



A Termodinâmica do Motor de Combustão Interna

Implicações sociais do uso dessa tecnologia

Adelson Fernandes Moreira
Francisco Pazzini Couto

(Organizadores)

O TEMPLATE ORIGINAL (THE LEGRAND ORANGE BOOK TEMPLATE) PODE SER ENCONTRADO EM [HTTP://WWW.LATEXTEMPLATES.COM/TEMPLATE/THE-LEGRAND-ORANGE-BOOK](http://www.latextemplates.com/template/the-legrand-orange-book).

AUTOR DO TEMPLATE: MATHIAS LEGRAND (LEGRAND.MATHIAS@GMAIL.COM) WITH MODIFICATIONS BY: VEL (VEL@LATEXTEMPLATES.COM).

LICENSA ORIGINAL:CC BY-NC-SA 3.0.

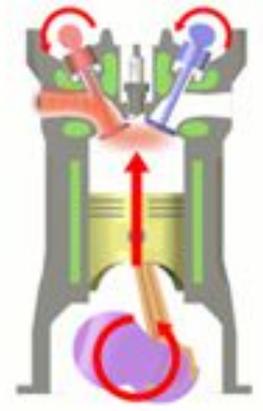
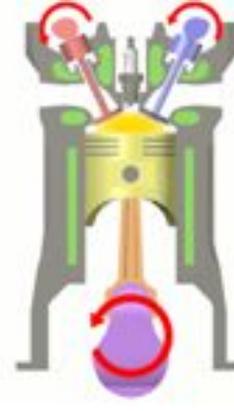
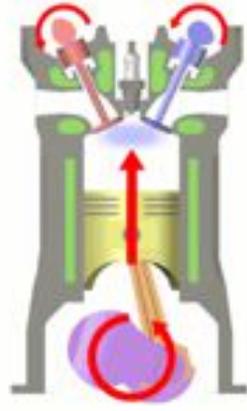
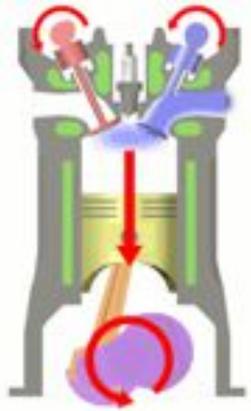
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>).

Formatação do texto, por meio do template: Gabriel Gonçalves dos Santos Rodrigues, bolsista de complementação educacional do CEFET-MG. O trabalho do estudante Gabriel contou com a co-orientação do professor Leonardo Gabriel Diniz, que também colaborou com a revisão conceitual de todo o material. Fevereiro de 2019.

Imagem da capa: <https://cn.depositphotos.com/190552690/stock-photo-illustration-internal-combustion-engine-engine.html>

Imagem do sumário: <https://www.motonline.com.br/noticia/comandos-em-acao>

Imagem de abertura dos capítulos: <https://docplayer.com.br/88704949-Introducao-aos-motores-de-combustao-interna.html>

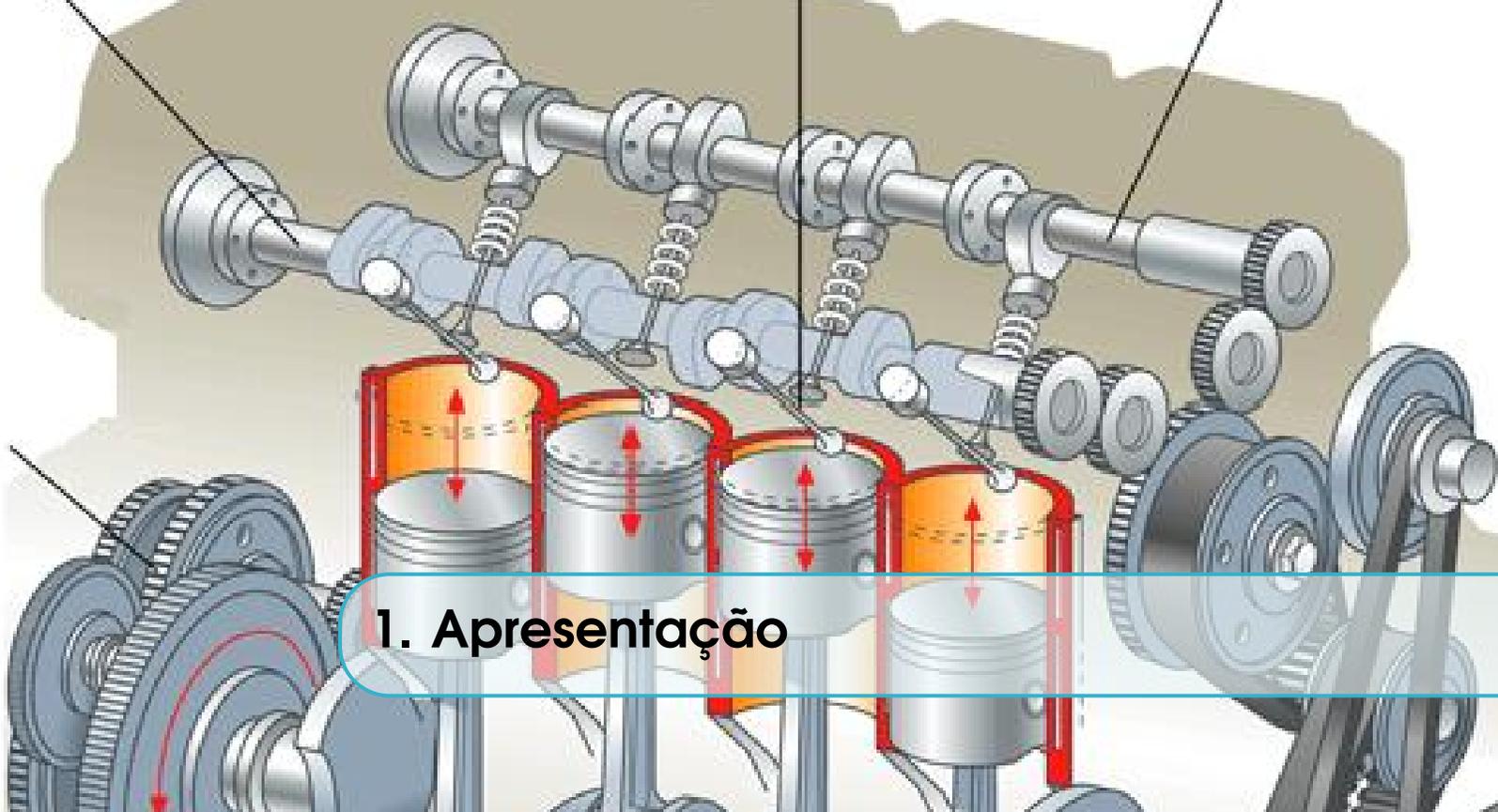


Sumário

1	Apresentação	7
2	Introdução à Termodinâmica	11
2.1	Problematização inicial.	11
2.2	Motor de combustão interna, processos físicos, propriedades dos materiais e conceitos da Termodinâmica.	12
2.3	Energia térmica, temperatura e calor	16
2.3.1	A Lei Zero da Termodinâmica	19
2.4	Escalas termométricas	21
2.5	Exercícios	25
2.6	Respostas das questões e dos exercícios	26
3	Riscos e cuidados da dilatação do motor	29
3.1	O que acontece a um material quando sua temperatura aumenta?	29
3.2	Exercícios	34
3.3	Respostas das questões e dos exercícios	36

4	Transmissão de calor.	39
4.1	Transmissão de calor e situações do cotidiano	39
4.2	O sistema de arrefecimento do motor de combustão interna: revisitando os processos de transmissão de calor	43
4.3	Exercícios	50
4.4	Respostas das questões e dos exercícios	53
5	Calor específico e capacidade térmica	55
5.1	Calor específico	56
5.2	Capacidade térmica	58
5.3	Trocas de calor - calorímetro	60
5.4	Equivalente mecânico do calor	62
5.5	Curva de aquecimento de uma substância	65
5.6	Exercícios	66
5.7	Respostas das questões e dos exercícios	72
6	Gases e transformações termodinâmicas	75
6.1	Exercícios	79
6.2	Respostas das questões e dos exercícios	81
7	Ciclo Otto e conservação da energia.	83
7.1	A energia se conserva no motor de combustão interna?	83
7.2	Os conceitos envolvidos na primeira lei da termodinâmica	86
7.3	Trabalho realizado por um gás em uma variação de volume	91
7.4	Exercícios	94
7.5	Respostas das questões e dos exercícios	96

8	Aplicações da 1ª lei da termodinâmica.	97
8.1	Transformações adiabáticas no cotidiano	97
8.2	Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna permanecer constante?	101
8.3	Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna aumentar?	104
8.4	Exercícios	108
8.5	Respostas das questões e dos exercícios	113
9	Rendimento de uma máquina térmica.	115
9.1	Máquinas Térmicas	115
9.2	A segunda lei da termodinâmica e as máquinas térmicas	118
9.3	Ordem e desordem	121
9.4	Exercícios	122
9.5	Respostas das questões e dos exercícios	128
10	Referências Bibliográficas	131



1. Apresentação

Esse texto didático se organiza e se desenvolve tendo como tema gerador uma tecnologia: o motor de combustão interna.

Ele é constituído de trechos autorais, combinados a textos adaptados ou transcritos de outros livros didáticos e fontes diversas, dentre elas, principalmente, GREF (1991, 1998), Alvarenga e Máximo (2006), Gaspar (2013) e Amaldi (1997). O mesmo se aplica aos exercícios propostos e exemplos resolvidos. Portanto, não é uma obra autoral, mas que organiza os conteúdos de Termodinâmica dentro de uma concepção específica.

Ao longo do texto são propostas questões, no sentido de promover um primeiro passo na assimilação dos conceitos. Ao final de cada capítulo são propostos exercícios, cumprindo um segundo passo nesse processo. Foram selecionados exercícios com abrangência e profundidade, tendo em vista a extensa carga horária de aulas semanais de um estudante de um curso técnico integrado, uma vez que esse material didático tem sido utilizado com estudantes da Educação Profissional Técnica de Nível Médio, da unidade de Belo Horizonte do CEFET-MG.

Ainda em busca de ajustes na abrangência e profundidade dos conteúdos de Termodinâmica, alguns tópicos são tratados de forma mais concisa: dilatação, comportamento dos gases e mudança de fase. A Segunda Lei da Termodinâmica é discutida do ponto de vista do rendimento de uma máquina térmica, explorando-se o enunciado de Kelvin. Cabe ao professor, caso julgue necessário e tenha as condições para isso, fazer os devidos aprofundamentos e ampliações no desenvolvimento dos conteúdos.

O motor de combustão interna é um tipo de máquina térmica, isto é, uma máquina que converte energia térmica em mecânica. Discutiremos essa tecnologia segundo duas perspectivas que se articulam.

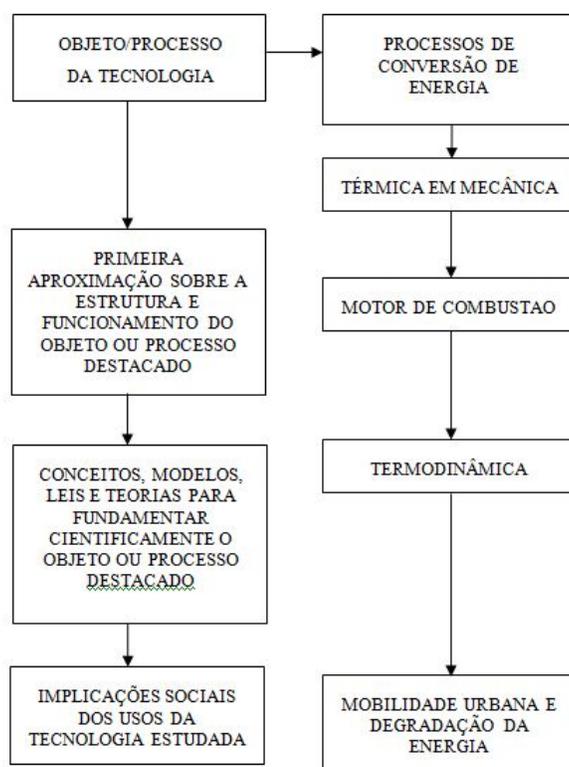
Em uma delas, apresentaremos os conceitos, modelos e leis da Termodinâmica como instrumentos para compreender os fundamentos científicos da tecnologia do motor de combustão interna. Na outra, discutiremos essa tecnologia a partir de seu uso, especialmente, dentro de um modelo de mobilidade urbana centrado no automóvel particular.

Quais os impactos socioambientais desse modelo? Quais as razões de sua prevalência para promover a circulação no meio urbano? Começaremos com atividades que justamente buscam problematizar o motor de combustão interna a partir de uma primeira visão de sua estrutura e funcionamento, mas também do significado da utilização intensiva dessa tecnologia em termos de consumo de energia e de emissão de gases de efeito estufa. Ao concluirmos essa primeira etapa de problematização, o curso poderá, a critério do professor, se desdobrar em dois eixos, explorando as duas perspectivas anteriormente mencionadas.

Em um deles, o estudo dos conceitos, modelos e leis que fundamentam a escolha de materiais e procedimentos técnicos que compõem a estrutura e o funcionamento do motor de combustão, assim como os limites para a conversão de energia térmica em mecânica. Para além do motor de combustão, os conceitos aprendidos serão aplicados em outras situações físicas, tecnologias e fenômenos de nosso cotidiano.

No outro eixo, por meio de um projeto extraclasse, poderá ser aprofundada a discussão dos impactos socioambientais do uso motor de combustão interna, que materializam duas ideias fundamentais vinculadas aos processos de conversão de energia: conservação e, especialmente, degradação. Uma apresentação e uma reflexão sobre projetos extraclasse, já desenvolvidos, podem ser encontradas em Melk (2017) e em Melk, Aguiar Jr., Moreira e Couto (2018).

Com a abordagem proposta para o segundo eixo, ciência, tecnologia e sociedade são relacionadas no estudo da Termodinâmica. Veremos que a 2ª lei da termodinâmica expressa limites para conversão de energia térmica em mecânica.

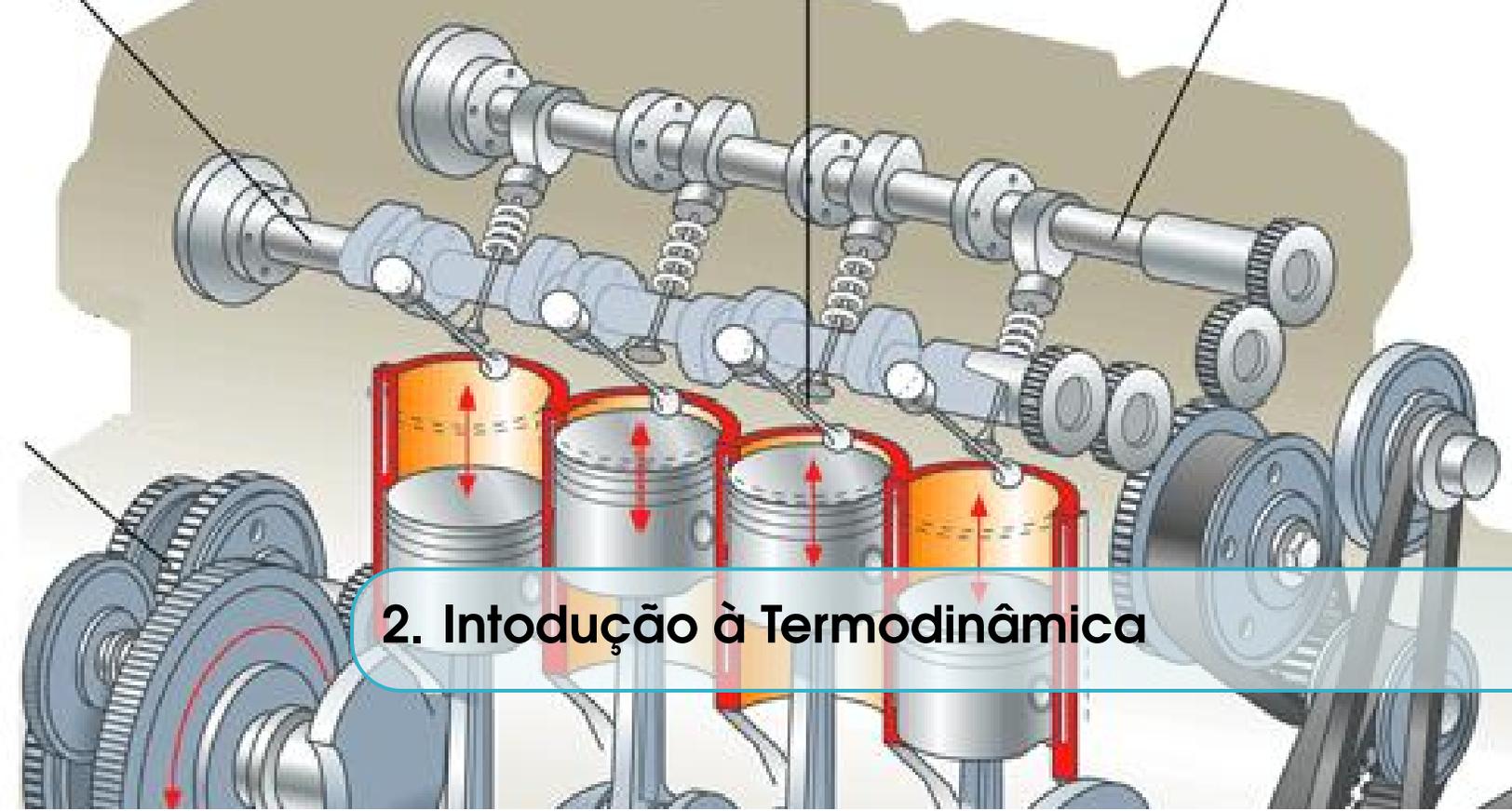


Esses limites se concretizam no baixo rendimento de uma tecnologia, que tem sido objeto de estudos

e investimentos, por mais de um século. Não obstante seu baixo rendimento e alta capacidade de poluir a atmosfera, ela é intensivamente utilizada com impactos socioambientais muito graves, especialmente nos grandes centros urbanos.

Ao desenvolver os conteúdos da Termodinâmica dessa forma, buscamos criar um contexto para que o estudante atribua significado aos conceitos que vão sendo ensinados, ao longo desse caminho. Nesse percurso, procuramos apresentar e desenvolver os conceitos não como fins em si mesmos, mas como instrumentos de compreensão e questionamento da realidade que nos cerca!

Adelson Fernandes Moreira
Francisco Pazzini Couto



2. Introdução à Termodinâmica

2.1 Problematização inicial.

Neste início das discussões sobre a Termodinâmica, queremos saber o que você sabe sobre o motor de combustão e os processos de conversão de energia envolvidos em seu funcionamento. Não há certo ou errado, mas os seus conhecimentos a partir dos quais vamos aprender sobre Termodinâmica, suas Tecnologias e Implicações Sociais. Responda, em uma folha à parte, às seguintes questões da maneira mais completa que você conseguir¹. Justifique suas respostas.

1. Ao iniciarmos determinada viagem de automóvel, no início, o tanque está cheio de gasolina. Após percorrermos algumas centenas de quilômetros, esse estará vazio. Para você, o que aconteceu com a gasolina? Responda com o maior detalhamento possível.
2. Uma pessoa pode fazer determinada viagem de ônibus ou de carro particular. Para você, em que circunstâncias haverá um maior "consumo" de energia, por pessoa, por quilômetro rodado? Justifique, calculando o consumo em kJ/(pessoa.km), tanto para o ônibus, que percorre 2 km com 1 L de diesel, como para o carro particular, que percorre 10 km com 1 L de gasolina. Considere que o ônibus transporte, em média, 40 pessoas e o carro, apenas uma. Considere: densidade da gasolina: 0,75 kg/L; densidade do diesel: 0,84 kg/L; calor de combustão da gasolina: 44 800 kJ/kg; calor de combustão do diesel: 42 600 kJ/kg.
3. De acordo com uma reportagem da EMBRAPA ²

“(…) ao chegar ao posto de combustível e mesmo antes da combustão, 1 litro de gasolina já emitiu para a atmosfera 507 gramas de CO_2 . Do mesmo modo, 1 litro de óleo diesel antes de ser totalmente transformado em energia nos motores já emitiu 510,4 gramas de CO_2 .”

Adicionando o equivalente do CO_2 emitido na combustão desses combustíveis, 1 litro de gasolina emite um total de 3,65 quilos de equivalentes CO_2 e 1 litro de diesel a 4,01 quilos de equivalentes CO_2 ”.

¹Baseado em AULER, Décio et al., 2005.

²EMBRAPA, 2014.

Considere que sua casa fique a, pelo menos, 10 km do Campus do CEFET-MG. Calcule quanto de CO_2 você emite por ano no percurso de ida e volta de sua casa até a escola, durante o período letivo considerando as duas opções de deslocamento: de ônibus e de carro particular. No percurso de carro, este faz 10 km/L de gasolina e transporta, em média, duas pessoas; no percurso de ônibus, este faz 2 km/L de diesel e transporta, em média, 40 passageiros no ônibus. Se a sua casa fica a uma distância maior que 10 km, utilize, para fazer os cálculos, a distância real que você percorre.

Atividade: Animações sobre a estrutura e funcionamento do motor de combustão interna.

Assista às animações, acessíveis nos links indicados a seguir, e responda às questões em uma folha à parte.

Animação 1: <http://www.youtube.com/watch?v=emRxXykWB3Y>

Animação 2: <https://aprendafisica.wordpress.com/2016/03/17/simulacao-do-funcionamento-de-uma-motor-de-combustao-interna>

Responda às questões a seguir:

1. Divida em etapas o funcionamento básico de um motor de combustão interna. Dê nome a cada uma dessas etapas e descreva o que acontece em cada uma delas.
2. Indique a etapa em que há obtenção de energia térmica. Que tipo de energia é convertida em térmica?
3. Indique a etapa em que há conversão de energia térmica em mecânica.
4. É correto afirmar que a etapa indicada, em 3, é aquela na qual, efetivamente, há realização de trabalho útil pelo motor?

2.2 Motor de combustão interna, processos físicos, propriedades dos materiais e conceitos da Termodinâmica.

Alguma vez você abriu o capô de um carro e ficou imaginando o que acontece lá dentro?³ Para quem não entende do assunto, o motor de um carro pode parecer uma salada de metal, tubos e fios. O propósito do motor de um carro a gasolina (ou álcool, ou gás) é transformar em movimento a energia liberada pela queima de um combustível. Isso vai fazer o carro andar. O modo mais fácil de criar movimento a partir da gasolina é queimá-la dentro de um motor. Portanto, o motor de carro é um motor de combustão interna (combustão que ocorre internamente.) Com essa informação em mente podemos fazer duas observações:

- Há vários tipos de motores de combustão interna, também chamados de motores a explosão. Motores a diesel são um tipo e turbinas a gás são outro.
- Existem também motores de combustão externa. O motor a vapor de trens antigos e navios a vapor é o melhor exemplo de motor de combustão externa. O combustível (carvão, madeira, óleo ou outro) é queimado fora do motor para produzir vapor, e este gera movimento dentro do motor. A combustão interna é muito mais eficiente (gasta menos combustível por quilômetro) do que a combustão externa, e o motor de combustão interna é bem menor que um motor equivalente de combustão externa.

³Adaptado de 'Como funcionam os motores de carros', por Marshall Brain- traduzido por HowStuffWorks Brasil (<http://carros.hsw.uol.com.br/motores-de-carros.html>).

2.2 Motor de combustão interna, processos físicos, propriedades dos materiais e conceitos da Termodinâmica. 13

Para compreender o funcionamento básico de um motor de combustão interna a pistão é útil ter uma imagem de como funciona a "combustão interna". Um bom exemplo é um antigo canhão de guerra. Você já viu em algum filme soldados carregarem um canhão com pólvora, colocarem uma bala e depois o acenderem? Isso é combustão interna. Mas o que isso tem a ver com motores?

Um exemplo melhor: digamos que você pegue um pedaço comprido de tubo de PVC, talvez com 7,5 cm de diâmetro e uns 90 cm de comprimento e feche uma das extremidades. Então, digamos que você espirre um pouco de WD-40 (anti-corrosivo) dentro do tubo, ou jogue uma gotinha de gasolina e em seguida empurre uma batata para dentro do cano. Recomendamos que NÃO faça essa montagem.

Esse dispositivo é conhecido como canhão de batatas (figura 2.1) com uma centelha é possível inflamar o combustível. O interessante aqui, e a razão para falarmos de um dispositivo como esse, é que um canhão de batata pode arremessar uma batata a cerca de 150 metros de distância! Um pingo de gasolina armazena um bocado de energia.

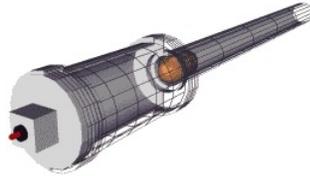


Figura 2.1: Canhão de batatas

Quase todos os carros atualmente usam o que é chamado de ciclo de combustão de 4 tempos para converter a energia liberada pela combustão da gasolina em movimento. Ele também é conhecido como ciclo Otto, em homenagem a Nikolaus Otto, que o inventou em 1867. Os 4 tempos estão ilustrados na figura 2.2.

Como são os tempos

Na figura você percebe que uma peça chamada **pistão** substitui a batata no canhão de batata. O pistão está ligado ao **virabrequim** por uma **biela**. Conforme gira, o virabrequim "arma o canhão."

1. A válvula de **admissão** se abre enquanto o pistão se move para baixo, levando o cilindro a aspirar e se encher de ar e combustível. Essa fase é a admissão.
2. O pistão volta para comprimir a mistura ar-combustível. É a **compressão**, que torna a explosão mais potente.
3. Quando o pistão atinge o topo do seu curso, a vela de ignição solta uma centelha para inflamar a gasolina. A gasolina no cilindro entra em combustão, transformando-se em gases com alta temperatura, que expandem rapidamente e empurram o pistão para baixo. É a etapa da **explosão/expansão**. O pistão, por inércia, continua o movimento para cima, expulsando os gases residuais, que não escaparam quando da abertura da válvula de escapamento.
4. Assim que o pistão atinge a parte de baixo do seu curso, a válvula de **escapamento** se abre e os gases resultantes da combustão deixam o cilindro através do tubo existente para esse fim. Ao final

do quarto tempo, quando o pistão atinge o topo do seu curso, o motor está pronto para o próximo ciclo, aspirando novamente ar e combustível.

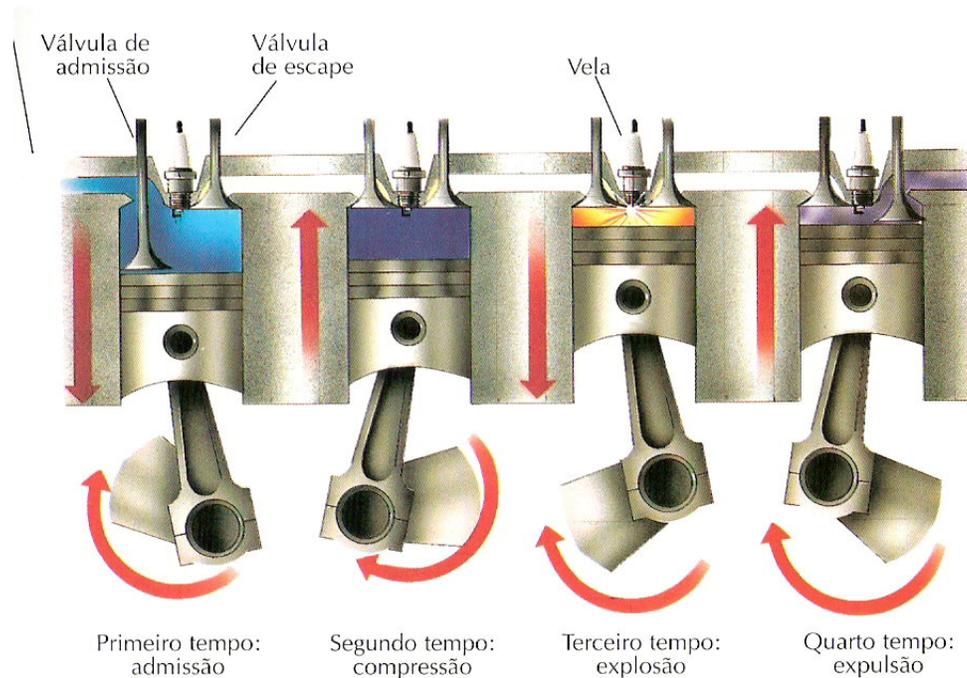


Figura 2.2: Os tempos/etapas do motor de combustão interna (Fonte: <https://abekwar.wordpress.com/2013/04/09/motores-a-pistao/>)

Observe que o movimento que resulta de um motor de combustão interna é **rotativo**, embora os pistões se movam de forma linear, da mesma forma que o canhão de batata. Em um motor o movimento linear dos pistões é convertido em movimento rotativo pelo virabrequim ou eixo de manivelas (2.3). É esse movimento rotativo que permite fazer as rodas dos carros girarem.

