de temperatura distorceu os trilhos, impossibilitando a passagem dos trens.

// Com o aquecimento, os trilhos sofreram uma grande expansão térmica.



// A água em ebulição, quando colocada em um copo de vidro comum, pode provocar o trincamento nas paredes, como observado no copo à direita.

Thales Trigo/Arquivo da editora



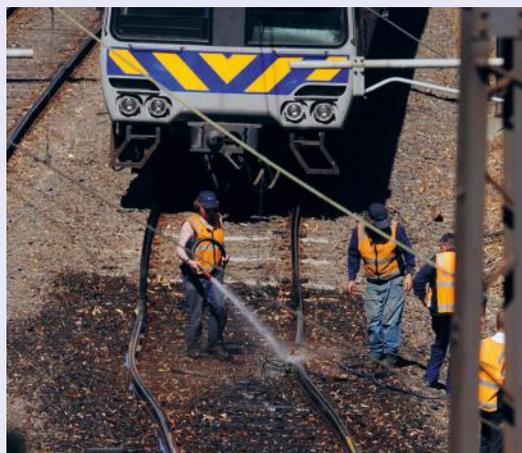
// As divisões de madeira permitem a dilatação das placas de concreto.

Thales Trigo/Arquivo da editora



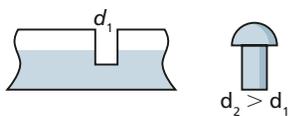
// As obturações metálicas se expandem e se contraem mais do que os dentes. Isso pode provocar fraturas ou infiltrações, quando são ingeridos líquidos muito gelados ou alimentos muito quentes.

CNRI/SPL/Latinstock



Fairfax Media via Getty Images

26. (OBF) A figura ilustra uma peça de metal com um orifício de diâmetro d_1 e um pino de diâmetro d_2 ligeiramente maior que o orifício d_1 , quando à mesma temperatura. Para introduzir o pino no orifício, pode-se:



Reprodução/
Arquivo da editora

- aquecer ambos: o orifício e o pino.
 - resfriar o pino.
 - aquecer o pino e resfriar o orifício.
 - resfriar o orifício.
 - resfriar ambos: o orifício e o pino.
27. Os materiais usados para a obturação de dentes e os dentes possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Assim, do ponto de vista físico, por que pode ser prejudicial aos dentes ingerirmos bebidas muito quentes ou muito geladas?

28. Uma substância tem coeficiente de dilatação superficial A e coeficiente de dilatação volumétrica B . Assim, o coeficiente de dilatação linear é igual a:

- $2A$.
- $\frac{A}{3}$
- $\frac{3AA}{4B}$
- $\frac{B}{2}$
- $\frac{AB}{6}$

29. Uma moeda, fabricada com níquel puro, está **ER** à temperatura ambiente de 20°C . Ao ser levada a um forno, ela sofre um acréscimo de 1% na área de sua superfície. Qual a temperatura do forno?

Dado: coeficiente de dilatação linear do níquel = $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução:

A expressão simplificada da dilatação superficial é:

$$\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta$$

Sendo:

$$\begin{aligned} \Delta A &= 0,01A_0 \\ \beta &= 2\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ \Delta \theta &= \theta - 20 \end{aligned}$$

temos:

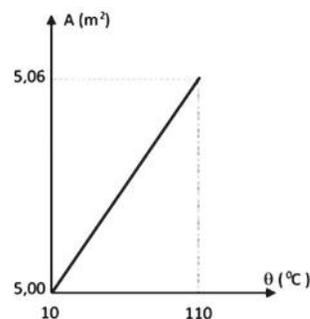
$$0,01A_0 = A_0 25 \cdot 10^{-6} (\theta - 20)$$

$$400 = \theta - 20 \therefore \theta = 420 \text{ }^\circ\text{C}$$

30. À temperatura de 15°C , encontramos uma chapa de cobre com superfície de área $100,0 \text{ cm}^2$. Que área terá essa superfície se a chapa for aquecida até 515°C ?

Dado: coeficiente de dilatação superficial do cobre = $3,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

31. (UPM-SP) O gráfico mostra a variação da área lateral de um cilindro metálico em função da temperatura, quando submetido a uma fonte de calor constante.



Reprodução/Mackenzie, 2016

O coeficiente de dilatação volumétrica média do material que constitui o cilindro é

- $60 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $120 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $240 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $300 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

32. Em uma placa de ouro, há um pequeno orifício, que a 30°C tem superfície de área $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. A que temperatura devemos levar essa placa para que a área do orifício aumente o correspondente a $6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$?

Dado: coeficiente de dilatação linear do ouro = $15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

33. Numa chapa de latão, a 0°C , fez-se um orifício circular de $20,0 \text{ cm}$ de diâmetro. Determine o acréscimo de área que o orifício sofre quando a temperatura da chapa é elevada a 250°C .

Dado: coeficiente de dilatação linear do latão = $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução:

Como o orifício é de forma circular, a 0°C sua área é calculada por:

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi R_0^2 \Rightarrow A_0 = 3,14 \cdot 10,0^2 \\ A_0 &= 314 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Usando a expressão simplificada da dilatação superficial:

$$\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta$$

e sendo:

$$\beta = 2\alpha \Rightarrow \beta = 4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

temos:

$$\Delta A = 314 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 250$$

$$\Delta A = 3,14 \text{ cm}^2$$

34. Uma estatueta de ouro foi aquecida de $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $75 \text{ } ^\circ\text{C}$, observando-se um aumento de $2,1 \text{ cm}^3$ em seu volume. Sendo $14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o coeficiente

de dilatação linear do ouro, qual era o volume inicial dessa estatueta?

35. Uma panela de alumínio possui, a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, uma capacidade de 1000 cm^3 (1 L). Se levamos a panela com água ao fogo, até que ocorra ebulição da água, sob pressão normal, qual será a nova capacidade da panela?

Dados: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; coeficiente de dilatação cúbica da água = $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

36. O coeficiente de dilatação linear do alumínio é $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Um cubo de alumínio com volume de 5 L é aquecido de $40 \text{ } ^\circ\text{F}$ até $76 \text{ } ^\circ\text{F}$. Qual é a variação aproximada do volume do cubo?

Exercícios Nível 2

37. Uma chapa de alumínio possui um furo em sua parte central. Sendo aquecida, observamos que:
- tanto a chapa como o furo tendem a diminuir suas dimensões.
 - o furo permanece com suas dimensões originais e a chapa aumenta.
 - a chapa e o furo permanecem com suas dimensões originais.
 - a chapa aumenta e o furo diminui.
 - tanto a chapa como o furo tendem a aumentar suas dimensões.

38. (Udesc) Uma placa de alumínio com um furo circular no centro foi utilizada para testes de dilatação térmica. Em um dos testes realizados, inseriu-se no furo da placa um cilindro maciço de aço. À temperatura ambiente, o cilindro ficou preso à placa, ajustando-se perfeitamente ao furo, conforme ilustra a figura ao lado.

O valor do coeficiente de dilatação do alumínio é, aproximadamente, duas vezes o valor do coeficiente de dilatação térmica do aço. Aquecendo-se o conjunto a $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ é **correto** afirmar que:

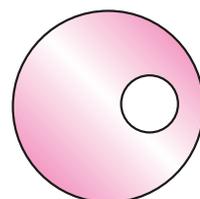
- o cilindro de aço ficará ainda mais fixado à placa de alumínio, pois o diâmetro do furo da placa diminuirá e o diâmetro do cilindro aumentará.



Reprodução/UDESC, 2016

- o cilindro de aço soltar-se-á da placa de alumínio, pois, em decorrência do aumento de temperatura, o diâmetro do furo aumentará mais que o diâmetro do cilindro.
- não ocorrerá nenhuma mudança, pois o conjunto foi submetido à mesma variação de temperatura.
- o cilindro soltar-se-á da placa porque sofrerá uma dilatação linear e, em função da conservação de massa, ocorrerá uma diminuição no diâmetro do cilindro.
- não é possível afirmar o que acontecerá, pois as dimensões iniciais da placa e do cilindro são desconhecidas.

39. Um disco de latão de $50,0 \text{ cm}^2$ de área é perfurado, ficando com um furo circular de $10,0 \text{ cm}^2$ na posição indicada na figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

O coeficiente de dilatação linear do latão é de $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e essas áreas se referem à temperatura ambiente. Se o disco for colocado em um forno e à temperatura elevada de $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, a área do furo:

- diminuirá de $0,12 \text{ cm}^2$.
- aumentará de $0,02 \text{ cm}^2$.
- diminuirá de $0,16 \text{ cm}^2$.
- aumentará de $0,04 \text{ cm}^2$.
- não sofrerá alteração.

40. Uma placa metálica de dimensões $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ tem em seu centro um furo cujo diâmetro é igual a $1,00 \text{ cm}$ quando a placa está à temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de dilatação linear do metal da placa é $20 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Quando a temperatura é de $520 \text{ }^\circ\text{C}$, a área do furo:
- a) aumenta 1%. d) diminui 2%.
 b) diminui 1%. e) não se altera.
 c) aumenta 2%.

41. (UFSE) Uma placa retangular de ferro possui, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, dimensões de $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ e um furo central, circular, de raio $2,5 \text{ cm}$.



Reprodução/Arquivo da editora

Na mesma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, dispõe-se de duas esferas, uma de ferro e outra de zinco, ambas com diâmetro de $5,0 \text{ cm}$. Sabendo que os coeficientes de dilatação linear do ferro e do zinco valem, respectivamente, $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, analise as afirmações que seguem.

- 0 – Aquecendo a placa de ferro a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ela sofre uma dilatação superficial de $0,12 \text{ cm}^2$.
 1 – Aquecendo a placa de ferro a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ o furo sofre uma contração de aproximadamente $0,09 \text{ cm}^2$.
 2 – Aquecendo as esferas a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, seus diâmetros passam a ter uma diferença de $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$.
 3 – Aquecendo a placa e as esferas a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, apenas a esfera de ferro passa pelo furo.
 4 – Resfriando a placa e as esferas a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, as duas esferas passam pelo furo.

42. (UPM-SP) Um cubo regular homogêneo de aresta $20,0 \text{ cm}$ está inicialmente a $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de dilatação linear médio do material com que foi fabricado é $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Aquecendo-se uniformemente o cubo com uma fonte de calor constante durante $50,0 \text{ s}$, a temperatura se eleva para $120,0 \text{ }^\circ\text{C}$. A dilatação ocorrida em uma das superfícies do cubo é
- a) $4,00 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$ d) $16,0 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$
 b) $8,00 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$ e) $20,0 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$
 c) $12,0 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$

43. Ao aquecermos um sólido de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, observamos que seu volume experimenta um aumento correspondente a $0,09\%$ em relação ao volume inicial. Qual é o coeficiente de dilatação linear do material de que é feito o sólido?

Resolução:

O volume inicial V_0 corresponde a 100% e a variação de volume ΔV , a $0,09\%$. Assim, podemos escrever a relação:

$$\Delta V = \frac{0,09V_0}{100}$$

Como: $\Delta V = V_0\gamma\Delta\theta$

então: $\frac{0,09V_0}{100} = V_0\gamma\Delta\theta$

Mas $\gamma = 3\alpha$.

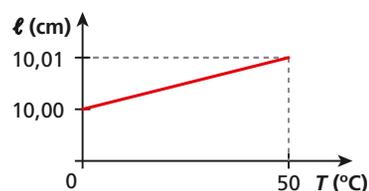
Portanto:

$$\frac{0,09}{100} = 3\alpha(80 - 20)$$

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

44. (UFJF-MG) O gráfico mostra a variação do comprimento ℓ da aresta de um cubo em função da temperatura T . Quando a temperatura varia de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, o volume do cubo deve variar de:

- a) $3,0 \text{ cm}^3$
 b) $2,0 \text{ cm}^3$
 c) $5,0 \text{ cm}^3$
 d) $6,0 \text{ cm}^3$
 e) $1,0 \text{ cm}^3$



Reprodução/Arquivo da editora

45. Uma barra de estanho tem a forma de um prisma reto de $4,0 \text{ cm}^2$ de área da base e $1,0 \text{ m}$ de comprimento, quando na temperatura inicial de $68 \text{ }^\circ\text{F}$. Sabendo que o coeficiente de dilatação linear do estanho é igual a $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, determine o comprimento e o volume dessa barra quando ela atinge a temperatura de $518 \text{ }^\circ\text{F}$.
46. (UPM-SP) Uma chapa metálica de área 1 m^2 , ao sofrer certo aquecimento, dilata $0,36 \text{ mm}^2$. Com a mesma variação de temperatura, um cubo de mesmo material, com volume inicial de 1 dm^3 , dilatará:
- a) $0,72 \text{ mm}^3$ c) $0,36 \text{ mm}^3$ e) $0,18 \text{ mm}^3$
 b) $0,54 \text{ mm}^3$ d) $0,27 \text{ mm}^3$
47. (UPM-SP) Uma esfera de certa liga metálica, ao ser aquecida de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, tem seu volume aumentado de $4,5\%$. Uma haste dessa mesma liga metálica, ao ser aquecida de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, terá seu comprimento aumentado de:
- a) $1,0\%$. c) $2,0\%$. e) $4,5\%$.
 b) $1,5\%$. d) $3,0\%$.

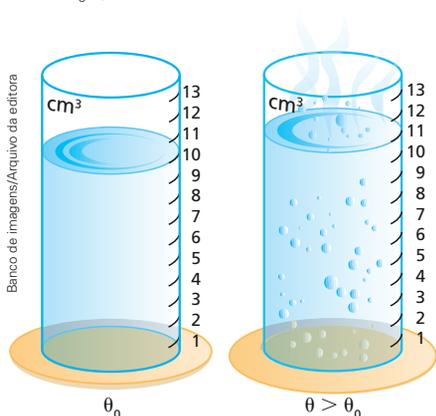
6. Dilatação térmica dos líquidos

Um líquido, devido às suas características, precisa estar no interior de um recipiente sólido para que possamos determinar seu volume.

Assim, podemos estudar o que ocorre com o volume de um líquido, no aquecimento ou no resfriamento, se ele estiver em uma proveta graduada, por exemplo.

Imaginemos um recipiente de vidro transparente, graduado corretamente em cm^3 , a uma temperatura θ_0 .

Um líquido, também à temperatura θ_0 , é colocado no interior desse frasco até a marca de 10 cm^3 . Como o frasco foi graduado corretamente a essa temperatura θ_0 , podemos dizer com certeza que o recipiente contém 10 cm^3 de líquido.



Agora, aquecendo o conjunto frasco-líquido até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), notamos que o líquido atinge a marca de 11 cm^3 .

Qual foi a dilatação sofrida por esse líquido?

À primeira vista, pode-se pensar que o líquido dilatou 1 cm^3 . Mas será que foi 1 cm^3 mesmo?

Na realidade, esse líquido dilatou mais do que 1 cm^3 , pois, como **o frasco também dilata**, entre duas marcas consecutivas da graduação do frasco temos agora uma capacidade maior do que 1 cm^3 .

Assim, à temperatura θ , temos o líquido ocupando 11 unidades da graduação do frasco, sendo que cada unidade corresponde a um volume maior do que 1 cm^3 . Daí termos mais de 11 cm^3 de líquido e, em consequência, uma dilatação real maior do que 1 cm^3 .

Lembre-se de que esse problema é inevitável, já que o líquido tem de estar no interior de um frasco sólido, que também dilata.

É por isso que se observam dois tipos de dilatação para os líquidos: uma **real** (que não depende do frasco) e outra **aparente** (afetada pela dilatação do frasco).

Em líquidos, só existe interesse no estudo da dilatação volumétrica, que é regida pela mesma equação da dilatação volumétrica dos sólidos:

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta\theta)$$

Os coeficientes de dilatação real dos líquidos são, em geral, maiores do que os dos sólidos.

Veja, na tabela ao lado, os coeficientes de dilatação real de alguns líquidos:

Para entendermos melhor as dilatações real e aparente, consideremos um frasco totalmente cheio com um líquido. Ao aquecermos o conjunto, notamos que ocorre um extravasamento parcial do líquido.

Fonte: <www.engineeringtoolbox.com/cubical-expansion-coefficients-d_1262.html>. Acesso em: 20 jun. 2018.

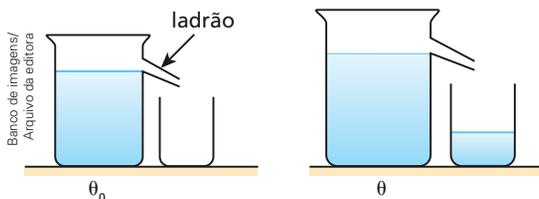
* Por volta de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



Água no interior de uma proveta graduada. O volume da água é lido na escala.

Cristina Xavier/Arquivo da editora

Líquido	$\gamma_{\text{real}} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
Éter	$16,0 \cdot 10^{-4}$
Álcool etílico	$10,9 \cdot 10^{-4}$
Petróleo	$10,0 \cdot 10^{-4}$
Glicerina	$5,08 \cdot 10^{-4}$
Água*	$2,14 \cdot 10^{-4}$
Mercúrio	$1,8 \cdot 10^{-4}$



Note que após o aquecimento o recipiente continua cheio. A quantidade de líquido extravasado representa a aparente dilatação do líquido, pois o **recipiente também dilatou**, aumentando sua capacidade.

Assim, a dilatação real do líquido corresponde à variação da capacidade do frasco mais o volume do líquido extravasado:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{frasco}} + \Delta V_{\text{aparente}}$$

Entretanto, $\Delta V = V_0 \gamma \Delta \theta$; como, no início, o volume real do líquido é igual ao aparente e, ainda, igual à capacidade do frasco, temos:

$$V_0 \gamma_r \Delta \theta = V_0 \gamma_f \Delta \theta + V_0 \gamma_a \Delta \theta$$

Daí:

$$\gamma_r = \gamma_f + \gamma_a$$

O coeficiente de dilatação real do líquido é igual à soma do seu coeficiente de dilatação aparente com o coeficiente de dilatação do frasco que o contém.

Observemos que a dilatação real depende somente do líquido, enquanto a dilatação aparente depende também do frasco em que foi medida. Um mesmo líquido apresenta dilatações aparentes diferentes quando medidas em dois frascos de materiais diferentes, pois o frasco que dilata menos provoca maior extravasamento e maior dilatação aparente.

7. Temperatura e massa específica

Vamos agora observar a influência da temperatura na massa específica de uma substância.

Define-se **massa específica** ou **densidade absoluta** (μ) de uma substância como o quociente de sua massa (m) pelo respectivo volume (V):

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

Com a variação de temperatura, a massa da substância considerada permanece inalterada, porém seu volume varia, o que provoca alteração em sua massa específica.

Assim, a uma temperatura θ_0 , temos:

$$\mu_0 = \frac{m}{V_0} \Rightarrow m = \mu_0 V_0 \quad (\text{I})$$

À temperatura θ , temos, para a densidade da substância:

$$\mu = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \mu V \quad (\text{II})$$

Igualando (I) e (II), podemos escrever:

$$\mu_0 V_0 = \mu V \quad (\text{III})$$

Substituindo em (III) a expressão da dilatação volumétrica:

$$V = V_0(1 + \gamma \Delta \theta)$$

Obtemos:

$$\mu_0 V_0 = \mu V_0(1 + \gamma \Delta \theta)$$

$$\mu_0 = \mu(1 + \gamma \Delta \theta)$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \gamma \Delta \theta}$$

Observe, na relação, que a massa específica de um líquido diminui com o aumento da temperatura.

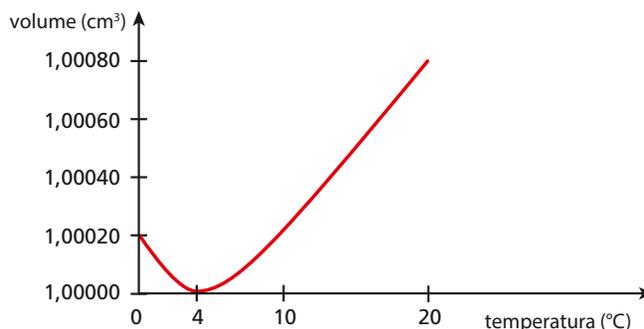
8. A dilatação anormal da água

Em geral, um líquido, quando aquecido, sempre dilata, aumentando de volume. No entanto, a água constitui uma exceção a essa regra, pois, ao ser aquecida de 0 °C a 4 °C, tem seu volume diminuído. Apenas para temperaturas acima de 4 °C a água dilata normalmente ao ser aquecida.

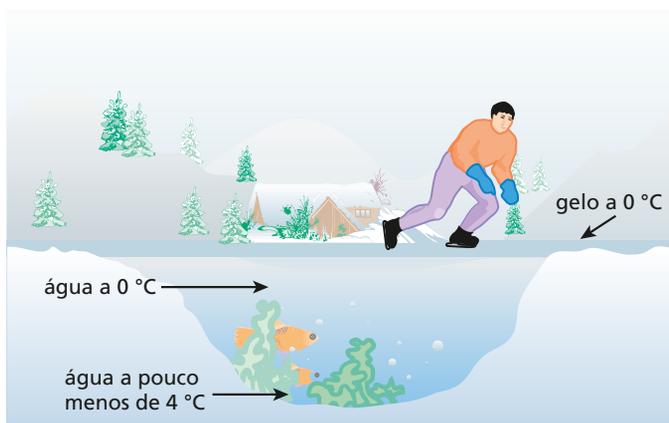
Para melhor ilustrar, vejamos o gráfico ao lado, que representa a variação de volume de 1 g de água pura em função da sua temperatura.

É importante observar que a 4 °C o volume da água é mínimo e, portanto, sua massa específica é máxima.

Esse tipo de dilatação anormal da água explica por que um lago congela apenas na superfície, como observado na imagem de abertura desse tópico. Durante o resfriamento da água da superfície, até 4 °C a densidade aumenta, e essa água desce, produzindo a subida da água mais quente do fundo (convecção). Isso ocorre até que toda a água do lago atinja 4 °C, pois, a partir daí, quando a temperatura da água da superfície diminui, seu volume aumenta, diminuindo a densidade. Em consequência, essa água mais fria não desce mais e acaba solidificando. Esse gelo formado na superfície isola o restante da água, fazendo com que a temperatura no fundo do lago se conserve acima de 0 °C, possibilitando que a vida aquática possa continuar existindo.



Banco de imagens/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

// A dilatação anormal da água faz com que apenas a superfície de um lago se solidifique. O gelo formado isola o restante da água (o gelo é péssimo condutor de calor), fazendo com que a temperatura no fundo do lago seja superior a 0 °C e, desse modo, preserve a vida animal e vegetal lá existente.

Exercícios Nível 1

48. Ao abastecer o carro num posto de gasolina, você compra o combustível por volume e não por massa, isto é, você compra “tantos litros” e não “tantos quilogramas” de combustível. Assim, qual o melhor horário do dia para abastecer o carro se você quer fazer economia?
49. Um posto recebeu 5000 L de gasolina num dia muito frio, em que a temperatura era de 10 °C. No dia seguinte, a temperatura aumentou para 30 °C, situação que durou alguns dias, o suficiente para que a gasolina fosse totalmente vendida. Se o coeficiente de dilatação volumétrica da gasolina é igual a $11 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$, determine o lucro do proprietário do posto, em litros.

50. Um frasco de vidro, graduado em cm^3 a 0 °C, contém mercúrio até a marca de $100,0 \text{ cm}^3$, quando ainda a 0 °C. Ao se aquecer o conjunto a 120 °C, o nível de mercúrio atinge a marca de $101,8 \text{ cm}^3$. Determine o coeficiente de dilatação linear do vidro.

Dado: coeficiente de dilatação do mercúrio: $\gamma_{\text{Hg}} = 18 \cdot 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$

Resolução:

A diferença de leitura corresponde à dilatação aparente do líquido, pois não podemos nos esquecer de que o frasco também dilatou:

$$\Delta V_{\text{aparente}} = 101,8 - 100,0$$

$$\Delta V_{\text{aparente}} = 1,8 \text{ cm}^3$$

Usamos a expressão da dilatação aparente dos líquidos:

$$\Delta V_{\text{aparente}} = V_{0A} \gamma_{\text{aparente}} \Delta \theta$$

Temos:

$$1,8 = 100,0 \cdot \gamma_a \cdot 120$$

$$\gamma_a = 15 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

porém:

$$\gamma_a = \gamma_r - \gamma_f \quad \text{e} \quad \gamma_f = 3\alpha_f$$

Portanto:

$$15 \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-5} - 3\alpha_f$$

$$3\alpha_f = 3 \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha_f = \alpha_{\text{vidro}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

51. Um recipiente de volume V está cheio de um líquido a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aquecendo-se o conjunto a $70 \text{ } ^\circ\text{C}$, transbordam $5,0 \text{ cm}^3$ de líquido. Esses $5,0 \text{ cm}^3$ correspondem:
- à dilatação real do líquido.
 - à dilatação aparente do líquido.
 - à soma da dilatação real com a dilatação aparente do líquido.
 - à diferença entre a dilatação real e a dilatação aparente do líquido.
 - a três vezes a dilatação real do líquido.

52. Num recipiente de porcelana, graduado corretamente em centímetros cúbicos a $30 \text{ } ^\circ\text{C}$, é colocado petróleo a $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ até a marca 500 cm^3 . Em seguida, eleva-se a temperatura do conjunto a $70 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Dados: coeficiente de dilatação cúbica do petróleo = $9,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; coeficiente de dilatação linear da porcelana = $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Determine:

- o coeficiente de dilatação aparente do petróleo, quando medido no frasco de porcelana;
- a marca atingida pelo petróleo no frasco, após o aquecimento;
- a dilatação real sofrida pelo petróleo.

53. [AFA-SP] Um recipiente tem capacidade de 3000 cm^3 a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ e está completamente cheio de um determinado líquido. Ao aquecer o conjunto até $120 \text{ } ^\circ\text{C}$, transbordam 27 cm^3 . O coeficiente de dilatação aparente desse líquido, em relação ao material de que é feito o recipiente é, em $^\circ\text{C}^{-1}$, igual a:
- $3,0 \cdot 10^{-5}$
 - $9,0 \cdot 10^{-5}$
 - $2,7 \cdot 10^{-4}$
 - $8,1 \cdot 10^{-4}$

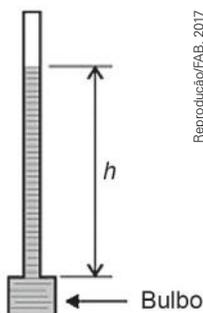
54. [OPF] Um recipiente de vidro, cujo coeficiente de dilatação térmica é $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tem volume igual a 100 dm^3 e está completamente cheio de um líquido à temperatura ambiente ($20 \text{ } ^\circ\text{C}$). Ao ser aquecido até $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ nota-se que foram derramados $0,20 \text{ dm}^3$ do líquido aquecido. Calcule a dilatação real do líquido.
- $0,30 \text{ dm}^3$
 - $0,15 \text{ dm}^3$
 - $0,11 \text{ dm}^3$
 - $0,22 \text{ dm}^3$
 - $0,32 \text{ dm}^3$

Exercícios Nível 2

55. [AFA-SP] Em um laboratório de Física é proposta uma experiência onde os alunos deverão construir um termômetro, o qual deverá ser constituído de um bulbo, um tubo muito fino e uniforme, ambos de vidro, além de álcool colorido, conforme a figura abaixo.

O bulbo tem capacidade de $2,0 \text{ cm}^3$, o tubo tem área de secção transversal de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ e comprimento de 25 cm .

No momento da experiência, a temperatura no laboratório é $30 \text{ } ^\circ\text{C}$, e o bulbo é totalmente preenchido com



Reprodução/FAB, 2017

álcool até a base do tubo. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação do álcool é $11 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e que o coeficiente de dilatação do vidro utilizado é desprezível comparado ao do álcool, a altura h , em cm, atingida pelo líquido no tubo, quando o termômetro for utilizado em um experimento a $80 \text{ } ^\circ\text{C}$, é

- 5,50
- 11,0
- 16,5
- 22,0

56. [Vunesp] Nos últimos anos temos sido alertados sobre o aquecimento global. Estima-se que, mantendo-se as atuais taxas de aquecimento do planeta, haverá uma elevação do nível do mar causada, inclusive, pela expansão térmica, causando inundação em algumas regiões costeiras.

Supondo, hipoteticamente, os oceanos como sistemas fechados e considerando que o coeficiente de dilatação volumétrica da água é aproximadamente $2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e que a profundidade média dos oceanos é de 4 km, um aquecimento global de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ elevaria o nível do mar, devido à expansão térmica, em, aproximadamente:

- a) 0,3 m. c) 0,8 m. e) 1,7 m.
b) 0,5 m. d) 1,1 m.

57. (UFPA) Um recipiente de vidro encontra-se completamente cheio de um líquido a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Quando o conjunto é aquecido até $80 \text{ }^\circ\text{C}$, o volume do líquido que transborda corresponde a 4% do volume que o líquido possuía a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Sabendo que o coeficiente de dilatação volumétrica do vidro é de $27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, determine o coeficiente de dilatação real do líquido.

58. Um recipiente de 200 cm^3 de capacidade, feito de um material de coeficiente de dilatação volumétrica de $100 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, contém 180 cm^3 de um líquido de coeficiente de dilatação cúbica de $1000 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A temperatura do sistema é de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual a temperatura-limite de aquecimento do líquido sem que haja transbordamento?

59. (UEA-AM) Em um experimento, foram colocados em um béquer de vidro graduado 100 cm^3 de um líquido à temperatura de 293 K . Aquecendo-se o sistema até 393 K , obteve-se um novo volume do líquido igual a $101,13 \text{ cm}^3$. Sendo o coeficiente de dilatação linear do vidro $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, o coeficiente de dilatação térmica real do líquido tem valor, em $^\circ\text{C}^{-1}$, igual a

- a) $9,0 \cdot 10^{-4}$ c) $5,6 \cdot 10^{-4}$ e) $1,4 \cdot 10^{-4}$
b) $7,2 \cdot 10^{-4}$ d) $2,8 \cdot 10^{-4}$

60. (Enem) A gasolina é vendida por litro, mas em sua utilização como combustível a massa é o que importa. Um aumento da temperatura do ambiente leva a um aumento no volume da gasolina. Para diminuir os efeitos práticos dessa variação, os tanques dos postos de gasolina são subterrâneos. Se os tanques não fossem subterrâneos:

- I. Você levaria vantagem ao abastecer o carro na hora mais quente do dia, pois estaria comprando mais massa por litro de combustível.
II. Abastecendo com a temperatura mais baixa, você estaria comprando mais massa de combustível para cada litro.

III. Se a gasolina fosse vendida por kg em vez de ser vendida por litro, o problema comercial decorrente da dilatação da gasolina estaria resolvido.

Dessas considerações, somente:

- a) I é correta. d) I e II são corretas.
b) II é correta. e) II e III são corretas.
c) III é correta.

61. (UFG-GO) Num dia quente em Goiânia, $32 \text{ }^\circ\text{C}$, uma dona de casa coloca álcool em um recipiente de vidro graduado e lacra-o bem para evitar evaporação. De madrugada, com o termômetro acusando $12 \text{ }^\circ\text{C}$, ela nota, surpresa, que, apesar de o vidro estar bem fechado, o volume de álcool reduziu-se. Sabe-se que o seu espanto não se justifica, pois se trata do fenômeno da dilatação térmica. A diminuição do volume foi de:

- a) 1,1%. d) 4,4%.
b) 2,2%. e) 6,6%.
c) 3,3%.

Considere o coeficiente de dilatação térmica volumétrica do álcool: $\gamma_{\text{álcool}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \gg \gamma_{\text{vidro}}$

62. A $4 \text{ }^\circ\text{C}$, a massa específica da água vale $1,0 \text{ g/cm}^3$.

ER Se o coeficiente de dilatação volumétrica real da água vale $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, qual é sua massa específica, na temperatura de $84 \text{ }^\circ\text{C}$?

Resolução:

A **densidade absoluta** ou **massa específica** de uma substância varia com a temperatura, de acordo com a seguinte função:

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 + \gamma\Delta\theta)}$$

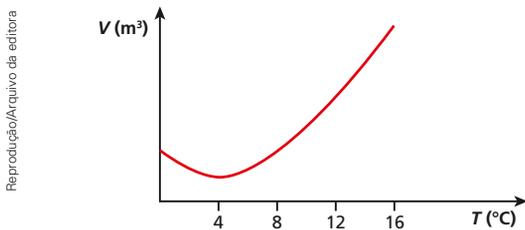
Substituindo os valores conhecidos, temos:

$$\mu = \frac{1,0}{1 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 80} \therefore \boxed{\mu \cong 0,98 \text{ g/cm}^3}$$

63. A densidade absoluta de um material a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ é $0,819 \text{ g/cm}^3$ e seu coeficiente de dilatação volumétrica vale $5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A que temperatura devemos levar esse corpo para que sua densidade absoluta torne-se igual a $0,780 \text{ g/cm}^3$?

64. Uma substância tem massa específica de $0,78 \text{ g/cm}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,65 \text{ g/cm}^3$ a $425 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual o seu coeficiente de dilatação volumétrica?

65. (Ufop-MG) Na figura, esboçou-se o gráfico do volume em função da temperatura para determinada massa de água líquida.



Por que não é possível medir a temperatura no intervalo entre 0 °C e 16 °C com um termômetro de água, usando a densidade como propriedade termométrica?

DESCUBRA MAIS

O que faz a água apresentar uma dilatação diferente em relação às demais substâncias?

Exercícios Nível 3

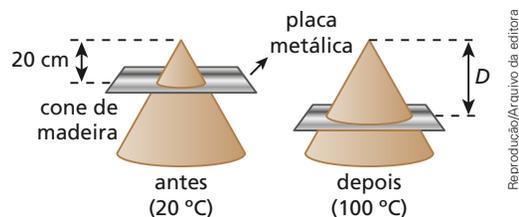
66. (UPM-SP) O coeficiente de dilatação linear de certo material é $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Utilizando como unidade de temperatura o grau Fahrenheit, o valor do coeficiente de dilatação linear desse material será:
- a) $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$. d) $5,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$.
 b) $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$. e) $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$.
 c) $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$.

67. (FGV-SP) Um bloco metálico, maciço, homogêneo, de capacidade térmica C , é feito de um material de coeficiente de dilatação linear α e ocupa um volume V_0 à temperatura ambiente. Ele é colocado no interior de um forno quente e recebe uma quantidade de calor Q até entrar em equilíbrio térmico com o forno sem sofrer mudança de estado físico. Como consequência, seu volume sofre uma dilatação ΔV . Tal dilatação é diretamente proporcional a V_0 ,
- a) α , C e $1/Q$. d) α , $1/Q$ e $1/C$.
 b) α , Q e $1/C$. e) Q , $1/\alpha$ e $1/C$.
 c) C , Q e $1/\alpha$.

68. (PUC-SP) Uma barra de alumínio, inicialmente a 20 °C, tem, a essa temperatura, uma densidade linear de massa igual a $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}$. A barra é aquecida sofrendo uma variação de comprimento de 3 mm. Sabe-se que o coeficiente de dilatação linear térmica do alumínio é $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e seu calor específico é 0,2 cal/g °C. A quantidade de calor absorvida pela barra é:
- a) 35 cal. c) 90 cal. e) 500 cal.
 b) 70 cal. d) 140 cal.

69. (UFABC-SP) Uma placa metálica de espessura desprezível tem um orifício circular e está encaixada horizontalmente num cone de madeira, como mostra a figura a seguir. À temperatura de 20 °C, a distância do plano que contém a placa ao vértice do cone

é 20 cm. A placa é, então, aquecida a 100 °C e, devido à dilatação térmica, ela escorrega até uma nova posição, onde ainda continua horizontal. Sendo o coeficiente de dilatação linear do material da placa igual a $5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e desconsiderando a dilatação do cone, determine, em cm, a nova distância D do plano que contém a placa ao vértice do cone a 100 °C.

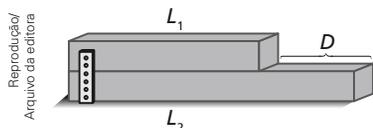


70. (UFBA) *Impossibilitados de medir a longitude em que se encontravam, os navegadores que tomaram parte nas grandes explorações marítimas se viam literalmente perdidos no mar tão logo perdessem contato visual com a terra. Milhares de vidas e crescente riqueza das nações dependiam de uma solução.* (SOBEL, 1997.)

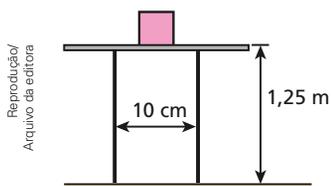
A determinação da longitude ao longo de viagens marítimas é feita pela comparação entre a hora local e a hora no porto de origem. Portanto, é necessário que se tenha, no navio, um relógio que seja ajustado antes de zarpar e marque, precisamente, ao longo de toda a viagem, a hora do porto de origem. Os relógios de pêndulo daquela época não serviam a esse propósito, pois o seu funcionamento sofria influência de muitos fatores, inclusive das variações de temperatura, devido à dilatação e à contração da haste do pêndulo.

A longitude pôde finalmente ser determinada através de um relógio, no qual o problema das variações de temperatura foi resolvido com a utilização

de tiras de comprimentos diferentes, feitas de materiais de coeficientes de dilatação diferentes. Com base nesse mesmo princípio físico, considere um conjunto formado por duas barras de comprimento $L_1 = 10,0 \text{ cm}$ e $L_2 = 15,0 \text{ cm}$ fixadas em uma das extremidades, inicialmente submetido à temperatura T_0 . Supondo que o conjunto tenha sua temperatura aumentada para $T = T_0 + \Delta T$, determine a relação entre os coeficientes de dilatação linear, α_1 e α_2 , das barras, para a qual a distância $D = 5,0 \text{ cm}$ não se altera com a variação de temperatura.



71. (UPM-SP) A figura a seguir mostra duas barras verticais, uma de cobre e outra de zinco, fixas na parte inferior. Elas suportam uma plataforma horizontal onde está apoiado um corpo. O coeficiente de atrito estático entre o corpo e a plataforma é 0,01, e os coeficientes de dilatação linear do zinco e do latão valem $2,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente. Qual a menor variação de temperatura capaz de provocar o deslizamento do corpo sobre a plataforma?



72. Na situação esquematizada na figura I, uma pequena caixa está em repouso sobre uma plataforma **P** que é mantida em equilíbrio na horizontal simplesmente apoiada sobre duas hastes metálicas verticais, **A** e **B**, de comprimentos iniciais iguais a L . Essas hastes estão separadas por uma distância d e seus coeficientes de dilatação lineares valem α_A e α_B , respectivamente, com $\alpha_B > \alpha_A$. A superfície de **P** é áspera e oferece à caixa um coeficiente de atrito estático igual a μ .

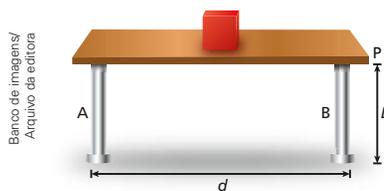


figura I

As hastes sofrem, então, um aumento de temperatura ΔT o que leva a montagem à situação es-

quematizada na figura II, na qual se observa que **P** ainda permanece parada em relação às hastes, mas a caixa fica na iminência de escorregar em relação a **P**.

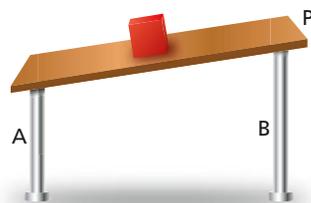


figura II

Banco de Imagens/Arquivo da editora

Das alternativas a seguir, aponte a que apresenta o valor correto da diferença $\alpha_B - \alpha_A$:

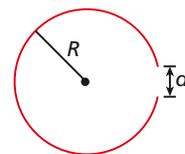
- a) $\frac{\mu d}{L \Delta T}$ c) $\frac{d}{\mu L \Delta T}$ e) $\frac{d \Delta T}{\mu L}$
 b) $\frac{\mu L}{d \Delta T}$ d) $\frac{L}{\mu d \Delta T}$

73. (ITA-SP) Um relógio de pêndulo simples é montado no pátio de um laboratório em Novosibirsk, na Sibéria, utilizando um fio de suspensão de coeficiente de dilatação $1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. O pêndulo é calibrado para marcar a hora certa em um bonito dia de verão de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Em um dos menos agradáveis dias do inverno, com a temperatura a $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, o relógio:
 a) adianta 52 s por dia. d) atrasa 26 s por dia.
 b) adianta 26 s por dia. e) atrasa 52 s por dia.
 c) atrasa 3 s por dia.

74. (UFBA) A haste de um pêndulo é feita com um material cujo coeficiente de dilatação vale $4,375 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Colocando-se esse pêndulo em uma câmara frigorífica, verifica-se o seu período de oscilação $T_1 = 0,75 T_0$, sendo T_0 o período medido num laboratório. Determine a diferença de temperatura que há entre o laboratório e a câmara frigorífica. Expresse sua resposta em $10^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

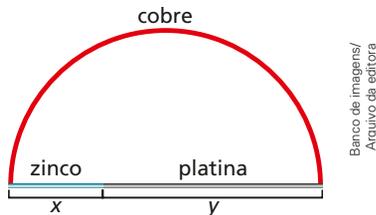
75. (Univest-SP) Um arame é encurvado em forma de um aro circular de raio R , tendo, porém, uma folga d entre suas extremidades, conforme indica a figura abaixo. Aquecendo-se esse arame, é correto afirmar que a medida de R e a medida de d , respectivamente:

- a) aumentará — não se alterará.
 b) aumentará — aumentará.
 c) aumentará — diminuirá.
 d) não se alterará — aumentará.
 e) não se alterará — diminuirá.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

76. Uma barra de cobre foi recurvada tomando a forma de uma semicircunferência. As extremidades foram unidas por uma outra barra reta constituída por dois metais: uma parte, de comprimento x , era de zinco e a outra, de comprimento y , de platina.



São dados os coeficientes de dilatação lineares: cobre = $17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; platina = $9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. zinco = $29 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

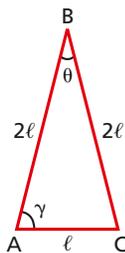
Para que o arco de cobre conserve sua forma semicircular, a qualquer temperatura a que seja levado, a razão $\frac{x}{y}$ entre os comprimentos iniciais x e y dos segmentos de zinco e platina deve ser:

- a) $\frac{1}{5}$ b) $\frac{2}{5}$ c) $\frac{3}{5}$ d) $\frac{1}{3}$ e) $\frac{2}{3}$

77. (PUC-SP) Três barras – **AB**, **BC** e **AC** – são dispostas de modo que formem um triângulo isósceles. O coeficiente de dilatação linear de **AB** e **BC** é α , e o de **AC** é 2α . A 0°C , os comprimentos de **AB** e **BC** valem 2ℓ e o de **AC** vale ℓ .

Aquecendo-se o sistema à temperatura t , observa-se que:

- a) o triângulo torna-se equilátero.
b) o triângulo deixa de ser isósceles.
c) não há alteração dos ângulos θ e γ .
d) as barras **AB** e **BC** dilatam-se o dobro de **AC**.
e) as três barras sofrem dilatações iguais.

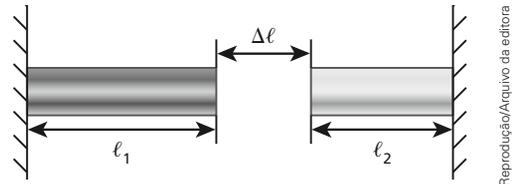


78. Uma régua de latão, com coeficiente de dilatação linear $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, foi graduada corretamente a 20°C . Ao ser aquecida, atingiu uma temperatura θ , à qual as medidas apresentam um erro de 0,1%. Qual é essa temperatura θ ?

79. (Vunesp) Uma régua de aço de coeficiente de dilatação linear $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ foi calibrada a certa temperatura, de tal modo que o erro máximo em cada divisão de milímetro é de $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$. Qual é o intervalo máximo de temperaturas em que essa régua pode ser usada, em torno da temperatura de calibração, se se pretende conservar aquela precisão?

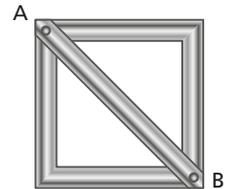
80. (OBF) Considere duas barras delgadas, de comprimentos ℓ_1 e ℓ_2 , feitas de materiais cujos coeficientes de dilatação linear são, respectivamente, α_1 e α_2 . As barras estão dispostas de modo a estarem separadas por uma distância $\Delta\ell$, conforme mostra a figura.

A que variação de temperatura deve ser submetido o sistema para que o espaçamento $\Delta\ell$, entre as duas barras, seja completamente preenchido? Considere que apenas as barras sofram influência dessa variação de temperatura.



81. (FGV-SP) Um serralheiro monta, com o mesmo tipo de vergalhão de ferro, a armação esquematizada.

A barra transversal que liga os pontos **A** e **B** não exerce forças sobre esses pontos. Se a temperatura da armação for aumentada, a barra transversal



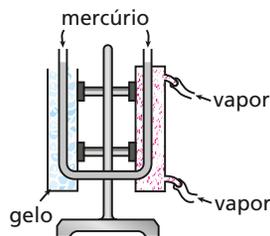
- a) continua não exercendo forças sobre os pontos **A** e **B**.
b) empurrará os pontos **A** e **B**, pois ficará $\sqrt{2}$ vezes maior que o novo tamanho que deveria assumir.
c) empurrará os pontos **A** e **B**, pois ficará $\ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$ vezes maior que o novo tamanho que deveria assumir.
d) tracionará os pontos **A** e **B**, pois ficará $\sqrt{2}$ vezes menor que o novo tamanho que deveria assumir.
e) tracionará os pontos **A** e **B**, pois ficará $\ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$ vezes menor que o novo tamanho que deveria assumir.

82. (UFG-GO) Deseja-se acoplar um eixo cilíndrico a uma roda com um orifício circular. Entretanto, como a área da seção transversal do eixo é 2,0% maior que a do orifício, decide-se resfriar o eixo e aquecer a roda. O eixo e a roda estão inicialmente à temperatura de 30°C . Resfriando-se o eixo para -20°C , calcule o acréscimo mínimo de temperatura da roda para que seja possível fazer o acoplamento. O eixo e a roda são de alumínio, que tem coeficiente de dilatação superficial de $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

83. (CPAEN-RJ) Um tanque metálico está cheio de ar à temperatura de $27\text{ }^\circ\text{C}$, e em equilíbrio térmico com ele. A partir de certo instante, aquecem-se o ar e o tanque, mantendo-se, em seu interior, pressão constante pela ação de uma válvula que permite o escapamento de ar. Se o coeficiente de dilatação volumétrica do material que compõe o tanque é $5,0 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, qual é a temperatura que o conjunto deve atingir para que escape 25% do ar originalmente contido no tanque?

- a) $36\text{ }^\circ\text{C}$ c) $129\text{ }^\circ\text{C}$ e) $400\text{ }^\circ\text{C}$
 b) $108\text{ }^\circ\text{C}$ d) $135\text{ }^\circ\text{C}$

84. A figura ao lado mostra um dispositivo utilizado para medir o coeficiente de dilatação cúbica de um líquido. Um dos ramos verticais do tubo em forma de U, que contém o líquido em estudo, é esfriado com gelo a $0\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto o outro ramo é aquecido utilizando-se vapor de água a $100\text{ }^\circ\text{C}$.

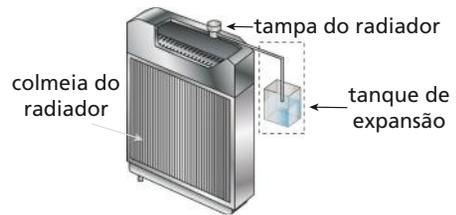


Banco de imagens/Arquivo da editora

Esse dispositivo foi usado pelos franceses Pierre Dulong e Alexis Petit para a obtenção do coeficiente de dilatação do mercúrio. Na experiência realizada, uma das colunas apresentava $250,0\text{ mm}$ e a outra $254,5\text{ mm}$ de líquido. Após os cálculos, o valor encontrado para o coeficiente de dilatação cúbica do mercúrio foi:

- a) $4,5 \cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. d) $1,8 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
 b) $1,8 \cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. e) $1,2 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
 c) $1,2 \cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

85. (OBF) Conectado ao radiador por uma mangueira, existe o tanque de expansão (veja figura abaixo).



Reprodução/Arquivo da editora

Esse tanque tem, também, o papel de acumular o excesso de água, que está inicialmente a $10\text{ }^\circ\text{C}$ e que vazará quando subir a temperatura da água colocada no radiador, devido às explosões do combustível nos cilindros do motor. Suponha que nesta ocasião a água esteja a $90\text{ }^\circ\text{C}$ e tenha o coeficiente de expansão volumétrica $\gamma = 4,0 \cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e que o radiador seja feito de cobre com coeficiente linear de expansão $\alpha = 2,0 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ preenchido totalmente com 20 litros de água. A quantidade de água que vazará será de

- a) 629 cm^3 . c) 822 cm^3 . e) 252 cm^3 .
 b) 544 cm^3 . d) 472 cm^3 .