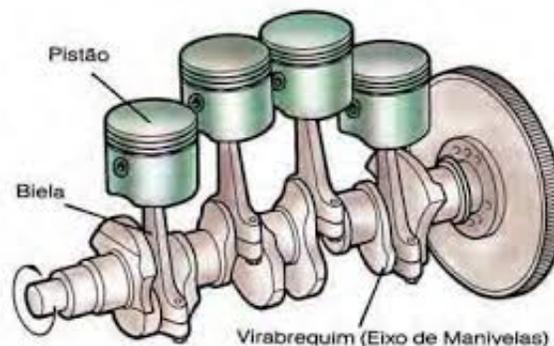


Figura 2.3: Mecanismo do virabrequim (Fonte: Manual Técnico. Curso Mahle Metal Leve. Motores de combustão interna, p. 12)

Do canhão para o motor de combustão interna, uma inovação fundamental foi tornar cíclico o processo de conversão de energia proporcionado pela combustão.

O motor de combustão interna é uma máquina térmica

Uma máquina térmica é um dispositivo que converte calor em trabalho. No caso do motor de combustão interna, calor liberado na explosão da mistura ‘combustível + ar’ expande os gases resultantes da combustão. Parte desse calor é, portanto, utilizado para realizar trabalho sobre o pistão, cujo movimento é transmitido para as rodas do carro, fazendo-o se movimentar.

Nem todo o calor é utilizado para a realização de trabalho. No caso dos motores de combustão interna, esse rendimento é muito baixo, em média, cerca de 30%. Isso significa que da energia liberada por um litro de gasolina, em um motor de carro convencional, 70% são perdidos para a vizinhança: sistema de refrigeração, atmosfera e outras peças do carro.

A escolha dos materiais utilizados na fabricação dos motores deve levar em conta as altas temperaturas produzidas pelo calor liberado pela combustão e não aproveitado na forma de trabalho. Um sistema de refrigeração impede que esses materiais atinjam temperaturas excessivamente altas que provoquem sua fusão.

A compreensão da estrutura e funcionamento do motor envolve processos físicos, propriedades de materiais e conceitos que compõem um campo de estudo chamado Termodinâmica. Algumas dessas propriedades, processos e conceitos estão mostrados figura 2.4.

PROCESSOS FÍSICOS	CONCEITOS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
O calor liberado na combustão.	Processos de conversão de energia Calor de combustão
Efeitos das trocas de calor: aquecimento e refrigeração do motor, dilatação das peças do motor, mudança de fase.	Calor, temperatura, processos de transferência de calor, dilatação, condutividade térmica, coeficiente de dilatação, capacidade térmica, calor específico, calor latente de mudança de fase e temperatura de mudança de fase.
As fases do ciclo de um motor.	Comportamento dos gases e transformações termodinâmicas.
Conversão de calor em trabalho.	Calor e trabalho como processos de transferência de energia. 1ª lei da termodinâmica e a conservação da energia. 2ª lei da termodinâmica e a degradação da energia.

Figura 2.4: Fundamentos científicos do motor de combustão interna

A figura 2.4 retrata o percurso que será seguido tendo o motor de combustão como o objeto da tecnologia que contextualiza o estudo de conceitos e princípios da Termodinâmica, com aplicações em muitas outras situações que envolvem fenômenos térmicos.

Ultrapassando o domínio dos conceitos, há que se destacar que a utilização da tecnologia do motor de combustão nos sistemas de transporte tem **implicações sociais**.

Ao se comparar a energia gasta por km, por pessoa, constata-se que a utilização do automóvel particular gasta uma quantidade bem maior de energia. Isso implica mais gasto de energia e mais emissões de CO_2 e outros gases e materiais poluentes na atmosfera.

O rendimento médio dos motores de combustão interna é muito baixo. A maior parte da energia liberada na combustão é desperdiçada.

O excesso de automóveis em circulação nas grandes cidades torna a mobilidade urbana uma impossibilidade e isso é um problema que aflige a todos os seus habitantes, de forma especial estudantes e trabalhadores, usuários cativos do transporte coletivo.

Por que a tecnologia dos motores de combustão tem um rendimento tão baixo? Se há tantas ressalvas quanto ao uso do carro particular e da tecnologia dos motores de combustão, por que há tantos carros particulares circulando e porque essa tecnologia é intensivamente utilizada? Que ações podem ser desenvolvidas em nossa cidade para solucionar o problema da mobilidade?

Essas questões têm relação com a 2ª lei da termodinâmica e e poderão ser retomadas durante o estudo dessa lei. Sua discussão pode ser uma forma significativa de concluir o estudo da Termodinâmica.

O próximo passo nessa caminhada da Termodinâmica, iniciada com uma discussão geral sobre a estrutura e funcionamento do motor de combustão interna, é descrever o processo de conversão de energia que acontece dentro do motor utilizando os conceitos de **energia térmica, temperatura, calor e trabalho**.

Questões

1. Que inovação técnica fundamental foi necessária para aproveitar, de forma contínua, a energia da combustão na construção de máquinas térmicas?
2. Por que o motor de combustão interna é caracterizado como máquina térmica?
3. O motor de combustão interna pode ser considerado como uma máquina eficiente?

2.3 Energia térmica, temperatura e calor

Ao iniciarmos determinada viagem de automóvel, no início, o tanque está cheio de gasolina. Após percorrermos algumas centenas de quilômetros, este estará vazio. Para você, o que aconteceu com a gasolina?

A gasolina, misturada com o oxigênio do ar, sofreu combustão, uma reação química exotérmica em que os reagentes, oxigênio e gasolina, se configuram em novos produtos com liberação de grande quantidade de energia.



Embora a energia liberada na combustão esteja explicitada como um produto da reação, ela está distribuída entre as moléculas do produto da combustão.

Onde ocorre a combustão da gasolina? Em câmaras do motor do carro, chamadas cilindros, cada uma delas fechada por uma tampa móvel, chamada pistão (figura 2.5).

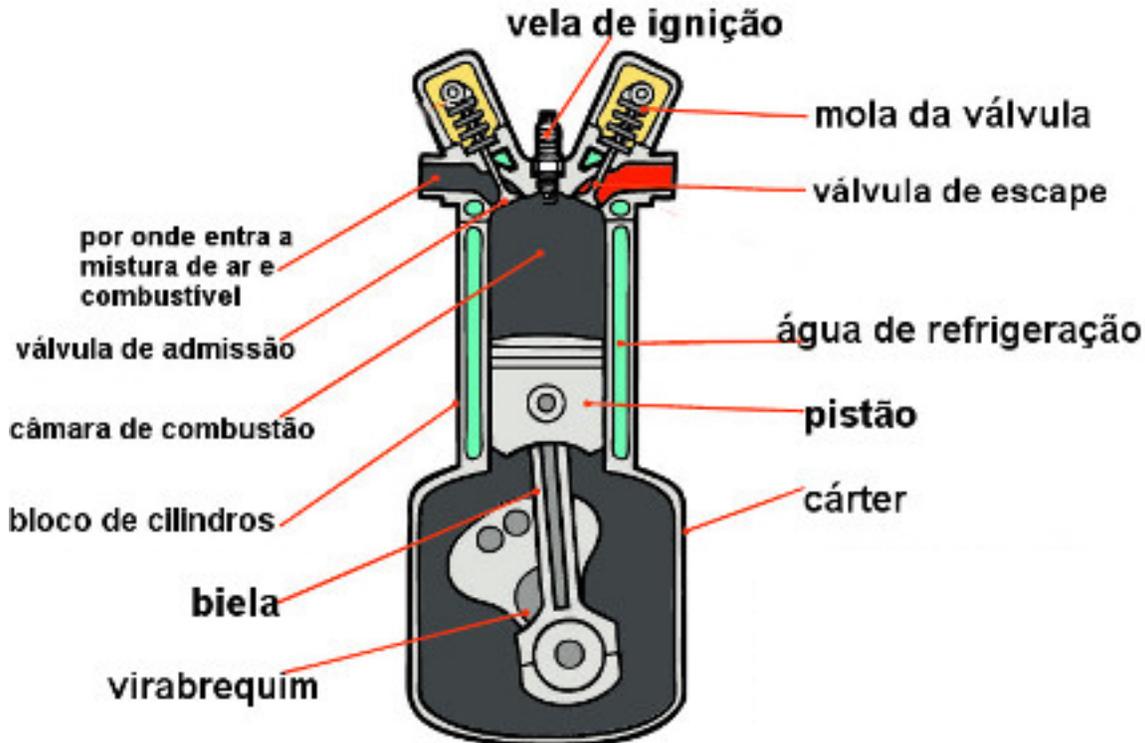


Figura 2.5: Partes do motor (Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>)

O que acontece com a energia liberada na combustão? A combustão é uma reação química na qual energia potencial química é convertida em energia térmica dos produtos da reação.

Energia térmica é a soma das energias cinéticas moleculares, isto é, das energias de movimento das moléculas constituintes de um material. Essa energia cinética molecular é diferente da energia cinética de um corpo em queda. No corpo em queda todas as moléculas se movem em conjunto, na mesma direção e sentido. A energia térmica resulta do movimento desordenado das moléculas constituintes de um material. Qualquer que seja a temperatura de um material, suas moléculas estão em contínuo movimento. A qualquer temperatura, um material possui energia térmica.

A energia convertida (liberada) na combustão encontra-se inicialmente na agitação das moléculas que constituem os produtos da reação. As moléculas de CO_2 , vapor d'água e demais produtos da combustão encontram-se em um alto grau de agitação. Que grandeza física indica esse alto grau de agitação molecular?

A temperatura é a grandeza física que indica o grau de agitação molecular de um material. Os produtos da combustão, ao absorverem a energia liberada na reação, adquirem um **alto grau de agitação molecular** e, portanto, encontram-se em **alta temperatura**.

Considere os produtos da reação de combustão como um sistema. **Um sistema é uma porção do universo que destacamos para ser estudada.** Se definimos um sistema, ele implica uma vizinhança.

Vizinhança é o restante do universo circundante ao sistema destacado. Se considerarmos como sistema os produtos da combustão, sua vizinhança será constituída pelo bloco do motor, pelo sistema de refrigeração do motor, pelas demais peças do carro próximas ao motor, e pela atmosfera. Nesse caso, sistema e vizinhança encontram-se com temperaturas muito diferentes, o sistema com uma temperatura e agitação molecular muito maiores que a vizinhança. Ocorre então uma transferência de energia do sistema para a vizinhança. **Essa energia transferida devido à diferença de temperatura entre sistema e vizinhança é chamada de calor.**

Nesse processo de transferência de energia na forma de calor, as moléculas dos produtos da combustão, com alto grau de agitação, se expandem e movimentam o pistão, a tampa móvel do cilindro. Nesse caso os gases resultantes da combustão exercem **força e produzem o deslocamento do pistão**, portanto, realizam **trabalho**. Logo, parte do calor que se transfere dos produtos da combustão para sua vizinhança é convertido em **trabalho**.

O motor de combustão interna é denominado máquina térmica, um dispositivo que converte calor em trabalho.

Resumindo, na combustão da gasolina (figura 2.6):

Energia potencial química é convertida em energia térmica dos produtos da combustão, que apresentam **alto grau de agitação molecular** e, portanto, **alta temperatura**.

Nesse processo, **parte do calor absorvido pelos gases resultantes da combustão é convertida em trabalho**, pois esses gases, com alta agitação molecular, se expandem e movimentam o pistão, a tampa móvel do cilindro. Esse movimento do pistão é transferido para as rodas do carro, proporcionando seu movimento.

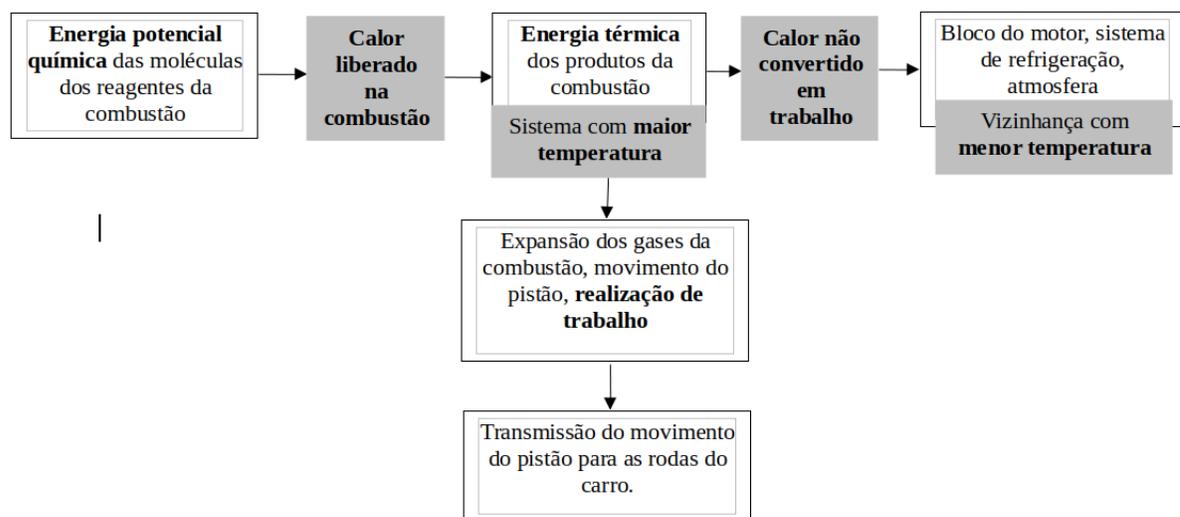


Figura 2.6: Transformações de energia no motor de combustão interna.

2.3.1 A Lei Zero da Termodinâmica

Ao discutirmos a conversão de energia no motor de combustão interna, a definição de temperatura foi interpretada do ponto de vista microscópico, isto é, como expressão de propriedades, não observáveis, dos átomos e moléculas constituintes do corpo. Interpretamos temperatura como uma grandeza física que indica o grau de agitação das moléculas de um corpo.

Em Termodinâmica, temos a oportunidade de fazer, sistematicamente, relações entre os níveis micro e macroscópico. Essa relação se faz presente na definição de temperatura, pois ela é definida como uma grandeza física relacionada a propriedades macroscópicas, isto é, propriedades observáveis de um corpo, passíveis de serem medidas.

Nossa percepção pelo tato atribui à temperatura o significado de indicar o quão quente ou frio se encontra um corpo.

E sabemos, pela experiência, que dois corpos, a diferentes temperaturas, que podem trocar calor entre si, tendem ao equilíbrio térmico, caracterizado pela igualdade de temperatura entre eles. Essa afirmação está diretamente relacionada com a LEI ZERO DA TERMODINÂMICA, que pode ser assim enunciada:

Se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo B, e B está em equilíbrio térmico com outro corpo C, então A e C estão em equilíbrio térmico.

Esse enunciado parece indicar uma situação óbvia e necessária, mas não é esse o caso. Por exemplo, João conhece Maria e Maria conhece José. Isso não implica que João e José se conhecem. Um ímã atrai dois pedaços de ferro. Dessa observação não decorre necessariamente que os pedaços de ferro exercerão atração entre si. Se a magnetização desses pedaços de ferro não permanecer, após a interação com o ímã, a atração entre eles, efetivamente, não ocorrerá.

Portanto, do ponto de vista macroscópico, a definição de temperatura é tal que, se dois corpos em contato térmico, alcançam o equilíbrio, após certo tempo, esse equilíbrio é expresso pela igualdade das temperaturas dos corpos.

Entretanto, a nossa percepção de temperatura pelo tato é um tanto subjetiva e pode levar a ambiguidades (figura 2.7). Imagine que você coloca sua mão direita dentro de uma vasilha com água fria e a esquerda dentro de outra vasilha com água quente. Depois você coloca as duas mãos dentro de uma terceira com água morna. Cada mão indicará uma temperatura diferente para a água dentro da terceira vasilha.



Figura 2.7: A percepção de temperatura pelo tato pode ser enganosa (<http://www.if.ufrgs.br/cref/leila/temp.htm>)

Retorne ao enunciado da Lei Zero da Termodinâmica e veja que ela está estreitamente relacionada com a construção de um termômetro, pois este nada mais é que um dispositivo que fornece uma medida indireta de temperatura, baseada no pressuposto de que, após certo intervalo de tempo, ele entra em equilíbrio térmico com o sistema cuja temperatura se quer medir. No enunciado da Lei Zero da Termodinâmica, anteriormente apresentado, B poderia ser considerado o termômetro que indica a igualdade de temperaturas entre A e C.

O que significa dizer que o termômetro faz uma medida indireta de temperatura? Significa que esse dispositivo de medida de temperatura apresenta uma propriedade observável (ponto de vista macroscópico) relacionada à agitação térmica molecular, não observável (ponto de vista microscópico).

Essa propriedade observável é chamada VARIÁVEL TERMOMÉTRICA, por exemplo: volume de um líquido ou gás, resistência elétrica de um condutor, cor de um metal, pressão de um gás, entre outras. É com base na variável termométrica que se constrói a escala do termômetro, assunto da próxima seção.

Questões

As respostas às questões a seguir devem ser justificadas com cálculos e/ou comentários escritos:

4. Conceitue energia térmica, temperatura e calor, destacando as diferenças entre esses conceitos
5. Utilizando os conceitos enunciados no item 1, descreva o processo de conversão de energia que acontece em um motor de combustão interna, a partir da combustão da mistura 'combustível + ar'.
6. Conceitue sistema e vizinhança.
7. Utilize os conceitos de sistema e vizinhança para descrever o processo de conversão de calor em trabalho no motor de combustão interna.

8. Com base nas definições de energia térmica, temperatura e calor, apresentadas no texto, estão corretos os enunciados apresentados abaixo?

a) A temperatura é uma medida do calor de um corpo.

b) Estou com muito calor, hoje.

9. Considere duas amostras de um mesmo material com massas diferentes e à mesma temperatura.

a) Haverá troca de calor entre elas?

b) Elas possuem a mesma energia térmica?

10. Dois blocos idênticos A e B (figura 2.8), ambos de ferro, são colocados em contato e isolados de influências externas, como mostra a figura 2.8. As temperaturas iniciais dos blocos são, respectivamente, 200°C e 50°C .



Figura 2.8: Blocos de Ferro (Fonte: https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Calor3.php - modificada)

a) Use o conceito de calor para descrever o que acontecerá com as temperaturas de A e de B, até eles alcançarem o equilíbrio térmico. Caracterize as temperaturas de A e de B, no equilíbrio térmico.

b) É correto afirmar que a igualdade de temperatura entre os blocos é a condição para que seja interrompida a troca de calor entre eles?

11. Para se determinar a temperatura de um pequeno inseto, um grande número deles foi colocado em um recipiente. Em seguida, introduziu-se um termômetro que indicou uma temperatura de 25°C .

a) Para determinar a temperatura de cada inseto seria necessário conhecer a quantidade de insetos colocada dentro do recipiente?

b) Qual é a temperatura de um dos insetos?

2.4 Escalas termométricas

Nos motores de combustão interna a temperatura no interior do cilindro é muito elevada (por volta de 500°C) devido à combustão da gasolina, álcool, diesel ou gás. Existe um sistema nesses veículos - sistema de arrefecimento - próprio para controlar a temperatura do bloco do motor, evitando assim que ele sofra danos permanentes ao sofrer um superaquecimento.

Um dos componentes do sistema de arrefecimento dos carros é o sensor de temperatura (figuras 2.9 e 2.10) que fica inserido no bloco do motor e em contato com o líquido de arrefecimento que envolve os cilindros do motor.

Quando a temperatura do líquido de arrefecimento muda, uma propriedade elétrica do sensor também altera: a resistência elétrica. Dessa forma é possível estabelecer uma relação entre a temperatura do líquido que circula o bloco do motor e sua resistência elétrica. Dizemos que a resistência elétrica do sensor é a VARIÁVEL TERMOMÉTRICA desse termômetro e o fio

metálico, cuja resistência elétrica varia, é a SUBSTÂNCIA TERMOMÉTRICA utilizada. Os termômetros utilizados nos laboratórios de química utilizam como **substância termométrica** um *líquido* (mercúrio ou álcool) que apresentam a *dilatação de seu volume* como **variável termométrica**. Diferentes tipos de termômetros, como veremos mais adiante, apresentam diferentes variáveis e substâncias termométricas.



Figura 2.9: Sensor de temperatura (Fonte: <https://fueltech.com.br/products/sensor-de-temperatura-do-motor>)

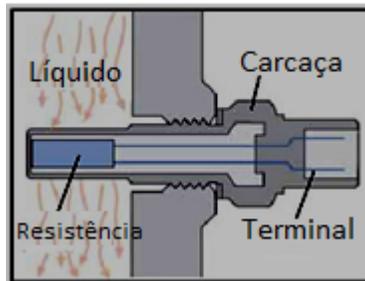


Figura 2.10: sensor no bloco do motor

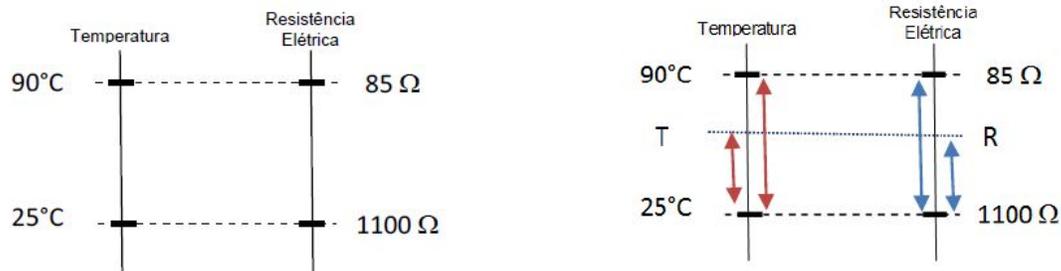
Voltemos ao nosso sensor de temperatura. A unidade que mede a resistência elétrica é o OHM (Ω). Isso significa que se ocorrer uma alteração na temperatura do líquido (em $^{\circ}C$), o valor da resistência elétrica (em Ω) também mudará. Conhecendo-se a função matemática que estabelece essa relação podemos escrever que **a temperatura é função da resistência elétrica**, ou em linguagem matemática:

$$t=f(R) \left\{ \begin{array}{l} t \text{ é medido em } ^{\circ}C \\ R \text{ é medido em ohm} \end{array} \right.$$

Construção da escala termométrica: Vamos supor que para cada valor de temperatura do exemplo acima, exista somente um valor da resistência elétrica do sensor e que, essa relação seja representada por uma equação do 1^o grau ($y = ax + b$). O manual de um fabricante⁴ de sensores informa que quando a temperatura do líquido de arrefecimento é de $25^{\circ}C$ o valor da resistência elétrica é de

⁴MTE-Thomson. Sistema de arrefecimento.

1110 ohms e para a temperatura de 90°C o valor da resistência elétrica é de $85\ \Omega$ ⁵. Podemos representar esses valores conforme os diagramas a seguir.



Para descobrir como se relacionam as grandezas, podemos utilizar as regras de proporção elaboradas por Tales de Mileto (624a.C - 546a.C). O diagrama da esquerda mostra as correspondências entre temperatura, em Celsius, e a resistência do sensor, em ohms, ao longo de duas retas verticais paralelas.

Para determinar a função entre a temperatura T e a resistência elétrica R , acrescenta-se, conforme o diagrama da direita, valores desconhecidos e correspondentes de temperatura e resistência. Basta, então, fazer a proporção entre as medidas dos segmentos proporcionais envolvendo em uma das razões os valores desconhecidos de T e R .

$$\frac{T - 25}{90 - 25} = \frac{R - 1100}{85 - 1100} \quad (2.1)$$

Resolvendo a equação, teremos que:

$$T = \frac{13}{203}(1100 - R) + 25 \quad (2.2)$$

Observe que a equação nos permite determinar o valor da temperatura caso o valor da resistência elétrica seja conhecida, ou vice-versa. Toda equação física possui um limite de validade: não faria sentido algum determinarmos o valor da resistência elétrica para uma temperatura de 10.000°C !

EXEMPLO:

Utilize a equação acima para determinar a resistência elétrica do sensor quando a temperatura do líquido de arrefecimento é de 50°C .

SOLUÇÃO:

$$50 = \frac{13}{203}(1100 - R) + 25 \Rightarrow 50 - 25 = \frac{13}{203}(1100 - R) \Rightarrow 25 \times 203 = 13(1100 - R) \quad (2.3)$$

⁵Na maioria dos sólidos, a resistência elétrica R aumenta com o aumento da temperatura; nesses casos o material é do tipo PTC (coeficiente positivo de temperatura), diferentemente do material de que é feito o resistor desse sensor, que é NTC - coeficiente negativo de temperatura.

$$5075 = 14300 - 13R \Rightarrow 13R = 9225 \Rightarrow R = 710\Omega. \quad (2.4)$$

Questões

12. Substitua em R o valor de 1100Ω e encontre o valor de T. (esta é uma maneira de verificar se sua equação está correta)
13. Substitua em T o valor de 90°C e encontre o valor de R.
14. Quatro tipos de termômetros⁶ estão mostrados na figura 2.11. Em cada um deles identifique a SUBSTÂNCIA e a VARIÁVEL TERMOMÉTRICAS.



Figura 2.11: Tipos de termômetro

15. Pesquise sobre a escala de temperatura Celsius e elabore um pequeno texto sobre como ela foi construída. Faça o mesmo para a escala Fahrenheit e mostre como ambas se relacionam (equação de conversão).

Construção da escala Kelvin ou absoluta (K): Os estudos das propriedades dos gases, dentre outros, conduziram os cientistas à ideia de que a temperatura de um objeto está associada à agitação das partículas que a compõem, isto é, quanto maior a temperatura maior seria a agitação de suas moléculas/átomos. Conforme já discutimos, essa é a definição de temperatura do ponto de vista microscópico.

Essa associação entre temperatura e agitação molecular leva a uma interessante pergunta: pode um corpo não apresentar agitação alguma das partículas que o constituem (temperatura mínima possível) ou existiria um limite superior para o grau de agitação dessas partículas (temperatura máxima possível)?

Diferentes campos de pesquisa da Física Clássica apresentam para a primeira pergunta uma resposta positiva e para segunda, uma negativa. A menor temperatura possível para um sistema macroscópico

⁶Fontes das figuras, da esquerda para a direita: <https://www.lojatudo.com.br/mini-termometro-ambiente-auto-adesivo-liquido-vermelho-incoterm-41736.html>; <http://horizonte.forumeiros.com/t230-tipos-de-termometros-fisica-8-serie-9-ano>; <https://www.fisiofernandes.com.br/Sistema/404?ProductLinkNotFound=termometro-digital-infravermelho-techline>; <http://www.novatriadaeletronica.com.br/produtos/detalhe/1033/termometro-digital-com-termopar-tipo-k-tm-902c>

⁷ seria de, aproximadamente, $-273,16^{\circ}\text{C}$. Em função disso foi proposta uma escala de temperaturas na qual não houvesse valores negativos (escala absoluta), uma vez que quando não houvesse agitação das partículas de um corpo, a temperatura a ele atribuída seria ZERO - zero kelvin (0 K). Essa escala é denominada escala Kelvin (K) e é a escala de temperatura utilizada no sistema internacional de unidade (SI). Por convenção utiliza-se o símbolo "t" para temperaturas na escala Celsius e "T" para temperaturas na escala Kelvin. Tanto a escala Kelvin quanto a Celsius são escalas centígradas e relacionam-se conforme o quadro que segue:

Relação $t(^{\circ}\text{C})$ e $T(\text{K})$		Fenômeno associado
T=t+273	$100^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 373\text{K}$	Ebulição da água (1 atm)
	$0^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 273\text{K}$	Solidificação da água (1 atm)
	$-273^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 0\text{K}$	Menor temperatura possível

2.5 Exercícios

1.(Cesgranrio) Com o objetivo de recalibrar um velho termômetro com a escala totalmente apagada, um estudante o coloca em equilíbrio térmico, primeiro, com gelo fundente e, depois, com água em ebulição sob pressão atmosférica normal. Em cada caso, ele anota a altura atingida pela coluna de mercúrio: 10cm e 30cm, respectivamente, medida sempre a partir do centro do bulbo. A seguir, ele espera que o termômetro entre em equilíbrio térmico com o laboratório e verifica que, nesta situação, a altura da coluna de mercúrio é de 18,0cm. Qual a temperatura do laboratório na escala Celsius deste termômetro?

2.Em uma certa escala X de temperatura, os pontos fixos do gelo e do vapor correspondem, respectivamente, a 25 X e a 85 X. Sabendo que a temperatura de fusão do enxofre é de 388 K, determine o valor dessa temperatura na escala X.

3.Sabemos que o zero absoluto é um valor teórico, ou seja, um valor encontrado por meio de cálculos, e não de forma experimental. Pesquise qual foi, até os dias de hoje, a menor temperatura conseguida de forma experimental e discuta o que poderia ocorrer se o zero absoluto fosse atingido.