86. (UPM-SP) Como sabemos, a água apresenta dilatação anômala, pois quando resfriada a partir da temperatura de $4\text{ }^\circ\text{C}$ o seu volume aumenta. Assim, quando determinada massa de água a $20\text{ }^\circ\text{C}$ (calor específico = $1,0\text{ cal/g }^\circ\text{C}$, densidade = $1,0\text{ g/cm}^3$) é resfriada, transformando-se em gelo a $0\text{ }^\circ\text{C}$ (calor latente de fusão = 80 cal/g , densidade = $0,9\text{ g/cm}^3$), tem seu volume aumentado de 20 cm^3 . A quantidade de calor retirada dessa massa de água é de:

a) 18000 cal . c) 10800 cal . e) 3600 cal .
 b) 14400 cal . d) 7200 cal .

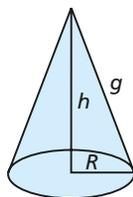
Para raciocinar um pouco mais

87. A figura representa um sólido maciço e homogêneo, feito de alumínio e na forma de um cone.

São dadas as seguintes informações:

- I. O coeficiente de dilatação linear (α) do alumínio é $2,4 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- II. A área de um círculo de raio R é dada por πR^2 .

III. A área total da superfície externa de um cone é dada por $\pi R(g + R)$, em que R é o raio do círculo da base do cone e g , a sua geratriz (veja a figura).



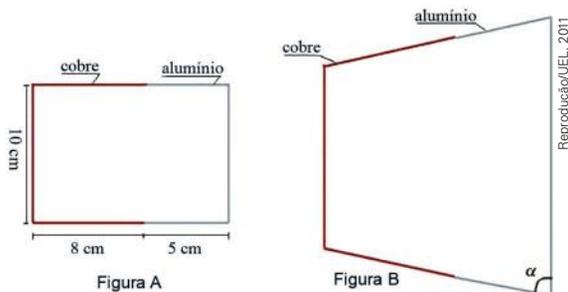
Banco de imagens/Arquivo da editora

IV. O volume de um cone é dado por $\frac{\pi R^2 h}{3}$, em que

R é o raio do círculo da base e h é a altura do cone. Aquecendo-se esse cone de alumínio de $\Delta\theta$, observa-se que o raio da base R sofre uma dilatação correspondente a $2,0\%$ de seu valor inicial. Nessas condições, os aumentos percentuais da área total externa e do volume desse cone serão, respectivamente, de:

- a) $2,0\%$ e $2,0\%$. d) $6,0\%$ e $8,0\%$.
 b) $4,0\%$ e $8,0\%$. e) $4,0\%$ e $6,0\%$.
 c) $2,0\%$ e $4,0\%$.

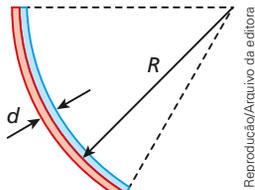
88. (UEL-PR) Um retângulo é formado por um fio de cobre e outro de alumínio, como mostra a figura A. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação linear do cobre é de $17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e o do alumínio é de $24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, qual o valor do ângulo α se a temperatura do retângulo for elevada de $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, como está apresentado na figura B?



- a) $89,98^\circ$ b) 30° c) 15° d) $0,02^\circ$ e) 60°

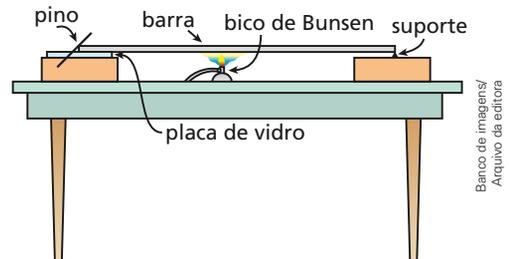
89. (UFC-CE) Um triângulo retângulo isósceles é montado com arames de materiais distintos, de modo que nos catetos o material possui coeficiente de dilatação térmica linear $A\sqrt{2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, enquanto na hipotenusa o material possui coeficiente de dilatação térmica linear $\frac{A}{\sqrt{2}} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Determine a variação de temperatura para que o triângulo torne-se equilátero.

90. (OBF) Uma lâmina bimetálica é constituída por uma junção de duas lâminas retilíneas que têm o mesmo comprimento quando estão à temperatura T . Ao aumentar sua temperatura para $T + \Delta T$ a lâmina se curva, formando um arco de circunferência de espessura total d (veja a figura). Supondo que os coeficientes de dilatação linear das lâminas sejam respectivamente iguais a α_2 e α_1 , com $\alpha_2 > \alpha_1$, e que as espessuras de cada lâmina, após a dilatação, sejam iguais, deduza a expressão do raio de curvatura R da junção entre as lâminas.

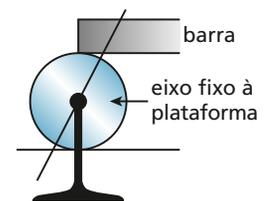


91. (UPM-SP) As rodas de uma locomotiva são discos metálicos e feitos de um material cujo coeficiente de dilatação linear é $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Quando essa locomotiva faz certo percurso, com as rodas à temperatura de $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, cada uma delas realiza 40 000 voltas completas. Se as rodas da locomotiva estivessem à temperatura de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, o número de voltas inteiras que cada uma daria, quando a locomotiva realizasse esse mesmo percurso, seria
- a) 40 030. c) 40 050. e) 40 070.
b) 40 040. d) 40 060.

92. Em um experimento de dilatação térmica dos sólidos usou-se uma barra de alumínio de 1,0 metro de comprimento a uma temperatura inicial de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$, conforme o esquema a seguir:



Aquecendo-se a barra, ela se expande e faz o pino cilíndrico (de $5,0 \text{ mm}$ de raio) rolar em torno do eixo fixo, movendo o ponteiro.



A extremidade presa ao suporte se mantém fixa. A que temperatura deve ser aquecida a barra para que o ponteiro gire 45° a partir de sua posição inicial?

Dados: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\pi = 3,2$.

- a) $220 \text{ } ^\circ\text{C}$. c) $200 \text{ } ^\circ\text{C}$. e) $520 \text{ } ^\circ\text{C}$.
b) $150 \text{ } ^\circ\text{C}$. d) $45 \text{ } ^\circ\text{C}$.

93. (ITA-SP) Um relógio de pêndulo, construído de um material de coeficiente de dilatação linear α , foi calibrado a uma temperatura de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ para marcar um segundo exato ao pé de uma torre, de altura h . Elevando-se o relógio até o alto da torre, observa-se certo atraso, mesmo mantendo-se a temperatura constante. Considerando R o raio da Terra, L o comprimento do pêndulo a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ e que o relógio permaneça ao pé da torre, então a temperatura para a qual se obtém o mesmo atraso é dada pela relação:

- a) $\frac{2h}{\alpha R}$ c) $\frac{(R+h)^2 - LR}{\alpha LR}$ e) $\frac{2R+h}{\alpha R}$
b) $\frac{h(2R+h)}{\alpha R^2}$ d) $\frac{R(2h+R)}{\alpha(R+h)^2}$

94. (ITA-SP) Um relógio tem um pêndulo de 35 cm de comprimento. Para regular seu funcionamento, ele possui uma porca de ajuste que encurta o comprimento do pêndulo de 1 mm a cada rotação completa à direita e alonga este comprimento de 1 mm a cada rotação completa à esquerda. Se o relógio atrasa um minuto por dia, indique o número aproximado de rotações da porca e sua direção necessários para que ele funcione corretamente.

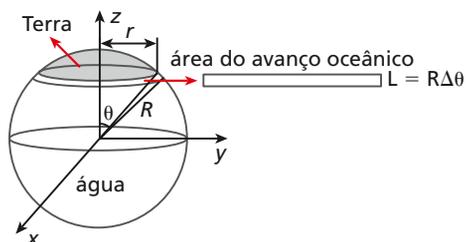
- a) 1 rotação à esquerda
- b) $\frac{1}{2}$ rotação à esquerda
- c) $\frac{1}{2}$ rotação à direita
- d) 1 rotação à direita
- e) 1 e $\frac{1}{2}$ rotações à direita.

95. (UFU-MG) Uma barra de 10 kg de um determinado metal a 600 °C é colocada dentro de um recipiente com paredes adiabáticas de volume 273 L. Inicialmente, dentro do recipiente, há 1 000 g de certo gás perfeito à pressão de 1 atmosfera e à temperatura de 0 °C.

Nessas condições, determine:

- a) A temperatura final da barra de metal, sabendo-se que o calor específico do metal e do gás são dados, respectivamente, por $c_M = 0,1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ e $c_{\text{gás}} = 0,2 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$.
- b) A variação de volume da barra de metal, dado que o seu coeficiente de dilatação linear e a sua densidade inicial são, respectivamente, $\alpha_M = \left(\frac{10}{3}\right) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $\rho_M = 1 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$.
- c) A pressão final do gás (aproximada até a primeira casa decimal), admitindo que o volume do recipiente não se altera.

96. (UFG-GO) Tem-se atribuído o avanço dos oceanos sobre a costa terrestre ao aquecimento global. Um modelo para estimar a contribuição da dilatação térmica é considerar apenas a dilatação superficial da água dos oceanos, onde toda superfície terrestre está agrupada numa calota de área igual a 25% da superfície do planeta e o restante é ocupado pelos oceanos, conforme ilustra a figura.



Dados:

Raio médio da Terra: 6 400 km

$\text{sen } \theta = 0,86$

Coefficiente de dilatação superficial da água:

$$\frac{4}{3} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

De acordo com o exposto, calcule a variação de temperatura dos oceanos responsável por um avanço médio de $L = 6,4 \text{ m}$ sobre a superfície terrestre.

97. (IME-RJ) Um copo está sobre uma mesa com a boca voltada para cima. Um explosivo no estado sólido preenche completamente o copo, estando todo o sistema a 300 K. O copo e o explosivo são aquecidos. Nesse processo, o explosivo passa ao estado líquido, transbordando para fora do copo. Sabendo que a temperatura final do sistema é 400 K, determine:
- a) a temperatura de fusão do explosivo;
 - b) o calor total fornecido ao explosivo.

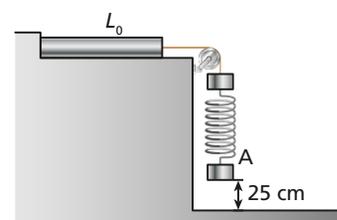
Dados:

- volume transbordado do explosivo líquido: 10^{-6} m^3 ;
- coeficiente de dilatação volumétrica do explosivo no estado líquido: 10^{-4} K^{-1} ;
- coeficiente de dilatação volumétrica do material do copo: $4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
- volume inicial do interior do copo: 10^{-3} m^3 ;
- massa do explosivo: 1,6 kg;
- calor específico do explosivo no estado sólido: $10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- calor específico do explosivo no estado líquido: $10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; e
- calor latente de fusão do explosivo: $10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Consideração:

- o coeficiente de dilatação volumétrica do explosivo no estado sólido é muito menor que o coeficiente de dilatação volumétrica do material do copo.

98. O sistema observado a seguir encontra-se inicialmente em equilíbrio. A barra metálica, de coeficiente de dilatação linear igual a $8 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tem comprimento inicial de 6,25 metros. O fio e a mola são ideais, de massas desprezíveis, a constante elástica da mola é igual a 400 N/m. o bloco **A** tem massa de 10 kg e a aceleração da gravidade no local vale 10 m/s^2 .



Quanto deve ser aquecida (somente) a barra metálica para que o bloco **A** encoste no solo e a mola, de comprimento natural igual a 0,50 metro, não experimente deformação?

Reprodução/Arquivo da editora

Banco de imagens/Arquivo da editora

Ondulatória

// Big Ben é o nome do maior sino da *Elizabeth Tower*, que toca a cada hora. Suas badaladas correspondem à nota mi. Os sinos menores, chamados *quarter bells*, tocam a cada 15 minutos.



Alamy/Fotoarena



Ondulatória é a parte da Física que estuda as oscilações, a produção e a propagação de ondas em geral, sejam elas de natureza mecânica, sejam de natureza eletromagnética. Trata também dos fenômenos determinados por movimentos ondulatórios.



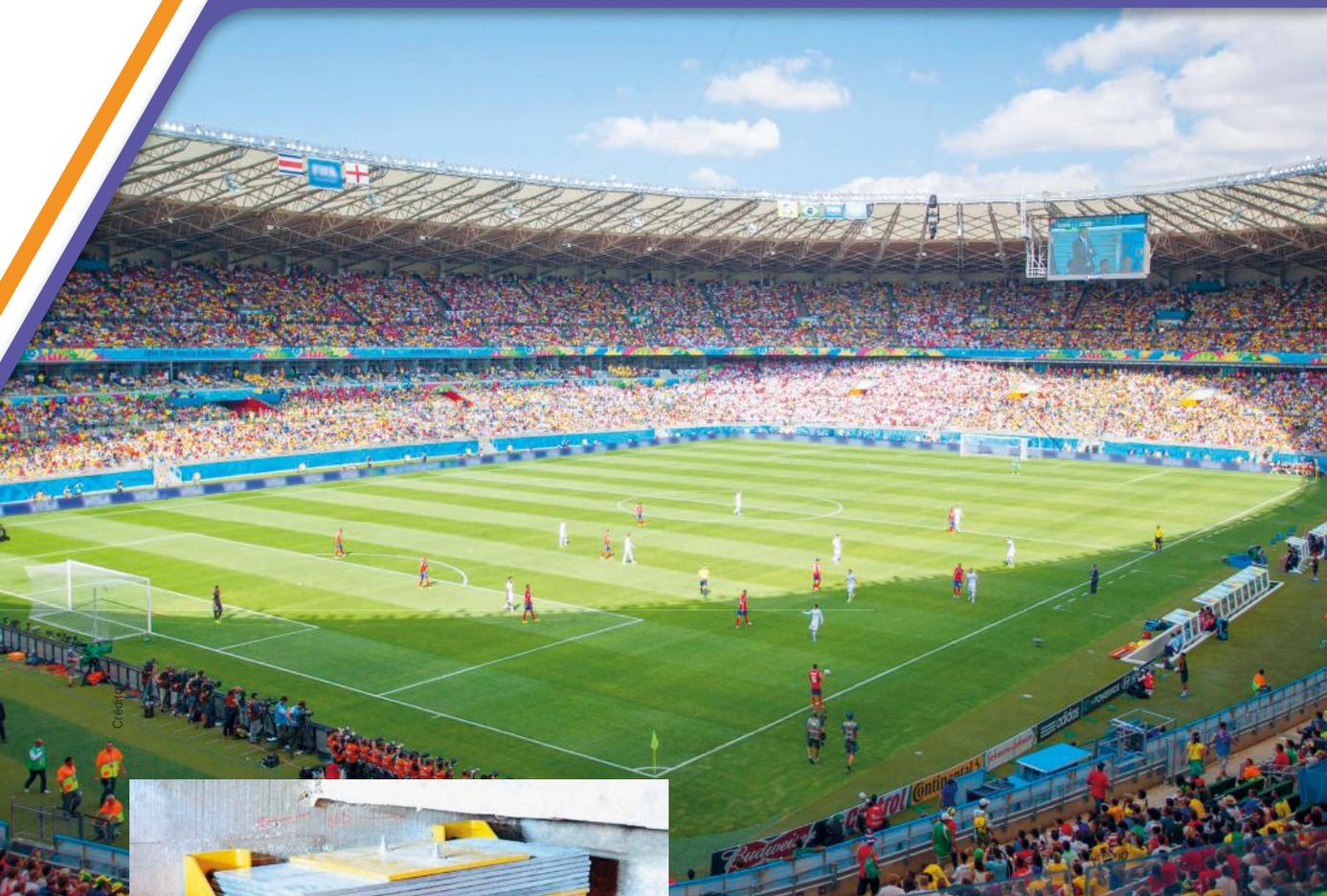
Lefteris Pitarakis/Associated Press/Glow Images

// O pêndulo do grande relógio possui um fio de 4,0 m e pesa 300 kg. Ele faz parte do mecanismo que viabiliza a marcação das horas. Quando o relógio atrasa ou adianta ligeiramente, o seu período é ajustado com o uso de moedas. As moedas modificam o centro de gravidade do fio, alterando o comprimento efetivo do pêndulo. O mecanismo de funcionamento desse relógio é complexo, envolvendo sistemas que ultrapassam o modelo de pêndulo simples.

NESTA UNIDADE VAMOS ESTUDAR:

- Tópico 1: Movimento harmônico simples (MHS)
- Tópico 2: Ondas
- Tópico 3: Acústica

Movimento harmônico simples (MHS)



Alamy/Forcarena



Reprodução/Gerb do Brasil Ltda.

// Em dias de jogo, a vibração das torcidas faz a estrutura dos estádios também vibrar. No Mineirão, as arquibancadas executavam aproximadamente um movimento harmônico simples com amplitude de 16 mm. Para minimizar o desconforto do público e garantir a integridade do estádio, foram instalados 176 amortecedores nesse estádio para a Copa Mundial de 2014, como o que vemos ao lado. Com isso, a amplitude da vibração diminuiu para 7 mm, ou seja, menos que a metade.

Movimentos oscilatórios estão presentes de diversas maneiras no nosso cotidiano. Entre eles, podemos citar o movimento de vaivém de um balanço ou até mesmo o movimento de moléculas de cristais usados para determinar a variação do tempo em relógios de alta precisão. Os movimentos periódicos também se fazem presentes no nosso dia a dia, como o movimento da Lua em torno do Sol ou da Terra em torno do Sol, os movimentos de sístole e diástole do coração humano, etc.

Desenvolveremos neste tópico os conceitos necessários para o estudo de movimentos periódicos, oscilatórios e do MHS, que é periódico e oscilatório ao mesmo tempo. Veremos os conceitos de período, de frequência e de amplitude. Usaremos para isso um modelo matemático para a descrição desse movimento específico denominado movimento harmônico simples (MHS).

1. Movimento oscilatório

No dia a dia, podemos observar vários tipos de movimento, entre os quais alguns que podem ser classificados como **movimentos oscilatórios**. Um balanço em um parque infantil é um exemplo de dispositivo que executa movimento oscilatório. Ele vai e volta pela mesma trajetória.

No teto de uma residência encontramos preso um longo fio e na extremidade uma luminária. Quando venta, esse dispositivo oscila.

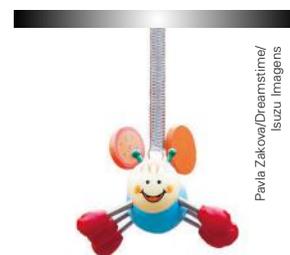


iStockphoto/Getty Images

/// Candelabro da Catedral Metropolitana de Santa Maria Assunta, Itália.

Um pequeno objeto, preso na extremidade de uma mola que está fixa no teto de uma sala. Ao puxarmos o bloco para baixo e soltarmos, ele vai oscilar para cima e para baixo, alternando o sentido de movimento.

Um **movimento** é definido como **oscilatório** quando executa uma mesma trajetória em torno de um ponto fixo, invertendo o sentido regularmente. Esse ponto fixo é denominado ponto de equilíbrio.



Pavla Zakova/Dreamstime/Isuzu Imagens

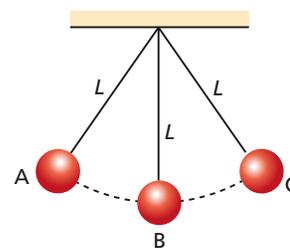
2. Movimento periódico

Quando uma sucessão de situações apresenta características que se repetem no decorrer do tempo, ela pode ser denominada periódica. A sucessão dos dias e das noites, a visão da Lua em seu movimento ao redor da Terra, as batidas que ouvimos ao auscultar nosso coração ou uma partícula que realiza um movimento circular e uniforme são exemplos de situações que se repetem periodicamente.

Um **movimento** é definido como **periódico** quando seus estados cinemáticos (posição, velocidade e aceleração) se repetem em intervalos de tempo iguais.

Quando observamos um pêndulo oscilando, cada situação cinemática dessa massa pendular se repete em intervalos de tempo iguais.

Em cada ponto, entre **A** e **C**, a massa do pêndulo passa duas vezes em cada oscilação completa, uma vez na ida e outra na volta. Observe que, ao passar por esses pontos, a posição se repete na ida e na volta e as acelerações vetoriais também se repetem na ida e na volta, mas as velocidades vetoriais são diferentes; o sentido do vetor velocidade é o oposto na ida e na volta, invertendo o sentido, configurando, assim, dois estados cinemáticos diferentes em cada ponto da trajetória, um na ida e outro na volta. Portanto, uma oscilação completa corresponde ao movimento de ida mais o de volta.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Outros exemplos de sistemas que executam movimentos periódicos são um planeta orbitando em torno do seu Sol, uma cadeira de balanço, um ventilador em funcionamento, etc.



// Uma roda-gigante, quando gira em movimento circular e uniforme, realiza um movimento periódico. Para um passageiro em uma de suas cadeiras, sua posição, sua velocidade vetorial (\vec{v}) e sua aceleração vetorial (\vec{a}) se repetem a cada volta em intervalos de tempos iguais.

Período e frequência

Quando você observa os ponteiros de um relógio, cada um deles também tem um movimento periódico. O ponteiro das horas repete seu movimento em intervalos de 12 horas; o dos minutos, a cada 1 hora; e o dos segundos, a cada 1 minuto. Esses intervalos de tempo correspondem ao período de cada movimento (T).

Observando um determinado movimento periódico podemos contar quantas vezes (n) ele se repete em um determinado intervalo de tempo (Δt).

Definimos período (T) como a razão entre o tempo total dos movimentos (Δt) e o número de vezes (n) que o movimento periódico se repetiu nesse intervalo de tempo (Δt).

$$T = \frac{\Delta t}{n}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade utilizada para medir o período é o **segundo (s)**. No entanto, como o período é um intervalo de tempo, podemos usar qualquer outra unidade de tempo para expressar essa grandeza física.

Nos movimentos periódicos, além de usar o período, utilizamos outra grandeza física denominada **frequência (f)**, que corresponde ao número de vezes que determinada ocorrência periódica se repetiu na unidade de tempo, a qual podemos expressar pela relação a seguir.

$$f = \frac{n}{\Delta t}$$

Relacionando as expressões do período e da frequência, podemos concluir que:

$$f = \frac{1}{T}$$

No SI, a unidade de medida de frequência é o **hertz (Hz)**. Portanto, 1 Hz corresponde a uma repetição da ocorrência periódica a cada segundo (s).

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

3. Movimento harmônico simples (MHS)

O estudo dos movimentos periódicos é realizado examinando-se o comportamento das grandezas físicas associadas a eles no decorrer do tempo. Vamos observar que as grandezas posição, velocidade e aceleração devem variar periodicamente com o tempo. Isto é, elas devem repetir seus valores em cada ciclo, ao passo que o tempo sempre avança. Nos casos mais simples, usamos as funções **seno** e **cosseno** para expressar essa relação. Essas funções são chamadas de **harmônicas**.

Dessa forma, são denominados **movimentos harmônicos simples (MHS)** alguns movimentos oscilatórios e periódicos, que podem ser expressos por funções horárias harmônicas, ou seja, podem ser expressos por funções seno e cosseno.

Para iniciar o estudo desses movimentos, usaremos uma simplificação. O movimento circular uniforme (MCU) vai nos auxiliar neste começo do estudo do MHS. Assim, associaremos um MCU a cada MHS estudado.

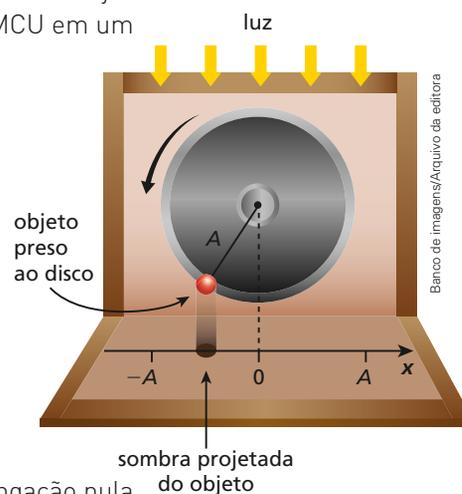
Para começar, imaginemos uma partícula realizando um MCU em uma trajetória circular de raio $R = A$. Para obter o MHS, vamos projetar esse MCU em um eixo **Ox**, horizontal.

Essa associação entre o movimento circular uniforme e a projeção do movimento em um eixo horizontal pode ser visualizada no aparato da figura ao lado, na qual um objeto preso a um disco que executa MCU é iluminado e sua sombra é projetada na superfície abaixo do disco.