4.Construiu-se um alarme de temperatura (figura 2.12) com base numa coluna de mercúrio e num sensor de passagem, como sugere a figura. A altura H do sensor óptico (par laser/detector) em relação ao nível pode ser regulada de modo que, à temperatura desejada, o mercúrio, subindo pela coluna, impeça a chegada de luz ao detector, disparando o alarme. Calibrou-se o termômetro usando-se os pontos principais da água e um termômetro auxiliar, graduado na escala Celsius, de modo que a 0°C a altura da coluna de mercúrio é igual a 8 cm, enquanto a 100°C a altura é de 28 cm. A temperatura do ambiente monitorado não deve exceder 60°C . Qual a altura em que o sensor óptico deve ser instalado?

⁷Essa condição se faz necessária uma vez que, classicamente, a temperatura é uma grandeza estatística e somente faz sentido quando associada a uma grande quantidade de partículas.

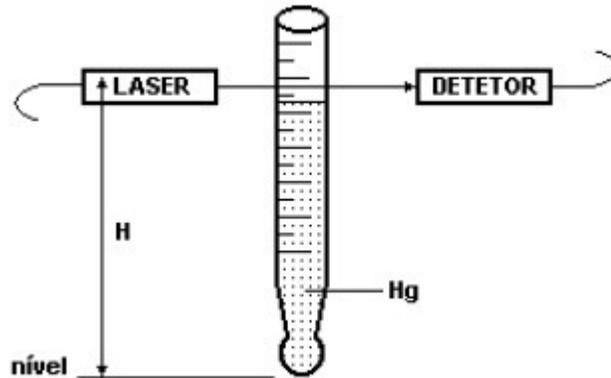


Figura 2.12: Alarme de temperatura (Fonte: <https://brainly.com.br/tarefa/9606725>)

5. (EsPCEX-SP) Comparando-se a escala Z com a escala C (Celsius) de dois termômetros, obteve-se o gráfico mostrado na figura 2.13, que mostra a correspondência entre essas duas escalas. Quando o termômetro graduado em $^{\circ}\text{C}$ estiver registrando 90, o termômetro graduado em $^{\circ}\text{Z}$ estará registrando:

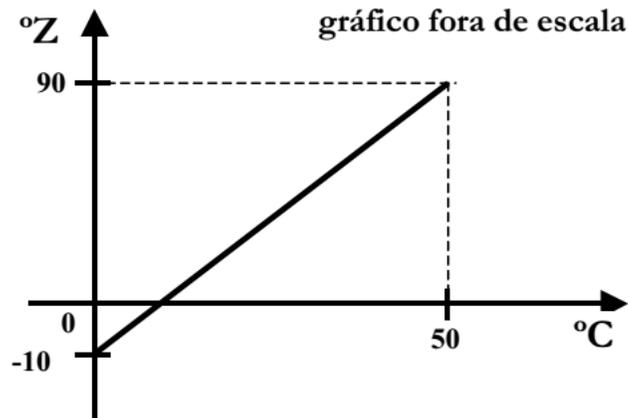


Figura 2.13: Gráfico da escala Z em função da escala Celsius

- A) 100
- B) 120
- C) 150
- D) 170
- E) 200

2.6 Respostas das questões e dos exercícios

Questões

1 a 7. Discuta com seu professor.

8. a) Incorreto.

b) Incorreto.

9.a) Não.

b) Não.

10. Discuta com seu professor.

11. a) Não.

b) 25°C.

12 a 14. Discuta com seu professor.

Exercícios

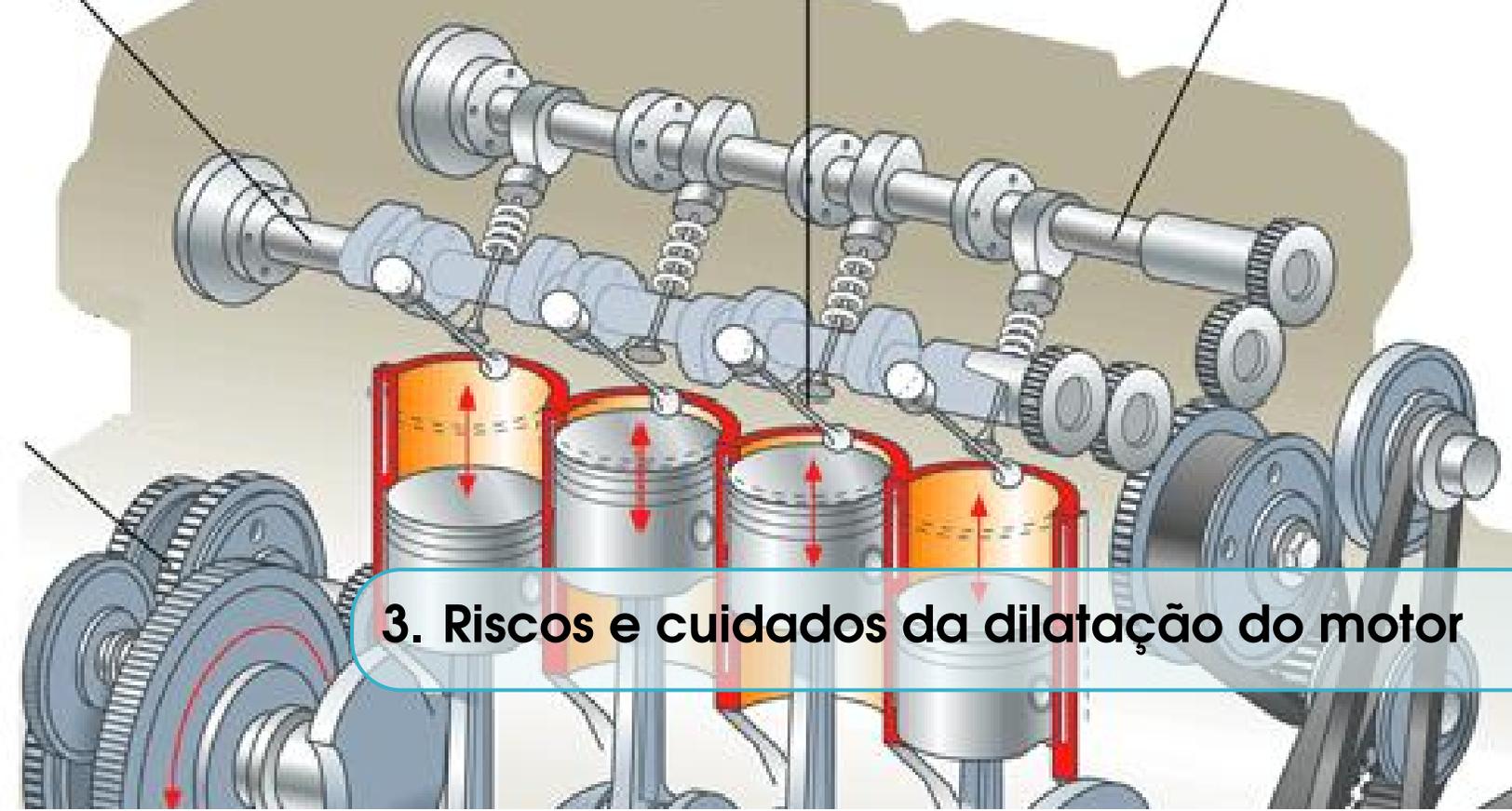
1. 40°C.

2. 94X.

3. Discuta com seu professor.

4. 20 cm.

5. D.



3. Riscos e cuidados da dilatação do motor

3.1 O que acontece a um material quando sua temperatura aumenta?

Se a temperatura aumenta, a agitação térmica das moléculas constituintes do material aumenta também. Essa maior agitação térmica molecular provoca, na maioria dos materiais, um maior afastamento entre as moléculas. Macroscopicamente, em termos observáveis, aumentam as dimensões do material. Dizemos, portanto, que ele sofreu **dilatação**. A redução da temperatura, nesse caso, provocaria o processo inverso, a **contração** do material.

A variação de temperatura do corpo pode provocar outras alterações nas propriedades do objeto/material como: mudanças de estado físico, alteração das propriedades elétricas e/ou ópticas, mudança na cor, etc... No presente texto discutiremos com mais profundidade as alterações no volume dos objetos devido à alteração de temperatura.

Algumas partes do motor operam em regime de altas temperaturas como é o caso do pistão, das válvulas de admissão e escapamento, que estão em contato direto com os gases resultantes da combustão. Estes gases podem atingir temperaturas próximas de 500°C momentaneamente. Essas peças sofrem, portanto, variações consideráveis de temperatura, cujos efeitos devem ser previstos no projeto e construção dos motores.

Em um manual sobre motores de combustão interna ¹ o fenômeno da dilatação aparece relacionado às seguintes situações envolvendo peças e funcionamento do motor:

I. A união do bloco do motor com outras peças, em razão da necessidade de total vedação requer uma junta com material que evite vazamentos, por razão do aquecimento e dilatação dos metais. As juntas de dilatação mantêm a folga necessária entre o bloco e as peças de modo que eles podem dilatar e se manterem bem unidos, não obstante os aumentos em suas dimensões. Na figura 3.1 está mostrada uma junta de dilatação, destacada em preto, e o bloco do motor. Ela é utilizada na parte superior do bloco onde os cilindros são vedados e onde se posicionam as válvulas de admissão e de escapamento.

¹TILLMANN, 2013.



Figura 3.1: Junta de dilatação e bloco do motor (Fonte: <https://omecanico.com.br/o-problema-nao-e-de-junta>)

II. “A fim de que a válvula vede bem e, para permitir ajustes, desgaste, expansão e contração devido a mudanças de temperatura, é necessária sempre alguma folga. Essa folga deve ser a mínima necessária para assegurar que a válvula fique ajustada na sede. Uma folga razoável deve ser aceita para erros de ajustagem, prevendo nessas condições, a dilatação dos materiais e a manutenção da lubrificação” (p. 340). Ver figura 3.2.

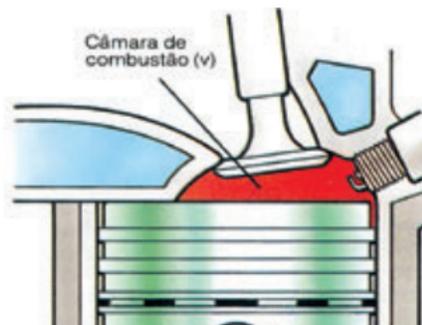


Figura 3.2: Câmara de combustão do motor

III. “Em marcha, a dilatação dos pistões é grande. As folgas médias têm um diâmetro maior para os pistões de liga de alumínio devido à maior dilatação dessa liga em relação à fundição ou ao aço. Nos pistões de aço, maus condutores de calor, a temperatura eleva-se mais dos que nos pistões de liga de alumínio. Em temperatura ambiente, o pistão deve ser ajustado no seu cilindro com certa folga, para que, mesmo depois de ter atingido a sua temperatura de marcha, ainda deslize livremente. As folgas de dilatação ocorridas na fabricação do pistão dependem das seguintes situações:

- do diâmetro do cilindro;
- dos metais que compõem o pistão;
- da forma do pistão;

- do regime de rotação do motor;
- do sistema de refrigeração e de sua eficácia;
- das condições de emprego do motor;
- do tipo de combustível.

(...)” (p. 36-37)

IV. “De um modo geral, a refrigeração a ar faz com que o motor funcione a temperaturas muito variáveis. A ajustagem dos pistões, segmentos e válvulas exige folgas de dilatação suficientes e um óleo lubrificante de excelente qualidade” (p.83).

O que o projetista de um motor de combustão deve considerar, em termos de cálculos, para garantir que o fenômeno da dilatação não implique maior desgaste das peças? Um ponto de partida é o cálculo da dilatação linear de um sólido.

Cálculo da dilatação linear de um sólido

Calcular a dilatação linear de um material sólido significa determinar quantitativamente o quanto varia o comprimento desse material ao longo de uma única dimensão. No entanto, a dilatação é sempre volumétrica, o que significa que os materiais dilatam ao longo das três dimensões: comprimento, altura e largura.

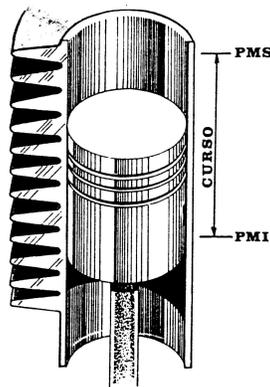


Figura 3.3: Pistão de um motor de combustão interna (Fonte: <https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/mci.pdf>, p. 9)

Ao ter sua temperatura aumentada, o pistão da figura 3.1 sofre aumento de comprimento em todas as direções, por exemplo, ao longo do seu diâmetro. Na figura, curso do pistão refere-se à extensão, na qual ele se desloca dentro do cilindro. PMS e PMI significam, respectivamente, ponto morto superior e ponto morto inferior, posições nas quais o pistão inverte seu movimento dentro do cilindro.

Considere que, a uma dada temperatura ambiente t_0 , o diâmetro inicial do pistão seja L_0 . Pode-se mostrar, por meio de experimentos, que se a temperatura do pistão for aumentada para t , a variação ΔL no comprimento do seu diâmetro é calculada por:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, α é uma propriedade de cada material, chamada coeficiente de dilatação linear e $\Delta t = t - t_0$ é a variação de temperatura do pistão. Como base na equação. 3.1 e sabendo que α é

uma constante, propriedade de cada material, podemos afirmar que a dilatação linear é diretamente proporcional ao comprimento inicial do material e à sua variação de temperatura.

Exemplo:

1. Duas barras de 3 metros de alumínio encontram-se separadas por 1cm à uma temperatura $\theta = 20^\circ C$. Qual deve ser a temperatura para que elas se encostem, considerando que a dilatação, ao longo dos comprimentos das barras, seja apenas no sentido de diminuir o espaçamento entre elas? Sendo $\alpha_{Al} = 22 \times 10^{-6} C^{-1}$.

Sendo a dilatação linear dada por

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta$$

Mas a variação no comprimento das barras deve ser apenas 0,5cm = 0,005m, pois as duas barras variarão seu comprimento, então substituindo os valores:

$$\begin{aligned} 0,005 &= 3 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta - 20) \\ 0,005 &= (66 \cdot 10^{-6} \cdot \theta) - (1320 \cdot 10^{-6}) \\ 66 \cdot 10^{-6} \cdot \theta &= 0,005 + 1320 \cdot 10^{-6} \\ \theta &= \frac{0,005 + 1320 \cdot 10^{-6}}{66 \cdot 10^{-6}} \\ \theta &= 96^\circ C \end{aligned}$$

Questões

1. Um prédio, feito de estrutura de aço, tem juntas verticais a cada 100m. Essas juntas correspondem a vãos de 10 cm (figura 3.4), previstos pelo engenheiro. Considere o coeficiente de dilatação linear do aço igual a $3,2 \times 10^{-6} C^{-1}$. Que variação de temperatura máxima que esse vão permite sem risco para o prédio?

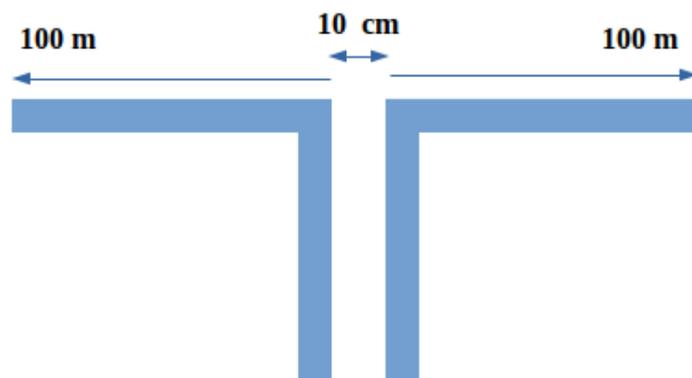


Figura 3.4: Desenho esquemático de uma junta de dilatação entre vigas horizontais de 100m.

2. No item III, extraído do manual sobre motores, foram apresentados fatores que devem ser levados em conta na previsão da folga entre o pistão e a parede interna do cilindro. Relacione cada fator indicado a um ou mais termos do segundo membro da equação 3.1.

Outras situações em que o fenômeno da dilatação deve ser levado em conta

Conforme discutido em exercício anterior (figura 3.4), os engenheiros evitam acidentes ao prever as dilatações que os materiais vão sofrer, deixando folga entre as estruturas de um prédio. A figura 3.5 mostra outra junta de dilatação vertical numa vista parcial da estrutura de um prédio.

Na fabricação de barris, aros metálicos são aquecidos. Após dilatarem o suficiente, esses aros envolvem os barris. Ao se resfriarem sofrem contração e ficam bem justos e firmes comprimindo as partes, em geral de madeira, que constituem superfície dos barris.

Não apenas os sólidos, mas também líquidos e gases dilatam quando aquecidos. Os líquidos dilatam mais que os sólidos (em média 10x mais) e os gases dilatam ainda mais que os líquidos (em média, 100x mais). O maior efeito do aumento da agitação molecular nas dimensões de materiais, nos estados líquido e sólido decorre do enfraquecimento progressivo das forças intermoleculares quando se passa do sólido para o líquido e do líquido para o gasoso.



Figura 3.5: Junta de dilatação sendo limpa para preenchimento posterior com material flexível (Fonte: <http://sandbox.cachina.com.br/sites/cascola/passos.html>)

Algumas substâncias contraem quando são aquecidas. A água, em determinada faixa de temperatura, é um caso exemplar. Quando aquecida de 0°C a 4°C , a água tem o seu volume diminuído. Portanto a densidade da água líquida é máxima a 4°C . Com base no gráfico mostrado na figura 3.6, você saberia explicar por quê? Esse comportamento singular da água faz com que a superfície de um lago gelado se congele a partir da superfície, garantindo a existência de água líquida em regiões mais profundas do lago, essencial para a manutenção da vida aquática naquele local.

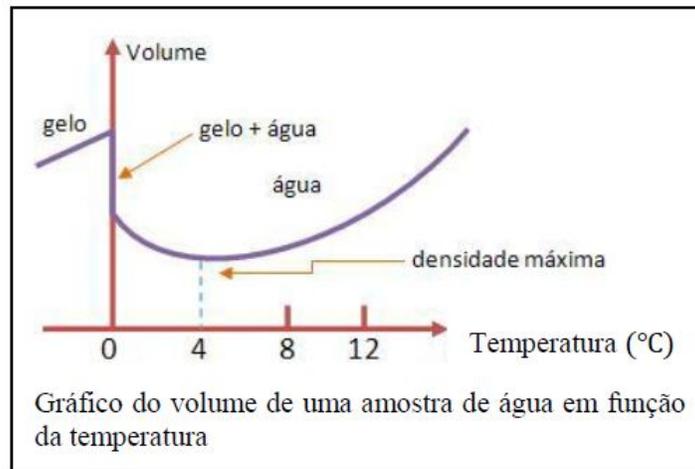


Figura 3.6: Gráfico de um volume de água em função da temperatura (Fonte: <https://www.colegioweb.com.br/dilatacao-termica/dilatacao-anomala-da-agua.html>)

A figura 3.7 mostra uma lâmina bimetálica: dois metais distintos justapostos e firmemente presos um ao outro. Os metais possuem o mesmo comprimento inicial, porém coeficientes de dilatação diferentes. Ao sofrerem a mesma variação de temperatura, o metal de maior coeficiente de dilatação dilata-se mais e curva a lâmina bimetálica ocupando a face externa da concavidade, justamente por possuir maior extensão. Lâminas bimetálicas são utilizadas em termostatos que regulam, por exemplo, temperatura de aparelhos elétricos. Ao alcançar determinada temperatura, a lâmina bimetálica se curva, interrompendo o circuito elétrico utilizado no aquecimento do dispositivo.

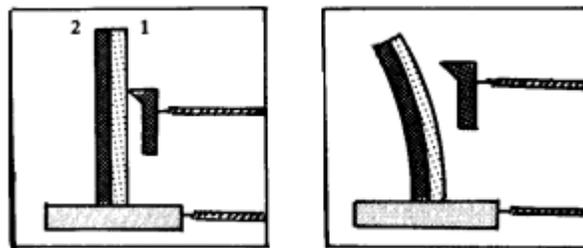


Figura 3.7: Termostato (Fonte: GREF, 1998, p. 18)

3.2 Exercícios

Todas as respostas deverão ser justificadas com cálculos ou comentários escritos.

1. Pesquise e escreva as equações que possibilitam o cálculo da dilatação volumétrica e da dilatação superficial. Indique como se obtém os coeficientes de dilatação superficial e volumétrica a partir do coeficiente de dilatação linear.
2. Algumas vezes, ao se lavar louças, acontece de dois copos ficarem grudados um ao outro. Enuncie um procedimento baseado no fenômeno da dilatação que possibilitará soltar os copos, sem o risco de quebrá-los.

3. Ao fazer chá em minha casa, coloquei a chaleira feita de um vidro comum muito fino diretamente em contato com a chama do fogão. Após alguns minutos, a base da chaleira estilhaçou, fazendo vaziar água com açúcar por toda a superfície do fogão. Por que isso aconteceu? Se a chaleira fosse feita de vidro pirex, ela poderia ser colocada em contato direto com a chama? O vidro pirex tem o coeficiente de dilatação bem menor que os coeficientes de vidros comuns.

4. Um recipiente de vidro está completamente cheio com 20cm^3 de um líquido cujo coeficiente de dilatação volumétrica é $2,0 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$. O recipiente é fechado por uma rolha, que está vazada por um tubo capilar, até tocar o líquido. A seção reta do tubo é 1mm^2 e ele tem comprimento suficiente para comportar a dilatação do líquido. A temperatura do líquido é aumentada em 10°C .

a) Determine a altura, em cm, que o líquido sobe no tubo capilar, considerando desprezível a dilatação do recipiente. Faça um desenho de forma a ilustrar sua solução.

b) Caso a dilatação do recipiente não possa ser desprezada, a altura calculada em (a) seria maior ou menor? Justifique.

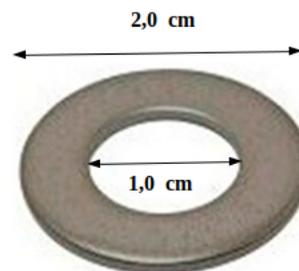
c) Deduza a equação que permitiria calcular a altura que o líquido subiria no tubo capilar considerando a dilatação do recipiente não desprezível e tomando como conhecido o coeficiente de dilatação volumétrica do material do recipiente.

5. Um mecânico pretende soltar uma porca de invar, que se encontra emperrada em um parafuso de ferro. O invar é um liga de ferro e níquel com baixíssimo coeficiente de dilatação, portanto muito menor que o coeficiente do ferro. Que procedimento você sugeriria ao mecânico?

6. Um posto recebeu 5.000 litros de gasolina num dia em que a temperatura era de 35°C . Com a chegada de uma frente fria, a temperatura ambiente baixou para 15°C , assim permanecendo até que a gasolina fosse totalmente vendida. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação volumétrica da gasolina é $1,1 \times 10^{-3} \text{C}^{-1}$, calcule em litros o prejuízo sofrido pelo dono do posto.

7. O diâmetro externo de uma arruela de metal² é de 2,0 cm e seu diâmetro interno mede 1,0 cm. Aquecendo-se a arruela, verifica-se que seu diâmetro externo aumenta de ΔX . Então podemos concluir que diâmetro interno:

- a) diminui de ΔX
- b) diminui de $\Delta X/2$
- c) aumenta de ΔX
- d) aumenta de $\Delta X/2$
- e) não varia



8. Duas barras A e B de um mesmo metal, são aquecidas a partir de 0°C . Entre os gráficos da figura 3.8, indique aquele que mostra corretamente como os comprimentos das duas barras variam enquanto a temperatura é aumentada

²Fonte da figura: <https://www.aladimmetais.com.br/produto/arruela-1-4-ferro-polido-40pcs-75445>.

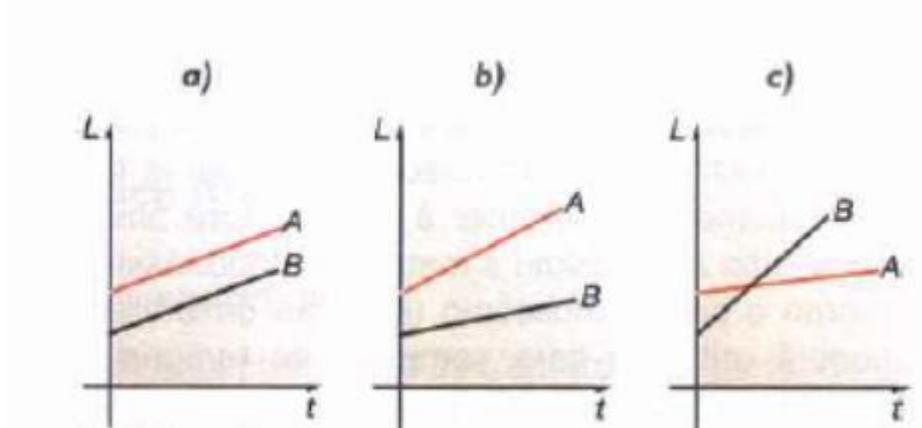


Figura 3.8: Gráficos comprimento X temperatura (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2006, p. 68)

9. Duas barras encontram-se inicialmente à mesma temperatura t_0 . Uma delas tem comprimento $l_{01} = 10,0$ cm e coeficiente de dilatação linear α_1 e a outra tem comprimento $l_{02} = 12,0$ cm e seu coeficiente de dilatação linear é α_2 . Deseja-se que, ao aquecer as duas barras até uma temperatura t , a diferença entre seus comprimentos permaneça sempre igual a 2,0 cm, qualquer que seja o valor de t .

a) Qual deve ser o valor da razão entre os coeficientes α_1 e α_2 para que isso aconteça?

b) Qual dos gráficos do exercício 8 descreve o comportamento das barras? Indique qual reta representa o comportamento da barra 1.

10. Uma barra de aço e um anel de alumínio estão ambos a 20°C . A barra possui um diâmetro de 3,000 cm e o diâmetro interno do anel é 2,994 cm. Considere os coeficientes de dilatação linear do aço e do alumínio iguais, respectivamente, a $11 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ e $23 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

a) Sendo ambos igualmente aquecidos, a partir de qual temperatura a barra poderá ser introduzida no anel?

b) Qual dos gráficos do exercício 8 descreve o comportamento da barra de aço e do anel de alumínio? Indique qual reta representa o comportamento do anel.

3.3 Respostas das questões e dos exercícios

Questões

1. 313°C .

2. Discuta com seu professor.

Exercícios

1 a 3. Discuta com seu professor.

4. a) 4,0 cm.

b) Menor.

c) Discuta com seu professor.

5. Resfriar o conjunto porca/parafuso.

6. 110 L.

7. Letra d.

8. Letra b.

9. a) $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1,2$

b) Gráfico (a). A reta B representa a barra 1 pois a mesma possui o menor comprimento inicial L_{01} .

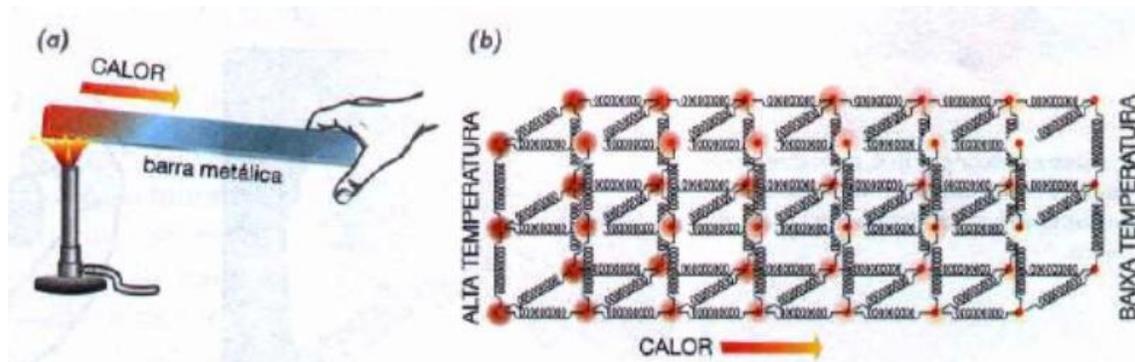
10. a) 187°C .

b) Gráfico (c). A reta B descreve o comportamento do anel. O ponto de interseção entre as retas corresponde à igualdade de diâmetro entre anel e barra, à temperatura de 187°C .

4. Transmissão de calor.

4.1 Transmissão de calor e situações do cotidiano

Condução¹



[H]

Figura 4.1: Condução em uma barra de metal.

Uma pessoa aproxima a extremidade de uma barra metálica de uma fonte de calor. Os átomos ou moléculas dessa extremidade adquirem maior energia de agitação. Parte dessa energia é transferida para as partículas da região vizinha a esta extremidade e a temperatura desta região também aumenta. Este processo continua ao longo da barra e, após certo tempo, a pessoa que segura a outra extremidade perceberá uma elevação de temperatura neste local (figura 4.1).

Houve, portanto, transmissão de calor ao longo da barra, que continuará enquanto existir uma diferença de temperatura entre as duas extremidades. A transmissão foi feita pela agitação dos

¹O texto, as figuras e a atividade dessa seção foram baseados na seção 'Transferência de calor', de Alvarenga e Máximo, 2006, p. 107-110.

átomos da barra, transferida sucessivamente de um para outro, sem que esses átomos se deslocassem da posição em torno da qual oscilam continuamente (figura 4.1). Tal processo de transmissão de calor é denominado **condução** e acontece de forma predominante nos sólidos. Nele, há transferência de energia, sem transporte de matéria. Dependendo do estado de agregação e organização dos átomos e moléculas, de como se encontram ligados em uma substância, da existência ou não de elétrons livres, a agitação térmica poderá ser transmitida de um átomo/molécula para outro, com maior ou menor facilidade, fazendo com que esta substância seja boa ou má condutora de calor. Metais são bons condutores de calor. Isopor, cortiça, porcelana, madeira, ar, gelo, lã, papel são chamados isolantes térmicos porque conduzem mal o calor.

Convecção



Figura 4.2: Correntes de convecção.

Um recipiente com água está em contato com uma chama. A camada de água do fundo do recipiente recebe calor da chama por condução. O volume dessa camada aumenta e sua densidade diminui, fazendo com que ela se desloque para a parte superior do recipiente, sendo substituída por uma camada de água mais fria, mais densa, proveniente da região superior (figura 4.2). O processo continua, com uma circulação contínua de água mais quente para cima e mais fria para baixo, denominada corrente de **convecção**. O calor transmitido, por condução, às camadas inferiores, vai sendo distribuído, por convecção, a toda a massa de líquido, por meio do movimento de translação do próprio líquido. Embora a transmissão de calor por condução possa ocorrer em gases e líquidos, estes apresentam baixa condutividade térmica. A transferência de calor por convecção é predominante nos fluidos.

Radiação

Uma lâmpada de filamento se encontra dentro de uma campânula de vidro, onde se fez vácuo. Um termômetro posicionado fora da campânula mostrará um aumento de temperatura, indicando que o vácuo não impediu a transferência de calor (figura 4.3). Tal processo não pode ter ocorrido por condução ou convecção, pois ambos dependem da existência de um meio material para ocorrerem. A transmissão de calor do filamento da lâmpada para o termômetro ocorreu por meio de ondas eletromagnéticas. Entre a Terra e o Sol existe vácuo, portanto, o calor do Sol chega até nosso planeta também por meio de ondas eletromagnéticas.

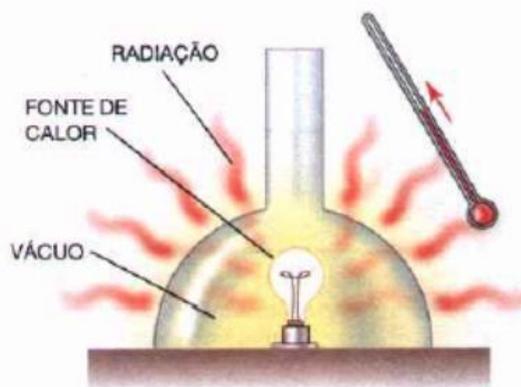


Figura 4.3: Radiação de uma lâmpada.

A radiação térmica, ou radiação infravermelha, é um tipo de onda eletromagnética, correspondente a uma faixa de frequência específica. São também ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, as micro-ondas, a luz, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama. No vácuo todas essas ondas se propagam com a mesma velocidade, $3,00 \times 10^8$ m/s. Essas ondas diferem na frequência com que oscilam seus campos elétrico e magnético. Sabemos que a luz branca é o efeito em nossa visão da superposição de cores da luz. Cada cor corresponde a uma onda eletromagnética com certo valor de frequência. A qualquer temperatura um corpo emite radiação, porém, a frequência da radiação emitida depende da temperatura do corpo.

Na temperatura próxima do zero absoluto, um corpo emite radiação com frequência na região das micro-ondas. Na temperatura ambiente, 300 K, a frequência da radiação se situa na faixa do infravermelho, que nomeamos como radiação térmica. A uma temperatura de 1000 K, a maior parte da energia irradiada ainda se encontra na faixa de frequência correspondente ao infravermelho, mas já é possível captar ondas com frequência correspondente à cor vermelha. Portanto, a 1000 K, o corpo já se apresenta avermelhado. O Sol, a 5800 K, emite em todas as frequências da luz visível, portanto, luz branca (45%), mas irradia também na faixa do infravermelho (45%) e do ultravioleta (10%). Para temperaturas extremamente elevadas, resultantes, por exemplo, de uma explosão nuclear, a maior parte da radiação se encontra na frequência dos raios X, havendo ainda grandes porções de radiação nas demais frequências, incluindo os raios gama.

O calor que uma pessoa recebe quando está próxima de um corpo aquecido pode chegar até ela pelos três processos: condução, convecção e radiação. Quanto maior for a temperatura do corpo aquecido, maior será a porção de calor transmitida por radiação, por exemplo, quando estamos perto de um forno com alta temperatura. Para uma ampla faixa de valores de temperatura em torno da temperatura ambiente, um corpo aquecido transmite calor por radiação, predominantemente na frequência do infravermelho. Essa radiação não é percebida pela visão, mas pelo tato e causa a sensação de aquecimento em nossa pele.

Questões:

1) a) Identifique o processo de transferência de calor predominante e que pode ser usado para explicar os fenômenos e aplicações mostrados na primeira coluna da tabela. Não é preciso refazer a tabela na folha de respostas.

b) No caso dos fenômenos e aplicações descritos em 5, 8, 10, 14, 15, 17 e 20, explique como o processo de transmissão de calor identificado participa do fenômeno ou aplicação.

Fenômenos e aplicações	Condução	Convecção	Radiação
1. Processo de transferência de calor predominante nos fluidos.			
2. Em um aquecedor elétrico, a entrada de água fria é feita na parte inferior e a saída de água quente na parte superior.			
3. Processo de transferência de calor predominante nos sólidos.			
4. Processo de transferência de calor que se realiza com transporte de matéria.			
5. Os ventos são causados pela variação da densidade do ar em camadas diferentemente aquecidas. Por isso, durante o dia, nas regiões litorâneas, a brisa sopra do mar para a terra.			
6. Quem já entrou num carro que tenha ficado estacionado ao Sol por algum tempo, com os vidros fechados, vai entender o significado da expressão "cercando o calor". Se o calor "consegue" entrar no carro, porque ele não sai?			
7. Processo de transferência de calor que não depende da existência de um meio material.			
8. Em certos modelos antigos de geladeira, com congelador na parte superior, as prateleiras devem ser feitas de grades.			
9. Um cubo de gelo enrolado em um pano de lã derrete mais rápido do que outro cubo em contato direto com o ar, à temperatura ambiente?			
10. Um pedaço de carne assa mais rapidamente quando se introduz nele um espeto metálico.			
11. Um objeto pintado com a cor preta e colocado ao Sol tem sua temperatura sensivelmente elevada.			
12. Um pássaro eriça suas penas para manter ar entre elas, dificultando a transferência de calor de seu corpo para o ambiente.			
13. Os cabos das panelas normalmente não são feitos de metal.			
14. Ao andar descalço em um dia ensolarado, você percebe que existe uma diferença de temperatura significativa entre um piso claro e um escuro, ainda que ambos sejam feitos do mesmo material.			

15. Com o tato, sentimos um piso de ladrilho mais frio do que um de madeira, ambos em um mesmo ambiente. Isso é uma evidência de que o ladrilho tem uma menor temperatura que a madeira?			
16. Em climas quentes, as pessoas usam frequentemente roupas claras.			
17. Um cobertor de lã é quente? Ele produz calor?			
18. Em países de clima frio, plantas tropicais são aclimatadas em galpões de vidro.			
19. Um dispositivo comum, utilizado para acender lâmpadas ou acionar alarmes é o sensor infravermelho, acionado quando uma pessoa passa à sua frente.			
20. É devido ao efeito estufa que o nosso planeta se mantém aquecido durante a noite. Sem esse aquecimento a Terra seria um planeta gelado, com poucas chances de propiciar o surgimento da vida.			

2) A animação acessível no link a seguir mostra, com detalhe, o sistema de refrigeração do motor: <https://www.youtube.com/watch?v=V7inC4lOpGs>. Indique os processos de troca de calor que acontecem no sistema de refrigeração do motor, e descreva-os. Na sua descrição, explicita três procedimentos técnicos que favorecem a transferência de calor por condução, que é o processo predominante no sistema de refrigeração do automóvel.

4.2 O sistema de arrefecimento do motor de combustão interna: revisitando os processos de transmissão de calor

No início de nossos estudos sobre o motor de combustão interna vimos que de cada 100 unidades de energia que colocamos no carro na forma de gasolina, cerca de 1/3 é efetivamente transformado em movimento (energia cinética), cerca de 1/3 dessa energia é liberado na forma de calor pelos gases do escapamento e o outro 1/3 é liberado na forma de calor pelo sistema de resfriamento do motor. Estudaremos agora o sistema de resfriamento, também denominado sistema de arrefecimento, e alguns conceitos físicos a ele associados.

As animações e simulações sobre o funcionamento do motor indicaram que a temperatura dos gases no interior da câmara de combustão é muito elevada (cerca de 500°C). Disso resulta uma elevada temperatura no interior do cilindro que precisa ser constantemente resfriado por um sistema com fluido refrigerante, que pode ser água, óleo ou ar.

A imagem abaixo mostra o diagrama do sistema de arrefecimento a água encontrado em um manual técnico ² típico de um carro. Observe-o atentamente.

²<http://www.mte-thomson.com.br/site/biblioteca/manual-de-arrefecimento/> (acesso em fev. 2016)

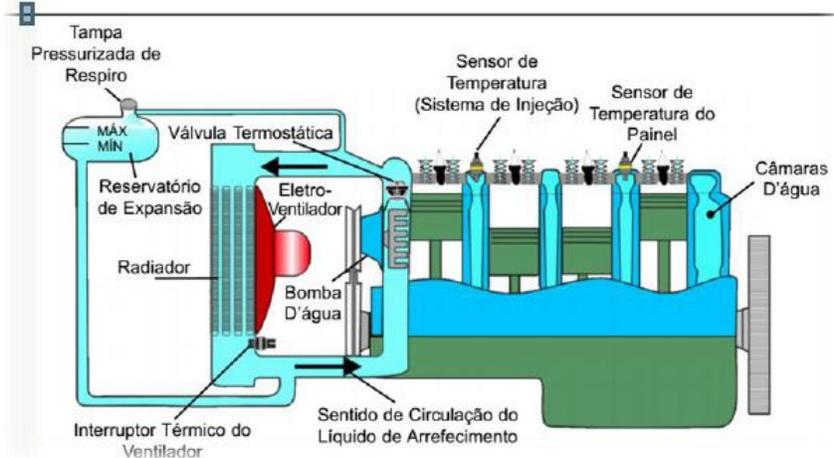


Figura 4.4: Diagrama do sistema de arrefecimento de um motor de 4 cilindros (Fonte: MTE - Thomson, p. 11)

Observe que o desenho (figura 4.4) é uma representação do motor de 4 cilindros em corte. Ao lado dos cilindros temos ductos que conduzem água. Enquanto o motor está frio, a água circula somente em suas galerias internas, para aquecer-se rapidamente. Quando a água que circula ao lado dos cilindros aquece acima de uma determinada temperatura (em torno de 85°C), a válvula termostática se abre e permite a circulação dessa água aquecida para a parte da frente do motor, onde se encontra o radiador. No radiador a água tem sua temperatura reduzida. Quando o valor da temperatura da água, que circula em torno dos cilindros alcança uma temperatura inferior a 85°C , a válvula fecha-se novamente. No endereço <https://www.youtube.com/watch?v=Th6kFV8t18Y> você encontra uma didática animação sobre esse sistema.

Na animação anteriormente indicada, a água representada na cor azul está fria e na cor vermelha está quente. Para uma compreensão ainda mais detalhada do sistema de refrigeração do motor de combustão, acesse outra animação no seguinte endereço: <https://www.youtube.com/watch?v=V7inC4lOpGs>.

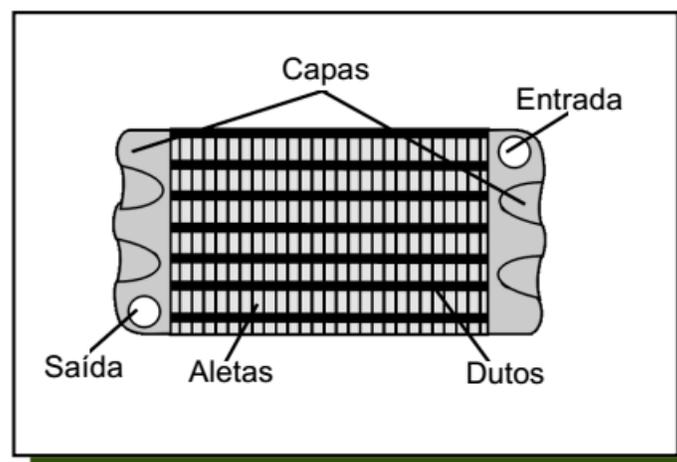


Figura 4.5: Radiador (Fonte: MTE - Thomson, p. 13)

O radiador (Figura 4.5) é o componente do sistema que recebe o líquido aquecido e o devolve ao motor com uma temperatura mais baixa. Está posicionado geralmente à frente do motor, de forma a receber o fluxo de ar causado pelo movimento do carro. O radiador possui dutos internos para a circulação do líquido de arrefecimento, providos de aletas que direcionam o fluxo de ar e auxiliam a dissipar o calor, diminuindo a temperatura do líquido.

O ar que entra na parte dianteira do carro, pela grade, pode resfriar a água que se encontra no radiador, caso esse ar passe em um ritmo e temperatura adequada. Se isso não ocorrer um ventilador entra em funcionamento (veja a localização na Figura 4.4) e resfria a água ali presente. É muito comum o ventilador ser acionado logo após o motorista parar o carro, devido à falta de um fluxo natural de ar para o espaço onde encontra-se o radiador.

Existem três tipos de transmissão de calor: condução; convecção e radiação. No sistema de refrigeração do motor, ocorrem, principalmente, trocas de calor por condução e por convecção. A água em contato com o bloco do motor e absorve calor por condução. Por ser feito de metal, o bloco do motor transmite com facilidade o calor por condução. A circulação de água pelo bloco do motor e pelo radiador é favorecida pelas correntes de convecção. As aletas e tubos chatos que compõem o radiador favorecem a troca de calor por condução ao aumentar a área de contato do ar que atravessa o radiador entrando em contato com suas partes aquecidas. A válvula termostática, mostrada na segunda animação, recebe calor da água por condução alcançando uma temperatura suficiente para derreter a cera que se encontra em seu interior. O derretimento da cera proporciona a abertura da válvula e a passagem de água aquecida para o radiador. No processo de refrigeração do motor, além dos processos de condução e convecção exemplificados, há emissão contínua de radiação térmica pelo radiador, pela água e pelo bloco do motor. Esses três tipos de troca de calor serão detalhados nas seções seguintes.

Condução: quatro questões

Apresentamos abaixo uma lista de diversos recipientes. Todos têm o mesmo formato e possuem tampa. Em negrito, destacamos o material mais importante e mais abundante utilizado na confecção de cada recipiente.

3. Enumere os recipientes em ordem crescente de eficiência caso nosso objetivo seja manter aquecido, por mais tempo, um litro de café quente.

Tipo de recipiente	Eficiência para “manter aquecido” 1 litro de café.	Eficiência para “manter gelado”
vasilha de isopor com 2 cm de espessura		
vasilha de vidro com 2 cm de espessura		
vasilha de ferro com 2 cm de espessura		

4. Enumere os mesmos recipientes em ordem crescente de eficiência, caso nosso objetivo seja manter gelado, por mais tempo, um litro de limonada. Use, para isso, a última coluna da tabela acima.

Em nosso dia a dia lidamos com materiais que são bons condutores de calor e outros que são maus condutores de calor (também chamados “isolantes térmicos”). Sabemos que os metais, em geral, são bons condutores de calor. Mas a pergunta é: será que todos os metais conduzem o calor igualmente?

5. Para verificar se há diferenças na condução do calor em metais diferentes, considere a seguinte situação: dois pedaços de arame de mesmas dimensões enrolados, um de cobre e outro de ferro (figura 4.6). Os extremos dos dois arames são cobertos com parafina ou cera; a parte enrolada é aquecida com a chama de uma vela. Haverá diferença significativa entre os intervalos de tempo que a parafina, colocada em cada pedaço de arame, levará para derreter? Explique as possíveis diferenças. Se puder, utilize a expressão “condutibilidade térmica” para diferenciar os dois metais observados.

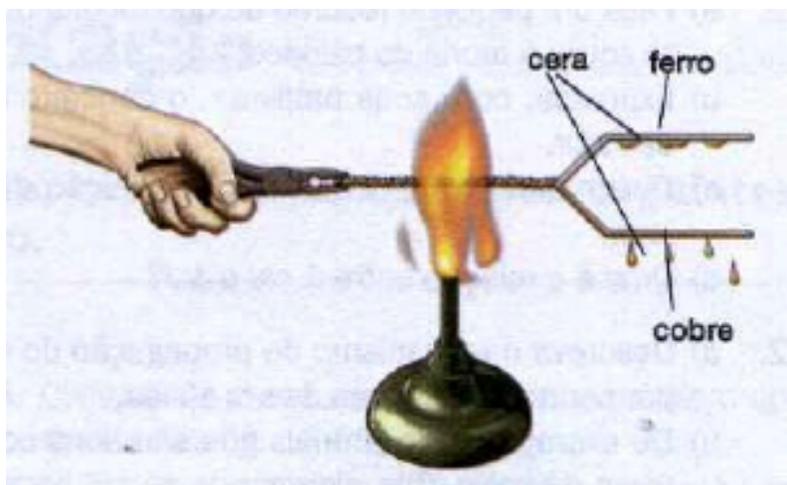


Figura 4.6: Experimento de condutibilidade térmica (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2006, p. 132)

Microscopicamente podemos representar a situação acima da seguinte maneira: as moléculas do metal formam uma rede organizada. Ao fornecermos energia para parte dessa rede (através da vela), a energia térmica das partículas aumenta gradativamente. Como as moléculas estão ligadas uma às outras por forças de grande intensidade, a vibração vai se propagando ao longo do metal até atingir a outra extremidade (Figura 4.7). Certamente, a medida que essa vibração vai se propagando, sua intensidade vai diminuindo. Dessa maneira podemos falar em um gradiente³ de temperatura ao longo das hastes de metal.

A condução é um processo de transferência de calor que ocorre preferencialmente nos sólidos e, em baixa intensidade, nos líquidos. Em função de sua composição e estrutura moleculares, cada tipo de material tem uma condutibilidade térmica diferente, por isso a parafina levará tempos diferentes para derreter, na extremidade de cada metal da figura 4.6.

³ gradiente - Alteração no valor de uma quantidade (como luz, temperatura, pressão ou intensidade de som) por unidade de medida de distância em uma direção especificada. (fonte: Dicionário Michaelis de Português OnLine - acesso em fev. 2016)

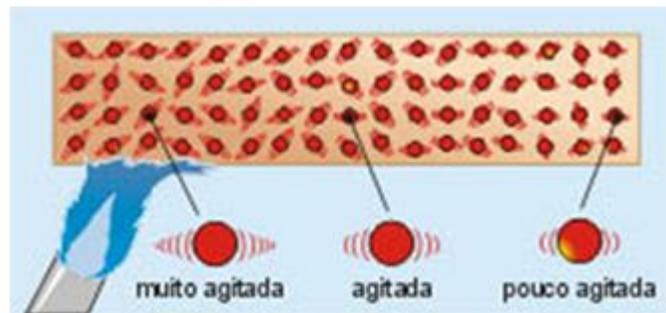


Figura 4.7: Representação do fluxo de calor da região de MAIOR temperatura para região de MENOR temperatura (Fonte: <https://www.todamateria.com.br/conducao-termica>)

6. Na situação retratada na figura 4.8, a superfície metálica está colocada entre a chama da vela e uma folha de papel. A folha de papel está posicionada, portanto, na parte superior da chapa metálica, com a chama da vela aquecendo a parte inferior. Em contato direto com a folha de papel, a chama da vela conseguiria queimá-la sem dificuldades. Com a chapa metálica interposta entre o papel e a chama, isso não acontece. Por quê?

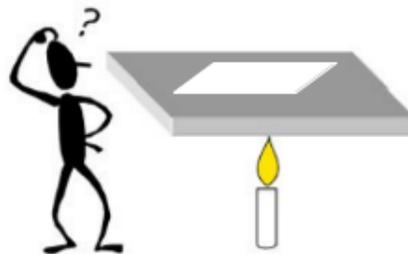


Figura 4.8: Uma pequena mágica

Convecção

Nos líquidos as ligações intermoleculares são fracas quando comparadas com os sólidos. Nos gases elas praticamente inexistem. Por isso a transmissão do calor por condução, nos líquidos, ocorre com grande dificuldade e, nos gases, praticamente não acontece. O calor nos líquidos e nos gases, propaga-se, preferencialmente, por CONVECÇÃO.

O vídeo, que pode ser acessado no link a seguir, mostra as correntes de convecção em um ebulidor: <https://www.youtube.com/watch?v=MkU ms3G2qUg>. Observe atentamente a água que se encontra sobre o ebulidor ANTES dele ser ligado. Observe o comportamento da água com o ebulidor ligado. DESCREVA o que observou e busque uma justificativa para o fato (figura 4.9).

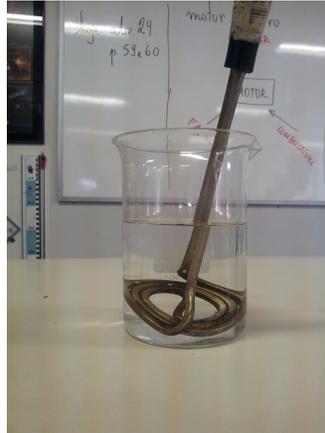
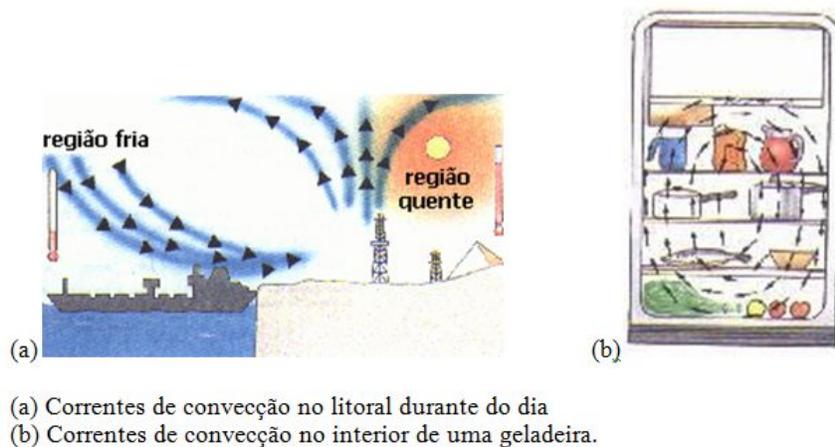


Figura 4.9: Ebulidor

Na experiência com o ebulidor, quando este é ligado, a porção da água que se encontra na parte superior é aquecida e dilata-se. Isso faz com que a água fique menos densa e suba. Formam-se as chamadas **CORRENTES DE CONVECÇÃO**, cujo sentido, nos líquidos e gases é ascendente para a parte do líquido (ou gás) com temperatura mais elevada e descendente para a de temperatura mais baixa. Parte do calor liberado por nosso corpo é por convecção, o que explica o fato de não suarmos muito quando andamos de bicicleta (pois o ar ao redor de nosso corpo é constantemente renovado) enquanto transpiramos muito com poucos minutos de exercícios em uma bicicleta ergométrica.

As correntes de convecção têm enorme importância na distribuição do calor no planeta Terra, seja através das correntes de ar na atmosfera, pelas correntes marítimas nos oceanos ou no manto terrestre com o movimento do magma. Brisas oceânicas e correntes de ar no interior de modelos mais antigos de geladeira, com prateleiras feitas de grades, como mostra a figura 4.10, também são exemplos de correntes de convecção⁴.



(a) Correntes de convecção no litoral durante o dia
(b) Correntes de convecção no interior de uma geladeira.

Figura 4.10: Exemplos de correntes de convecção

⁴Fonte da figura: <http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Refrigeracao/conveccao.htm>.

Radiação

Imagine-se próximo de uma churrasqueira que permanece acesa por várias horas. EXPLIQUE por que o calor que chega até você não é por transmissão via CONDUÇÃO. EXPLIQUE por que o calor que chega até você não é por transmissão via CONVECÇÃO. Existe uma terceira forma de transmitir o calor de um ponto a outro que não depende da presença da matéria. Ela é responsável por transferir a energia de um ponto a outro por meio de ondas eletromagnéticas. Maiores detalhes dessas ondas serão estudadas posteriormente. Ondas como a luz, micro-ondas, ondas de rádio, ultravioleta, infravermelho e outras mais são exemplos desse tipo de onda (figura 4.11).

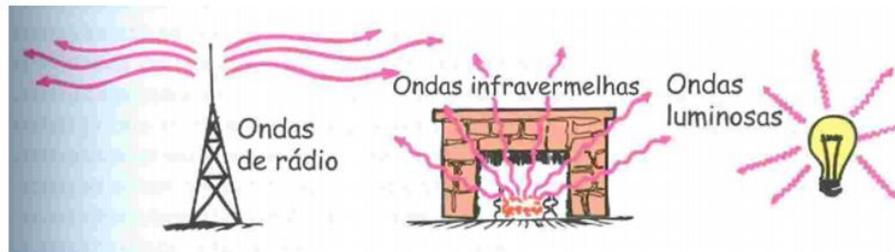


Figura 4.11: Alguns exemplos de radiação eletromagnética (Fonte: <http://unilasermedica.com/radiacion-infrarroja-y-efectos-en-la-piel> - modificada)

Os controles remotos da maioria dos aparelhos eletrônicos disponíveis em nossas residências operam com um led⁵ de infravermelho. Nossos olhos são sensíveis a determinadas ondas eletromagnéticas (como a luz) mas não são sensibilizados por outras ondas eletromagnéticas como o ultravioleta, raios X, infravermelho, etc.

Os objetos, incluindo nossos corpos, são constituídos de moléculas e estas tem o movimento de vibração e/ou rotação associado à temperatura. Quanto maior a temperatura maior a agitação dos átomos. Porém ao vibrarem, os átomos emitem ondas eletromagnéticas. A frequência predominante na qual essas ondas são emitidas depende da temperatura. O calor transmitido por uma churrasqueira, em brasa, ou por um forno aquecido se faz por meio de ondas eletromagnéticas com frequência na faixa do infravermelho. Onda eletromagnética, nessa faixa de infravermelho, é chamada de radiação térmica.

Essa é a propriedade que permite ao termômetro de infravermelho funcionar. Um sensor em seu interior capta a radiação infravermelha proveniente do objeto que está a sua frente e essa radiação produz uma corrente elétrica no aparelho que a associa a uma determinada temperatura.

As ondas de infravermelho são também conhecidas como ondas de calor. Essa radiação tem enorme importância na emissão e absorção de energia pelos objetos. Na Terra, seu efeito mais conhecido é o efeito estufa. Gases estufa, como o CO_2 e o vapor d'água, compõem a atmosfera e impedem a radiação infravermelha emitida pela crosta terrestre atravessar a atmosfera. Por isso, a temperatura de nosso planeta não reduz excessivamente no período da noite, mantendo uma temperatura média própria para a vida. A intensificação da emissão de CO_2 tem aumentado de forma perigosa o efeito estufa causando o incremento da temperatura média da Terra, com sensíveis e negativos impactos ambientais.

⁵LED: Diodo Emissor de Luz - É um componente eletrônico semiconductor que tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz.

Por ser um tipo de onda eletromagnética, o infravermelho não necessita da presença de matéria para se propagar. Propaga-se pelo vácuo e o estudo de suas características muito diz sobre as propriedades das moléculas das quais se origina. Na astronomia, medicina e em análises químicas o estudo da radiação infravermelha tem enorme utilização.

As câmeras de aparelhos celulares, diferente de nossos olhos, são sensíveis às ondas eletromagnéticas de infravermelho. É fácil verificar isso. Pegue um controle remoto que você saiba que está funcionando corretamente e direcione-o para seus olhos. Aperte os botões dele e (muito provavelmente) você não verá nada! Porém agora, interponha entre seus olhos e o controle, a câmera do aparelho celular; isto é, vire a câmera para o controle e olhe para o painel de seu telefone. Agora ao apertar as teclas do controle remoto o resultado será bem diferente. DESCREVA-O. Altere a tecla que você pressiona e veja se algo muda.

4.3 Exercícios

1. (UFMG) A radiação é o principal processo de transferência de energia no caso

- a) da chama no fogão para a panela.
- b) do sol para um satélite de Júpiter.
- c) do ferro de soldar para a solda.
- d) da água para um cubo de gelo flutuando nela.