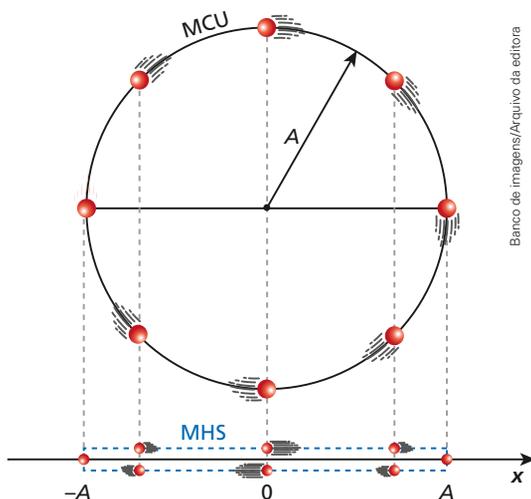
Enquanto a partícula desenvolve um movimento circular e uniforme (MCU) na trajetória circular, a sua projeção no eixo **Ox** tem um **movimento retilíneo, oscilatório** (entre A e $-A$) e **periódico**, constituindo-se em um movimento harmônico simples (MHS).

A posição da projeção da partícula é definida pela abscissa x , medida no eixo **Ox**. Assim, a **elongação** do MHS, que determina o espaço x da projeção é medida a partir da origem **O** do eixo, apresentando elongação nula ($x = 0$), elongação máxima ($x = A$) e elongação mínima ($x = -A$). A elongação máxima é denominada **amplitude** (A) do MHS.

É importante lembrar que, para ter um MHS, não é necessário ter um MCU. Estamos usando o MCU para entender de maneira simplificada o mecanismo do MHS. Veremos mais adiante outros MHS sem que exista um MCU para a geração desse movimento.



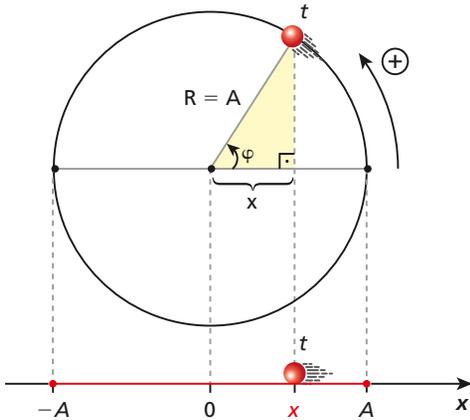
Banco de imagens/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

4. Função horária de um MHS

Banco de imagens/Arquivo da editora



Para obter a função horária da elongação x de um MHS, vamos considerar uma partícula em movimento circular uniforme (MCU) em uma circunferência de raio $R = A$. Em um determinado instante t , a partícula ocupa a posição x mostrada na figura ao lado.

No estudo do movimento circular e uniforme (MCU), no volume 1, vimos que a posição angular da partícula é definida pela fase φ e que a função horária da fase φ em função do tempo t é expressa por:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0$$

em que ω é a velocidade angular da partícula que se encontra em MCU. Essa grandeza também é chamada de **frequência angular**, ou **pulsção** do MHS. E a grandeza φ_0 é uma constante denominada **fase inicial**, que determina a posição angular da partícula em MCU no instante $t = 0$.

Dessa forma, considerando o triângulo retângulo que aparece na figura representada acima, podemos inferir que:

$$x = A \cos \varphi$$

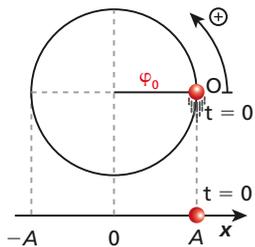
Portanto:

$$x = A \cos (\omega t + \varphi_0)$$

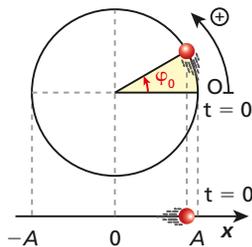
Como φ_0 caracteriza a fase inicial do MCU, ele também determina a fase inicial do MHS, definindo a posição inicial, que é o local onde se encontra o corpo no instante $t = 0$.

A seguir podemos observar algumas posições iniciais de um corpo em MHS, que aparecem com maior frequência nos exercícios que vamos resolver.

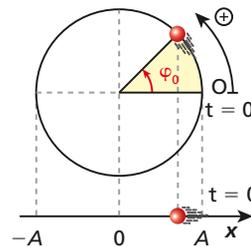
Banco de imagens/Arquivo da editora



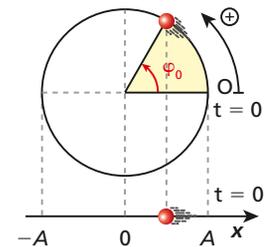
$$\varphi_0 = 0 = 0^\circ$$



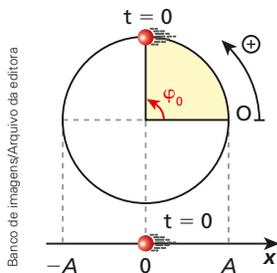
$$\varphi_0 = \frac{\pi}{6} \text{ rad} = 30^\circ$$



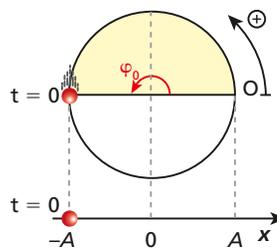
$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} \text{ rad} = 45^\circ$$



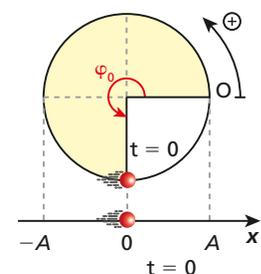
$$\varphi_0 = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 60^\circ$$



$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \text{ rad} = 90^\circ$$



$$\varphi_0 = \pi \text{ rad} = 180^\circ$$



$$\varphi_0 = \frac{3\pi}{2} \text{ rad} = 270^\circ$$

5. Função horária da velocidade do MHS

Ao percorrer a trajetória circular, a partícula assume velocidades que são diferentes em cada ponto. Na figura a seguir, representamos a velocidade da partícula em um determinado instante t . A projeção dessa velocidade no eixo Ox corresponde à velocidade instantânea do MHS.

Observe o triângulo retângulo assinalado na figura ao lado.

$$|\vec{v}_{MHS}| = |\vec{v}_{MCU}| \text{sen } \varphi$$

Mas $|\vec{v}_{MCU}| = \omega A$ e $\varphi = \omega t + \varphi_0$

Portanto, juntando essas expressões, obtemos a função horária da velocidade escalar instantânea do MHS:

$$|\vec{v}_{MHS}| = \omega A \text{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

No eixo Ox , em que se realiza o MHS, podemos observar que a velocidade escalar do movimento harmônico simples, nesse instante, tem sentido oposto ao da orientação do eixo. Dessa forma, essa velocidade é negativa, e a expressão fica definida por:

$$v = -\omega A \text{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

Essa é a equação horária da velocidade escalar que vamos utilizar na resolução dos exercícios cuja partícula realiza um MHS.

6. Função horária da aceleração do MHS

Como a partícula que usamos como referência encontra-se em MCU, sua aceleração é exclusivamente centrípeta, e a projeção dessa aceleração no eixo Ox corresponde à aceleração do MHS. Observe na figura ao lado.

Do triângulo retângulo da figura, podemos concluir que:

$$|\vec{a}_{MHS}| = |\vec{a}_{MCU}| \cos \varphi$$

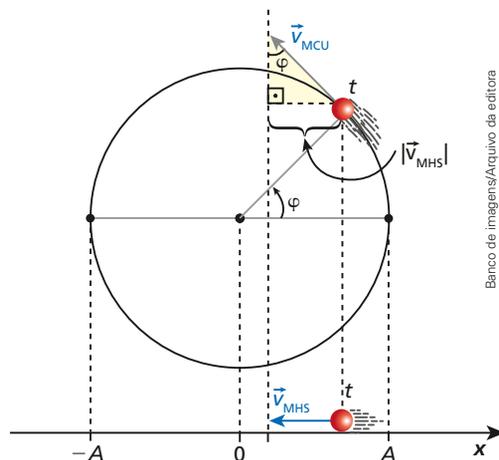
Mas $|\vec{a}_{MCU}| = \omega^2 A$ e $\varphi = \omega t + \varphi_0$

Portanto, juntando as expressões, temos:

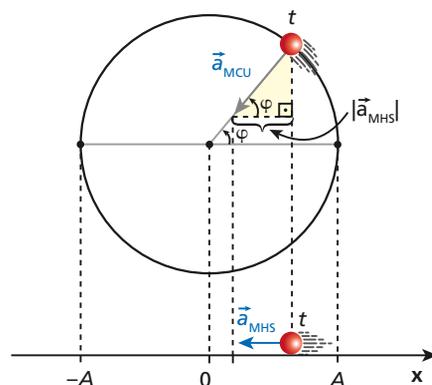
$$|\vec{a}_{MHS}| = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

O MHS inverte seu sentido de movimento ao passar pelos pontos A e $-A$. Nesses instantes a velocidade do MHS é igual a zero. Ao passar pelo ponto O , origem do eixo Ox , a velocidade é máxima. Assim, de A para O e de $-A$ para O o movimento do MHS é acelerado e de O para $-A$ e de O para A ele é retardado. Como no instante representado na figura o MHS ocorre de A para O , o movimento é acelerado, e a aceleração escalar deve ter mesmo sinal da velocidade escalar nesse instante. No item anterior, vimos que a velocidade escalar é negativa; assim, a aceleração escalar também deve ser negativa.

$$\alpha = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0)$$



Banco de imagens/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

7. Velocidade escalar do MHS em função da elongação (x)

No item 5, vimos a equação horária da velocidade escalar, isto é, a função da velocidade escalar com o tempo. No entanto, podemos relacionar também a velocidade escalar com a elongação x , do MHS.

Para tanto, vamos considerar as equações horárias da elongação (x) e da velocidade escalar (v):

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow \cos(\omega t + \varphi_0) = \frac{x}{A}$$

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow \sin(\omega t + \varphi_0) = -\frac{v}{\omega A}$$

Da Matemática, sabemos que o quadrado do seno somado ao quadrado do cosseno do mesmo ângulo é igual a 1.

Assim:

$$\left(-\frac{v}{\omega A}\right)^2 + \left(\frac{x}{A}\right)^2 = 1 \Rightarrow \frac{v^2}{\omega^2 A^2} + \frac{x^2}{A^2} = 1$$

Desenvolvendo essa relação, obtemos a expressão:

$$v^2 = \omega^2 (A^2 - x^2)$$

Uma das propriedades do MHS pode ser observada nessa relação. Se considerarmos os pontos de inversão do MHS, onde as elongações assumem os valores $x = A$ e $x = -A$, substituindo esses valores na expressão acima concluímos que a velocidade se anula nesses pontos.

No centro da trajetória, no ponto **0**, onde a elongação se anula ($x = 0$), a velocidade assume o valor absoluto máximo.

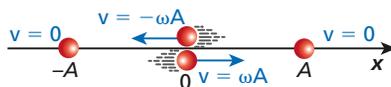
$$v^2 = \omega^2 (A^2 - 0) = \omega^2 A^2$$

$$v = \pm \omega A$$

O valor positivo ocorre quando o movimento tem o mesmo sentido da trajetória (de $-A$ para A), e o valor negativo, quando o sentido é contrário à orientação da trajetória (de A para $-A$). Daí podermos concluir que:

$$v_{\text{máx}} = \omega A$$

Esquemmatizando, temos:



Banco de imagens/
Arquivo da editora

8. Aceleração escalar do MHS em função da elongação (x)

Além da velocidade escalar, podemos também relacionar a aceleração escalar com a elongação x . Para isso, vamos utilizar a função horária da elongação x e a função horária da aceleração escalar α :

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\alpha = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Isolando o cosseno na primeira equação e substituindo na segunda, temos:

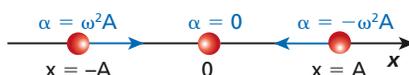
$$\alpha = -\omega^2 x$$

Nessa nova relação, podemos observar que o valor absoluto da aceleração escalar é máximo quando $x = A$ ou $x = -A$, nos pontos de inversão do movimento. No ponto central **0**, a elongação é nula e a aceleração escalar também. Observe que, considerando o valor relativo da aceleração escalar, ela é máxima no ponto $-A$ e mínima no ponto A . Essa aceleração se deve à força de restituição que provoca o MHS. Essa força tende sempre a trazer a partícula de volta ao ponto de equilíbrio do MHS, o ponto central **0**.

Da expressão anterior, podemos concluir que a aceleração escalar máxima é dada por:

$$\alpha_{\text{máx}} = \omega^2 A$$

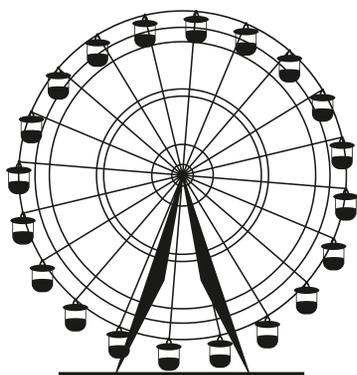
Esquemmatizando, temos:



Banco de imagens/
Arquivo da editora

Exercícios Nível 1

- Um aluno foi passar as férias em um local onde existe um grande parque de diversões. Lá está uma roda-gigante.



aarrows/Shutterstock

Cada cadeira realiza um movimento circular uniforme (MCU) em torno do eixo no qual gira o dispositivo. Ao meio-dia, quando o Sol encontra-se a pino, isto é, exatamente acima da roda-gigante, pode-se observar que a sombra de cada cadeira, projetada no solo, realiza um movimento retilíneo em um segmento de reta horizontal de tamanho igual ao diâmetro da roda-gigante.

Analise as afirmativas a seguir e classifique-as em verdadeira ou falsa.

- O movimento da sombra de uma das cadeiras projetada no chão é oscilatório e periódico.
- O movimento de uma cadeira da roda-gigante é periódico, mas não é oscilatório.
- O movimento da sombra de uma cadeira realiza um movimento harmônico simples (MHS) no chão.

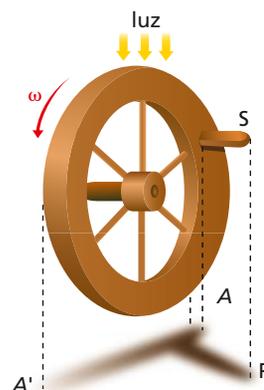
- É preciso que uma das cadeiras realize meia-volta em MCU para que sua sombra realize uma oscilação no chão.
- A amplitude do movimento da sombra é igual ao diâmetro do MCU de uma cadeira.
- O movimento de uma cadeira da roda-gigante é um MHS.

Com base em sua classificação das afirmações acima, escolha a alternativa correta.

- Se apenas 1, 3 e 5 são verdadeiras.
- Se apenas 2, 4 e 6 são verdadeiras.
- Se apenas 1, 2 e 3 são verdadeiras.
- Se apenas 4, 5 e 6 são verdadeiras.
- Se todas são verdadeiras.

- Duda folheava um antigo livro de Física quando encontrou a ilustração ao lado.

Curiosa, passou a ler o texto que se encontrava ao lado da figura: "Suponha que o Sol esteja a pino e que a roda gire em movimento circular e uniforme (MCU). A sombra **P** do punho **S**, projetada no chão, efetua então movimento harmônico simples entre os pontos de inversão **A** e **A'**."



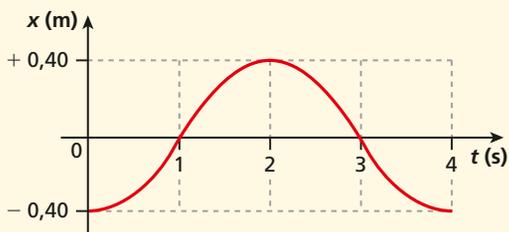
Banco de imagens/Arquivo da editora

A partir do enunciado anterior, podemos afirmar que:

- Tanto o movimento da roda como o da sombra são movimentos oscilatórios.
- O movimento da roda é periódico, mas o movimento da sombra não.
- O período de oscilação da sombra é metade do período do MCU da roda.
- O MCU da roda e o MHS realizado pela sombra do punho **S** possuem o mesmo período.
- A amplitude do MHS da sombra é igual ao diâmetro da roda.

3. No estudo do movimento harmônico simples (MHS) de uma partícula **P**, foram coletados os valores da elongação (x) em função do tempo (t) e, em seguida, plotados em um gráfico conforme a figura abaixo.

Banco de imagens/Arquivo da editora



A partir dos valores encontrados no gráfico, determine:

- a amplitude e o período desse MHS.
- a pulsação e a frequência do MHS.
- no intervalo dado no diagrama, os instantes em que houve inversão do movimento.
- os valores da velocidade escalar e da aceleração escalar máximas.

Resolução:

a) Do gráfico, temos:

$$A = 0,40 \text{ m} \quad \text{e} \quad T = 4 \text{ s}$$

b) Da expressão para a pulsação do MHS, temos:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \therefore \quad \omega = \frac{\pi}{2} \text{ rad/s}$$

E a frequência é:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{4} \text{ s} \Rightarrow f = 0,25 \text{ Hz}$$

c) Houve inversão nos instantes em que a velocidade assume o valor zero. Assim:

$$t_1 = 0, t_2 = 2 \text{ s e } t_3 = 4 \text{ s}$$

d) A velocidade escalar máxima é:

$$v_{\text{máx}} = A\omega$$

$$v_{\text{máx}} = 0,40 \cdot \frac{\pi}{2} \Rightarrow v_{\text{máx}} = 0,20\pi$$

$$v_{\text{máx}} = \frac{\pi}{5} \text{ m/s}$$

E a aceleração escalar máxima é:

$$\alpha_{\text{máx}} = A\omega^2$$

$$\alpha_{\text{máx}} = 0,40 \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \Rightarrow \alpha_{\text{máx}} = \frac{0,40\pi^2}{4}$$

$$\alpha_{\text{máx}} = \frac{\pi^2}{10} \text{ m/s}^2$$

4. No estudo dos movimentos harmônicos simples (MHS), vamos encontrar como exemplo o movimento de uma partícula **S** ao longo de um eixo **Ox**. Ela obedece à seguinte função horária do movimento $x = 3 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ (SI), em que x corresponde à elongação da partícula e t , ao tempo de movimento.

Determine:

- a amplitude, a pulsação e o período desse movimento.
- a frequência e a fase inicial do movimento.
- os valores da velocidade escalar máxima e da aceleração escalar máxima de **S**.
- represente em um diagrama $x = f(t)$ a elongação entre os instantes $t = 0$ e $t = 4$ s.

5. Uma partícula **B** realiza um movimento harmônico simples (MHS) em um segmento de reta horizontal, obedecendo à equação horária $x = 0,3 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$, no SI. Determine:

- a amplitude, a pulsação, o período e a frequência desse MHS.
- a equação da velocidade escalar do MHS em função do tempo.
- a equação da aceleração escalar do MHS em função do tempo.

6. Uma partícula realiza um movimento harmônico simples (MHS) percorrendo um segmento de reta de 1,6 m. Cada oscilação completa demora 4 segundos. Escreva a expressão da elongação (x) em função do tempo (t) para cada uma das condições expressas a seguir e esboce o gráfico correspondente:

- em $t = 0$, a elongação x é igual à amplitude A .
- em $t = 0$, a elongação x é nula e decrescente.
- em $t = 0$, a elongação x é igual a $-A$.
- em $t = 0$, a elongação x é nula e crescente.

Resolução:

Se a trajetória toda mede 1,6 m, a amplitude (A) do MHS vale:

$$A = 0,8 \text{ m}$$

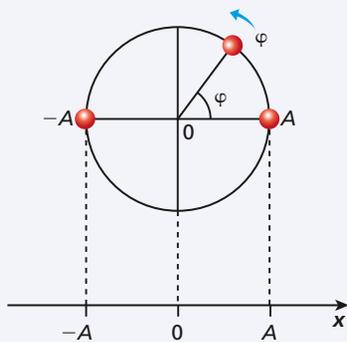
Se o período da oscilação vale 4 s, temos:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4} \therefore \omega = \frac{\pi}{2} \text{ rad/s}$$

A função horária de elongação é expressa por:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

A fase inicial φ_0 na circunferência do MCU que "acompanha" o MHS.



Em $t = 0$:

Se $x = A \Rightarrow \varphi_0 = 0$

Se $x = 0$ e elongação decrescente \Rightarrow

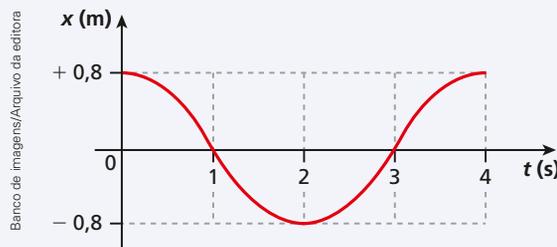
$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

Se $x = -A \Rightarrow \varphi_0 = \pi \text{ rad}$

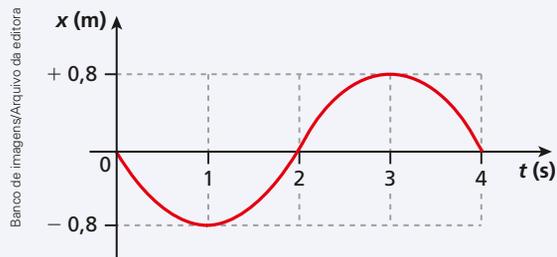
Se $x = 0$ e elongação crescente $\Rightarrow \varphi_0 = \frac{3\pi}{2}$

Assim:

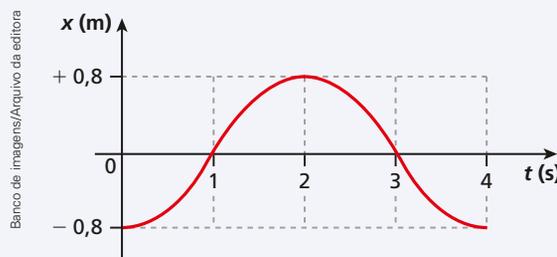
a) $x = 0,8 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ (SI)



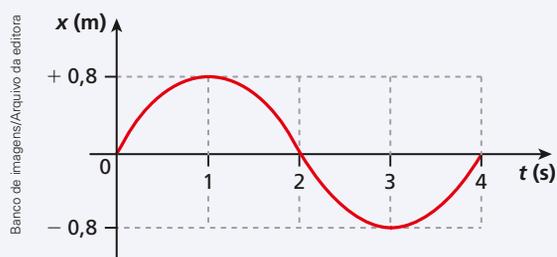
b) $x = 0,8 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{2}\right)$ (SI)



c) $x = 0,8 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + \pi\right)$ (SI)



d) $x = 0,8 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + \frac{3\pi}{2}\right)$ (SI)

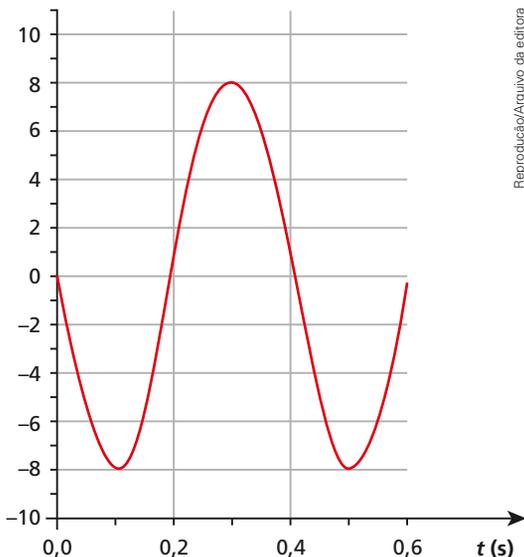


7. Uma partícula se move sobre uma reta, oscilando em MHS, entre as extremidades de um segmento de comprimento igual a 2 metros. A velocidade escalar dessa partícula obedece à expressão $v = -2\pi \sin(2\pi t + \pi)$, com velocidade em m/s e o tempo em segundos.

Determine:

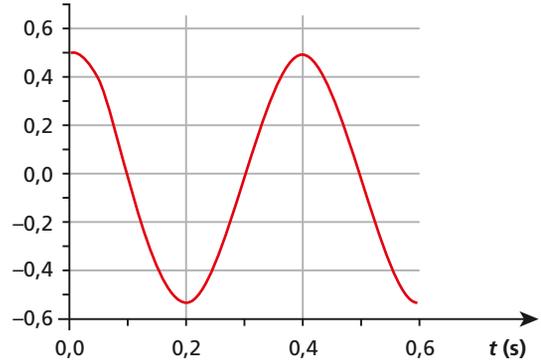
- o período desse movimento;
 - a função horária $x = f(t)$ do MHS;
 - a aceleração do movimento no instante $t = 5$ s.
8. (UPM-SP) Uma partícula realiza um MHS (movimento harmônico simples) segundo a equação $x = 0,2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}t\right)$, no SI. A partir da posição de elongação máxima, o menor tempo que esta partícula gastará para passar pela posição de equilíbrio é:
- 8 s.
 - 4 s.
 - 2 s.
 - 1 s.
 - 0,5 s.
9. (UFG-GO) Os gráficos **A**, **B**, **C** representam, em ordem aleatória, a posição (em m), a velocidade (em m/s) e a aceleração (em m/s^2), em função do tempo (em s), de um corpo executando um movimento harmônico simples, sob a ação de uma força do tipo $F = -kx$.

Gráfico A



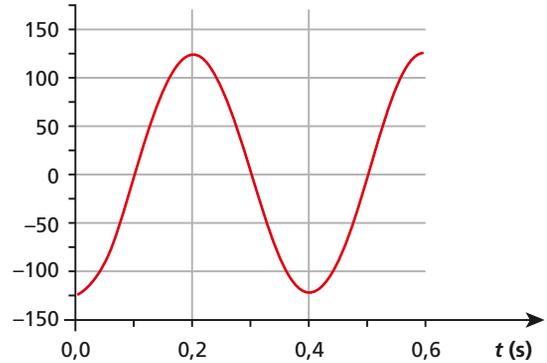
Reprodução/Arquivo da editora

Gráfico B



Reprodução/Arquivo da editora

Gráfico C

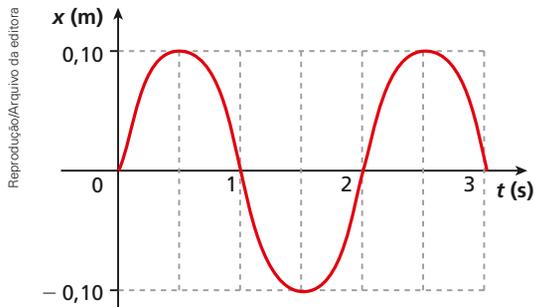


Reprodução/Arquivo da editora

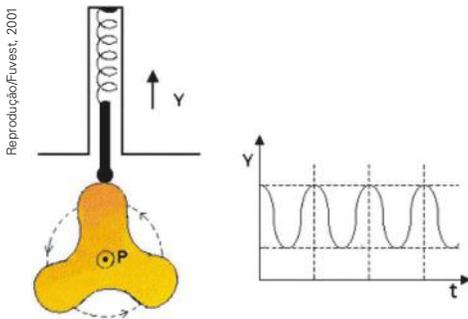
Com base nos gráficos **A**, **B** e **C**:

- identifique qual deles se refere à posição, qual à velocidade e qual à aceleração. Justifique sua resposta.
 - determine o deslocamento máximo do corpo em relação à origem (amplitude) e a frequência desse movimento.
10. Uma partícula executa um MHS entre os pontos A e A' de um segmento retilíneo e horizontal. Ao passar pela posição de equilíbrio O , sua velocidade escalar vale 1 m/s ; e, ao inverter sua posição em A ou A' , o módulo de sua aceleração escalar vale 2 m/s^2 . Determine o período de oscilação dessa partícula.
11. Uma partícula executa um MHS com amplitude igual a 20 cm . A que distância da posição de equilíbrio sua velocidade será 50% da que teria nesse ponto?
12. Uma partícula executa um MHS em uma trajetória retilínea e horizontal. Ao passar pela posição de equilíbrio, sua velocidade escalar tem valor absoluto máximo igual a 30 m/s . Nas posições extremas do movimento, a aceleração escalar assume o máximo valor absoluto igual a 90 m/s^2 . Qual é o valor absoluto de sua velocidade escalar em uma posição $x = 5 \text{ m}$, medido desde o ponto de equilíbrio O ?

13. (Vunesp) A partir do gráfico a seguir, que representa posições ocupadas por um móvel em função do tempo quando oscila em movimento harmônico simples, determine:

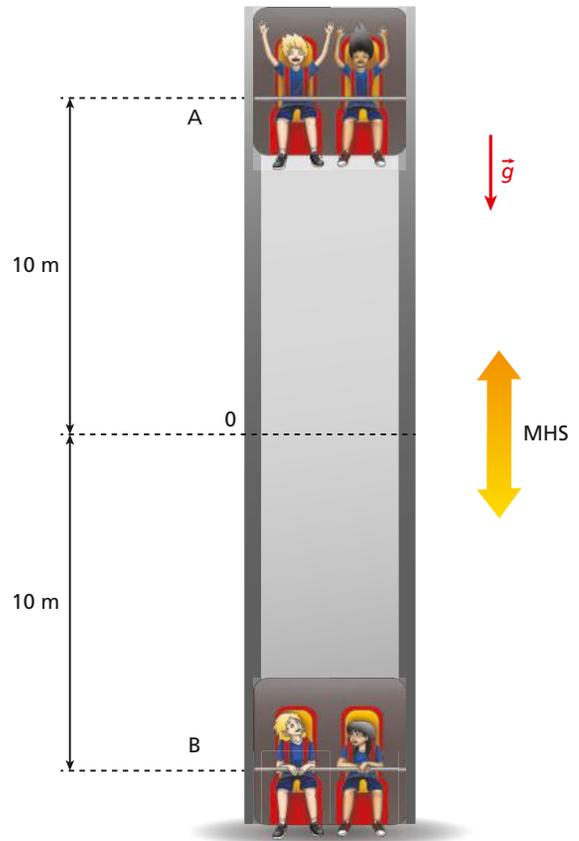


- a) a frequência e a amplitude do movimento;
 b) os instantes, durante os três primeiros segundos, em que a velocidade se anulou.
14. (Fuvest-SP) Uma peça, com a forma indicada, gira em torno de um eixo horizontal **P**, com velocidade angular constante e igual a π rad/s. Uma mola mantém uma haste apoiada sobre a peça, podendo a haste mover-se apenas na vertical. A forma da peça é tal que, enquanto ela gira, a extremidade da haste sobe e desce, descrevendo, com o passar do tempo, um movimento harmônico simples $Y(t)$ como indicado no gráfico. Assim, a frequência do movimento da extremidade da haste será de:



- a) 3,0 Hz.
 b) 1,5 Hz.
 c) 1,0 Hz.
 d) 0,75 Hz.
 e) 0,5 Hz.
15. Uma atração de tirar o fôlego em alguns parques de diversão consiste em uma plataforma horizontal que realiza movimento harmônico simples (MHS) na vertical com amplitude igual a 10 m. As pessoas que se submetem a esse “brinquedo” sentem ausência total de peso quando a plata-

forma inverte o sentido do seu movimento no ponto mais alto, **A**, e detectam um intenso aumento aparente de peso quando a plataforma inverte o sentido do seu movimento no ponto mais baixo, **B**.



Supondo que no local a aceleração da gravidade tenha módulo $g = 10 \text{ m/s}^2$, determine:

- a) o período de oscilação da plataforma;
 b) o valor aparente da aceleração da gravidade percebido pelas pessoas no ponto **B**.
16. (ITA-SP) Uma partícula em movimento harmônico simples oscila com frequência de 10 Hz entre os pontos L e $-L$ de uma reta. No instante t_1 , a partícula está no ponto $\sqrt{3} \frac{L}{2}$, caminhando em direção a valores inferiores, e atinge o ponto $-\sqrt{2} \frac{L}{2}$ no instante t_2 . O tempo gasto nesse deslocamento é:
- a) 0,021 s.
 b) 0,029 s.
 c) 0,15 s.
 d) 0,21 s.
 e) 0,29 s.

9. Força no MHS

Na segunda lei de Newton, vimos que a força aplicada a um corpo de massa m pode provocar como consequência uma aceleração vetorial de módulo a . A expressão que relaciona a intensidade da força com o módulo da aceleração é dada por:

$$F = ma$$

No MHS vimos que a aceleração escalar relaciona-se com a elongação por meio da expressão:

$$a = -\omega^2 x$$

Sendo a a aceleração expressa na segunda lei de Newton, temos:

$$F = -m\omega^2 x$$

Como, para cada MHS, a massa m e a pulsação ω são constantes, podemos fazer o produto $m\omega^2$ igual a K , que chamaremos de **constante de força do MHS**.

Assim, obtemos a relação:

$$F = -Kx$$

Observe que a força do MHS é diretamente proporcional à elongação x de sinal contrário. Isto é, quando a elongação é negativa, a força é positiva e, quando a elongação é positiva, a força assume o sinal negativo. Essa é a característica mais importante para reconhecer se um movimento é ou não um MHS. Note que a força atua sempre para garantir a continuação do movimento (MHS), visto que ela é uma **força restauradora**. Toda vez que o corpo que realiza o MHS passa pela posição central (ponto **0**) a força age para retardar o movimento e trazê-lo de volta ao ponto **0**. Esse ponto **0** determina a **posição de equilíbrio** do MHS. Nesse ponto (**0**) a elongação e a força se anulam, e o corpo passa por essa posição em razão de sua inércia de movimento.

Podemos agora completar a definição de MHS.

Assim, um **movimento** é definido como **MHS** quando seus estados **cinemáticos** (posição, velocidade e aceleração) e **dinâmicos** (força) se repetem periodicamente em uma trajetória retilínea.

10. Período (T) e frequência (f) do MHS

No item anterior determinamos que a constante de força do MHS é dada por

$$K = m\omega^2$$

Mas, anteriormente, vimos que a pulsação do MHS é expressa por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Assim, temos:

$$K = m\omega^2 \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

e:

$$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

É importante observar que o período de um MHS independe da amplitude das oscilações, mas depende da **massa** (m) oscilante e da **constante de força** (K) do MHS.

Como a frequência (f) de oscilação é o inverso do período (T), temos:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

11. Oscilador massa-mola

Os osciladores massa-mola se constituem nos principais exemplos de MHS. Na maioria das vezes em que encontramos um MHS ele será a representação de uma mola oscilando, principalmente, na horizontal ou na vertical.

Oscilador massa-mola na horizontal

Na figura representada ao lado, encontramos um bloco de massa m , inicialmente em repouso, sobre um plano horizontal sem atrito. O bloco encontra-se preso na extremidade de uma mola de massa supostamente desprezível, de constante elástica K . Inicialmente, a mola encontra-se sem deformação.

Na posição indicada na figura, a elongação, a velocidade escalar, a aceleração escalar e a força do MHS são nulos.

Vamos agora afastar o bloco da posição de equilíbrio 0 , deslocando-o para a direita, por exemplo, até uma posição que vamos definir como A .

Considerando nula a influência do ar e que a mola opere em regime de elasticidade perfeita, se soltarmos o bloco, ele vai deslizar pelo plano horizontal até atingir o ponto definido como $-A$, oposto de A em relação à posição de equilíbrio 0 . O bloco passará a executar um movimento oscilatório e periódico no segmento de reta $-AA$, realizando um MHS. Observe que o sistema é conservativo.

Na posição A , a energia potencial elástica armazenada na mola e a energia cinética de movimento do bloco valem:

$$E_p = \frac{KA^2}{2} \quad \text{e} \quad E_c = 0$$

A energia mecânica total do sistema é dada por:

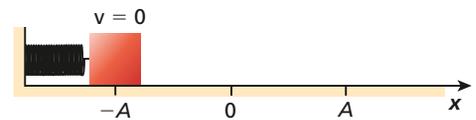
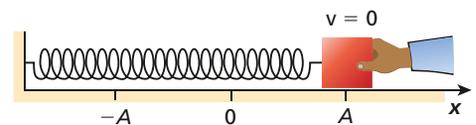
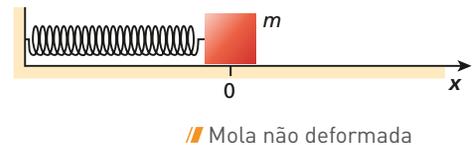
$$E_m = E_p + E_c = \frac{KA^2}{2} + 0$$

Portanto:

$$E_m = \frac{KA^2}{2}$$

Nos pontos A e $-A$, a energia potencial elástica é máxima, e a energia cinética é nula:

$$E_p = \frac{KA^2}{2} \quad \text{e} \quad E_c = 0$$



No ponto de equilíbrio **0**, a energia potencial elástica é nula, e a energia cinética é máxima:

$$E_p = 0 \text{ e } E_c = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{KA^2}{2}$$

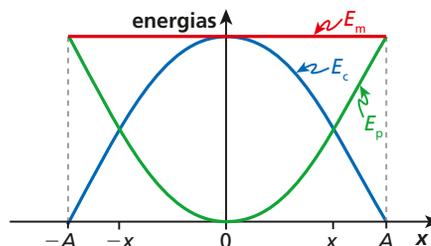
Em uma posição genérica x , as energias são calculadas por:

$$E_p = \frac{Kx^2}{2} \text{ e } E_c = \frac{mv^2}{2}$$

É importante observar que, em qualquer ponto do MHS, a energia mecânica total é constante, já que o sistema é conservativo.

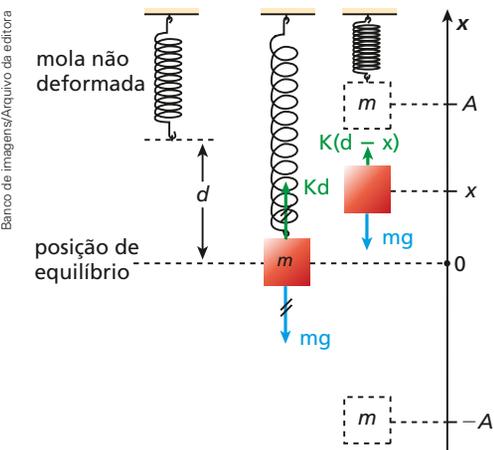
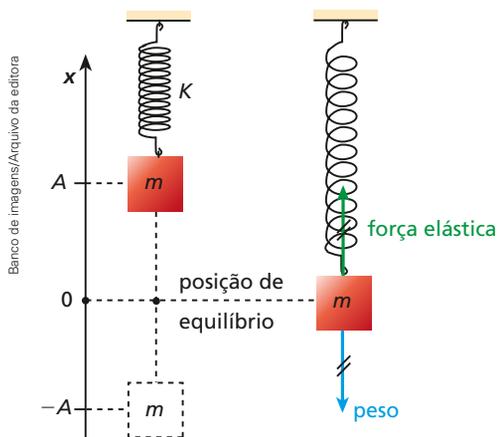
$$E_m = \frac{KA^2}{2}$$

Representando graficamente essas energias, obtemos:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Oscilador massa-mola na vertical



Consideremos uma mola de constante elástica K e condições ideais (ausência de resistência do ar e mola em regime de elasticidade perfeita). Ao prender a mola no teto de uma sala, o bloco de massa m vai oscilar na vertical.

No ponto de equilíbrio **0**, a força resultante no bloco é nula, no entanto a mola permanece deformada. A força do MHS, nesse caso, corresponde à soma vetorial das forças peso e elástica aplicadas no bloco. Observe que no ponto **0** a mola encontra-se deformada, portanto a força elástica não é nula; ela tem como intensidade o mesmo valor do módulo da força peso, resultando em uma soma vetorial nula. Como a mola se encontra deformada na posição de equilíbrio, é fácil perceber que, ao contrário do oscilador massa-mola horizontal, a elongação do MHS não corresponde à deformação da mola.

Para provar que esse movimento é um MHS, vamos representar uma situação genérica desse movimento:

Na posição genérica representada na figura, a intensidade da resultante das forças que agem no bloco vale:

$$F = K(d - x) - mg$$

$$F = Kd - Kx - mg$$

Mas, na posição de equilíbrio **0**, vimos que a força resultante valia zero e que as forças peso e elástica tinham a mesma intensidade. Daí:

$$Kd = mg$$

Assim, substituindo na expressão acima, temos:

$$F = mg - Kx - mg$$

e:

$$F = -Kx$$

Essa força proporcional ao deslocamento do corpo e com sentido contrário ao movimento é a força característica de um MHS. Portanto, esse movimento vertical que acabamos de estudar é um movimento harmônico simples (MHS).

Como a constante de força continua sendo a constante elástica da mola K , o período de oscilação continua sendo calculado pela expressão:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

Ampliando o olhar

Como determinar a massa de um astronauta?

Aqui na Terra quase tudo que o fazemos exige esforço muscular. Portanto, sempre estamos “trabalhando” alguns músculos. No entanto, quando um astronauta está viajando por regiões onde a gravidade é próxima de zero (microgravidade) ou não proporciona a sensação de peso (como nas espaçonaves em órbita ao redor da Terra), ele precisa fazer certos exercícios físicos, pois sua massa muscular diminuirá em virtude da atrofia das fibras.

Nesse caso, um rígido controle da massa muscular do astronauta deve ser feito. Mas como fazê-lo? Uma balança como a que usamos aqui na Terra não funciona no espaço.

Para resolver esse problema, os engenheiros da Nasa desenvolveram um dispositivo denominado Body Mass Measurement Device (BMMD), que em português significa Aparelho que Mede a Massa do Corpo.

Esse dispositivo consiste em uma cadeira presa a uma mola. O astronauta senta-se, então, nela, e o conjunto astronauta e BMMD vai oscilar. O número de oscilações completas, dividido pelo intervalo de tempo, corresponde à frequência de oscilação do sistema. O período de oscilação é o inverso da frequência.

Com o período de oscilação determinado, podemos obter a massa total do sistema.

Essa massa é a soma das massas do astronauta mais a massa da cadeira (conhecida).

O conjunto astronauta + BMMD é o conhecido sistema massa-mola.

Para determinação diária da massa do astronauta, podemos utilizar a equação obtida anteriormente que relaciona o período de oscilação com a massa do corpo:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}$$

em que $M = m_c + m_a$.

Assim, sendo conhecida a massa da cadeira (m_c) e a constante K da mola, podemos obter a massa (m_a) do astronauta:

$$m_a = \frac{T^2 K}{4\pi^2} - m_c$$



Reprodução/NASA

// Body Mass Measurement Device (BMMD), aparelho em forma de cadeira projetado por engenheiros da Nasa para monitorar as perdas de massa corpórea dos astronautas. Na fotografia, a astronauta Karen Nyberg realiza atividades de monitoramento e medição de massa.

Pontes que balançam

Osciladores são de grande importância na construção civil, pois podem ser utilizados para estabilizar edificações. Um ótimo exemplo é a ponte Rio-Niterói, com seus 13,3 km de extensão. Devido a ventos muito fortes, com registros de até 60 km/h, o fluxo na ponte era costumeiramente interdito, pois esses ventos resultavam em oscilações com amplitudes de 1 m.

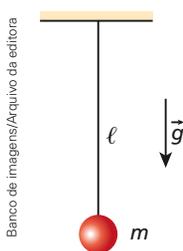
Em 1980, motoristas chegaram a abandonar seus veículos na ponte. Para diminuir a aflição dos usuários, o Instituto de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desenvolveu um sistema para reduzir a amplitude de oscilação da ponte. Esse sistema, constituído de uma caixa com molas, que se comportam como osciladores harmônicos, foi instalado no vão central da ponte em 2004. Com isso, as oscilações da ponte foram reduzidas em 80%, diminuindo a sensação de desconforto dos motoristas e aumentando a resistência da ponte em relação a tensões na sua estrutura.



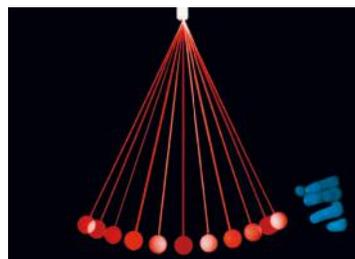
Lightfoccker/Getty Images

12. Pêndulo simples

Entende-se como pêndulo simples o conjunto de uma massa m presa à extremidade de um fio inextensível que oscila em torno de um ponto fixo.



Banco de imagens/Arquivo da editora



Visuals Unlimited/Getty Images

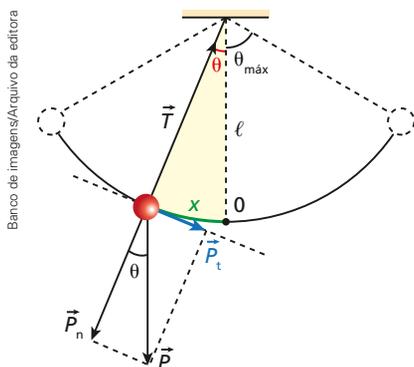
O movimento oscilatório desse corpo não é rigorosamente um MHS. No entanto, para pequenos ângulos θ de oscilação, esse movimento se aproxima muito de um MHS. A condição para que essa aproximação seja válida é:

$$\theta_{\text{máx}} \leq 10^\circ$$

Nesse intervalo, de 0° a 10° , o valor do ângulo em radianos e seu seno são praticamente iguais. Assim, quando trabalharmos com oscilações pendulares como sendo MHS, estaremos considerando essa condição especial.

Consideremos uma massa pendular que foi afastada de sua posição de equilíbrio (dentro das condições especiais) e posta a oscilar.

As forças que atuam na massa pendular é o seu peso (\vec{P}) e a tração no fio (\vec{T}). A resultante dessas forças corresponde à componente tangencial da força peso (\vec{P}_t), que, nesse caso, é a força restauradora.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Assim:

$$P_t = mg \sin \theta$$

O ângulo θ em radianos é definido por:

$$\theta = \frac{x}{\ell}$$

Valendo a relação:

$$P_t = mg \sin \frac{x}{\ell}$$

Percebemos que rigorosamente esse movimento não é um MHS, pois a força restauradora \vec{P}_t não é diretamente proporcional à elongação x , mas sim ao seno de x . No entanto, na situação especial, para pequenos ângulos θ (menores que 10°), podemos substituir o seno pelo próprio ângulo em radianos.

$$P_t = mg\theta = mg \frac{x}{\ell}$$

Sendo constantes os valores de m , g e ℓ , podemos fazer:

$$K = \frac{mg}{\ell}$$

E o módulo P_t da força restauradora pode ser expresso por:

$$P_t = Kx$$

Agora, sim, a força restauradora \vec{P}_t é diretamente proporcional à elongação x , e o movimento pode ser aproximado ao de um MHS. Novamente, isso só vale para pequenos ângulos de oscilação.

Como o período (T) de oscilação de um MHS é muito importante no estudo desse movimento, vamos obter a equação do cálculo desse período para um pêndulo oscilante.

Sabemos que, em um MHS, o período é determinado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$$

e:

$$K = \frac{mg}{\ell}$$

Relacionando essas duas expressões, obtemos:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\frac{mg}{\ell}}}$$

Finalmente:

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

Observemos que essa relação somente é válida para pequenos ângulos de oscilação (até 10°) e que esse período não depende da massa pendular m .

Um túnel atravessando a Terra

No imaginário coletivo existe aquela pergunta: Se fizéssemos um túnel atravessando a Terra e saltássemos para dentro dele, o que aconteceria? Em 1864, o escritor francês Júlio Verne publicou o famoso livro de ficção científica *Viagem ao centro da Terra*. Nele, Verne descreveu como seria o movimento de um corpo que caísse nesse túnel. Segundo ele, a atração gravitacional aumentaria até o centro da Terra, quando cessaria subitamente. Hoje sabemos que Verne errou.

Se um corpo caísse nesse túnel, seria atraído pela massa da Terra que estivesse na esfera de raio r , distância entre a posição em que o corpo se encontra e o centro da Terra. Isto é, a força gravitacional diminuiria à medida que o corpo se aproximasse do centro do nosso planeta. Ele passaria pelo centro, onde a força gravitacional vale zero, devido à sua inércia de movimento. Na segunda metade do túnel, a força de atração gravitacional se inverteria, retardando o movimento, até o corpo chegar à abertura do poço, do outro lado. Na sequência, o corpo voltaria a descer o túnel, repetindo o movimento. Ele ficaria oscilando entre as duas aberturas do túnel em um movimento harmônico simples (MHS).

Obviamente, essa é uma situação teórica, com condições idealizadas, como a ausência de resistência do ar e a distribuição uniforme da massa da Terra (o que não ocorre). Além disso, o núcleo do nosso planeta tem o magma líquido e um centro sólido ainda desconhecido.

Para provar que esse movimento é um MHS, vamos analisar a força gravitacional (peso) que provoca essa oscilação:

$$F_g = P = mg$$

Mas:

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

em que M é a massa da Terra e r , o raio (e também a elongação do MHS). No início $r = R$, em que R é o raio da Terra.