2. (FAAP-modificada) Uma estufa para flores, construída em alvenaria, com cobertura de vidro, mantém a temperatura interior bem mais elevada do que a exterior. Sobre essa situação são feitas as seguintes afirmações:

- I. O calor entra por radiação e sai muito pouco por convecção.
- II. A cobertura de vidro bloqueia a saída de calor por meio de radiação.
- III. O calor entra por radiação e sai muito pouco por condução.
- IV. O calor entra por condução e convecção e só pode sair por radiação.

A(s) afirmação(ões) que pode(m) justificar a elevada temperatura do interior da estufa é(são):

- a) I, III.
- b) I, II.
- c) IV.
- d) II, III.
- e) II.

3. (UFRS) Para que dois corpos possam trocar calor é necessário que

- I - estejam a diferentes temperaturas.
- II - tenham massas diferentes.
- III - exista um meio condutor de calor entre eles.

Quais são as afirmações corretas?

- a) Apenas I.

- b) Apenas II.
- c) Apenas I e II.
- d) Apenas I e III.
- e) I, II e III

4. (Enem) O resultado da conversão direta de energia solar é uma das várias formas de energia alternativa de que se dispõe. O aquecimento solar é obtido por uma placa escura coberta por vidro, pela qual passa um tubo contendo água. A água circula, conforme mostra a figura 4.12.

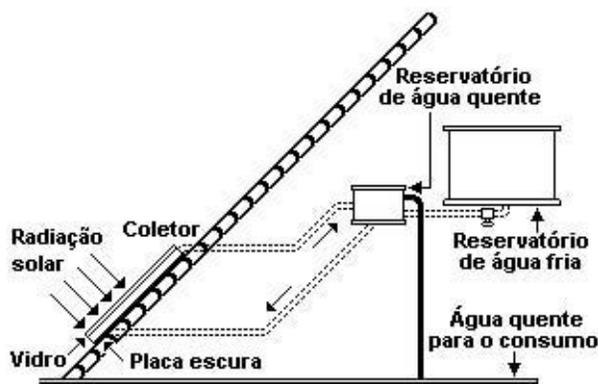


Figura 4.12: Coletor solar (Adaptado de PALZ, Wolfgang, "Energia solar e fontes alternativas". Hemus, 1981.)

São feitas as seguintes afirmações quanto aos materiais utilizados no aquecedor solar:

- I. O reservatório de água quente deve ser metálico para conduzir melhor o calor.
- II. A cobertura de vidro tem como função reter melhor o calor, de forma semelhante ao que ocorre em uma estufa.
- III. A placa utilizada é escura para absorver melhor a energia radiante do Sol, aquecendo a água com maior eficiência.

Dentre as afirmações acima, pode-se dizer que, apenas está(ão) correta(s):

- a) I.
- b) I e II.
- c) II.
- d) I e III.
- e) II e III.

5. Assinale a afirmativa errada.

- a) A radiação é o único processo de troca de calor que existe no vácuo.
- b) Nos desertos as pessoas usam roupas de lã para impedir a passagem de calor por condução.
- c) Vou ter muito calor se me mudar para o deserto do Saara.

- d) A temperatura que tenho em meu corpo é mais alta que a temperatura de fusão do gelo.
6. (FUVEST - modificada) Em modelos antigos de geladeira com prateleiras feitas de grades, o congelador fica sempre na parte de cima para:
- Manter a parte de baixo mais fria que o congelador.
 - Manter a parte de baixo mais quente que o congelador.
 - Ceder calor à camada de ar em contato com o congelador.
 - Que o frio vá para o congelador.
7. (FAAP-modificada) As garrafas térmicas são frascos de paredes duplas, entre as quais é feito o vácuo. As faces destas paredes que estão frente a frente são espelhadas (figura 4.13). O vácuo entre as duas paredes tem a função de evitar:
- somente a condução.
 - somente a irradiação.
 - somente a convecção.
 - a condução e a irradiação.

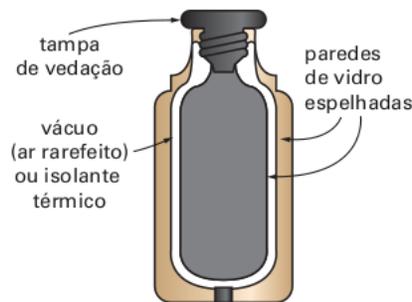


Figura 4.13: Garrafa térmica

8. (UFMG) A figura 4.14 mostra um tubo de ensaio contendo água e um cubo de gelo mantido fixo ao fundo de sua extremidade fechada. Quando aquecemos a extremidade aberta do tubo com uma chama, a porção superior da água começa a ferver sem que o gelo do fundo se derreta. Várias afirmativas são feitas em relação à situação apresentada. Quais delas são corretas?

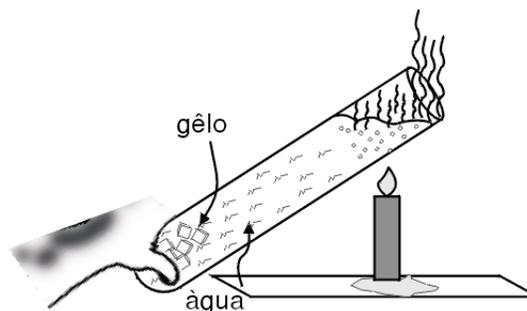


Figura 4.14: Fervendo água com gelo

I) Ao aquecermos a parte superior do tubo de ensaio, não favorecemos a formação de correntes de convecção através da água.

II) A água é má condutora de calor e a transferência de calor através dela até o bloco de gelo é lenta.

III) Se aquecêssemos o tubo de ensaio em sua extremidade inferior, haveria a formação de correntes de convecção através da água.

IV) A água é boa condutora de calor e ferve rapidamente ao ser aquecida.

a) apenas I e II.

b) apenas I e III.

c) apenas III e IV.

d) apenas I, II e III.

9. (UFMG- modificada) Você consegue manter seus dedos e mão ao redor da chama de uma vela, como mostra a parte a, da figura 4.15 mas não consegue mantê-la sobre a chama como se vê em b. Faça a experiência e comprove. Isso acontece porque a maior parte do calor transferido da chama até a sua mão, na situação b, se faz por:

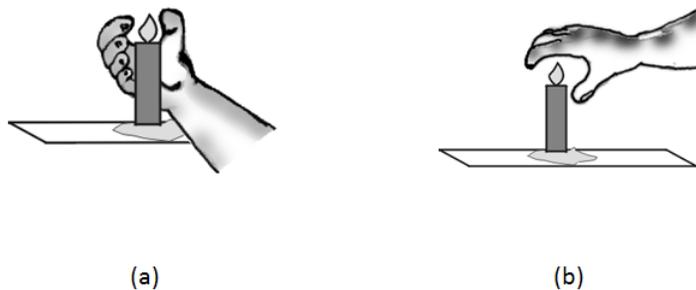


Figura 4.15: Calor recebido da chama de uma vela

a) condução.

b) convecção.

c) radiação.

d) condução e radiação.

10. Uma pessoa, com uma dieta média apropriada, consome e despende por volta de 2000 kcal por dia. Suponha que toda a energia consumida pelo corpo seja despendida em forma de calor para o ambiente. Compare a potência média de liberação de calor por essa pessoa, para o ambiente à sua volta, com a potência elétrica de uma lâmpada de 100 W. Explique porque uma sala repleta de pessoas fica mais “quente”. Considere: 1cal = 4 joules

4.4 Respostas das questões e dos exercícios

Questões

1 a 6. Discuta com seu professor.

Exercícios

1. B

2. B

3. A

4. E

5. C

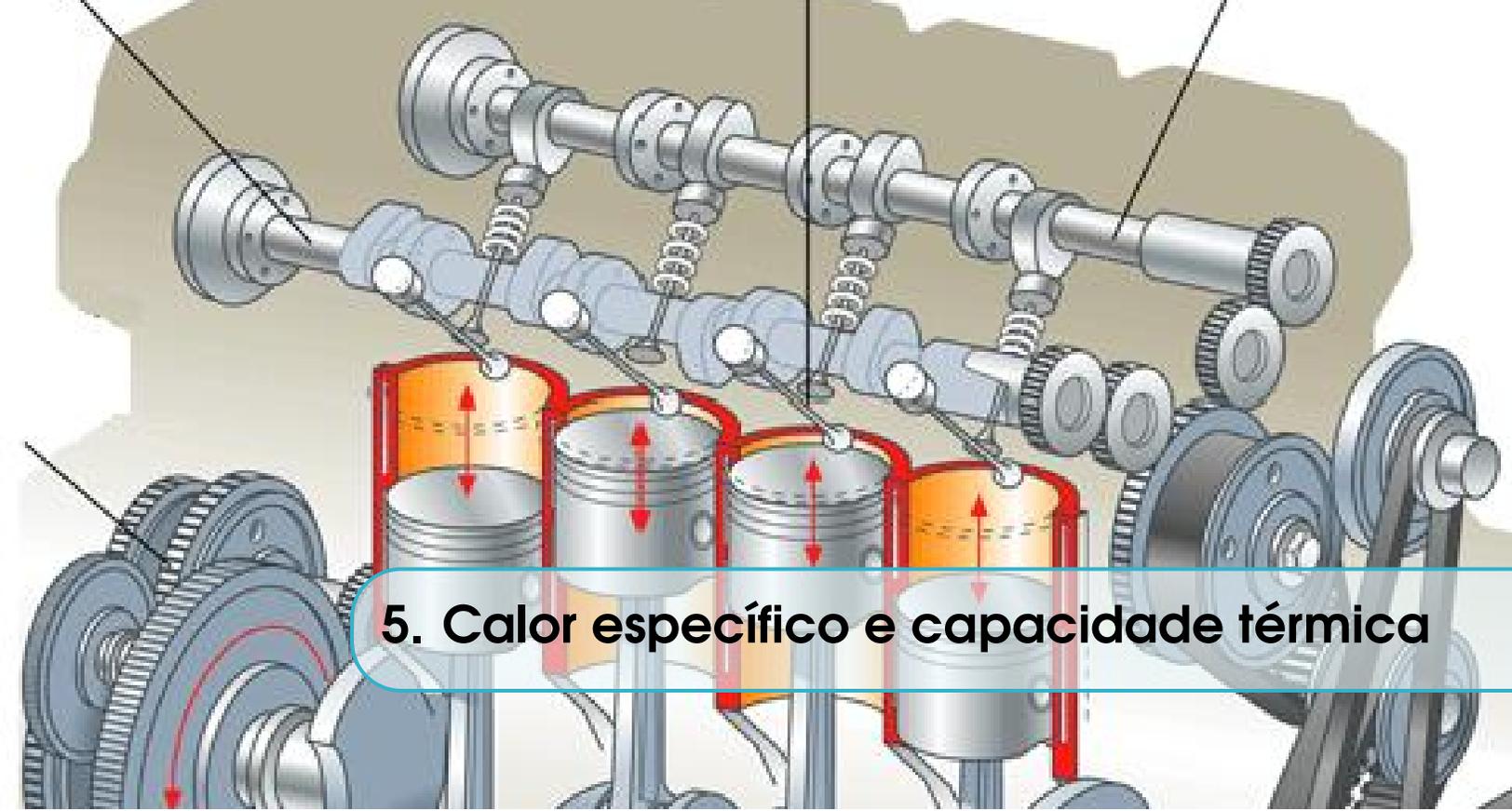
6. B

7. A

8. D

9. B

10. A potência média de uma pessoa é igual a, aproximadamente, 93W, quase igual a de uma lâmpada de 100W. Logo, podemos considerar uma pessoa, em termos de aquecimento de ambiente, semelhante a uma lâmpada de 100W.



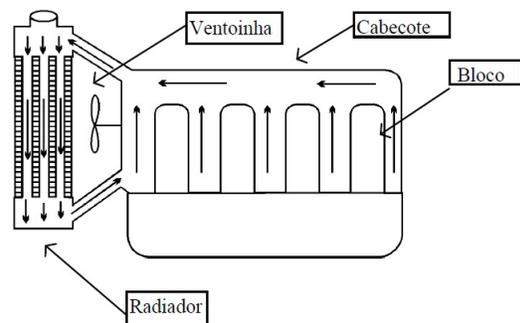
5. Calor específico e capacidade térmica

Nos textos anteriores estudamos a importância das propriedades térmicas dos materiais para a construção dos motores de carros. A rapidez com que o calor se propaga pelas peças, a quantidade de energia absorvida pela peça para aumentar sua temperatura, a variação do volume quando aquecido ou resfriado, todas essas questões trazem escolhas que tem profundas consequências no rendimento, durabilidade e consumo de combustível do motor do automóvel.

Nesse texto discutiremos com mais detalhes as propriedades relacionadas à quantidade de calor absorvido ou liberado por um objeto quando sua temperatura varia. O vídeo destacado no capítulo anterior (<http://youtube.com/watch?v=V7inC4IOPGs>) mostrou como funciona o sistema de refrigeração do motor de um automóvel.



Sistemas de refrigeração de motores de veículos como o fusca ou de muitas motocicletas utilizam o ar como substância refrigerante.



Na maioria dos sistemas de refrigeração de motores de veículos, a água é utilizada como substância refrigerante.

Alguns veículos e, principalmente as motocicletas, não utilizam um sistema tão complexo como o apresentado pelo vídeo. Para resfriar esses motores, é o ar que circula ao redor das aletas que envolvem os cilindros. É um sistema mais simples, porém seria mais eficiente?¹

Por que os motores mais "fortes" necessitam ser resfriados por água² e não por ar?

5.1 Calor específico

Por definição, 1 caloria é a quantidade de energia necessária para variar, em 1°C , a temperatura de 1 grama de água entre $14,5^{\circ}\text{C}$ e $15,5^{\circ}\text{C}$.³ Podemos utilizar esta definição para determinarmos a quantidade de energia absorvida (ou liberada) por uma determinada massa de água quando a sua temperatura varia.

1. Utilizando o conceito de caloria acima exposto, complete a tabela 5.1, com dados que podem ser obtidos em laboratório.

Tabela 5.1: Calor absorvido/liberado pela água em função de sua massa e da variação de sua temperatura

Quantidade de calor (Q)	Massa (M)	Variação de temperatura (Δt)
1 caloria	1 grama	1°C
?	1 grama	5°C
2 calorias	2 gramas	?
?	2 gramas	5°C
1 caloria	6 gramas	?
5 calorias	6 gramas	?
?	massa m	variação de temperatura (Δt)

Observe que uma primeira conclusão que poderíamos chegar após preencher os dados da tabela 5.1 é que a quantidade de calor Q necessária para variar a temperatura da água seria igual ao produto massa x variação de temperatura, isto é, $Q = m \cdot \Delta t$. Porém essa relação somente seria válida para a água, uma vez que outras substâncias, quando utilizamos 1g de amostra, podem absorver mais ou menos de 1 caloria para variar sua temperatura em 1°C . A relação acima está incompleta. Existe um problema de unidade. Em comparação com a água, vejamos os valores para o ar, muito utilizado para resfriar os blocos de motores de motocicletas.

¹Fonte da figura: GREF, 1998, p. 46.

²Fonte da figura: Varella, 2012, p. 22.

³Será mostrado mais adiante que 1 cal equivale 4,18 J.

Tabela 5.2: Calor absorvido/liberado pela água e pelo ar para valores unitários de massa e de variação de temperatura

Substância	Quantidade de calor (Q)	Massa (M)	Varição de temperatura (Δt)
ÁGUA	1 caloria	1 grama	1°C
AR	0,24 caloria	1 grama	1°C

Denominamos CALOR ESPECÍFICO (c) de uma substância a quantidade de calor Q necessária para variar em 1°C a temperatura de 1g dessa substância. De acordo com a tabela 5.2:

- Calor específico da água ($C_{\text{água}}$) = $1,0 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}}$
- Calor específico da água (C_{ar}) = $0,24 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}}$

2. Reconstrua a tabela 5.1 para o ar e encontre uma equação que defina calor específico de uma substância em função do calor Q que uma amostra de massa m da substância troca com a vizinhança para sofrer uma variação de temperatura (Δt).

A tabela 5.3 apresenta o calor específico, a pressão constante, para diferentes elementos, substâncias ou materiais.

Tabela 5.3: Calor específico de cada material.

Substância	Calor específico (pressão constante) $\text{cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$
Água a 20°C	1
Água a 90°C	1,005
Álcool	0,6
Alumínio	0,22
Ar	0,24
Chumbo	0,031
Cobre	0,091
Ferro	0,11
Gelo	0,5
Hidrogênio	3,4
Latão	0,092
Madeira	0,6
Ouro	0,032
Prata	0,056
Tijolo	0,2
Vapor d'água	0,48
Vidro	0,2
Zinco	0,093

3. Você consegue agora explicar por que a maioria dos motores utiliza a água como substância refrigerante ao invés de utilizar o ar?

A quantidade de calor (Q) “absorvida” ou “liberada” por uma substância, durante um processo de “aquecimento” ou “resfriamento”, pode ser calculada pela expressão:

Quantidade de calor = massa x calor específico da substância x variação de temperatura

Representando as grandezas físicas envolvidas na equação por meio de símbolos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

A equação 5.1 calcula, portanto, a quantidade de calor absorvida/liberada **por uma substância**, que se encontra em uma mesma fase de agregação, quando conhecemos o valor da massa e da variação de temperatura. Ela é chamada **equação fundamental da calorimetria**.

Observe, na tabela 5.3, que o valor do calor específico da água é muito grande quando comparado com outras substâncias ou elementos. Esse fato tem importantes consequências para a criação e manutenção de vida em nosso planeta.

4. (Uel) Os cinco corpos, apresentados na tabela a seguir, estavam à temperatura ambiente de 15°C quando foram, simultaneamente, colocados num recipiente que continha água a 60°C .

Tabela 5.4: Calor específico de cada metal.

MATERIAL	MASSA (g)	CALOR ESPECÍFICO ($\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$)
Alumínio	20	0,22
Chumbo	200	0,031
Cobre	100	0,091
Ferro	30	0,11
Latão	150	0,092

Ao atingirem o equilíbrio térmico, o corpo que recebeu maior quantidade de calor foi de:

- Alumínio
- Chumbo
- Cobre
- Ferro
- Latão

5.2 Capacidade térmica

Voltemos ao motor de carro. Imagine que a temperatura ambiente seja de 20°C e que depois de 10 minutos de funcionamento do motor, sua temperatura apresente um valor igual a 80°C . Qual a quantidade de calor necessária para provocar tal aquecimento?

Se pudéssemos obter os dados (massa e material) de todos os componentes do motor do carro poderíamos utilizar a equação fundamental da calorimetria $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$ para cada componente e, posteriormente somar todas as contribuições das peças individuais. A figura 5.1 nos mostra que isso é uma maneira de resolver o problema extremamente trabalhosa, pois teríamos que utilizar a equação para o pistão, volante do motor, cames, válvulas, velas, balancim, bloco do motor, ...



Figura 5.1: Componentes de um motor de automóvel, Fonte: <https://www.wallpaperflare.com/engineering-no-people-built-structure-architecture-design-wallpaper-pplqw>)

Para resolver essa situação podemos pensar no motor como um só objeto (feito de diversos componentes 1, 2, 3, ...) e utilizar um artifício matemático:

$$Q_{TOTAL} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

$$Q_{TOTAL} = (m.c.\Delta t)_1 + (m.c.\Delta t)_2 + (m.c.\Delta t)_3 \dots = (m_1c_1 + m_2c_2 + m_3c_3 + \dots)\Delta t.$$

A soma dos efeitos dos diversos materiais, cada um com uma massa e calor específico, que acima está agrupado entre os parênteses, pode ser expressa como uma grandeza, denominada CAPACIDADE TÉRMICA (C) do objeto. A expressão acima pode, então, ser reescrita da seguinte maneira:

$$Q = (m_1c_1 + m_2c_2 + m_3c_3 + \dots)\Delta t \quad Q = C \cdot \Delta t \Rightarrow C = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \tag{5.2}$$

Uma análise dimensional da Capacidade Térmica nos mostra que sua unidade, no S.I., é joule/K. Outra unidade muito utilizada é cal/°C.

Quando dizemos que um objeto tem capacidade térmica de 30 cal/°C não estamos preocupados sobre quais materiais é feito o objeto e sobre suas respectivas massas, mas sim nos aspectos gerais de seu comportamento térmico. Sabemos que ele absorve ou libera 30 calorias quando sua temperatura varia (para mais ou para menos) em 1°C.

Apesar de desenvolvermos o conceito de capacidade térmica utilizando um objeto com vários componentes, como o motor de um carro, seu conceito se aplica mesmo em objetos constituídos por apenas um tipo de material.

Nesse caso, podemos estabelecer uma relação entre capacidade térmica e calor específico de uma substância, a partir da equação fundamental da calorimetria. Considere que um corpo, de massa (m) e capacidade térmica (C), feito de uma mesma substância, cujo calor específico é (c), troque com a vizinhança uma quantidade de calor (Q), sofrendo uma variação de temperatura (Δt). Com base na equação fundamental, podemos escrever:

$$Q = mc\Delta t \rightarrow \frac{Q}{\Delta t} \rightarrow C = mc \rightarrow c = \frac{C}{m} \tag{5.3}$$

5. Um bloco metálico está, inicialmente, a uma temperatura de 20°C . Recebendo 330 cal de calor, sua temperatura se altera para 50°C .

- Qual é a capacidade térmica do bloco?
- Diga, com suas palavras, o significado do resultado que você encontrou em (a).
- Quantas calorias seriam liberadas pelo bloco se a sua temperatura diminuísse 100°C ?

6. Considere que a massa do bloco metálico da questão anterior seja 50 g.

- Determine o calor específico do metal de que é feito o bloco.
- Com base no resultado obtido em (a), identifique o metal de que é feito o bloco.

5.3 Trocas de calor - calorímetro

O conceito de calor específico (c) e o de capacidade térmica (C) são utilizados para estudar as trocas de calor que ocorrem entre os corpos. Nenhum corpo somente emite ou somente absorve energia térmica: alguns absorvem mais que liberam (e, portanto, sua temperatura tende a subir), outros liberam mais que absorvem (e portanto sua temperatura tende a reduzir) e outros liberam uma quantidade de energia igual a que absorvem, logo, sua temperatura permanece constante.

No motor do carro, podemos imaginar que o bloco do motor recebe energia térmica dos gases resultantes da combustão e, parte dessa energia é liberada para o ar. Todo um sistema de arrefecimento é construído para manter a temperatura do bloco constante.

7. A chama de uma vela e a chama de uma boca de fogão apresentam uma mesma temperatura. No entanto, não conseguimos ferver uma panela cheia de água com a chama da vela, mas conseguimos com a chama de um fogão. Explique o fato.

Uma garrafa térmica (vaso de Dewar) é um dispositivo que evita a transferência de calor por condução, convecção e radiação, ou seja, podemos considerar que os objetos que se encontram dentro dele estão isolados termicamente.

As superfícies espelhadas dificultam a entrada e a saída de calor por radiação. O vácuo entre a dupla parede que constitui o vaso e os materiais isolantes impedem a troca de calor por condução. A devida vedação proporcionada pela tampa impede a convecção.

Um aparelho, como a garrafa térmica (figura 5.2), que isola termicamente da vizinhança corpos que, em seu interior, trocam calor entre si, é denominado CALORÍMETRO.

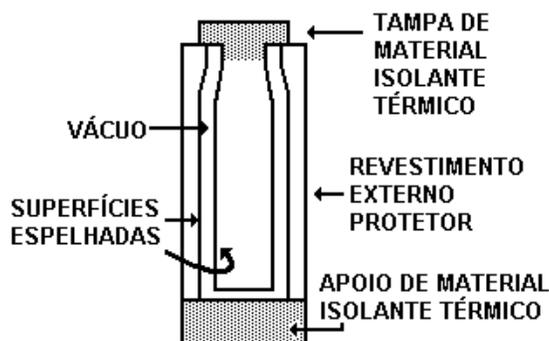


Figura 5.2: Garrafa térmica (fonte: <http://tuanijs.blogspot.com/2011/03/lista-para-o-2-ano.html>)

É muito comum, no nosso dia a dia, misturarmos 2 líquidos que estão a diferentes temperaturas para poder esfriar (ou esquentar) um pouco mais um deles. Pense em uma xícara de chá muito quente que desejamos esfriar adicionando um pouco de água fria. Podemos obter o resultado esperado depois de algumas tentativas, porém, às vezes, uma precisão na temperatura final é necessária (e desejável).

Nessa atividade experimental, buscaremos essa precisão no estudo quantitativo da troca de calor entre os objetos. Para isto, utilizaremos um calorímetro.

O calorímetro utilizado nesta atividade (figura 5.3) é um recipiente de formato bem simples. É constituído de um recipiente metálico de paredes finas, envolvido por outro recipiente fechado de paredes mais grossas e isolantes.

ATIVIDADE EXPERIMENTAL ⁴

A) Coloque dentro do calorímetro (___)g de água da torneira (m_1), feche o calorímetro, agite levemente e espere o conjunto entrar em equilíbrio térmico. Anote a temperatura inicial do conjunto. ($t_1 = (___) ^\circ C$).

B) Na mesa central do laboratório temos um grande béquer de vidro contendo água, em ebulição, e um bloco de alumínio, de massa m_2 igual a (___)g. O bloco está preso com barbante e pode ser retirado de lá puxado por ele. A água no interior encontra-se a uma temperatura t_2 de (___) $^\circ C$. É razoável pressupor que essa também seja a temperatura inicial do bloco de alumínio.

C) Retire um bloco de alumínio de dentro do béquer com água fervente e rapidamente transfira-o para o interior do calorímetro (figura 5.3).

D) Feche o calorímetro e agite-o levemente para que as trocas de calor aconteçam mais rapidamente. Depois de alguns minutos meça a nova temperatura de equilíbrio do conjunto calorímetro-água-bloco de alumínio ($t_{final} = (___) ^\circ C$).

E) Por que a transferência do bloco do alumínio, do béquer com água fervente para o calorímetro deve ser feita rapidamente e não de maneira lenta?

F) Considerando os elementos calorímetro/bloco de alumínio/água, explicita quais recebem ou liberam calor durante a troca de energia dentro do calorímetro.

⁴ Assista à videoaula desse experimento em <https://www.youtube.com/watch?v=R412mLDNeCA>

G) Utilizando as temperaturas iniciais e finais do calorímetro e sua respectiva capacidade térmica, determine o calor ($Q_{\text{calorímetro}}$) absorvido por ele. Escreva o resultado com o sinal positivo ou negativo, de forma a indicar calor absorvido ou liberado.

H) Utilizando as temperaturas iniciais e finais da água dentro do calorímetro, determine o calor ($Q_{\text{água}}$) absorvido por ela. Expresse o resultado utilizando corretamente o sinal.

I) Qual o calor liberado pelo bloco de alumínio ($Q_{\text{alumínio}}$)? Determine o valor do calor específico do alumínio, **EXPLICITANDO** seu raciocínio e atento aos sinais do calor absorvido e do calor liberado.

J) Explique o significado físico da resposta do item anterior.



Figura 5.3: Tipo de calorímetro que pode ser usado no experimento (<https://www.istockphoto.com/mx/foto/calor>)

5.4 Equivalente mecânico do calor

James Prescott Joule (1818-1889) nasceu na Inglaterra, em Salford (figura 5.4). Filho de um rico cervejeiro, Joule teve uma infância doente, o que lhe impediu de levar uma vida ativa. Refugiou-se nos livros e seu pai lhe ofereceu os melhores professores. A unidade de energia do sistema internacional (S.I.) é uma homenagem a seus trabalhos na determinação do equivalente mecânico do calor. Para recordar a importância dos trabalhos de Joule, vale rever alguns conceitos básicos da mecânica.



Figura 5.4: James Prescott Joule (1818-1889), (Fonte: <http://www.liberaldictionary.com/james-prescott-joule>)

Na ausência de forças externas, um corpo em movimento permanece em movimento retilíneo uniforme. Porém, ao lançarmos um livro, com determinada velocidade, sobre a superfície horizontal de uma mesa, observamos que seu movimento cessa. Sabemos que, nessas condições reais, existe uma força contrária ao movimento, o atrito, que reduz gradativamente, sua velocidade inicial. E a energia cinética inicial do livro? Perdeu-se?

Joule propôs que a energia cinética do objeto cujo movimento cessa era transformada em energia térmica. O movimento ordenado do livro era transformado em movimento desordenado das partículas que formam a mesa e o livro. Desconsiderando, outros processos de conversão de energia, o valor da energia cinética inicial do livro deve ser exatamente igual à quantidade de calor produzido, pois esta é uma forma de energia.

Joule imaginou que uma dada quantidade de energia, de qualquer natureza, produziria sempre a mesma quantidade de calor. Montou, então, uma série de experiências (figura 5.5) para obter a equivalência matemática das diversas formas de energia. Na montagem mostrada, um objeto de massa m era abandonado de uma altura h e seu movimento transferido para o interior de um recipiente contendo água. Essa era agitada por pás. Em linguagem moderna, a energia potencial gravitacional era transformada em energia térmica da água.

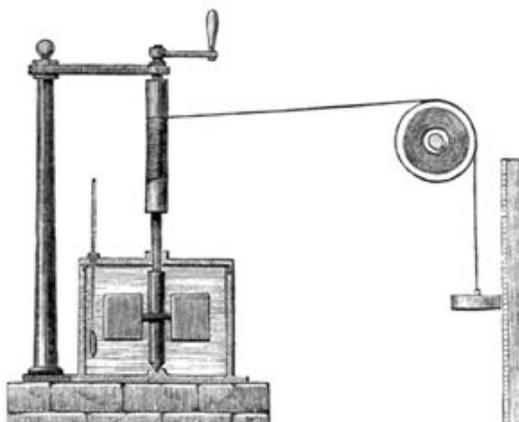


Figura 5.5: Diagrama do dispositivo utilizado por Joule (<https://historyofscience101.wordpress.com/2013/07/21/james-prescott-joule-1818-89>)

Com experimentos como esses, Joule mostrou que $1\text{cal} = 4,18\text{ J}$.

Lorde Kelvin, famoso cientista cujo nome é utilizado como unidade de temperatura na escala absoluta, descreve um de seus encontros com Joule, passeando pelo pico do Mont Blanc, o pico mais alto da Europa: "... e quem encontro subindo senão Joule, com um longo termômetro na mão, e uma carruagem com uma senhora não muito distante. Ele me disse que estava recém-casado, e que ia medir a diferença de temperatura existente entre os extremos da cachoeira."

8. Comparando a temperatura das águas no alto da cachoeira com a temperatura das águas na base da cachoeira, você espera que Joule tenha encontrado um valor maior, menor ou igual? Justifique.

Na catarata do Iguazu, a água caindo de 80m, produz uma variação de temperatura de $1/8$ de $^{\circ}\text{C}$, ou seja, aproximadamente $0,125^{\circ}\text{C}$. Foi com números pequenos como este que Joule apresentou parte de seu trabalho para a comunidade científica, tentando convencê-los da transformação das diferentes formas de energia. Iremos fazer uma experiência semelhante à de Joule, trocando água por bolinhas de chumbo. Como é necessário que a massa caia de uma grande altura para produzir significativa variação de temperatura (vide exemplo da catarata), iremos fazer sucessivas quedas para simular um efeito único de uma queda a grande altura.

ATIVIDADE EXPERIMENTAL⁵

A. Coloque dentro de um longo tubo de PVC, ___ g de bolinhas de chumbo (figura 5.6). Meça a temperatura inicial das esferas ($t_i = \text{___}^{\circ}\text{C}$). Meça o tamanho do tubo de PVC, isto é, a altura de queda as bolinhas de chumbo quando elas caírem ($h = \text{___ cm} = \text{___ m}$).



Figura 5.6: Tubo preto de pvc fechado em ambas as extremidades, com bolinhas de chumbo.

B. Tampe o tubo com uma rolha de plástico e gire o tubo de 180° , provocando a queda das bolinhas de chumbo. Repita este procedimento 99 vezes, simulando uma queda de uma altura de $100 \times \text{___ cm} = \text{___ cm}$. Expresse esse resultado em metros.

C. Após a 100^{a} queda, meça rapidamente a temperatura das esferas de chumbo introduzindo o termômetro na abertura lateral de uma das extremidades do tubo. ($t_f = \text{___}^{\circ}\text{C}$).

⁵ Assista á videoaula desse experimento em <https://www.youtube.com/watch?v=foki1BDBr7Y>

- D. Que transformações de energia ocorreram do momento em que você vira o tubo até o momento em que as esferas são paradas, abruptamente, ao atingirem o fundo do tubo?
- E. Determine o valor da energia potencial gravitacional, em joules, apresentado pelas esferas de chumbo ao cair da altura total.
- F. Determine a quantidade de calor (em calorias) que seria necessária para provocar nas esferas de chumbo a variação de temperatura registrada. Sabe-se que para elevar a temperatura de 1g de chumbo em 1°C é necessário 0,033 cal. (0,033 cal/(g. $^{\circ}\text{C}$))
- G. Compare os valores encontrados nos itens E e F e determine o equivalente mecânico do calor, ou seja, a relação joule-caloria.
- H. Compare o valor encontrado em G, com a relação esperada: 1 cal = 4,2 J. Explique as razões da diferença.
- I. Utilizando a relação esperada entre caloria e joule e supondo desprezíveis as forças dissipativas que atuam na virada do tubo e durante a queda das esferas, qual seria a variação de temperatura das esferas? Nesse caso toda a energia potencial gravitacional seria convertida em energia térmica das esferas, pelas forças dissipativas atuantes na base do tubo e que param as esferas.
- J. É correto afirmar que, nesse experimento, as esferas de chumbo absorveram calor?

5.5 Curva de aquecimento de uma substância

Para responder às questões a seguir, pesquise sobre os temas mudanças de fase e curva de aquecimento de uma substância.

Uma amostra de 10 g de certa substância pura, inicialmente no estado sólido, é aquecida a pressão constante. Medindo-se a temperatura da amostra em função da quantidade de calor por ela absorvida encontrou-se a curva de aquecimento mostrada na figura 5.7.

9. Identifique, no gráfico, os trechos em que a substância se encontra:

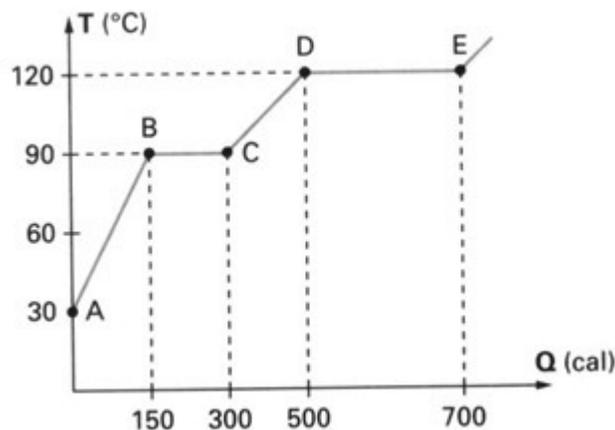


Figura 5.7: Curva de aquecimento de uma substância

- na fase sólida: _____

- na fase líquida: _____
- na fase gasosa: _____
- nas fases sólida e líquida: _____
- nas fases líquida e gasosa: _____

10. Assinale V, para as afirmativas verdadeiras e F, para as falsas. Justifique as falsas.

- a) No trecho AB, a substância está no estado sólido e sua capacidade térmica é $1,7 \frac{\text{cal}}{\text{oC}}$. ()
- b) No trecho AB, a substância está no estado sólido com calor específico igual a $0,25 \frac{\text{cal}}{\text{g.oC}}$. ()
- c) O trecho BC é uma evidência de que, a uma dada pressão, ‘durante a fusão, a temperatura de uma substância pura permanece constante’. ()
- d) A temperatura não se altera no trecho BC porque todo o calor fornecido foi utilizado para desfazer a rede cristalina do sólido, afastando as moléculas umas das outras e enfraquecendo as forças intermoleculares. ()
- e) Para fundir os 10g de substância, na temperatura de fusão, são necessárias 150cal. ()
- f) A temperatura não se altera no trecho DE porque todo o calor absorvido é utilizado para separar as moléculas do líquido, tornando nulas as forças intermoleculares, de acordo com o modelo de gás ideal. ()
- g) Após absorver 700cal, os 10g de substância se encontram no estado gasoso. ()
- h) Na temperatura de ebulição, são necessárias 20cal para vaporizar 1g de substância. ()
- i) Se fossem fornecidas 195cal aos 10g de substância, a partir da temperatura de 30°C , ao final desse processo, teríamos uma mistura de 7 gramas de substância na fase sólida e de 3g na fase líquida. ()
- j) A substância se liquefaz à temperatura de 120°C . ()
- l) Se 10 g da substância, no estado gasoso, a 120°C , cederem para a vizinhança 700cal, teremos ao final do processo, 10g de substância no estado sólido a uma temperatura de 30°C . ()
- m) Se 10 g da substância, no estado gasoso, a 120°C , cederem para a vizinhança 300cal, teremos ao final desse processo, 10g de substância no estado líquido a uma temperatura de 100°C . ()

11. O calor latente de mudança de fase de uma substância é a quantidade de calor necessária para mudar de fase uma unidade de massa dessa substância. Determine os calores latentes de fusão e vaporização da substância, em cal/g, com base no gráfico ‘temperatura x calor absorvido’.

12. É correto afirmar que:

- a) Sempre que um corpo troca calor com a vizinhança, sua temperatura se modifica?
- b) Para se determinar a fase em que se encontra uma substância, basta sabermos a sua temperatura?

5.6 Exercícios

1) (Pucsp) A experiência de James P. Joule, figura 5.8, determinou que é necessário transformar aproximadamente 4,2J de energia mecânica para se obter 1cal. Numa experiência similar, deixava-se cair um corpo de massa 50kg, 30 vezes de uma certa altura. O corpo estava preso a uma corda, de tal maneira que, durante a sua queda, um sistema de pás era acionado, entrando em rotação e

agitando 500g de água contida num recipiente isolado termicamente. O corpo caía com velocidade praticamente constante. Constatava-se, através de um termômetro adaptado ao aparelho, uma elevação total na temperatura da água de 14°C .

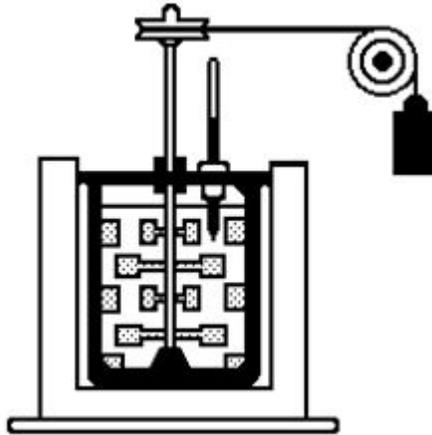


Figura 5.8: Experiência de James P. Joule

Determine a energia potencial total perdida pelo corpo e de que altura estava caindo.

Despreze os atritos nas polias, no eixo e no ar. Dados: calor específico da água: $c=1\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$; $g = 9,8\text{m/s}^2$.

- a) $E_p = 7000\text{J}$; $h = 0,5\text{m}$.
- b) $E_p = 29400\text{J}$; $h = 2\text{m}$.
- c) $E_p = 14700\text{J}$; $h = 5\text{m}$.
- d) $E_p = 7000\text{J}$; $h = 14\text{m}$.
- e) $E_p = 29400\text{J}$; $h = 60\text{m}$.

2) No experimento representado pela figura 5.8, que condição do experimento permite afirmar que:

- a) Toda a energia potencial gravitacional é convertida em térmica da água, durante a queda do corpo.
- b) A água é aquecida apenas por meio de realização de trabalho sobre ela.

3)(Vunesp) Massas iguais de água e óleo foram aquecidas num calorímetro, separadamente, por meio de uma resistência elétrica que forneceu energia térmica com a mesma potência constante, ou seja, em intervalos de tempo iguais cada uma das massas recebeu a mesma quantidade de calor. O gráfico, na figura 5.9, representa as temperaturas desses líquidos no calorímetro em função do tempo, a partir do instante em que iniciou o aquecimento.

- a) Qual das retas, I ou II, é a da água, sabendo-se que o calor específico da água é maior que o do óleo? Justifique sua resposta.
- b) Determine a razão entre os calores específicos da água e do óleo, usando os dados do gráfico.

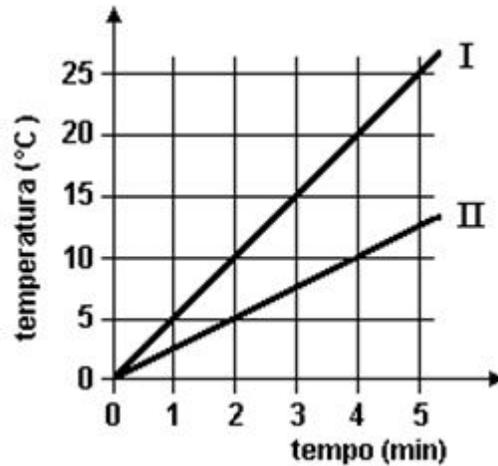


Figura 5.9: Aquecimento de água e óleo

4) (Fuvest) Um atleta envolve sua perna com uma bolsa de água quente, contendo 600g de água à temperatura inicial de 90°C . Após 4 horas ele observa que a temperatura da água é de 42°C . A perda média de energia da água por unidade de tempo é: Dado: $c = 1,0 \text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$

- a) 2,0 cal/s
- b) 18 cal/s
- c) 120 cal/s
- d) 8,4 cal/s
- e) 1,0 cal/s

5) (Unicamp) Um rapaz deseja tomar banho de banheira com água à temperatura de 30°C , misturando água quente e fria. Inicialmente, ele coloca na banheira 100L de água fria a 20°C . Desprezando a capacidade térmica da banheira e a perda de calor da água para a vizinhança da banheira, pergunta-se:

- a) quantos litros de água quente, a 50°C , ele deve colocar na banheira?
- b) se a vazão da torneira de água quente é de $0,20\text{L/s}$, durante quanto tempo a torneira deverá ficar aberta?

6) (Fatec) Um frasco contém 20g de água a 0°C . Em seu interior é colocado um objeto de 50g de determinado metal a 80°C . Os calores específicos da água e do metal são respectivamente $1,0\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ e $0,10\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$. Supondo não haver trocas de calor com o frasco e com o meio ambiente, a temperatura de equilíbrio desta mistura será:

- a) 60°C
- b) 16°C
- c) 40°C
- d) 32°C
- e) 10°C

7) (Fei) Um calorímetro contém 200cm^3 de água, e o conjunto está à temperatura de 20°C . Ao serem adicionados ao calorímetro 125g de uma liga a 130°C , verificamos que após o equilíbrio térmico a temperatura final é de 30°C . Qual é a capacidade térmica do calorímetro?

Calor específico da liga: $0,20\text{cal/g}^\circ\text{C}$

Calor específico da água: $1\text{cal/g}^\circ\text{C}$

Densidade da água: 1g/cm^3

a) $50\text{cal}/^\circ\text{C}$

b) $40\text{cal}/^\circ\text{C}$

c) $30\text{cal}/^\circ\text{C}$

d) $20\text{cal}/^\circ\text{C}$

e) $10\text{cal}/^\circ\text{C}$

8) (Uel) O gráfico 5.10 representa o calor absorvido por dois corpos sólidos M e N em função da temperatura. A capacidade térmica do corpo M, em relação à do corpo N, vale

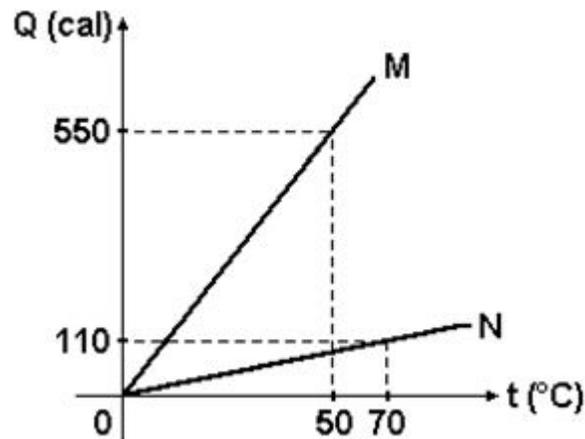


Figura 5.10: Aquecimento das massas M e N

a) 1,4.

b) 5,0.

c) 5,5.

d) 6,0.

e) 7,0.

9) (Unaerp) Você vai acampar por três dias e leva bujõeszinhos de gás de 2kg ; o calor de combustão do GLP (gás liquefeito de petróleo) é 600cal/g . Suponha que não haja perdas. Você utilizará o gás para aquecer 10L de água, desde 16°C até 100°C , por dia. O número de bujões necessários será:

Dados: densidade da água = 1kg/L

a) 2.

- b) 1.
- c) 5.
- d) 4.
- e) 3.

10) (Fuvest) Num forno de microondas é colocado um vasilhame contendo 3kg d'água a 10°C . Após manter o forno ligado por 14 min, se verifica que a água atinge a temperatura de 50°C . O forno é então desligado e dentro do vasilhame d'água é colocado um corpo de massa 1kg e calor específico $c=0,2\text{cal}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$, à temperatura inicial de 0°C . Despreze o calor necessário para aquecer o vasilhame e considere que a potência fornecida pelo forno é continuamente absorvida pelos corpos dentro dele. 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°C é:

- a) 56s.
- b) 60s.
- c) 70s.
- d) 280s.
- e) 350s.

11) (Mackenzie) Um corpo de massa 100g é aquecido por uma fonte térmica de potência constante e igual a 400 cal/min . O gráfico, na figura 5.11, mostra como varia no tempo a temperatura do corpo. O calor específico da substância que constitui o corpo, em $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$, é:

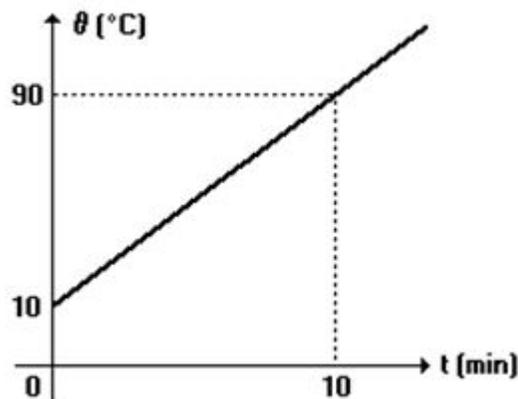


Figura 5.11: Variação de temperatura de um corpo de 100g

- a) 0,6.
- b) 0,5.
- c) 0,4.
- d) 0,3.
- e) 0,2.

12. (Vunesp) A figura 5.12 mostra as quantidades de calor Q absorvidas, respectivamente, por dois corpos, A e B, em função de suas temperaturas.

- a) Determine a capacidade térmica C_A do corpo A e a capacidade térmica C_B do corpo B, em $J/^\circ C$.
- b) Sabendo que o calor específico da substância de que é feito o corpo B é duas vezes maior que o da substância de A, determine a razão m_A/m_B entre as massas de A e B.

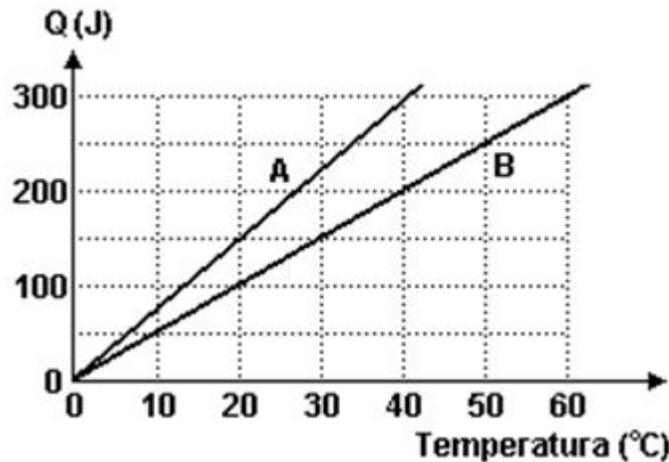


Figura 5.12: Quantidades de calor Q absorvidas pelos corpos A e B

13. (Fuvest) 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, conforme figura 5.13:

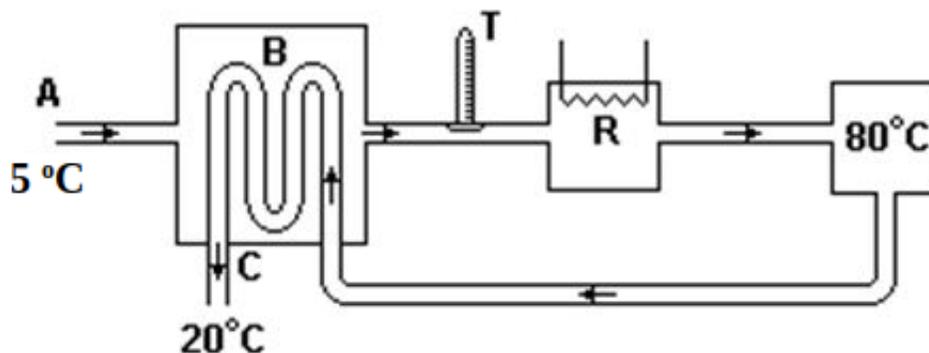


Figura 5.13: Dispositivo de pasteurização

- I) O leite entra no sistema (através de A), a $5^\circ C$, 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, através da resistência R, até que ele atinja $80^\circ C$.

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°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°C .
- b) 25°C .
- c) 60°C .
- d) 65°C .
- e) 75°C .

14. (Pucsp) Um aquecedor de imersão (ebulidor), mostrado na figura 5.14 dissipa 200W de potência, utilizada totalmente para aquecer 100g de água, durante um minuto. Qual a variação de temperatura sofrida pela água? Considere $1\text{cal} = 4\text{J}$ e $c_{\text{gua}} = \frac{1\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$.



Figura 5.14: Aquecedor de imersão

- a) 120°C .
- b) 100°C .
- c) 70°C .
- d) 50°C .
- e) 30°C .

5.7 Respostas das questões e dos exercícios

Questões

- 1 e 2. Discuta com seu professor.
- 3. O maior calor específico da água implica uma massa menor em relação ao ar para obter o mesmo resfriamento.
- 4. e
- 5. a) $11\text{ cal}/^{\circ}\text{C}$.

b) Para alterar em 1 °C a temperatura do bloco, ele deve trocar com a vizinhança 11 cal de calor (energia).

c) 1100 cal liberadas.

6. a) 0,22 cal/(g · °C)

b) Alumínio.

7 a 12. Discuta com seu professor.

Exercícios

1) b)

2) Discuta com seu professor.

3) a) II

b) 2

4) a)

5) a) 50 litros

b) 250s ou 4min e 10s

6) b)

7) a)

8) e)

9) e)

10) c)

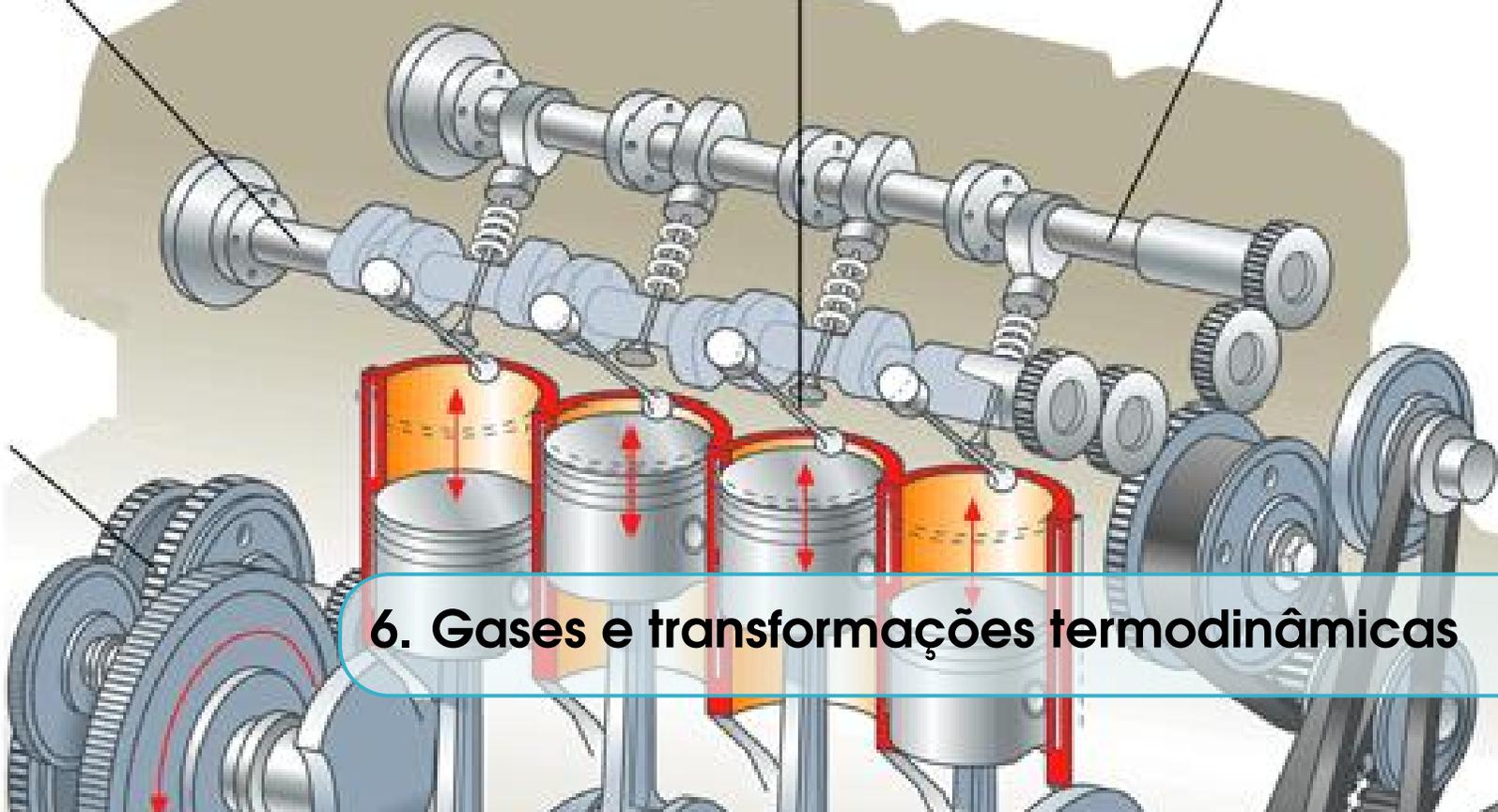
11) b)

12) a) $C_A = 7,5 \text{ J/}^\circ\text{C}$ e $C_B = 5 \text{ J/}^\circ\text{C}$

b) $m_A/m_B = 3$

13) d)

14) e)



6. Gases e transformações termodinâmicas

A primeira lição nas aulas de mergulho (figura 6.1) é: **Não prenda o ar quando estiver subindo.** Isso pode ser fatal. Para se fazer um mergulho seguro, o aprendiz necessita ir soltando o ar, à medida que voltar à superfície. Mesmo que você nunca tenha mergulhado (mas vale a pena!), o estudo dos gases lhe será útil, nesta e em uma série de outras situações.



Figura 6.1: Mergulhador (Fonte: <https://br.freepik.com/fotos-vetores-gratis/mergulhador>)

Os gases ideais são compostos de partículas livres - átomos ou moléculas num constante movimento aleatório. Isso significa que um gás vai preencher inteiramente qualquer recipiente onde for colocado. Ela vai ocupar uma porção definida do espaço, um **volume**, geralmente confinado num recipiente. Quanto maior a **temperatura** do gás, mais rapidamente suas partículas constituintes vão se movimentar. As colisões dessas partículas contra as paredes do recipiente vão ocasionar o aparecimento de uma **pressão**.

O comportamento de um gás real, que esteja submetido a condições de temperatura e pressão suficientemente distantes do processo de liquefação, pode ser interpretado segundo as equações do modelo de gás ideal, a ser apresentado neste capítulo.

O estado termodinâmico de um gás é definido se soubermos a **pressão (P)**, o **volume (V)**, a **temperatura (T)** e o **número de mols (n) do gás**, em um determinado instante. Trabalharemos hoje com um programa que simula o comportamento de um gás ideal em diferentes condições. Acesse o site (www.physics-chemistry-interactive-flash-animation.com). Clique em (*Matter*) e depois em (*(P and V/Boyle's Law)*). A figura 6.2 mostra a tela da simulação.

1. Variaremos o valor da pressão sobre o gás e registraremos os novos valores do volume ocupado. Preencha a tabela 6.1 com os valores pressão, em hPa, e volume, em cm^3 observando os seguintes critérios: a) espere o sistema estabilizar após realizar as alterações nos valores da pressão; b) como o valor do volume não fica rigorosamente constante, aproxime-o para um valor inteiro.