À medida que o corpo cai, g muda de valor, diminuindo, pois a massa M_i diminui, e o raio r também diminui. O valor de g_i (g no interior da Terra), vale:

$$g_i = \frac{GM_i}{r^2}$$

Sendo $\mu = M/V$ a densidade da Terra, temos:

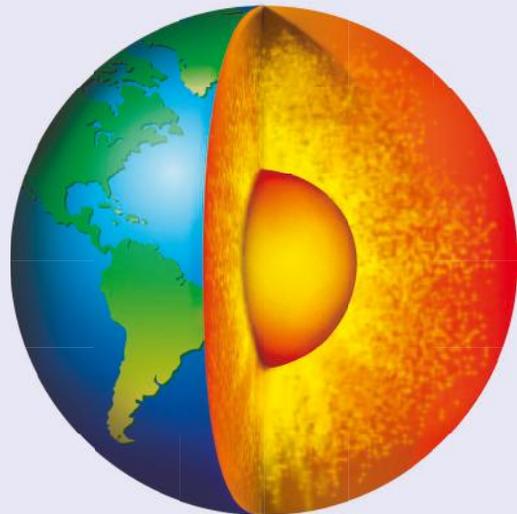
$$g_i = \frac{G}{r^2} \mu V_i = \frac{G}{r^2} \mu \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \Rightarrow g_i = \frac{4G\pi r}{3} \mu = \frac{4G\pi r}{3} \cdot \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} \Rightarrow g_i = \frac{GM}{R^3} r$$

$$F_g = m \frac{GM}{R^3} r \Rightarrow F_g = Kr$$



Ilustrações: Reprodução/Arquivo da editora

Imagem com elementos fora de escala.



Observe que m é a massa do corpo, G é a constante gravitacional, M é a massa total da Terra e R é o raio da Terra, e todos são constantes. Assim, a força gravitacional é diretamente proporcional a r , que corresponde à elongação do MHS, a distância do corpo até o centro do nosso planeta.

Quanto tempo ele levaria para realizar essa travessia?

A travessia corresponde somente ao tempo de ida, portanto metade do período do MHS. Assim, o período é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

e, a constante K , valendo:

$$K = \frac{GMm}{R^3}$$

Assim, temos:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

Como:

$$R = 6400 \text{ km} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

$$\pi = 3,14$$

$$M = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Vem:

$$T = 84 \text{ min } 44 \text{ s}$$

Portanto, a travessia seria feita na metade desse tempo:

$$\Delta t = 42 \text{ min } 22 \text{ s}$$

E se fizéssemos outro túnel, paralelo a esse, que não passasse pelo centro da Terra, quanto tempo levaria a travessia?

Observe que a abscissa x é dada por $x = r \sin \theta$ e a força ao longo do eixo x por:

$$F_x = F_g \sin \theta = \frac{GMm}{R^3} r \sin \theta \Rightarrow F_x = \frac{GMm}{R^3} x$$

Portanto, a constante K do MHS assume o mesmo valor:

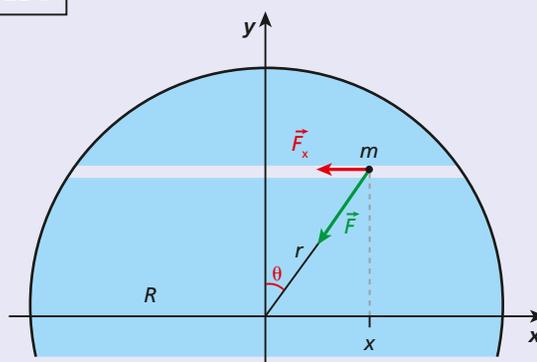
$$K = \frac{GMm}{R^3}$$

E o período desse movimento é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

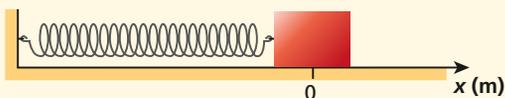
Ou seja, o tempo de travessia seria igual, independentemente do túnel que escavássemos através da Terra.

$$\Delta t = 42 \text{ min } 22 \text{ s}$$



17. Em um arranjo massa-mola horizontal, um **ER** bloco de massa 4 kg encontra-se em repouso sobre um plano horizontal, perfeitamente liso (sem atrito), preso à extremidade de uma mola inicial de constante elástica igual a 100 N/m.

Banco de imagens/
Arquivo da editora



O bloco é empurrado comprimindo a mola em 20 cm e abandonado. Ele passa então a oscilar, realizando um movimento harmônico simples (MHS).

Banco de imagens/
Arquivo da editora



Utilizando esses dados, determine:

- o período de oscilação do MHS;
- o valor da energia mecânica total desse sistema oscilatório;
- a representação gráfica da energia mecânica total, da energia potencial e da energia cinética em função da elongação (x);
- a representação gráfica da intensidade da força F resultante do MHS em função da elongação (x).

Resolução:

- a) A expressão do período de oscilação de um sistema massa-mola é:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{4}{100}} = 2\pi\frac{2}{10}$$

$$\boxed{T = 0,4\pi \text{ s}}$$

- b) A energia mecânica total do sistema massa-mola é determinada por:

$$E_m = \frac{kA^2}{2} \Rightarrow E_m = \frac{100 \cdot (0,2)^2}{2}$$

$$\boxed{E_m = 2 \text{ J}}$$

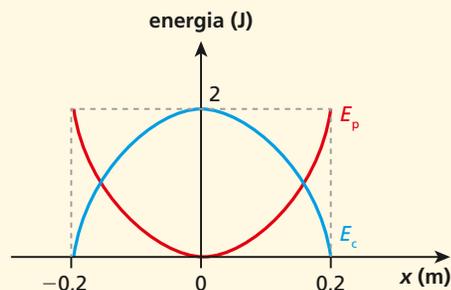
- c) A energia potencial é determinada por:

$$E_p = \frac{kx^2}{2} \Rightarrow E_p = 50x^2$$

A energia cinética:

$$E_c = E_m - E_p \Rightarrow E_c = 2 - 50x^2$$

Assim, graficamente:



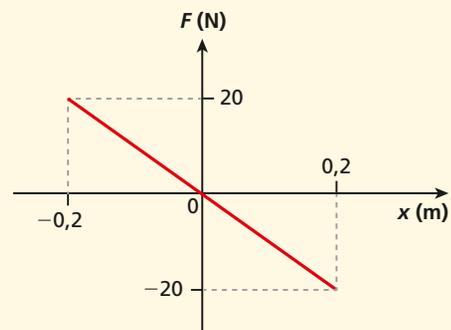
Banco de imagens/Arquivo da editora

- d) A intensidade da força:

$$F = -kx$$

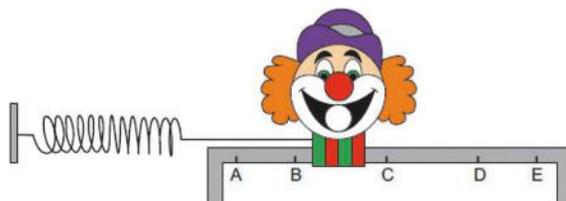
$$F = -100x$$

Assim, o gráfico respectivo é dado por:



Banco de imagens/Arquivo da editora

- 18.** (Unesp-SP) Em um parque de diversões, existe uma atração na qual o participante tenta acertar bolas de borracha na boca da figura de um palhaço, que, presa a uma mola ideal, oscila em movimento harmônico simples entre os pontos extremos **A** e **E**, passando por **B**, **C** e **D**, de modo que em **C**, ponto médio do segmento **AE**, a mola apresenta seu comprimento natural, sem deformação.



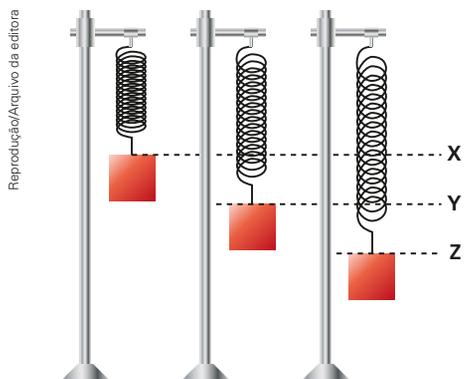
Reprodução/Unesp, 2016

Uma pessoa, ao fazer suas tentativas, acertou a primeira bola quando a boca passou por uma posição em que o módulo de sua aceleração é máxi-

mo acertou a segunda bola quando a boca passou por uma posição em que o módulo de sua velocidade é máximo. Dos pontos indicados na figura, essas duas bolas podem ter acertado a boca da figura do palhaço, respectivamente, nos pontos

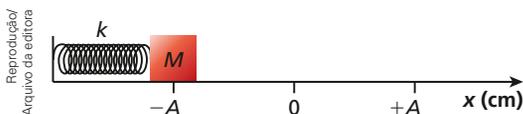
- a) **A e C.** c) **C e D.** e) **B e C.**
 b) **B e E.** d) **E e B.**

19. (Vunesp) Um objeto preso a uma mola é colocado em oscilação na direção vertical, entre os pontos **X** e **Z**, como mostra a figura. O ponto **Y** é o ponto no qual a força resultante no objeto é nula.



Durante o movimento de oscilação, em certos instantes, a energia cinética é nula e a energia potencial elástica é máxima. Essa condição ocorre

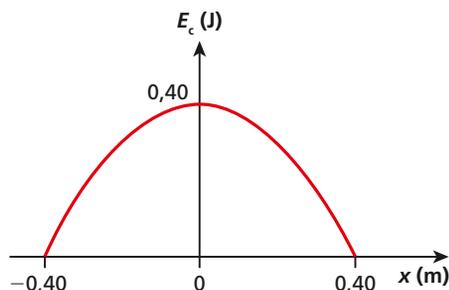
- a) nos pontos **X e Z.**
 b) no ponto **X**, apenas.
 c) nos pontos **Y e Z.**
 d) no ponto **Z**, apenas.
 e) no ponto **Y**, apenas.
20. (Efomm-RJ) O bloco de massa M da figura é, em $t = 0$, liberado do repouso na posição indicada ($x = -A$) e a seguir executa um MHS com amplitude $A = 10$ cm e período de 1,0 s.



No instante $t = 0,25$ s, o bloco se encontra na posição onde:

- a) a energia mecânica é o dobro da energia cinética.
 b) a energia mecânica é o dobro da energia potencial elástica.
 c) a energia cinética é o dobro da energia potencial elástica.
 d) a energia mecânica é igual à energia potencial elástica.
 e) a energia mecânica é igual à energia cinética.

21. (FGV-RJ) Uma esfera de aço, de pequenas dimensões, suspensa por uma mola ideal a um suporte, oscila harmonicamente na vertical em torno de sua posição de equilíbrio. A figura representa como a energia cinética da esfera varia em função do afastamento x em relação à posição de equilíbrio.



A constante elástica da mola vale

- a) 2,0 N/m
 b) 4,0 N/m
 c) 5,0 N/m
 d) 10,0 N/m
 e) 25,0 N/m

22. Em uma aula de Física, Maria Clara construiu **ER** um pêndulo simples. Ela cortou um pedaço de barbante de comprimento L , prendeu em sua extremidade uma esfera de massa 500 g e fixou a outra no teto da sala de aula. Provocando oscilações de pequenas amplitudes, mediu o período, 1,2 s. Desprezando influências do ar, fazendo $\pi = 3$ e aproximando o valor de g para 10 m/s^2 , determine o comprimento L da haste desse pêndulo.

Resolução:

O período de oscilação de um pêndulo não depende da massa pendular e é dado por:

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

Assim, substituindo-se os valores encontrados no texto, temos:

$$1,2 = 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{L}{10}}$$

$$0,2 = \sqrt{\frac{L}{10}} \Rightarrow 0,04 = \frac{L}{10}$$

$L = 0,4 \text{ m} = 40 \text{ cm}$

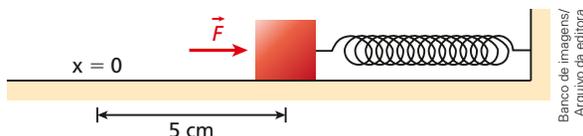
23. A Lua é o único satélite natural na Terra. Seu diâmetro é 27% do diâmetro do nosso planeta, e sua massa é 81 vezes menor. Isso faz com que a aceleração da gravidade em sua superfície seja $1/6$ da terrestre. Um sistema massa-mola vertical é colocado a oscilar aqui na Terra e o faz demorando T segundos para realizar uma oscilação completa. Colocado a oscilar na superfície da Lua, o período de oscilação desse mesmo sistema é igual a T' . Na comparação, T' é igual, maior ou menor que T ?

24. Durante uma aula de Física, um grupo de alunos realizou um experimento utilizando um pêndulo simples de haste 40 cm existente no laboratório. Cronometrou o tempo decorrido para 20 oscilações, encontrando Δt . Usando $g = 10 \text{ m/s}^2$ e fazendo $\pi = 3$, determine o intervalo de tempo Δt encontrado.

25. Se o comprimento de um pêndulo for aumentado de 2 m, seu período triplica. Qual é o comprimento da haste desse pêndulo?

Exercícios Nível 2

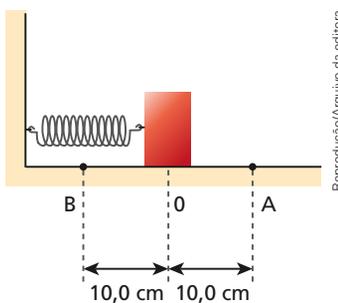
26. Um bloco de massa 500 g está fixo na extremidade de uma mola, de constante elástica igual a 18 N/m, e desliza sem atrito sobre uma superfície horizontal. No instante $t = 0$, a mola está comprimida e é liberada, passando a oscilar em MHS.



Determine a equação da posição e a da velocidade desse bloco.

27. Um pequeno bloco encontra-se preso à extremidade de uma mola vertical. O bloco inicialmente está em sua posição de equilíbrio, quando é deslocado 4 cm para baixo. Sua aceleração inicial é igual a $0,16 \text{ m/s}^2$ dirigida para cima. Se o bloco realiza um MHS, determine a equação de seu movimento.

28. (UPM-SP) Um corpo de 250 g de massa encontra-se em equilíbrio, preso a uma mola helicoidal de massa desprezível e constante elástica k igual a 100 N/m, como mostra a figura acima. O atrito entre as superfícies em contato é desprezível. Estica-se a mola, com o corpo, até o ponto **A**, e abandona-se o conjunto nesse ponto, com velocidade zero.



Em um intervalo de 1,0 s, medido a partir desse instante, o corpo retornará ao ponto **A**:

- a) uma vez.
- b) duas vezes.
- c) três vezes.
- d) quatro vezes.
- e) seis vezes.

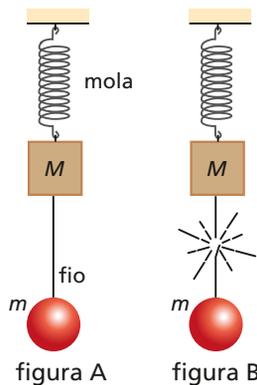
29. (UFRGS-RS) Dois corpos de massas diferentes, cada um preso a uma mola distinta, executam movimentos harmônicos simples de mesma frequência e têm a mesma energia mecânica. Nesse caso:

- a) o corpo de menor massa oscila com menor período.
- b) o corpo de menor massa oscila com maior período.
- c) os corpos oscilam com amplitudes iguais.
- d) o corpo de menor massa oscila com menor amplitude.
- e) o corpo de menor massa oscila com maior amplitude.

30. Ao suspender um bloco de 10 kg pela extremidade de uma mola, ela estica de 6,25 cm. Usando essa mesma mola, presa no teto de uma sala, penduramos outro bloco de 16 kg. Ao tirar da posição de equilíbrio o novo bloco, a mola passa a oscilar em MHS. Qual é o período de oscilação desse MHS ($g = 10 \text{ m/s}^2$)?

31. Um pequeno bloco de massa m oscila em MHS preso à extremidade de uma mola ideal. As oscilações ocorrem em um plano horizontal, sem atrito. O período de oscilações é igual a 2 s. Se, entretanto, aumentarmos mais 2 kg na massa do bloco, seu novo período de oscilação será igual a 3 s. Qual é a massa m inicial desse bloco?

32. Um sistema massa-mola vertical é constituído por uma mola ideal de constante elástica igual a 100 N/m , um bloco de massa M e uma esfera de massa m , desconhecidas. Na situação da figura **A**, o conjunto oscila com período igual a $0,6\pi$ segundos. Em um determinado instante, o fio que une os corpos é cortado, como pode ser observado na figura **B**. O conjunto massa-mola vai agora oscilar com período igual a $0,4\pi$ segundos. Utilizando os dados da questão, determine a massa M do bloco e a massa m da esfera.

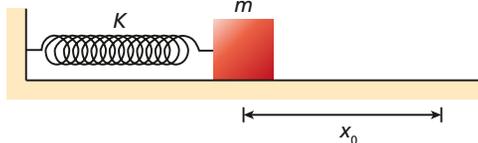


Banco de imagens/Arquivo da editora

33. (UFMS) Uma partícula executa um movimento harmônico simples ao longo do eixo x e em torno da origem O . Sua amplitude é A e seu período é $4,0 \text{ s}$. É correto afirmar:
- (01) A velocidade da partícula é nula quando $x = \pm A$.
 - (02) A frequência do movimento é $0,25 \text{ Hz}$.
 - (04) A aceleração da partícula é nula quando $x = \pm A$.
 - (08) A energia cinética da partícula no ponto $x = 0$ é nula.
 - (16) A energia mecânica total da partícula é igual à sua energia potencial quando $x = \pm A$.
 - (32) O módulo da força resultante na partícula é proporcional ao módulo de seu deslocamento em relação à origem.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

34. A figura mostra um sistema massa-mola sobre uma superfície horizontal sem atrito. Estica-se a mola de uma distância x_0 .



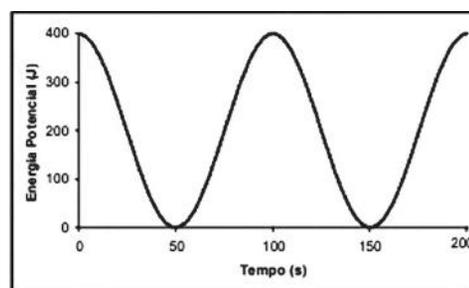
Banco de imagens/Arquivo da editora

Imediatamente, a massa é solta e passa a descrever um movimento harmônico simples MHS. Indique a afirmativa incorreta.

- a) A força resultante sobre o bloco é diferente de zero em todos os pontos da trajetória.
- b) A velocidade do bloco, nos extremos do movimento harmônico simples, é nula.

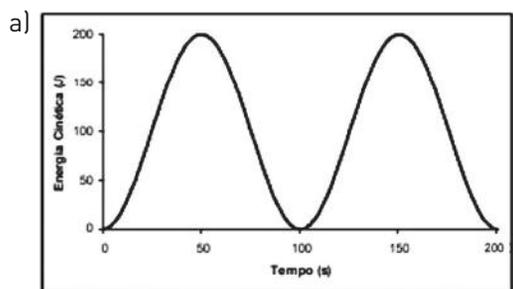
- c) A energia mecânica total do bloco não depende da sua massa.
- d) A frequência angular do MHS é $\sqrt{\frac{K}{m}}$.
- e) Se existir atrito com a superfície, o bloco não descreverá movimento harmônico simples.

35. (UFPB) Uma forma de se obter energia elétrica limpa é aproveitar o movimento ondulatório das ondas marítimas. Nesse sentido, considere que um objeto flutuando sobre o mar realiza movimento harmônico simples com sua energia potencial descrita pelo gráfico abaixo.

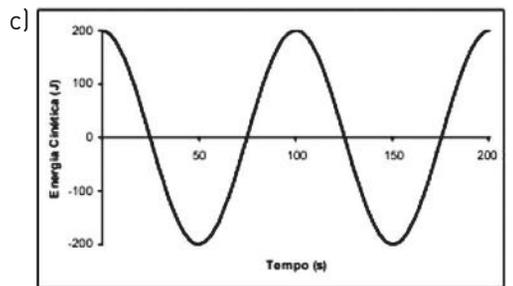
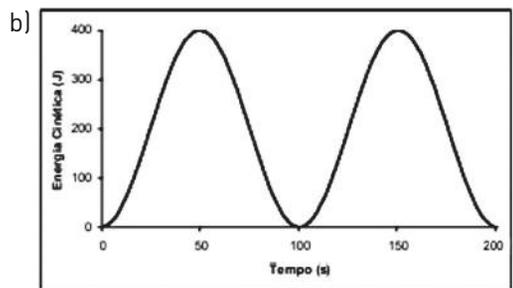


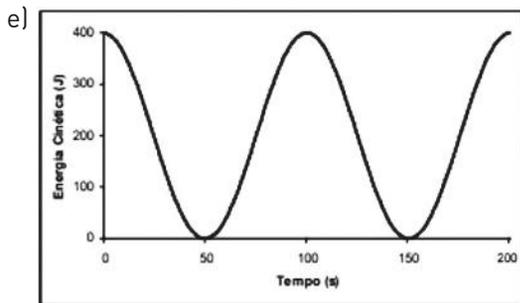
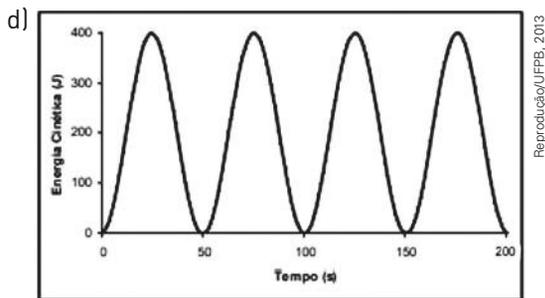
Reprodução/UFPB, 2013

Nessas condições, a variação da energia cinética desse objeto em função do tempo está melhor representada no gráfico:

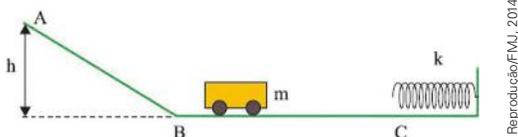


Reprodução/UFPB, 2013



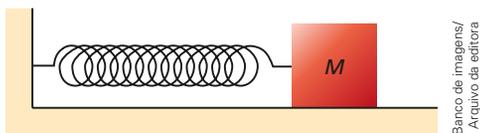


36. (FMJ-SP) Em um conjunto de pistas retilíneas e lisas, como mostra a figura, um carro, de massa $m = 500 \text{ kg}$, partiu do repouso no ponto **A** e deslizou até engatar em **C**, numa mola elástica de constante $k = 2 \cdot 10^3 \text{ N/m}$. Ao passar por **B**, sua velocidade era $v = 10 \text{ m/s}$ e, uma vez preso à mola, passou a descrever um movimento harmônico simples (MHS) em torno de **C**. A aceleração da gravidade local é de 10 m/s^2 .



- a) Determine a altura h , em relação ao plano **BC**, de onde o carro partiu.
 b) Calcule, em segundos, o período de oscilação do MHS executado pelo carro.
 Adote $\pi = 3$.

37. O sistema oscilante mostrado na figura realiza um MHS com amplitude 20 cm , período $T = 2 \text{ s}$ e massa $M = 20 \text{ g}$.

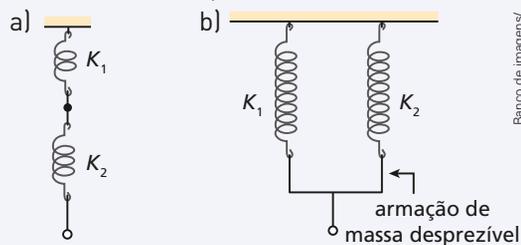


Não há atrito entre o bloco e o plano horizontal. Determine a energia potencial armazenada na mola no instante em que ela é igual à energia cinética do bloco. Considerar $\pi^2 = 10$.

38. (Efm-RJ) Um pequeno bloco de massa $0,50 \text{ kg}$ está suspenso por uma mola ideal de constante elástica 200 N/m . A outra extremidade da mola está presa ao teto de um elevador que, inicialmente, conduz o sistema mola/bloco com uma velocidade de descida constante e igual a $2,00 \text{ m/s}$. Se, então, o elevador parar subitamente, a partícula irá vibrar com uma oscilação de amplitude, em centímetros, igual a

- a) 2,00 c) 8,00 e) 13,0
 b) 5,00 d) 10,0

39. Molas podem ser associadas em série e em **ER** paralelo. A seguir encontramos as duas situações. Determine a constante elástica equivalente à associação em cada caso.