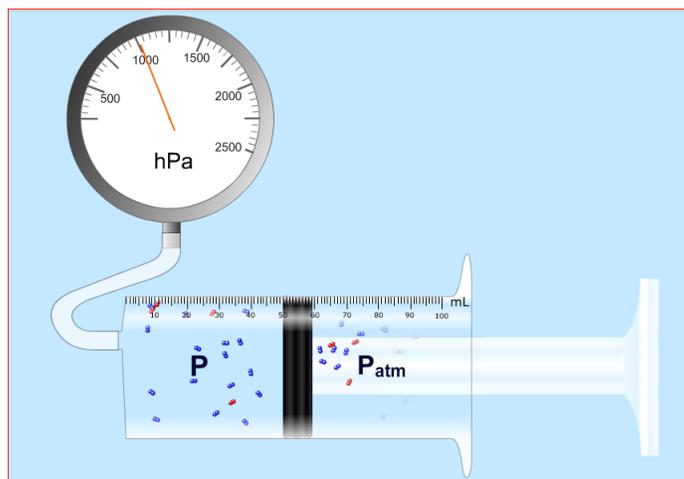


Figura 6.2: Comportamento de um gás em uma seringa

Tabela 6.1: Pressão (P) versus Volume (V)

Estado	P(hPa)	V(cm^3)
1		20
2		40
3		60
4		80
5		100

2. Podemos observar, analisando os números encontrados na tabela anterior que, quanto menor a pressão, maior o volume ocupado pelo gás. Mas podemos afirmar que essas grandezas são inversamente proporcionais? Para afirmar isso devemos verificar as propriedades associadas aos números. Grandezas inversamente proporcionais apresentam a propriedade do produto de seus valores ficar constante. Verificaremos isso preenchendo a tabela 6.2:

Tabela 6.2: Produto $P \cdot V$

Estado	$P \cdot V$ (hPa · cm ³)
1	
2	
3	
4	
5	

3. Encontre o valor médio do produto $P \cdot V$ ($\overline{P \cdot V}$) = _____ (sem casas decimais)
4. Para verificar se os valores do produto $P \cdot V$ de cada estado varia muito em relação ao valor médio, encontre o valor percentual da diferença entre o valor médio e o valor máximo/mínimo encontrado nos estados 1 ao 5.

$$\overline{P \cdot V} = \text{_____} (100\%) \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow P \cdot V_{MÍNIMO} = \text{_____} : \text{diferença percentual} = \text{_____} \% \\ \rightarrow P \cdot V_{MÁXIMO} = \text{_____} : \text{diferença percentual} = \text{_____} \% \end{array} \right.$$

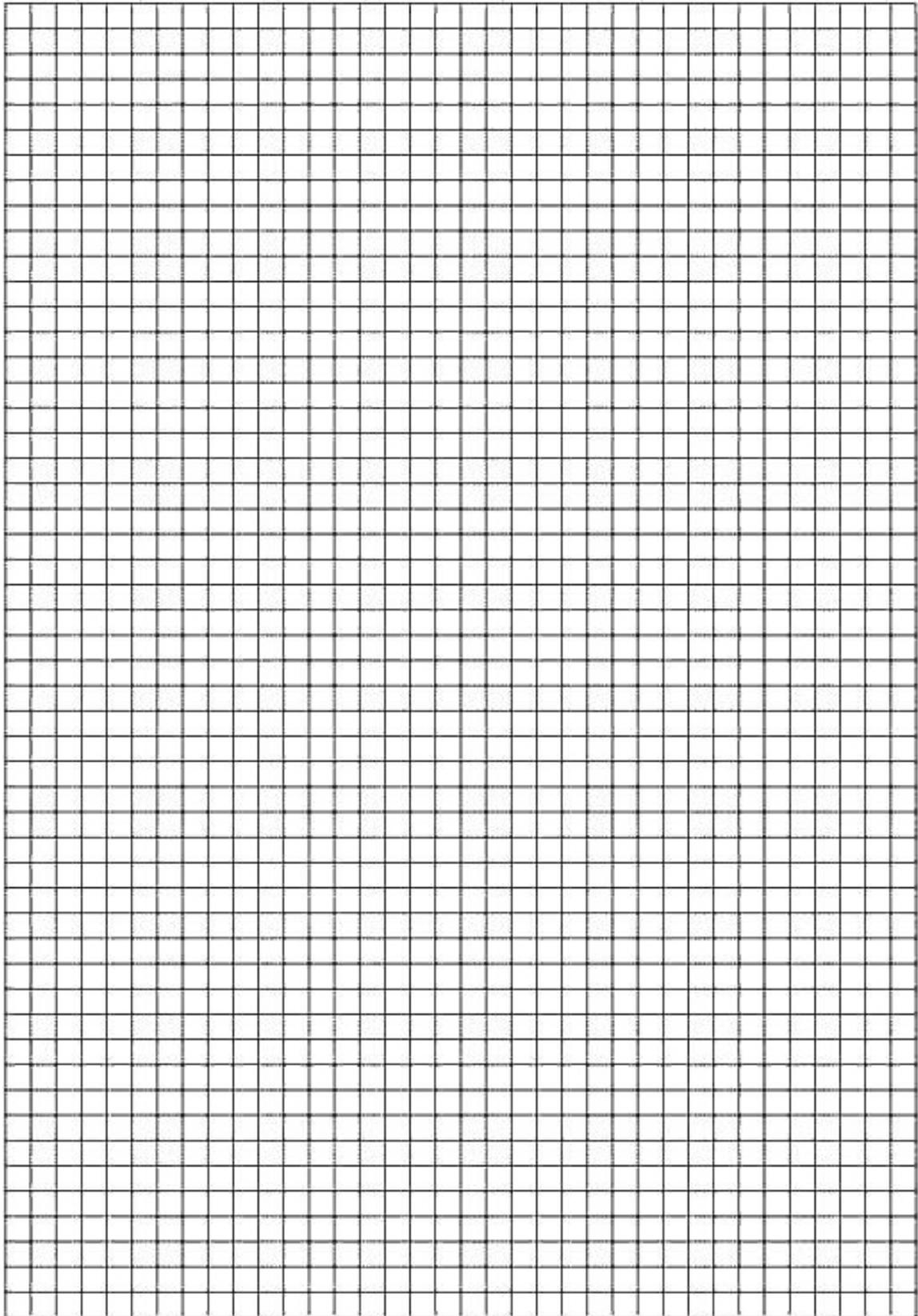
O ideal é que as diferenças percentuais não passem de 10%.

5. Depois das análises realizadas anteriormente, podemos afirmar que:
- produto $P \times V$ é constante?
 - As grandezas pressão e volume, na atividade realizada, são inversamente proporcionais? Justifique.
6. Sabe-se que os gases ideais obedecem a relação $PV = nRT$ (equação de estado dos gases ideais).
- Na equação: P é a pressão que o gás exerce nas paredes do recipiente que o contém; V é o volume ocupado pelo gás; n é o número de mols do gás; T é a temperatura absoluta do gás; R é uma constante de proporcionalidade cujo valor depende das unidades de pressão e volume.
 - Se a pressão é expressa em N/m^2 (Pa) e o volume em m^3 , R é $8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ Se a pressão é expressa em atm e o volume em L, R é $0,082(\text{atm} \cdot \text{L})/(\text{mol} \cdot \text{K})$

Nessa atividade, quais grandezas permanecem constantes? Então, qual o nome da transformação?

7. Verificaremos agora qual o aspecto do gráfico para as transformações realizadas dos estados 1 ao 5. Utilize o espaço abaixo para registrar os valores da pressão (ordenadas) e volume (abscissas). Construa uma escala que utilize a maior área possível do papel quadriculado.
8. Trace o gráfico com os pontos obtidos. Como denominamos essa curva matemática?

Qual é o nome dessa curva no gráfico $P \times V$, de forma a referenciar uma transformação com temperatura constante?



9. A lei de Boyle refere-se a uma transformação isotérmica. Qual é a sua expressão matemática?
10. Considerando o pulmão de um mergulhador como um recipiente fechado que contém gás, EXPLIQUE a frase grifada no primeiro parágrafo.
11. Imagine que dois grupos de estudantes, realizando transformações gasosas, tenham encontrado os seguintes pares de valores pressão e volume nas tabelas abaixo.

Tabela 6.3: transformação 1

Pressão (atm)	Volume (mL)
10	100
20	80
40	60
80	40
100	20

Tabela 6.4: Transformação 2

Pressão (atm)	Volume (mL)
20	100
25	80
40	50
60	33
90	22

Qual dessas transformações pode ser considerada isotérmica? Explique sua resposta.

6.1 Exercícios

01. Complete o quadro abaixo, com base na equação de estado de um gás ideal, cuja amostra tem massa constante.

Tipo de transformação	Variáveis de estado que permanecem constantes	Variáveis de estado que se modificam	Relação matemática entre as variáveis de estado que se modificam	Gráfico entre as variáveis de estado que se modificam, tendo T (K), como abscissa	Gráfico entre as variáveis de estado que se modificam, tendo t (°C), como abscissa
Isobárica					
Isovolútrica (Isométrica ou Isocórica)					

02. Os resultados experimentais obtidos por Boyle, Gay Lussac e Charles, para as transformações termodinâmicas dos gases ideais estão contidos na equação de estado de um gás ideal. Mostre que quando um gás ideal passa de um estado termodinâmico (1) para outro estado (2):

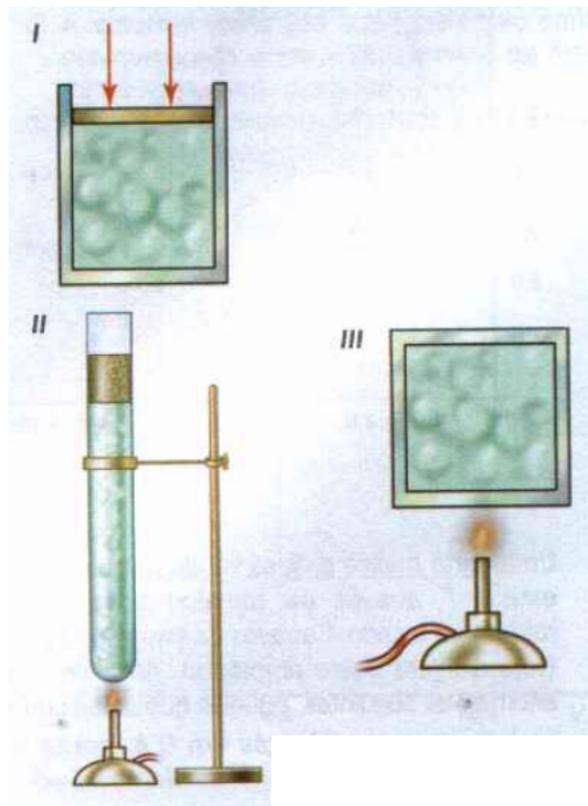
a) Se T for constante: $p_1 V_1 = p_2 V_2$ (Lei de Boyle).

b) Se p for constante: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ (Lei de Gay Lussac).

c) Se V for constante: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ (Lei de Charles).

d) Se p, V e T se modificam: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

03. A figura deste exercício representa as seguintes transformações termodinâmicas de um gás ideal: I. Um gás é comprimido lentamente de modo a se manter em equilíbrio térmico com a vizinhança. II. Um gás é aquecido lentamente, vedado por uma pequena coluna de mercúrio. III. Um gás é aquecido em um recipiente cuja dilatação é desprezível.



a) Identifique o tipo de transformação em I, II e III.

b) Considere as seguintes equações: $\frac{V}{T} = \text{constante}$; $\frac{p}{T} = \text{constante}$; $pV = \text{constante}$. Qual delas se aplica em cada transformação identificada?

04. Um motorista calibra os pneus de seu carro com uma pressão 30 libras/pol², a uma temperatura de 20 °C. Após fazer certo percurso, a temperatura dos pneus se elevou para 40 °C. A dilatação dos pneus é muito pequena e pode ser desprezada. Responda:

a) Que tipo de transformação sofreu o ar dentro do pneu?

b) Que pressão o ar exerce no pneu ao final do percurso?

05. Um gás ideal sofreu uma transformação isobárica, na qual sua temperatura variou de 27°C para 57°C .

a) Qual foi o percentual de variação de volume do gás nessa transformação?

6.2 Respostas das questões e dos exercícios

Questões

1 a 11. Discuta com seu professor.

Exercícios

01 e 02. Discuta com seu professor.

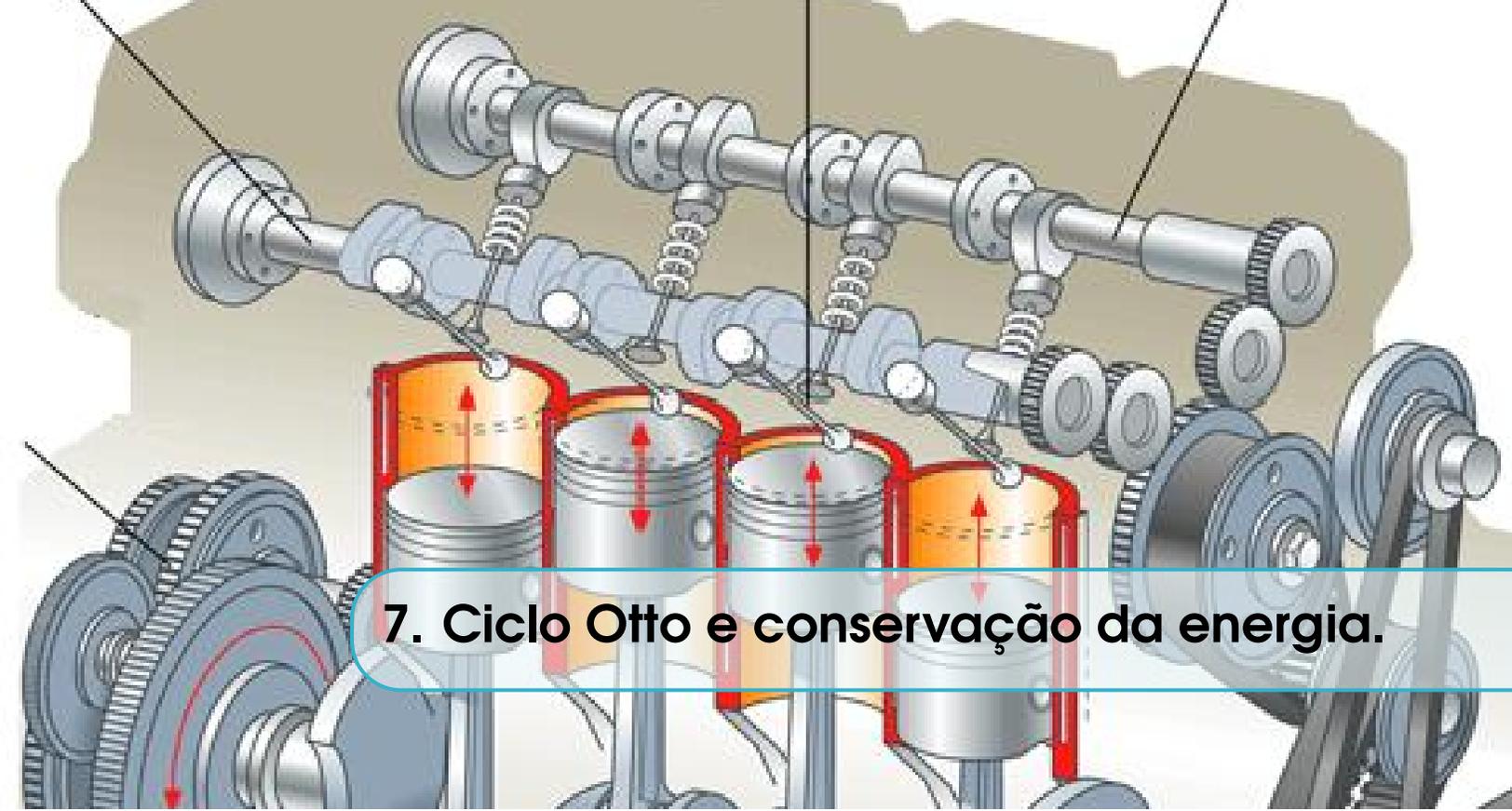
03. I: transformação isotérmica; $pV = \text{constante}$.

II: transformação isobárica; $\frac{V}{T} = \text{constante}$.

III: transformação isovolumétrica; $\frac{p}{T} = \text{constante}$.

04. 32 libras/pol².

05. 10 por cento.



7. Ciclo Otto e conservação da energia.

7.1 A energia se conserva no motor de combustão interna?

O fato da energia liberada na combustão dentro do motor não ser aproveitada integralmente na forma de trabalho implica afirmar que ela não se conserva?

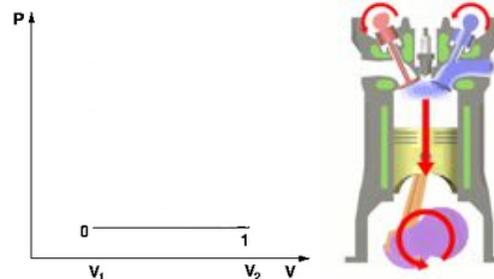
No funcionamento do motor de combustão, a energia sofre um processo de conversão, assumindo diferentes formas, porém se conservando, como prevê o Princípio de Conservação da Energia. Recordemos esse processo de conversão/conservação da energia representando o Ciclo Otto em um 'gráfico pressão x volume'.

Vimos que o estado termodinâmico de um gás é definido pelas seguintes grandezas: pressão, volume, temperatura, número de mols (massa). Estudamos com detalhe **a transformação isotérmica** para certa amostra de gás, na qual o número de mols e a temperatura do gás permaneceram constantes e **a pressão e volume do gás variaram segundo uma relação inversamente proporcional**.

No ciclo do motor de combustão, acontecem outras transformações termodinâmicas, descritas a seguir. Reveja a animação que coordena a representação do ciclo do motor com o gráfico $p \times V$ e com o comportamento do volume, temperatura e pressão dos gases dentro do cilindro do motor: <https://aprendafisica.wordpress.com/2016/03/17/simulacao-do-funcionamento-de-um-motor-de-combustao-interna>. Relacione os textos, gráficos e figuras ¹.

1º tempo: admissão da mistura.

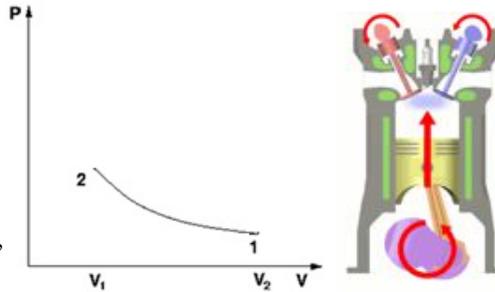
Abertura da válvula de admissão: enquanto o volume do gás aumenta, a pressão fica praticamente constante (**transformação isobárica 0-1**).



¹Fonte da figura dos tempos do motor: <https://www.motonline.com.br/noticia/comandos-em-acao>

2º tempo: compressão da mistura.

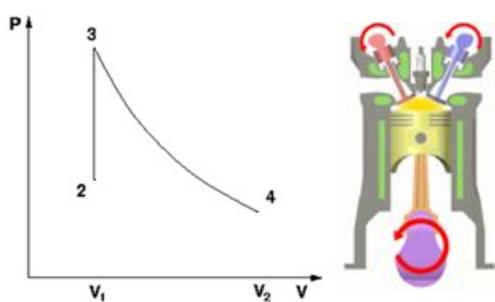
Enquanto o volume diminui, a pressão e a temperatura aumentam. Trata-se de uma compressão rápida em que a troca de calor com a vizinhança é desprezível (**compressão adiabática**). No ponto de compressão máxima e menor volume ocupado pela mistura combustível, ocorre uma centelha elétrica.



3º tempo: explosão/expansão da mistura.

Na etapa 2-3, o volume do gás fica praticamente constante e ocorre um grande aumento de temperatura e pressão (**transformação isovolumétrica 2-3**).

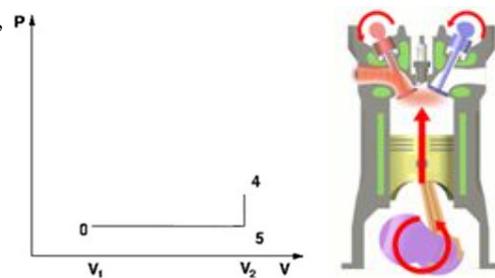
Na etapa 3-4, os gases resultantes da combustão se expandem rapidamente, a temperatura e a pressão sofrem redução devido à realização de trabalho sobre o pistão (**expansão adiabática 3-4**). Na etapa 3-4, a rapidez do processo torna a troca de calor com a vizinhança desprezível.



4º tempo: escape dos gases.

Na etapa 4-5, a abertura da válvula de escape provoca uma redução na pressão e na temperatura, com o volume ficando praticamente constante (**transformação isovolumétrica 4-5**).

Na etapa 5-0, o pistão se desloca para cima empurrando os gases resultantes da combustão para fora do cilindro. a redução do volume combinada à saída dos gases faz com que a transformação aconteça à pressão constante (**compressão isobárica 5-0**). Retorno às condições iniciais e reinício do ciclo.



No ciclo completo do motor, indicado na figura 7.1, a energia liberada pela combustão da mistura combustível somente é transformada em trabalho no terceiro tempo. Nas outras etapas (1º, 2º e 4º tempos), o pistão é empurrado devido ao giro do virabrequim. A parcela do calor liberado pela combustão e não convertida em trabalho aumenta a **energia interna U** dos gases resultantes da combustão, que saem pelo escapamento a temperaturas muito altas. Parte dessa energia interna é também transferida, aquecendo as peças do motor, que são refrigeradas continuamente, trocando calor com o meio ambiente.

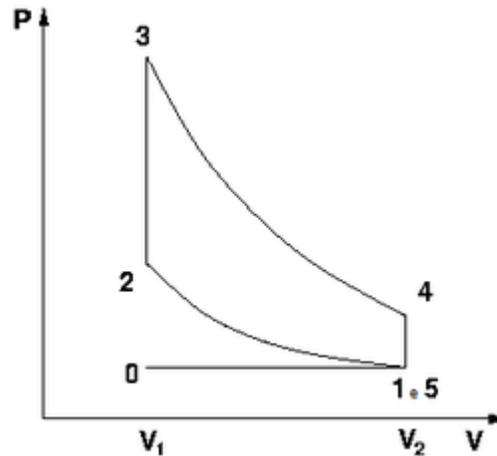


Figura 7.1: ciclo completo do motor.

A energia ou quantidade de calor Q liberada na combustão da mistura (ar + combustível) foi apenas parcialmente convertida em trabalho W e o restante se distribuiu entre as moléculas dos produtos da combustão provocando um aumento da sua energia interna (ΔU). Aplicando a conservação de energia ao ciclo da máquina térmica temos:

$$Q = W + |Q_F| \quad (7.1)$$

Nessa equação:

- Q é o calor liberado na combustão e absorvido pela substância que realiza trabalho, os gases resultantes da combustão.
- W é o trabalho realizado pelos gases resultantes da combustão.
- $|Q_F|$ é o módulo do calor liberado para a vizinhança (sistema de refrigeração e atmosfera). Esse corresponde à parcela de calor liberada na combustão, não convertida em trabalho, que aumentou a energia interna dos gases resultantes da combustão.

Portanto, o calor liberado para a vizinhança ($|Q_F|$), no ciclo do motor, corresponde ao aumento de energia interna (ΔU) dos gases resultantes da combustão. A equação da conservação de energia, para o ciclo do motor, pode ser escrita de outra forma:

$$Q = W + \Delta U \quad (7.2)$$

Essa equação expressa a **Primeira Lei da Termodinâmica**, que é uma forma alternativa de enunciar a **Conservação de Energia** do ponto de vista da variação da energia interna de um sistema. Isolando o termo ΔU , nessa equação, temos:

$$\Delta U = Q - W \quad (7.3)$$

Com base na equação 7.3, **calor e trabalho são processos de transferência de energia que podem alterar a energia interna de um sistema e, portanto, sua temperatura.**

7.2 Os conceitos envolvidos na primeira lei da termodinâmica

Energia Interna

No primeiro estudo que fizemos do motor de combustão interna, vimos que a energia liberada na combustão da mistura (ar + combustível) é convertida em energia térmica dos produtos da combustão e que, apenas, aproximadamente 1/3 dessa energia é convertida em trabalho.

Entretanto, a energia liberada na combustão é também convertida em energia potencial de interação entre os átomos das moléculas constituintes dos produtos da combustão, em energia cinética de vibração e rotação, dentro das moléculas. A soma de todas as formas de energia contidas em um sistema é conceituada como **energia interna (U)**.

Inicialmente, em uma primeira aproximação, vinculamos a energia térmica à soma das energias cinéticas de translação das moléculas. No estudo da primeira lei da termodinâmica, ampliamos o conceito de energia térmica para energia interna. A energia interna de um sistema é constituída das energias cinéticas de translação das moléculas, e ainda, dentro das moléculas, das energias cinéticas de vibração e de rotação e da energia potencial de interação entre os átomos que as constituem.

Energia Interna = Energia Cinética de Translação + Energia Cinética de Rotação e de Vibração + Energia Potencial

A intensa variação de energia interna dos produtos resultantes da combustão se expressa por sua elevada temperatura. **No caso dos gases, há uma estreita correlação entre energia interna e temperatura.** Se a energia interna aumenta, isso implica aumento de temperatura; se ela diminui, assim também acontece com a temperatura; se a energia interna permanece constante, constante também continua a temperatura de um gás. Matematicamente, assim se expressa a relação entre energia e temperatura absoluta de um gás ideal:

$$U \propto T \quad (7.4)$$

Para gases ideais monoatômicos, a equação que relaciona energia interna U e temperatura absoluta T é dada por:

$$U = \frac{3}{2}nRT \quad (7.5)$$

Nessa equação, n é o número de mols do gás e R a constante universal dos gases.

Então lembre-se: **O que acontece com a energia interna de um gás, acontece também com sua temperatura.**

A equivalência entre calor e trabalho

A equivalência entre calor e trabalho está expressa na primeira lei da termodinâmica.

Calor e trabalho são processos de transferência de energia que podem alterar a energia interna de um sistema e, portanto, sua temperatura

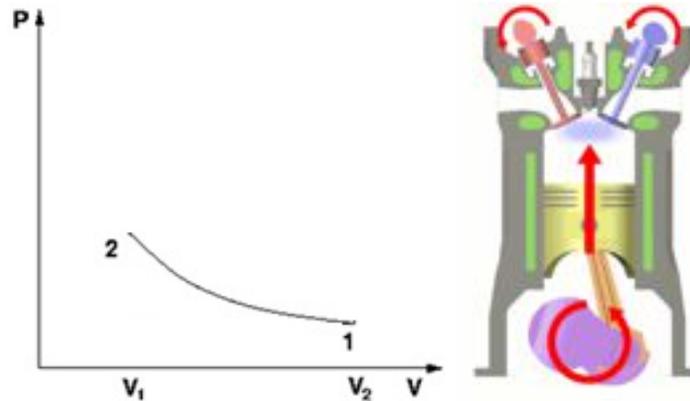
Vamos aplicar essa afirmação em algumas etapas do Ciclo Otto:

Na etapa 1-2, a mistura combustível sofre uma compressão rápida. A rapidez dessa compressão torna desprezível a troca de calor com a vizinhança. Uma transformação em que o calor trocado com a vizinhança é nulo é chamada transformação adiabática. Na compressão adiabática 1-2, a mistura combustível sofre um aumento de pressão em uma proporção maior que a redução do volume. Com

base na equação de estado de um gás ideal ($pV = nRT$), isso implica aumento de temperatura. **O aumento de temperatura significa aumento de energia interna.**

O que causou esse aumento de energia interna?

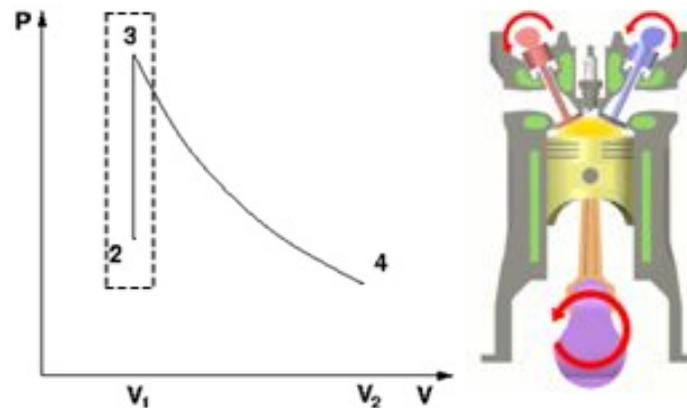
O trabalho que o virabrequim realizou sobre a mistura combustível, ao reduzir o seu volume dentro do cilindro.



Na etapa 2-3, acontece a explosão da mistura combustível. O processo é extremamente rápido e por isso podemos considerar que, nessa etapa, o pistão praticamente não se movimenta. O volume V_1 determinado pela posição mais alta do pistão fica constante. Por isso, a transformação é chamada isovolumétrica ou isométrica. Nessa etapa (2-3), não há realização de trabalho, uma vez que não há deslocamento do pistão. Mas há uma grande liberação de calor para os gases resultantes da explosão. A pressão aumenta e o volume fica constante. Isso implica aumento no produto pV e, portanto, com base na equação de estado de um gás ideal, aumento de temperatura, que é bastante expressivo. Portanto, a energia interna do sistema também aumentou significativamente, juntamente com o aumento da temperatura.

O que proporcionou esse significativo aumento da energia interna?

O calor liberado pela combustão e absorvido pelos seus produtos.



Na compressão adiabática 1-2, a temperatura e energia interna do sistema foram aumentadas por meio de realização de trabalho, sem troca de calor.

No aquecimento isovolumétrico 2-3, a energia interna e a temperatura foram aumentadas por meio de absorção de calor, sem realização de trabalho.

As etapas 1-2 (compressão adiabática) e 2-3 (aquecimento isovolumétrico) são exemplos da equivalência entre calor e trabalho como processos que podem alterar a energia interna e, portanto, a temperatura de um sistema.

Dessa equivalência entre calor e trabalho decorre a relação do equivalente mecânico do calor determinada por James Prescott Joule, hoje expressa por:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J.}$$

Joule (J) e caloria (cal) são, portanto unidades de energia, a primeira reconhecida como unidade de energia pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) e a segunda, uma unidade frequentemente usada em estudos de calorimetria e termoquímica.