Resolução:

- a) Na primeira situação encontramos as duas molas associadas em série. Quando aplicamos na extremidade da segunda mola uma força de intensidade F , a primeira mola também fica sujeita a uma força de mesma intensidade F . Assim, a mola K_1 vai se alongar x_1 e a mola K_2 , x_2 . A mola equivalente vai se alongar à soma das elongações das molas individualmente.

$$x_{eq} = x_1 + x_2$$

Mola equivalente:

$$F = K_{eq} x_{eq} = K_{eq} (x_1 + x_2)$$

Lembrando que:

$$x_1 = \frac{F}{K_1} \text{ e } x_2 = \frac{F}{K_2}$$

Temos:

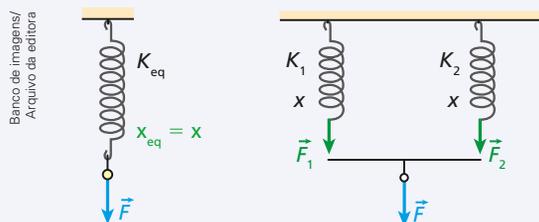
$$F = K_{eq} \left(\frac{F}{K_1} + \frac{F}{K_2} \right) \Rightarrow \boxed{\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}}$$

Para duas molas, vale a relação:

$$\boxed{K_{eq} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}}$$

b) Na segunda associação encontramos as molas em paralelo, uma ao lado da outra. Neste caso, aplicamos uma força de intensidade F nas extremidades das molas, de modo que as duas sejam alongadas igualmente de x .

A mola equivalente é aquela que sofre a mesma deformação x quando recebe a força de intensidade F .



Assim, vale a relação:

$$F_1 + F_2 = F \Rightarrow F = (K_1 + K_2)x$$

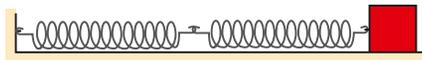
Na mola equivalente, temos:

$$F = K_{eq}x$$

Portanto:

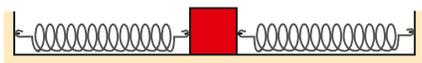
$$K_{eq} = K_1 + K_2$$

40. Para realizar um experimento, Maria Eduarda recebeu duas molas idênticas e um pequeno bloco de massa M . Associou as molas em série, prendeu o bloco em uma das extremidades.



A partir das molas relaxadas, puxou o bloco e deixou-o oscilar. Determinou a frequência achando o valor f_1 .

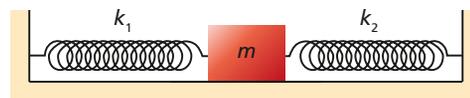
Em seguida, associou as molas de forma diferente, veja a figura dada a seguir.



Novamente, partindo da situação de molas relaxadas, puxou o bloco para o lado direito, soltou-o, deixando-o oscilar. O cálculo da nova frequência forneceu o valor f_2 .

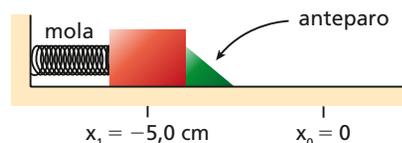
Determine a razão $\frac{f_1}{f_2}$.

41. (Unicube-MG) A figura abaixo mostra uma massa m presa por duas molas harmônicas de constantes elásticas respectivamente iguais a k_1 e k_2 , com $k_1 > k_2$.



Desprezando-se os atritos e o efeito do ar, determine o período de oscilação do sistema.

42. (IFSC) Um bloco de massa 4,5 kg está em repouso sobre um plano horizontal sem atrito e preso a uma mola que exerce uma força $F = -kx$, com $k = 200$ N/m e x em metros medido a partir da posição de equilíbrio da mola (x_0). Inicialmente, a mola encontra-se comprimida com o bloco em repouso na posição $x_1 = -5,0$ cm, o sistema permanece estático pela ação de um anteparo (vide figura abaixo).



Ao ser retirado o anteparo, o sistema entra em movimento. A velocidade escalar do bloco ao passar pela posição de equilíbrio da mola é, em módulo, igual a:

- a) $\left(\frac{1}{2}\right)$ m/s c) $\left(\frac{1}{3}\right)$ m/s e) $\left(\frac{1}{6}\right)$ m/s
 b) $\left(\frac{1}{8}\right)$ m/s d) $\left(\frac{1}{5}\right)$ m/s

43. (OBF) Um menino se pendura por meio de uma corda de 8 m de extensão a um galho de árvore. Nessa situação ele oscila descrevendo um arco de 30 cm de comprimento. São feitas três afirmações a respeito do evento:

- I. Se ele passar a oscilar segundo um arco de 60 cm, o período das oscilações dobrará.
- II. Se o menino tivesse uma massa duas vezes maior do que a que efetivamente tem, o período de oscilação ficaria reduzido à metade.
- III. Se o comprimento da corda for reduzido à metade, o período de oscilação ficará cerca de duas vezes maior.

Destas afirmações é possível concluir que:

- a) nenhuma das três está correta.
- b) apenas a afirmação I é correta.
- c) apenas as afirmações I e II são corretas.
- d) somente a afirmação III é correta.
- e) apenas as afirmações II e III são corretas.

44. Considere o planeta Terra como uma esfera perfeita de massa M e raio R . Determinado pêndulo tem período de oscilação de 12 s quando se encontra na sua superfície. Leva-se esse pêndulo a uma altura, em relação à superfície do nosso planeta, de $\frac{R}{4}$. Ao ser colocado para oscilar, qual será seu novo período?
45. No laboratório de Física da escola existe um pêndulo que "bate o segundo". Qual é o comprimento aproximado da sua haste se $\pi^2 = 9,8$? Se esse pêndulo fosse levado a um lugar onde a aceleração da gravidade g é um quarto do valor aqui na Terra, qual seria seu novo período de oscilação? ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
46. (UFRGS-RS) Um pêndulo foi construído com um fio leve e inextensível com 1,6 m de comprimento; uma das extremidades do fio foi fixada e na outra pendurou-se uma pequena esfera de chumbo cuja massa é 60 g. Esse pêndulo foi colocado para oscilar no ar, com amplitude inicial de 12 cm. A fre-

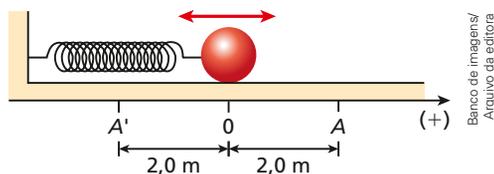
quência medida para esse pêndulo foi aproximadamente 0,39 Hz. Suponha agora que se possa variar a massa (M), a amplitude (A) e o comprimento do fio (L).

Qual das seguintes combinações dessas três grandezas permite, aproximadamente, a duplicação da frequência?

- a) $L = 6,4 \text{ m}$; $A = 12 \text{ cm}$; $M = 60 \text{ g}$.
 b) $L = 1,6 \text{ m}$; $A = 6 \text{ cm}$; $M = 60 \text{ g}$.
 c) $L = 0,4 \text{ m}$; $A = 6 \text{ cm}$; $M = 30 \text{ g}$.
 d) $L = 0,8 \text{ m}$; $A = 12 \text{ cm}$; $M = 60 \text{ g}$.
 e) $L = 1,6 \text{ m}$; $A = 12 \text{ cm}$; $M = 15 \text{ g}$.
47. Um pêndulo com haste de 2 m de comprimento encontra-se em um planeta **A**, onde a aceleração da gravidade vale $9,68 \text{ m/s}^2$. Seu período de oscilação é T . Ele é levado a outro planeta **B**. Ao oscilar, nota-se que seu período aumentou de 10%. Qual é a aceleração da gravidade no planeta **B**? De quanto deve variar o comprimento da haste desse pêndulo para que, estando em **B**, sua oscilação tenha o mesmo período T ?

Exercícios Nível 3

48. Na figura abaixo, a partícula ligada à mola ideal realiza um movimento harmônico simples (MHS) limitado pelos pontos A e A' .



O ponto **0**, centro da trajetória, é tomado como origem das elongações. Sabendo-se que em $t_0 = 0$ a partícula passava por **0** no sentido de **0** para **A** e que uma oscilação completa se realiza em 2,0 s, pede-se obter:

- a) a função horária $x = f(x)$;
 b) a função horária da velocidade escalar;
 c) a função horária da aceleração escalar;
 d) o módulo da aceleração escalar no ponto de elongação $x = 1,0 \text{ m}$.
49. (PUC-PR) Em condições de microgravidade a massa corpórea sofre bastante perda, e é por isso que em viagens espaciais a massa dos astronautas é periodicamente medida. Para isso é utilizado um equipamento especial, pois não é possível medir a massa por meio de uma balança conven-

cional. O dispositivo utilizado é conhecido como Body Mass Measurement Device (BMMD), cuja tradução para o português seria Aparelho de Medida de Massa Corpórea.



O BMMD é uma cadeira montada sobre molas. O astronauta senta na cadeira e esta é posta a oscilar medindo-se o período de oscilação. Dado esse contexto, analise as proposições a seguir:

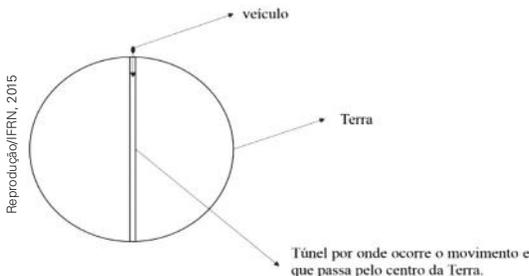
- I. Conhecendo-se apenas o valor do período é possível calcular a massa do astronauta.
- II. O período de oscilação da cadeira vazia é maior que o período medido com um astronauta sentado na cadeira.
- III. O período medido não depende da amplitude do movimento.

Marque a alternativa **correta**:

- a) Apenas a proposição I é verdadeira.
- b) Apenas a proposição II é verdadeira.
- c) Apenas as proposições I e II são verdadeiras.
- d) Apenas as proposições I e III são verdadeiras.
- e) Apenas a proposição III é verdadeira.

50. Um pequeno bloco **B** encontra-se na extremidade de uma mola e oscila em um plano horizontal sem atrito. Observa-se que a distância entre os extremos de cada oscilação é 40 cm. Determine a equação da velocidade em função do tempo. Sabe-se que no instante $t = 0$ o bloco passa pela posição $x = +10$ cm, movendo-se para a direita, e sua velocidade máxima no movimento vale 2 m/s.

51. (IFRN) "A queda" é um veículo criado pelos escritores de ficção científica. Consiste no transporte de pessoas entre pontos diametralmente opostos da superfície da Terra, pelo interior do planeta. Esse veículo é abandonado em um ponto da superfície terrestre e "cai" em linha reta, aumentando de velocidade até chegar ao centro da Terra, desacelerando a partir daí, até atingir o repouso do outro lado do planeta conforme figura abaixo.



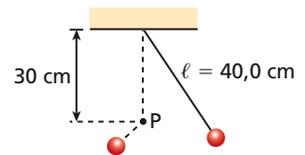
Considere que

- $\pi = 3,1$;
- a massa da Terra é uniformemente distribuída e igual a $6,0 \times 10^{24}$ kg;
- o diâmetro da Terra é de 12800 km;
- a constante de Gravitação Universal é $6,7 \times 10^{-11}$ Nm²/kg²;
- o movimento de queda desse veículo ocorre apenas sob a ação das forças gravitacionais;
- o veículo suporta as altas temperaturas do interior da Terra.

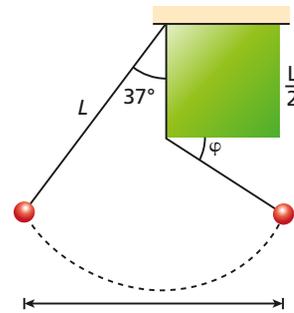
A partir das informações apresentadas, o tempo de viagem do veículo entre os dois pontos diametralmente opostos da superfície da Terra é de, aproximadamente,

- a) 42 minutos.
- b) 60 minutos.
- c) 83 minutos.
- d) 120 minutos.

52. (FCMSC-SP) A figura representa um pêndulo simples, de período igual a T . Colocando-se um prego (**P**) na posição indicada, o pêndulo, na máxima elongação para a esquerda, fica com a configuração indicada pela linha pontilhada, voltando depois à sua configuração inicial. Qual é o período de oscilação desse sistema?

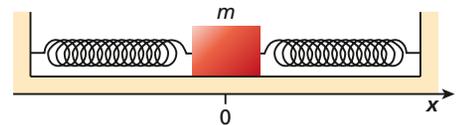


53. A figura mostra um pêndulo em que a haste é um fio de comprimento L e a massa pendular m .



No momento em que a esfera de massa m é solta com velocidade igual a zero, o fio da haste faz um ângulo de 37° com a vertical. Quando a esfera não consegue mais subir, sua velocidade é nula, o fio faz um ângulo φ com a horizontal. Qual o valor desse ângulo φ ? (Considere $\sin 37^\circ = \frac{3}{5}$).

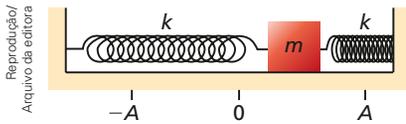
54. (CPAEN-RJ) Analise a figura abaixo.



A figura acima mostra duas molas ideais idênticas presas a um bloco de massa m e a dois suportes fixos. Esse bloco está apoiado sobre uma superfície horizontal sem atrito e oscila com amplitude A em torno da posição de equilíbrio $x = 0$. Considere duas posições do bloco sobre o eixo x : $x_1 = \frac{A}{4}$ e $x_2 = \frac{3A}{4}$. Sendo v_1 e v_2 as respectivas velocidades do bloco nas posições x_1 e x_2 , a razão entre os módulos das velocidades, $\frac{v_1}{v_2}$ é

- a) $\sqrt{\frac{15}{7}}$
- b) $\sqrt{\frac{7}{15}}$
- c) $\sqrt{\frac{7}{16}}$
- d) $\sqrt{\frac{15}{16}}$
- e) $\sqrt{\frac{16}{7}}$

55. (Marinha do Brasil-DF) Analise a figura abaixo.

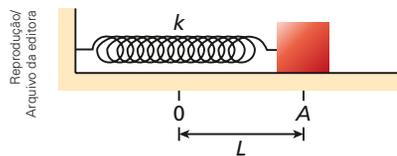


Nessa figura, duas molas idênticas de constante elástica k estão presas a suportes físicos e a um bloco de massa m . Sabe-se que este sistema está oscilando em MHS (movimento harmônico simples) com uma amplitude A . Tendo em vista as posições 1 e 2 do bloco, cujas distâncias em relação à posição de equilíbrio do sistema são, respectivamente, iguais a $d_1 = \frac{A}{2}$ e $d_2 = \frac{A}{3}$, assinale a opção que apresenta razão correta entre os módulos das velocidades do bloco, $\frac{v_1}{v_2}$.

- a) $\frac{1}{2}\sqrt{3}$ c) $\frac{2}{3}\sqrt{2}$ e) $\frac{2}{3}\sqrt{3}$
 b) $\frac{3}{4}\sqrt{\frac{3}{2}}$ d) $\frac{3}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}$

56. Uma pequena esfera encontra-se parada no fundo de uma superfície semiesférica lisa, sem atritos, de raio 10 m. Ela é deslocada ligeiramente de sua posição de equilíbrio e logo em seguida é solta para oscilar. Qual é o tempo mínimo que ela demora para, após ser solta, retornar à sua posição de equilíbrio? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

57. (Vunesp) Um bloco de massa m está sobre um piso horizontal e sem atrito. Uma mola de constante elástica k e de massa desprezível está presa à parede e ao bloco. O ponto **0** corresponde à posição de relaxamento da mola. Em um dado momento, o bloco é puxado horizontalmente até o ponto **A**, distendendo a mola de um comprimento L . O bloco é mantido em repouso no ponto **A**, conforme indicado na figura.



Após o bloco ser solto do ponto **A**, desprezando-se a resistência do ar ao movimento, a expressão matemática que representa o módulo da velocidade escalar máxima atingida pelo bloco é

- a) $\frac{L}{2}\sqrt{\frac{k}{m}}$ c) Lkm e) $L\sqrt{\frac{k}{m}}$
 b) $\frac{Lk}{2m}$ d) $\frac{Lkm}{2}$

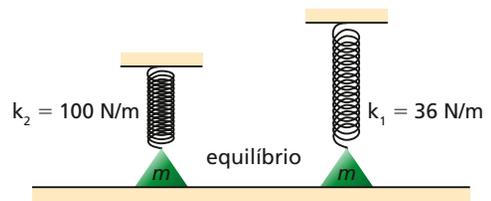
58. (Uece) Dois sistemas massa-mola oscilam sem atrito sobre uma superfície horizontal. As massas são idênticas, cada uma com valor m , e as molas têm constantes elásticas k_s e k_m . O sistema com k_s realiza uma oscilação completa em 1 s e o oscilador com k_m oscila com período de 1 minuto. Para isso, as constantes elásticas das molas podem ser relacionadas por

- a) $\sqrt{\frac{k_s}{k_m}} = 60$ c) $\frac{k_m}{k_s} = 60$
 b) $\sqrt{\frac{k_m}{k_s}} = 60$ d) $\frac{k_s}{k_m} = 60$

59. José precisava calcular a massa M de um bloco, mas não tinha balança. Ele construiu um sistema massa-mola ideal e colocou outro bloco de massa 2 kg para oscilar na extremidade da mola. Mediu a frequência de oscilação e encontrou o valor 2 Hz. Substituiu o bloco de 2 kg pelo outro de massa desconhecida e colocou-o para oscilar. Mediu a nova frequência e determinou o valor 1 Hz. Qual é a massa M desconhecida do bloco?

60. Sobre um piso horizontal, sem atrito, um bloco de 100 g de massa oscila em MHS preso na extremidade de uma mola de constante elástica igual a 10 N/m, com amplitude de 10 cm. Se, quando esse bloco atinge um extremo de oscilação, acrescentarmos mais 300 g de massa no bloco oscilante, qual a nova amplitude e o novo período de oscilação do MHS?

61. (CPAEN-RJ) Analise a figura a seguir.



Na figura acima, temos dois sistemas massa-mola no equilíbrio, onde ambos possuem a mesma massa $m = 4,0 \text{ kg}$; no entanto, o coeficiente elástico da mola do sistema 1 é $k_1 = 36 \text{ N/m}$ e o do sistema 2 é $k_2 = 100 \text{ N/m}$. No ponto de equilíbrio, ambas as massas possuem a mesma posição vertical e, no instante $t = 0$, elas são liberadas, a partir do repouso, após sofrerem um mesmo deslocamento vertical em relação aos seus respectivos pontos de equilíbrio. Qual será o próximo instante, em segundos, no qual elas estarão novamente juntas na mesma posição vertical inicial,

ou seja, na posição vertical ocupada por ambas em $t = 0$?

Dado: considere $\pi = 3$.

- a) 3,0 c) 6,0 e) 9,0
b) 4,5 d) 7,5

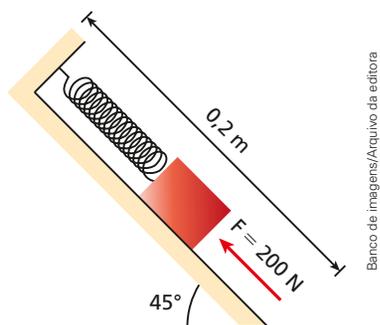
62. (Unicamp-SP) Um pêndulo simples, que executa um movimento harmônico simples num ambiente escuro, é iluminado por um holofote estroboscópico.
- a) Sendo $L = 0,4$ m o comprimento do pêndulo, calcule a frequência de suas oscilações.
- b) Qual deve ser a frequência máxima do estroboscópio para que esse pêndulo pareça estar parado na posição vertical? Considere $g = 10$ m/s².
63. (ITA-SP) Dois pêndulos simples, respectivamente de massas m_1 e m_2 e comprimentos L_1 e L_2 ,

são simultaneamente abandonados para pôr-se em oscilação. Consta-se que a cada 4 ciclos do primeiro a situação inicial é restabelecida idênticamente. Nessas condições, pode-se afirmar que necessariamente:

- a) o pêndulo 2 deve oscilar mais rapidamente que o pêndulo 1.
- b) o pêndulo 2 deve oscilar mais lentamente que o pêndulo 1.
- c) $8\sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$ é um número inteiro.
- d) $6\sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$ é um número inteiro.
- e) $m_1L_1 = 2m_2L_2$.

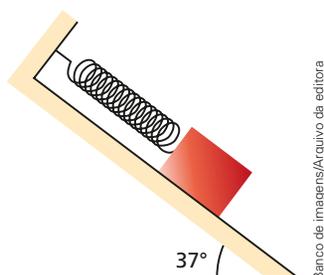
Para raciocinar um pouco mais

64. Na figura dada a seguir, podemos observar um sistema massa-mola que se encontra em repouso sobre um plano inclinado.



A massa do bloco vale $20\sqrt{2}$ kg; no repouso, a mola encontra-se distendida de 20 cm e não há atritos entre o bloco e o plano. A partir dessa situação, o bloco é empurrado para cima, deslocando-se 10 cm. Em seguida, é abandonado, passando a realizar um MHS. Determine a frequência de oscilação desse sistema ($g = 10$ m/s²).

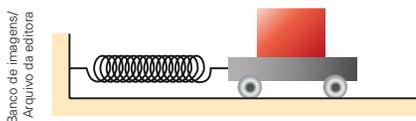
65. Sobre um plano liso, sem atrito, inclinado de 37°, um bloco de massa 1 kg encontra-se preso à extremidade de uma mola de constante elástica igual a 30 N/m.



O bloco move-se em MHS ao longo do plano. Qual é a aceleração do bloco no ponto em que sua energia potencial é máxima? ($g = 10$ m/s²).

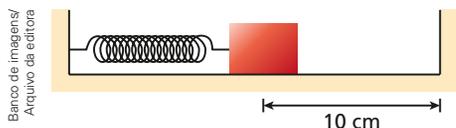
66. (Uece) Uma massa m presa a uma mola de constante elástica k oscila sobre um plano horizontal sem atrito de modo que sua velocidade em função do tempo é dada por $v = v_{\text{máx}} \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$. Desprezando-se todos os atritos, a energia potencial elástica em função do tempo é dada por
- a) $\frac{1}{2}m(v_{\text{máx}})^2 \sin^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$ c) $\frac{1}{2}k \cos^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$
- b) $\frac{1}{2}m(v_{\text{máx}})^2 \cos^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$ d) $\frac{1}{2}k \sin^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$
67. Alguns alunos estavam em um laboratório de Física quando resolveram realizar um experimento de MHS (movimento harmônico simples). Apoiaram, então, o bloco de madeira de 9,0 kg em cima de um carrinho de massa 1,0 kg. O carrinho deslizava pelo piso com rodinhas que praticamente anulavam o atrito com o chão, tornando-o desprezível. O coeficiente de atrito entre o bloco e o carrinho era igual a 0,5. Foi utilizada uma mola de constante elástica igual a 1 000 N/m.

A figura a seguir mostra a configuração montada pelos alunos:



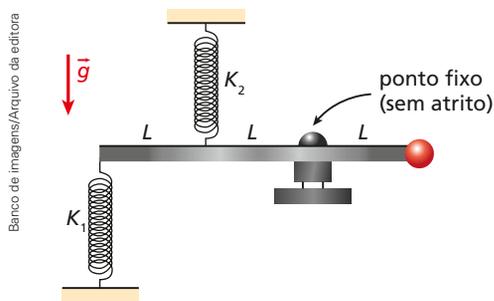
Determine a maior amplitude de oscilação possível para o sistema sem que o bloco deslize sobre o carrinho ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

68. Um bloco de massa 1 kg encontra-se em repouso na posição indicada na figura.



Deslocando-o para a esquerda 20 cm e soltando-o em seguida, o bloco passa a oscilar sem atrito com a superfície do plano horizontal adquirindo uma energia cinética máxima igual a 2 J. Determine o tempo que ele demora para regressar à posição de onde foi abandonado. Considere a colisão com a parede perfeitamente elástica.

69. Na figura dada a seguir, vamos encontrar um sistema mecânico constituído por duas molas, uma barra de massa desprezível e uma pequena esfera de massa m . No início o sistema encontra-se em equilíbrio com a mola K_1 esticada e a mola K_2 comprimida. Desconsidere qualquer atrito no ponto de fixação da barra.



Se a esfera for deslocada ligeiramente para baixo e abandonada, o sistema passa a oscilar. Determine o período de oscilação da pequena esfera de massa m .

70. Na parede de um restaurante existe um antigo relógio de pêndulo que marca corretamente as horas. Sua haste mede 75 cm. Em um determinado dia, acidentalmente, a haste se rompeu. O pro-



prietário mandou soldá-la. No entanto, não notaram que ela ficou 2 mm menor do que era. Esse relógio vai continuar a marcar o tempo corretamente, vai adiantar ou vai atrasar? No caso de adiantar ou de atrasar, determine quanto em cada dia.

71. Um pêndulo simples tem um período de oscilação igual a $\sqrt{5}$ s quando se encontra na superfície da Terra. Se esse pêndulo for colocado no interior de um caminhão e preso no teto da carroceria, qual será seu novo período de oscilação se o caminhão acelerar uniformemente, em trajetória retilínea com $7,5 \text{ m/s}^2$? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
72. (OBF) Um antigo relógio tipo carrilhão é acionado pelas oscilações de um pêndulo de aço (coeficiente de dilatação linear igual a $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) que, no inverno, realiza uma oscilação completa em 1,0 s. Sabendo-se que no verão esse relógio passa a atrasar o equivalente a 2,0 min por mês, determine a diferença entre as temperaturas médias no verão e no inverno.
73. (ITA-SP) A equação $x = 1,0 \text{ sen } (2,0t)$ expressa a posição de uma partícula em unidades do Sistema Internacional. Qual seria a forma do gráfico v (velocidade) versus x (posição) desta partícula?
- Uma reta paralela ao eixo de posição.
 - Uma reta inclinada passando pela origem.
 - Uma parábola.
 - Uma circunferência.
 - Uma elipse.
74. (UFMG-PB) John A. Wheeler e Niels Bohr inventaram, na primeira metade do século passado, o modelo de uma gota líquida para o núcleo atômico. Ele permite compreender o fenômeno de divisão de um núcleo — fissão nuclear. Quando um nêutron é absorvido, o núcleo oscila até que ocorra a fissão. Considere, *grosso modo*, um núcleo de Urânio 236 ($4,0 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$) em oscilação como um sistema massa-mola clássico. A energia do sistema necessária para a fissão vale $1,0 \cdot 10^{-12}$ joules. Quando a deformação do núcleo atinge 0,10 fm ($1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}$), a frequência de oscilação do núcleo de Urânio 236 será
- $5,0 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$.
 - $2,3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$.
 - $5,0 \cdot 10^{44} \text{ Hz}$.
 - $4,2 \cdot 10^{23} \text{ Hz}$.
 - $3,7 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$.

Unidade 1 – Termologia

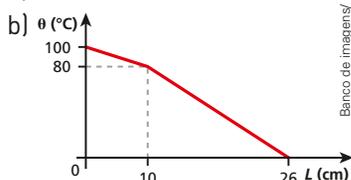
Tópico 1 – Temperatura

1. 113 °F 2. 86 °F 3. 20 °C
 5. 20 °C 6. -40 °C
 8. -20 °X e 60 °X
 9. 36 °F 10. 3,0 °C
 11. a) $\theta_x = 4\theta_c - 50$
 b) 270 °X
 c) -50 °X e 350 °X
 12. 15° 13. c 14. b
 15. 45 °C 16. 78 °C 17. 30 °R
 18. a) $\theta_c = 5,0h - 5,0$
 b) 45 °C
 c) 6,4 cm
 20. 30 °C
 22. 1,25 mm 23. a
 24. 25 °C 25. -273 °C e -459 °F
 26. 15 K 27. c 28. 120 °C
 30. 491 °R e 671 °R
 31. -615 °C. Não, ela está abaixo do zero absoluto.
 32. d 33. b
 34. 32 °C
 35. d 36. b 37. 1,5 °X
 38. a 39. d 40. e
 41. e 42. 40 °C 43. d
 44. d 45. e 46. -25,6°
 47. d 48. b
 49. a) 450 °C c) 3 F₀
 b) 15 atm d) 324 km/h

Tópico 2 – O calor e sua propagação

1. d 2. d 3. d
 4. c 6. d 7. a
 8. e 9. a 11. 68 °F
 12. $6,0 \cdot 10^4$ cal/s 14. 80 °C
 15. d 17. d
 18. Matilde deve colocar o aparelho na parte superior da parede.
 19. c 20. d 21. c
 22. d 23. c 24. d
 25. c 26. c 27. c
 28. d 29. 40 Wh

30. 48 °C e 42 °C
 31. a) 52 m² c) 14,4 kWh
 b) 600 W
 32. 40 °C 33. 80 °C 34. e
 35. $1,6 \cdot 10^2$ cal/s 36. b
 37. a
 38. a) $7,5 \cdot 10^{-3}$ W/m °C b) 50 W
 39. a) 80 °C



Banco de imagens/
Arquivo da editoria

40. b 41. b
 42. a) $\Delta\theta = 0$
 b) O sal aumenta a temperatura de ebulição da água.
 c) $\Delta\theta \neq 0$

43. a 44. c 45. c

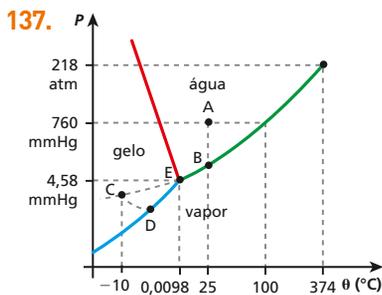
Tópico 3 – Calor sensível e calor latente

1. d 2. d 3. c
 4. c 5. c 7. B
 8. 115 kcal 9. 800 cal/s
 10. 162 W 11. 0,25 cal/g °C
 12. d
 13. a) $5,0 \cdot 10^3$ g
 b) $1,5 \cdot 10^4$ degraus
 14. a) $2,25 \cdot 10^5$ cal
 b) $18,8 \cdot 10^5$ J
 16. a) Aproximadamente 58 W
 b) $2,4 \cdot 10^4$ g
 17. d 18. 55 °C
 19. a) $\frac{1000}{7}$ cal/s b) 70 s
 20. 0,05 cal/(g °F)
 21. $3,0 \cdot 10^4$ kcal
 22. c
 23. 0,56 cal/(g °C)
 24. a 26. 30 °C 27. 40 °C
 28. 6 29. 10 °C 30. 550 mL
 31. b 32. d
 33. a) 100 cal e 5 000 cal
 b) 30 °C e 0,51 cal/g °C
 34. d 35. d 36. b
 38. a 39. 70 °C
 40. a) 12,5 kcal
 b) Aproximadamente 91 cal/°C
 41. c 42. 75 °C 44. 110 g
 45. 20 g 46. 300 g 47. 8,0 g
 48. c 49. e
 50. $2,4 \cdot 10^4$ cal
 52. 12 kcal 53. 50 °C
 54. 10 500 cal 55. b
 56. b
 57. -80 °C e 40 °C
 58. 70 min
 59. a) 0 °C e 725 g b) 14 750 g
 60. Uma caixa 61. b
 62. a) 4,0 cal/g e 0,10 cal/g °C
 b) 12,5 g
 63. c 65. 24 °C
 66. a) 0 °C b) 100 g
 67. b 69. d 70. 52 °C
 71. Sim; 125 g 72. b
 73. 0 °C 74. -9,0 °C
 75. c 77. c 78. b
 79. d 80. d 81. b
 82. $1,86 \cdot 10^4$ cal 83. d
 84. c 85. e 86. d
 87. e 88. b 89. e
 90. c 92. 0,125 kg
 93. a) 6 600 cal b) 11 g
 94. 80 °C 95. a 96. e
 97. c
 98. I – V; II – V; III – V; IV – V.
 99. 14 100. b 102. e
 103. 19 104. c 106. d
 107. d 108. e 109. d
 110. c 111. 5,0 g 112. -16 °C
 113. a) $3,24 \cdot 10^9$ J ou $5,76 \cdot 10^9$ J
 b) 10 K
 114. c 115. c 116. a
 117. d 118. d
 119. a) $\frac{10}{3}$
 b) Aproximadamente 56,7 °C
 120. c
 121. a) 427 920 cal
 b) Aproximadamente 5,1 kg
 122. a) $2,0 \cdot 10^2$ W b) $9,0 \cdot 10^4$ J
 c) $1,55 \cdot 10^3$ s

123. a) $2,28 \cdot 10^6$ J
 b) II
 c) 1,5 kg
 d) $2,5 \cdot 10^3$ J/kg °C
124. a) Evaporação
 b) 1150 kJ
125. a) 6,0 N b) $1,5 \cdot 10^5$ cal/h
126. c
127. a) Aproximadamente 77 J
 b) Aproximadamente 115 W
128. a) 70 g b) 22 °C e zero
129. c 130. e

131. a) $T_f = \frac{2T}{3} \cdot \left(\frac{1 - \frac{1}{2^{2N-2}}}{1 - \frac{1}{2^{N-1}}} \right)$
 b) $T_f = \frac{2T}{3}$

132. 3,1 m² 133. 1 Btu \approx 252 cal
134. a) $3,6 \cdot 10^4$ células/s
 b) 1,4 J
135. c 136. c



Se toda a água se solidifica, a situação final será o ponto **D**. Se restar água após a solidificação, a situação final será o ponto **E** (ponto triplo).

138. c 139. e 140. d
 141. 250 °C 142. 2,5 s

Tópico 4 – Gases perfeitos

1. $1,0 \cdot 10^4$ N 2. e
 3. 0,2 4. b 5. b
 7. 4,0 cmHg 8. 293 °C
 9. 5,0 atm 10. 81 °C
 12. b 13. a 14. d
 15. a 16. 150 mmHg
 17. 427 °C 18. 2
 19. Aproximadamente 2,2 atm

20. a) Quando a porta do freezer é aberta, entra ar mais quente em seu interior, fazendo com que a pressão interna se iguale à pressão externa. A porta é fechada e o ar existente no interior do freezer é resfriado rapidamente, diminuindo sensivelmente sua pressão. Como a pressão do ar externo é maior, haverá uma diferença de pressão que dificultará sua abertura. Para conseguirmos abrir a porta, será necessário aplicarmos uma força de intensidade maior do que aquela decorrente da diferença entre a pressão externa e a interna. Se deixarmos passar certo intervalo de tempo, notamos que a abertura da porta fica mais fácil. Isso ocorre porque a vedação da porta não é ideal, o que possibilita a entrada de ar externo no interior do freezer. Esse ar será resfriado lentamente, mas aumentará o número de partículas de ar, o que aumentará a pressão do ar no interior do freezer. Quando essa pressão tornar-se igual à pressão externa, a massa de ar de dentro do freezer ficará praticamente constante e a resistência à abertura da porta será devida apenas aos ímãs existentes na borracha de vedação que aderem ao metal do corpo do freezer.

b) $6,0 \cdot 10^3$ N

22. d 23. 9,0 atm 24. b
 25. -73 °C 26. 8,2 atm 27. d
 28. e 30. -153 °C e 27 °C
 31. 177 °C
 32. $3,0 \cdot 10^{24}$ moléculas
 33. 120 °C
 34. a) 87 °C b) 2,45 atm
 35. e 36. c 37. 27 °C
 39. 4,5 atm 40. 640 g 41. a
 42. b

43. a) 100 mol b) 160 min
 44. $1,0 \cdot 10^{-2}$ kg 45. 900 mmHg
 46. $\frac{1}{2}$ 48. c
 49. a) 4,0 N/cm² b) Lei de Boyle
 50. 0,02 mol
 51. a) 6,0 L b) 5,0 L
 52. d 54. 27 °C
 55. 3,6 atm
 56. I) Correta III) Incorreta
 II) Incorreta
 58. d 59. c 60. c
 61. d 62. 10
 63. 1 (F); 2 (V); 3 (F); 4 (V).
 64. c 65. 493 m/s
 66. 127 °C 67. 2,0 atm 68. c
 69. a) 1500 kg
 b) 1125 kg
 c) Aproximadamente 0,34 m/s²
 70. a) $-3,0 \cdot 10^3$ J
 b) 50 m/s²
 c) $2\text{Na}_3\text{(s)} \rightarrow 2\text{Na(s)} + 3\text{N}_2\text{(g)}$
 d) 36 L
 71. 2,5 g 72. d
 73. a) $8 \cdot 10^{12}$ moléculas/m³
 b) 10
 74. c
 75. a) $V_A = \frac{2}{3}SL$ e $V_B = \frac{1}{3}SL$
 b) $\frac{L}{6}$
 76. a) 1800 kg c) 0,29 m/s²
 b) 1350 kg
 77. b 78. d
 79. a) $1 \cdot 10^4$ mol
 b) $3 \cdot 10^6$ J
 80. e
 81. 108 balões
 82. a) 240 K b) 90 Pa
 83. a) 60 W c) 96 K
 b) $9,0 \cdot 10^4$ d) 1,32 atm
 84. a) $1,10 \cdot 10^5$ Pa
 b) 450 K
 c) 3%
 85. a) 13,2 kN
 b) 63 °C
 c) Aproximadamente 0,16 mol

86. A \Rightarrow CO₂; B \Rightarrow H₂; C \Rightarrow Ne

87. a) 250 mol
b) 18,75 mol
c) 4,0 h

88. b

89. a) $\frac{20}{21}$
b) $P_{\text{atm}} = (P + 1,0 \cdot 10^4 \text{ h})$ [SI]
c) $1,05 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

90. $\frac{6}{7} T_0$

91. $m = \frac{p_0 a^3 + Mga - nRT}{ga(\mu \cos \theta + \sin \theta)}$

Tópico 5 – Termodinâmica

1. c 2. c 3. d

5. a) Aumenta.
b) +60 J

6. 8 kcal 7. 250 J e zero

8. 26 9. a 10. 37

11. 3,0 J 12. 150 J

14. a) 400 cal c) Zero
b) -400 cal

15. a) 50 cal c) Zero
b) -50 cal

16. e 17. c

18. a) $V = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$
b) 7,5 L

19. $\Delta U = +200 \text{ cal}$

20. d 21. 12

22. a) Zero c) $3,2 \cdot 10^2 \text{ J}$
b) $3,2 \cdot 10^2 \text{ J}$ d) $1,6 \cdot 10^2 \text{ J}$

23. a) 415 J b) 10 K ou 10 °C

25. a) 1 200 J
b) Zero
c) 1 200 J

26. 1800 J

27. a) Realizado; 2 200 J
b) Aumentou; 6 300 J

28. 6,0 J 29. $2,5 \cdot 10^3 \text{ J}$

30. a) 8 J b) **C e A**

31. 20 W

32. $\frac{4}{3}$ 33. c

35. a) Zero, 300 J e 250 J
b) 675 J
c) 27 °C

36. a) 10 mol
b) $24,9 \cdot 10^3 \text{ J}$
c) $37,4 \cdot 10^3 \text{ J}$

38. 26 J

39. a) $-2,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $4,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
e $T_a = T_c$
b) $4,0 \cdot 10^3 \text{ J}$

40. a 41. a 42. d

43. c

45. a) Zero b) 450 cal

46. 3750 cal 47. 10 J

48. 4,0 °C 49. b 50. b

51. 4,1 atm

52. a) Isométrica
b) 7 500 cal e 7 500 cal

53. a 54. $0,45 p_0 V_0$

55. a) 100 K b) 8 715 J

56. b 57. e 59. 7,5 g

60. d 61. e 62. 10 °C

63. a) 40 J b) 85,5 °C

64. 4 200 cal

65. $2,0 \cdot 10^3 \text{ N}$ e $400/3 \text{ J}$

66. 17 67. 14 68. b

69. c 71. 55% 72. 50%

73. b

74. a) 40% c) 3 000 J

b) 5 000 J

75. c 76. b 77. d

78. e

79. a) Falsa b) 50 m³ 80. 840 kW

81. a) $2,0 \cdot 10^5 \text{ J}$ b) 67%

82. a 83. d

84. Aproximadamente 28 cm³

86. Aproximadamente 4 343 cal/K

87. +0,3 cal/K

88. Verdadeiras: **a, b, e, f**

Falsas: **c, d, g, h**

89. 4 J 90. c 91. c

92. a) 0,2 mol c) 6,4 cm
b) $3 \cdot 10^3 \text{ N}$ d) 192 J

93. b 94. a

95. Aproximadamente 4 343 cal/K

96. c 97. d 98. a

99. c

100. a) 40 MW b) 3,0 °C

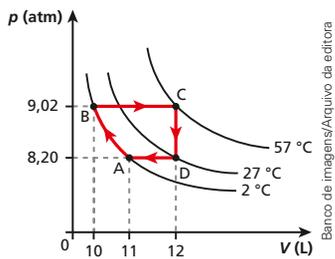
101. $4,9 \cdot 10^{-2} \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$

102. a) No início, o martelo tem energia mecânica na forma potencial. Na queda, a energia mecânica se conserva e a energia potencial transforma-se em cinética. No impacto, parte dessa energia mecânica (80%) é transferida para as moléculas do gás, transformando-se em energia térmica.

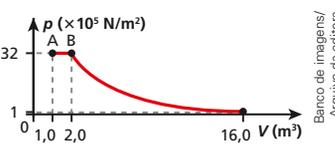
b) 10 K ou 10 °C

103. b

104. a) 300 cal
b) Aproximadamente 1,7
c) 3 cal/mol K

105. a) 
b) 123 J d) 1 230 W
c) 123 J

106. b

107. a) 
b) $1,04 \cdot 10^7 \text{ J}$
c) $-2,4 \cdot 10^6 \text{ J}$

108. b

109. a) $T_f = T_0$
b) $-6,9 \text{ n R}$ (processo impossível de ocorrer)

110. +0,3 cal/K

111. 11,63 J/K 112. b

113. d 114. c 115. c

116. a) $8,0 \cdot 10^4 \text{ W}$
b) +16,7 W/K; aumenta.

Tópico 6 – Dilatação térmica dos sólidos e dos líquidos

1. d 3. 200,2 cm

4. $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

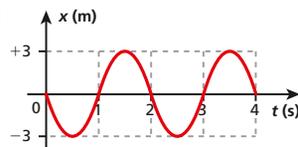
5. $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 6. $770 \text{ } ^\circ\text{C}$
 7. e 8. a 9. c 10. d
 12. a) $9,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ b) $0,048\%$
 13. Aproximadamente $7,2 \text{ mm}$
 14. d
 15. c 16. c 18. $0,60 \text{ m}$
 19. b 20. $1,5$ 21. d
 23. c 24. $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 25. c 26. b
 27. Se a obturação dilatar mais, o dente poderá quebrar. Se dilatar menos, poderão ocorrer infiltrações.
 28. e 30. $101,6 \text{ cm}^2$
 31. c 32. $430 \text{ } ^\circ\text{C}$
 34. $1,0 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$
 35. $1007,2 \text{ cm}^3$
 36. $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ L}$
 37. e 38. b 39. d
 40. c
 41. 0 – F; 1 – F; 2 – V;
 3 – V; 4 – V.
 42. d 44. d
 45. $1,005 \text{ m}$ e 406 cm^3
 46. b 47. b
 48. No período da manhã.
 49. 110 L 51. b
 52. a) Aproximadamente
 $9,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 b) 518 cm^3
 c) $18,2 \text{ cm}^3$
 53. b 54. d 55. b
 56. c 57. $527 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 58. $143 \text{ } ^\circ\text{C}$ 59. e 60. e
 61. b 63. $120 \text{ } ^\circ\text{C}$
 64. $5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 65. Porque de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $4 \text{ } ^\circ\text{C}$ a densidade da água aumenta e, a partir de $4 \text{ } ^\circ\text{C}$, diminui.
 66. a 67. b 68. b
 69. $20,08 \text{ cm}$ 70. $1,5$
 71. $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 72. a 73. b
 74. 1 75. b 76. e
 77. e 78. $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ 79. $5,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
 80. $\frac{\Delta \ell}{(\ell_1 \alpha_1 + \ell_2 \alpha_2)}$ 81. a

82. $349,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 83. c
 84. b 85. b 86. a
 87. e 88. a 89. $\frac{1}{A} \text{ } ^\circ\text{C}$
 90. $\frac{d}{4} \left[\frac{2(1 + \alpha_1 \Delta T)}{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T} + 1 \right]$
 91. b 92. a 93. b 94. c
 95. a) $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ c) $1,3 \text{ atm}$
 b) 10^{-2} m^3
 96. $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$
 97. a) 350 K b) $3,2 \cdot 10^5 \text{ J}$
 98. $100 \text{ } ^\circ\text{C}$

Unidade 2 – Ondulatória

Tópico 1 – Movimento Harmônico Simples (MHS)

1. c 2. d
 4. a) 3 m , $\pi \text{ rad/s}$ e 2 s
 b) $0,5 \text{ Hz}$ e $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$
 c) $3\pi \text{ m/s}$ e $3\pi^2 \text{ m/s}^2$
 d)



Banco de imagens/
Arquivo da editora

5. a) $0,30 \text{ m}$, $\pi \text{ rad/s}$, $0,50 \text{ s}$ e $2,0 \text{ Hz}$
 b) $v = -0,30\pi \text{ sen} \left(\pi t + \frac{\pi}{2} \right) \text{ (SI)}$
 c) $\alpha = -0,30\pi^2 \text{ cos} \left(\pi t + \frac{\pi}{2} \right) \text{ (SI)}$
 7. a) 1 s
 b) $x = \text{cos} [2\pi t + \pi] \text{ (SI)}$
 c) $4\pi^2 \text{ m/s}^2$
 8. d
 9. a) B → posição
 A → velocidade
 C → aceleração
 b) $0,5 \text{ m}$ e $2,5 \text{ Hz}$
 10. $3,14 \text{ s}$
 11. Aproximadamente $17,3 \text{ cm}$
 12. $15\sqrt{3} \text{ m/s}$
 13. a) $0,50 \text{ Hz}$ e $0,10 \text{ m}$
 b) $0,50 \text{ s}$; $1,5 \text{ s}$ e $2,5 \text{ s}$
 14. b
 15. a) $2\pi \text{ s}$ b) 20 m/s^2

16. b 18. a 19. a
 20. e 21. c 23. $T' = T$
 24. 24 s 25. $0,25 \text{ m}$
 26. $x = 0,05 \text{ cos} (6t) \text{ (SI)}$
 $v = -0,3 \text{ sen} (6t) \text{ (SI)}$
 27. $x = 0,04 \text{ cos} (2t + \pi) \text{ (SI)}$
 28. c 29. e 30. $0,2\pi \text{ s}$
 31. $1,6 \text{ kg}$ 32. 4 kg e 5 kg
 33. 51 34. a 35. b
 36. a) $5,0 \text{ m}$ b) $3,0 \text{ s}$
 37. $2 \cdot 10^{-3} \text{ J}$ 38. d 40. $\frac{1}{2}$
 41. $2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}$
 42. c 43. a 44. 15 s
 45. 1 m e 4 s 46. c
 47. 8 m/s^2 e diminuir de $0,347 \text{ m}$
 48. a) $x = 2,0 \text{ cos} \left(\pi t + \frac{3\pi}{2} \right) \text{ (SI)}$
 b) $v = -2,0\pi \text{ sen} \left(\pi t + \frac{3\pi}{2} \right) \text{ (SI)}$
 c) $\alpha = -2,0\pi^2 \text{ cos} \left(\pi t + \frac{3\pi}{2} \right) \text{ (SI)}$
 d) $\pi^2 \text{ m/s}^2$
 49. e
 50. $v = -2 \text{ sen} \left(10t + \frac{5\pi}{3} \right) \text{ (SI)}$
 51. a 52. $\frac{3T}{4}$ 53. 37°
 54. a
 55. b 56. $\frac{\pi}{2} \text{ s}$ 57. e
 58. a
 59. 8 kg 60. 10 cm e $0,4\pi \text{ s}$
 61. c
 62. a) Aproximadamente $0,8 \text{ Hz}$
 b) Aproximadamente $1,6 \text{ Hz}$
 63. c 64. $\frac{3}{\pi} \text{ Hz}$ 65. 6 m/s^2
 66. a
 67. $5,0 \text{ cm}$ 68. $\frac{2\pi}{15} \text{ s}$
 69. $2\pi \sqrt{\frac{m}{4K_1 + K_2}}$
 70. Adiantar;
 aproximadamente 2 min
 71. 2 s
 72. Aproximadamente $9,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
 73. e 74. e



O CONECTE agora é CONECTE LIVE!

O CONECTE, coleção voltada para o Ensino Médio que alia Tecnologia à Educação, apresenta uma novidade nesta reformulação: o CONECTE LIVE!

O CONECTE LIVE integra conteúdos digitais exclusivos às obras de autores renomados. Além disso, promove maior interação entre alunos, professores e autores. Livros digitais, objetos educacionais digitais, entre outros conteúdos interativos, compõem a coleção.

Outra novidade! As atualizações no material didático não se encerram no momento em que os livros são impressos. Ofertas complementares e atividades diferenciadas são disponibilizadas na plataforma digital ao longo de todo o ano escolar, garantindo novidades frequentes a professores e alunos!

Para conhecer todos os materiais e os serviços do CONECTE LIVE, acesse: <http://conecte.plurall.net/>