A convenção de sinais de calor e trabalho na equação da primeira lei da termodinâmica

Para dar significado à convenção de sinais que deve ser utilizada na aplicação da equação da 1ª lei, vamos trabalhar com essa equação na seguinte forma:

$$\Delta U = Q - W \quad (7.6)$$

Essa equação implica a seguinte convenção de sinais:

Calor absorvido pelo sistema	$Q > 0$
Calor liberado pelo sistema	$Q < 0$
Trabalho realizado pelo sistema	$W > 0$
Trabalho realizado sobre o sistema	$W < 0$

No **aquecimento isovolumétrico** 2-3 (tempo 3 do ciclo Otto, ver quadro da p. 10):

- O trabalho trocado com a vizinhança é zero. Não há deslocamento do pistão.
- O calor é positivo uma vez que ele foi absorvido pelo sistema.
- Aplicando a equação da primeira lei da termodinâmica:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = Q \quad (7.7)$$

$$Q > 0 \rightarrow \Delta U > 0 \quad (7.8)$$

- A temperatura do gás aumenta, uma vez que U aumenta. Isto também é evidenciado pelo aumento do produto pV, de acordo com a equação de estado de um gás ideal.

Embora não faça parte do ciclo Otto, apresentamos as características de um **resfriamento isovolumétrico**, figura 8.15, em que um gás se encontra dentro de um recipiente cujas paredes não podem se mover, conforme figura abaixo. Esse gás está em contato com uma vizinhança a menor temperatura e cede calor para ela.

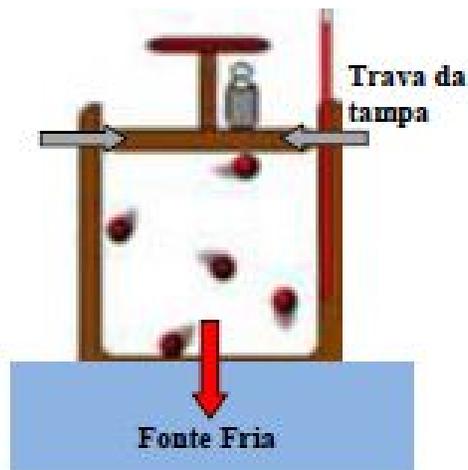


Figura 7.2: Resfriamento isovolumétrico

(Fonte: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/transformacao-isotermica-ou-lei-boyle.htm> - modificada)

- O trabalho trocado com a vizinhança é zero. Não há deslocamento do pistão.
- O calor é negativo uma vez que ele foi liberado pelo sistema.
- Aplicando a equação da primeira lei da termodinâmica:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = Q \quad (7.9)$$

$$Q < 0 \rightarrow \Delta U < 0 \quad (7.10)$$

- A temperatura do gás diminui, uma vez que U diminui. Isto também é evidenciado pela diminuição do produto pV, de acordo com a equação de estado de um gás ideal.

Na **compressão adiabática** 1-2 (tempo 1 do ciclo Otto, ver quadro da p. 10):

- O calor trocado com a vizinhança é zero.
- A vizinhança (virabrequim) realiza trabalho sobre o sistema (mistura ar + combustível).
- O trabalho é negativo pois o sistema faz uma força com sentido contrário ao deslocamento da parede móvel (pistão).
- Aplicando a equação da primeira lei da termodinâmica temos:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = -W \quad (7.11)$$

$$W < 0 \rightarrow \Delta U > 0 \quad (7.12)$$

- A temperatura do gás aumenta, uma vez que U aumenta. Isto também é evidenciado pelo aumento do produto pV, de acordo com a equação de estado de um gás ideal. Na compressão adiabática, o aumento da pressão é proporcionalmente maior que a redução do volume da mistura combustível.

Na **expansão adiabática** 3-4 (tempo 3 do ciclo Otto, ver quadro da p. 10):

- O calor trocado com a vizinhança é zero.
- O sistema (gases resultantes da combustão) realiza trabalho sobre a vizinhança (pistão, virabrequim, volante do motor e engrenagens).
- O trabalho é positivo pois a força feita pelo sistema tem o mesmo sentido do deslocamento da parede móvel.
- Aplicando a equação da primeira lei da termodinâmica temos:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = -W \quad (7.13)$$

$$W > 0 \rightarrow \Delta U < 0 \quad (7.14)$$

- A temperatura do gás diminui, uma vez que U diminui. Isto também é evidenciado pela diminuição do produto pV, de acordo com a equação de estado de um gás ideal. Na expansão adiabática, a redução da pressão é proporcionalmente maior que o aumento do volume do sistema.

Exemplo

Suponha que um sistema realize uma transformação termodinâmica, trocando energia com sua vizinhança. Calcule a variação de energia interna do sistema nos seguintes casos:

a) O sistema absorve 100 cal de calor e realiza um trabalho de 200 J.

$$Q = 100\text{cal} = 100 \times 4,18\text{J} = 418\text{J}$$

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = 418 - 200 \rightarrow \Delta U = 218\text{J}$$

Nessa transformação, Q e W são ambos positivos. Dos 418J absorvidos, 200J foram convertidos em trabalho. O restante, 218J, foi utilizado para elevar a energia interna do sistema.

b) O sistema absorve 100cal de calor e 200J de trabalho é realizado sobre ele.

$$Q = 100\text{cal} = 100 \times 4,18\text{J} = 418\text{J}$$

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = 418 - (-200) \rightarrow \Delta U = 418 + 200 = 618\text{J}$$

O calor com sinal positivo significa energia absorvida pelo sistema. Trabalho com sinal negativo também significa energia absorvida, pois a vizinhança realizou trabalho sobre o sistema. Por isso a energia interna do sistema sofreu um aumento devido ao calor absorvido pelo sistema e ao trabalho realizado sobre ele.

c) O sistema libera 100cal de calor e 200J de trabalho é realizado sobre ele.

$$Q = -100\text{cal} = -100 \times 4,18\text{J} = -418\text{J}$$

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = -418 - (-200) \rightarrow \Delta U = -418 + 200 = -218\text{J}$$

O sistema perdeu para a vizinhança 418J de calor e recebeu 200J na forma de trabalho. Ao final, perdeu mais que ganhou. A energia interna sofreu uma redução de 218J.

7.3 Trabalho realizado por um gás em uma variação de volume

Um gás encontra-se em um recipiente com um êmbolo móvel cuja área é A , conforme figura 7.3. O êmbolo (tampa móvel) pode se deslocar livremente, com atrito desprezível. Ao receber calor da vizinhança, o gás expande, à pressão constante p , exercendo sobre o êmbolo uma força F e deslocando-o de uma distância d .

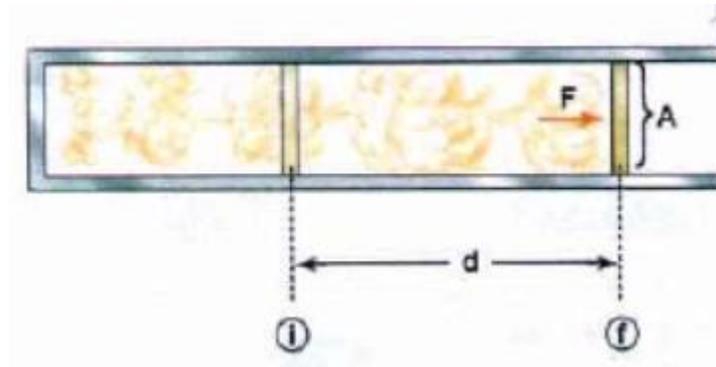


Figura 7.3: Trabalho realizado por um gás em uma expansão (Alvarenga e Máximo, 2006, p. 116)

Uma vez que a expansão é isobárica (pressão constante), a força F exercida pelo gás sobre o êmbolo é constante, pois:

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = p \cdot A$$

Se a força é constante, para calcular o trabalho W , realizado pela força F , podemos aplicar a equação $W = Fd \cdot \cos \alpha$, em que α é o ângulo entre o vetor força \vec{F} e o deslocamento \vec{d} .

No caso da figura, $\alpha = 0$. Então temos que:

$$W = Fd \rightarrow W = p \cdot A \cdot d$$

O produto $(A \cdot d)$ é justamente a variação de volume ΔV , promovida pelo gás, ao deslocar o êmbolo de 'd', na expansão. Ao final, o trabalho realizado pelo gás em uma variação de volume, **à pressão constante**, pode ser escrita por:

$$W = p \cdot \Delta V \tag{7.15}$$

No caso da variação de volume de um gás acontecer com pressão variável, a equação acima não se aplica. O cálculo do **módulo** do trabalho será feito a partir da área sob o gráfico 'pressão x volume', representado na figura 7.4. Se for uma expansão, como representado na figura, o trabalho é positivo. No caso de uma compressão, o trabalho é negativo.

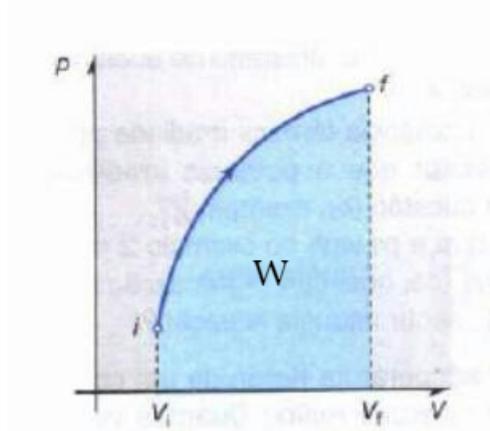


Figura 7.4: Gráfico pressão x volume da expansão de um gás, com pressão não constante (Alvarenga e Máximo, 2006, p. 146 - modificada)

Exemplo

2. Suponha que, na figura 7.3, que representa uma expansão isobárica, o gás exerceu uma pressão constante de 2atm , desde o volume 200cm^3 até o volume 500cm^3 . Qual o trabalho, em J, realizado pelo gás nessa expansão?

Para obter o trabalho em J, temos que converter as unidades de pressão e volume para o SI:

$$2\text{atm} = 2 \times 1,01 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 2,02 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (7.16)$$

$$1\text{cm}^3 = 1 \times (10^{-2}\text{m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3 \rightarrow 200\text{cm}^3 = 200 \times 10^{-6}\text{m}^3 = 2,00 \times 10^{-4}\text{m}^3 \quad (7.17)$$

Uma vez que a pressão é constante, a equação $W = p\Delta V$ pode ser aplicada:

$$W = 2,02 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 3,00 \times 10^{-4}\text{m}^3 = 6,06 \times 10 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^3}{\text{m}^2} = 60,6\text{N} \cdot \text{m} = 60,6\text{J} \quad (7.18)$$

3. Temos, na figura 7.5, o gráfico $p \times V$ da transformação de um sistema termodinâmico. Determine o trabalho realizado nas etapas AB, BC e CD e o trabalho total realizado na transformação².

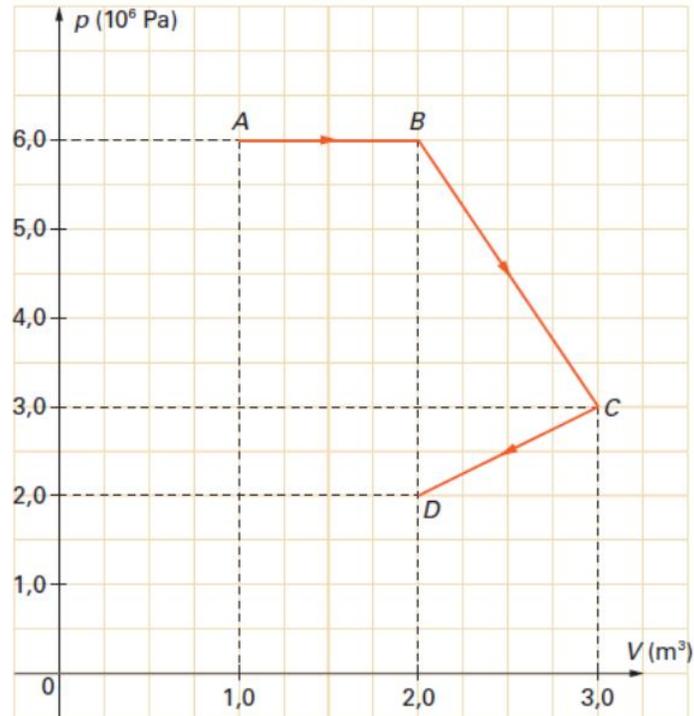


Figura 7.5: Gráfico $p \times V$ da transformação de um sistema termodinâmico

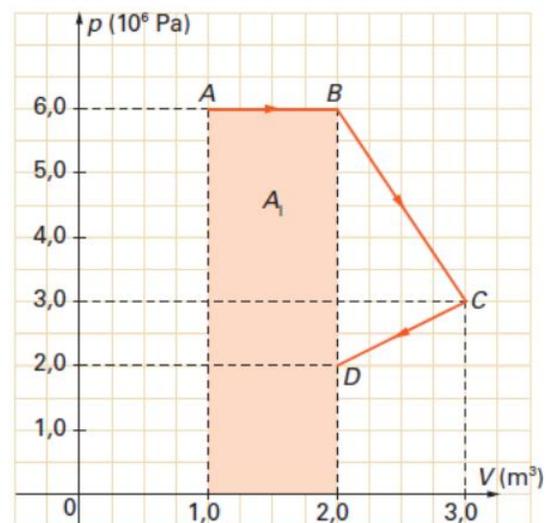
Cálculo do trabalho na etapa AB: Calcula-se a área sob o trecho AB do gráfico.

$A_I =$ área do retângulo sob o segmento AB

$$A_I = 1,0\text{m}^3 \times 6,0 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$A_I = 6,0 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$$

$$W_{AB} = A_I \rightarrow W_{AB} = 6,0 \times 10^6 \text{J}$$



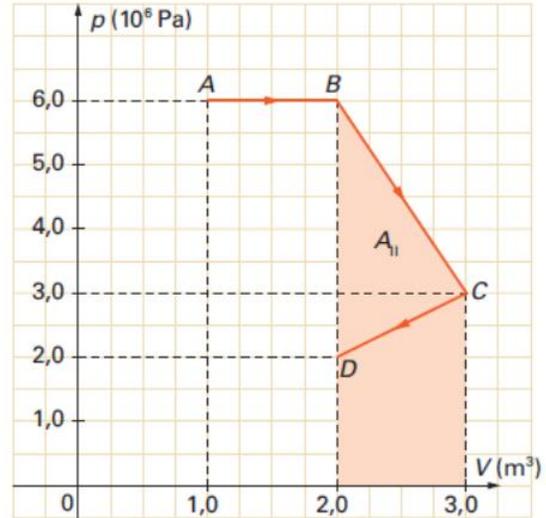
²Texto e figuras desse exercício foram retiradas de Gaspar, 2013, p. 264.

Cálculo do trabalho na etapa BC: Calcula-se a área sob o trecho BC do gráfico.

$$A_{II} = \text{área do trapézio sob o segmento BC}$$

$$A_{II} = \frac{(6,0 \times 10^6 + 3,0 \times 10^6)}{2} \times 1,0 \quad A_{II} = 4,5 \times 10^6 \text{ J}$$

$$W_{BC} = A_{II} \rightarrow W_{BC} = 4,5 \times 10^6 \text{ J}$$



Cálculo do trabalho na etapa CD: Calcula-se a área sob o trecho CD do gráfico.

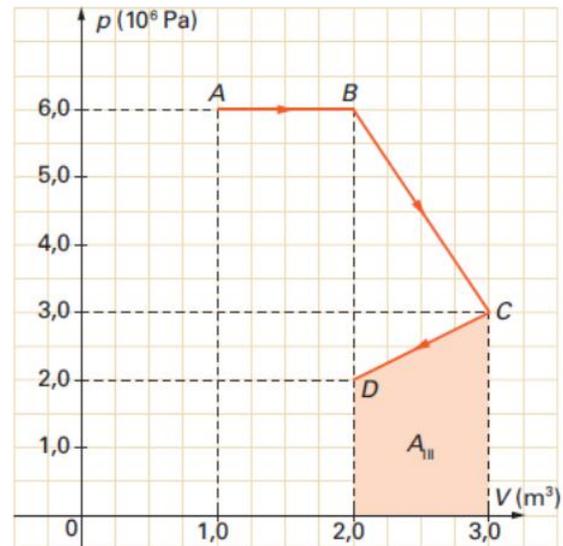
$$A_{III} = \text{área do trapézio sob o segmento CD}$$

$$A_{III} = \frac{(3,0 \times 10^6 + 2,0 \times 10^6)}{2} \times 1,0$$

$$A_{III} = 2,5 \times 10^6 \text{ J}$$

$$W_{CD} = -A_{III} \text{ (pois se trata de uma compressão)}$$

$$W_{CD} = -2,5 \times 10^6 \text{ J}$$



O trabalho total será a soma dos trabalhos em cada etapa:

$$W_T = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} = (6,0 + 4,5 - 2,5) \times 10^6 \text{ J} \rightarrow W_T = 8,0 \times 10^6 \text{ J}$$

7.4 Exercícios

1. Um sistema sofre uma transformação na qual ele absorve 50cal de calor e se expande, realizando um trabalho de 320J.

a) Qual é, em joules, o calor absorvido pelo sistema? (Considere 1cal = 4,2J)

b) Calcule a variação de energia interna que o sistema experimentou.

2. Suponha que um gás, mantido a volume constante, liberasse 170cal de calor para sua vizinhança.

- a) Qual o trabalho realizado pelo gás?
- b) Qual foi, em calorias, a variação de energia interna do gás?
- c) A energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não variou?
3. Um gás é comprimido sob uma pressão constante de $5,0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, desde um volume inicial de $3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, até um volume final de $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.
- a) Houve trabalho realizado pelo gás ou sobre o gás?
- b) Calcule este trabalho.
- c) Se o gás liberou 100J de calor durante a compressão, determine a variação de sua energia interna.
4. Com base na equação para o cálculo do trabalho em uma variação de volume a pressão constante, justifique a convenção de sinais para o trabalho, que foi apresentada com base na equação da primeira lei da termodinâmica.
5. Suponha que após a expansão, o gás do exemplo 2 tenha sido comprimido, conservando a mesma pressão, até retornar ao volume de 200 cm^3 . Determine o trabalho realizado nessa transformação e justifique o sinal atribuído ao trabalho calculado.
6. Considere um gás dentro de um cilindro provido de um pistão. O gás é aquecido, mas seu volume permanece constante.
- a) O gás está exercendo força sobre o pistão?
- b) O que ocorre com o valor desta força durante o aquecimento?
- c) Há deslocamento do pistão?
- d) Qual o valor do trabalho realizado nesta transformação?
7. O gráfico $p(\text{Pa}) \times V(\text{m}^3)$ mostra uma transformação num sistema termodinâmico. Determine o trabalho realizado nos trechos AB, BC e CD e o trabalho total realizado na transformação.

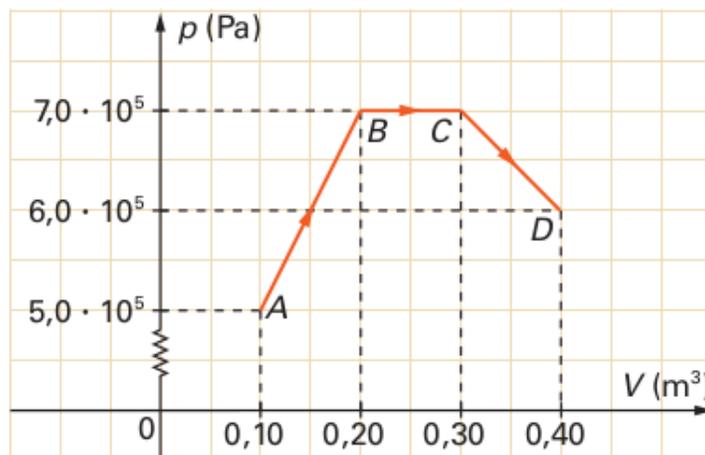
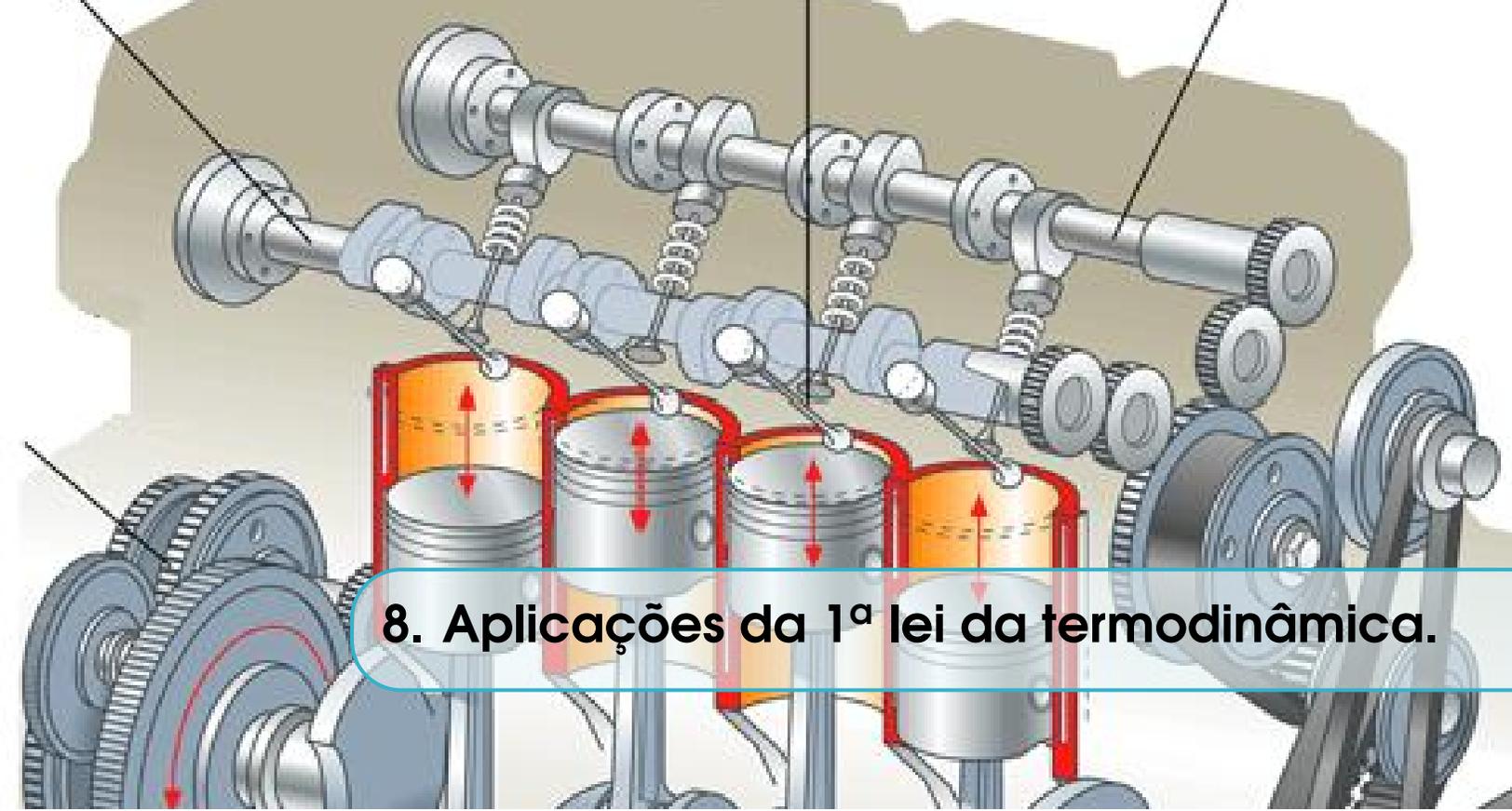


Figura 7.6: Gráfico da transformação (Fonte: Gaspar, 2013)

7.5 Respostas das questões e dos exercícios

Exercícios

1. a) 210 J.
b) -110 J.
2. a) zero.
b) -170 cal.
c) A energia interna diminuiu.
3. a) Houve realização de trabalho sobre o gás.
b) -75 J.
c) -25 J.
4. Discuta com seu professor.
5. a) -60,6 J, pois se trata de uma compressão (diminuição de volume), trabalho realizado sobre o gás.
6.a) Sim.
b) Aumenta, na medida em que aumenta a pressão do gás sobre as paredes do recipiente.
c) Não.
d) Zero.
7. $W_{AB} = 6,0 \times 10^4 J$; $W_{BC} = 7,0 \times 10^4 J$; $W_{CD} = 6,5 \times 10^4 J$; $W_{TOTAL} = 2,0 \times 10^5 J$.



8. Aplicações da 1ª lei da termodinâmica.

8.1 Transformações adiabáticas no cotidiano

A) Trata-se de uma experiência curiosa, mas muito fácil de ser realizada. Inicialmente, não iremos nos preocupar em buscar uma “explicação” para ela. Contentaremos-nos, apenas, em realizá-la. Coloque a palma de uma de suas mãos em frente a sua própria boca. Faça o ar passar pela menor abertura possível que puder produzir em seus lábios e sinta a temperatura do ar que sai de sua boca para a palma da mão (figura 8.1). Agora, abra bem os lábios e sopre novamente o ar em direção à palma da mão. Você percebe a diferença na temperatura do ar proveniente da boca nas duas situações? Em caso positivo, descreva-a, no seu caderno¹.



Figura 8.1: Uma pessoa assopra o ar da boca para as mãos

B) Com um aerossol, não tóxico e não poluente, é possível fazer uma outra exploração interessante. Inicialmente, a substância contida no interior do aerossol deverá estar em equilíbrio térmico com sua vizinhança, isto é, deverá estar à temperatura ambiente. Deixe o frasco de aerossol sobre a mesa e segure um termômetro na direção em que sairá o jato de aerossol. Mire e dispare o jato de tal forma que ele possa atingir o bulbo do termômetro (figura 8.2). Observando o valor registrado

¹O texto e as figuras dessa seção foram extraídos e adaptados de CALOR, TRABALHO E ENERGIA INTERNA: A 1ª LEI DA TERMODINÂMICA, produzidos pelo prof. Hélder Figueiredo de Paula, do COLTEC – UFMG.

no termômetro, responda: a substância que se expande rapidamente e entra em contato com o termômetro sofre alguma variação de temperatura durante essa expansão?

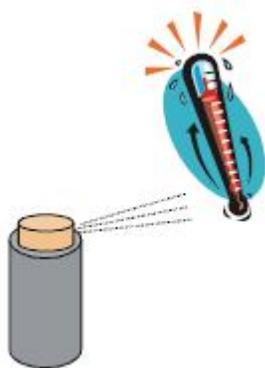


Figura 8.2: Expansão adiabática em um aerosol

Inicialmente, muitos de nós temos dificuldade em entender como a substância contida no interior do frasco de aerosol sofre um rápido resfriamento, quando apertamos a válvula do frasco e permitimos sua expansão. Afinal, estamos acostumados à ideia de que uma substância só pode sofrer um resfriamento ao liberar calor para uma vizinhança a uma temperatura inferior à sua. Mas será que essa condição existia na experiência com o aerosol, isto é, é possível identificar um corpo mais frio que possa ter absorvido calor?

Tanto o ar originário dos pulmões, que passa por uma pequena abertura entre os lábios (situação A), quanto a substância contida no aerosol (situação B), sofreram um processo de resfriamento que é chamado de “expansão adiabática”. Por definição, um sistema sofre uma transformação “adiabática” quando se expande ou é comprimido sem “absorver”, nem “liberar” calor para o ambiente que o cerca. A rigor, as transformações adiabáticas só poderiam ocorrer para sistemas totalmente isolados termicamente. Alguns processos reais, entretanto, realizam-se com muita rapidez, de tal forma que é possível considerá-los como processos “adiabáticos”. Esse é justamente o caso da transformação sofrida pelo líquido à alta pressão, contido no interior de um aerosol, que se expande e se transforma em vapor ao passar para o lado de fora do frasco.

Ao pressionarmos a válvula do aerosol, permitimos que a substância contida no interior do frasco, à alta pressão, expanda-se rapidamente e empurre o ar atmosférico. Ao expandir-se e empurrar o ar atmosférico à sua frente, a substância realiza trabalho (exerce força sobre o ar atmosférico e provoca seu deslocamento). A queda de temperatura da substância, verificada nessas circunstâncias, não pode ser atribuída às trocas de calor. Na verdade, nem o ar atmosférico nem qualquer outro corpo na vizinhança do frasco estavam mais frios que a substância e, portanto, ela não poderia perder energia “liberando calor”.

Funcionários da cozinha de grandes restaurantes e indústrias, que usam fornos a gás, costumam deparar-se com um fenômeno curioso. Quando os grandes bujões estão com a válvula aberta e os queimadores todos abertos, o gás GLP passa pela válvula sofrendo rápida expansão e queda de temperatura. Assim, a superfície metálica dos bujões fica completamente gelada, chegando ao “absurdo” de apresentar uma fina camada de gelo no seu entorno. Não tão grande, mas também claramente perceptível, é a queda na temperatura do cilindro de um extintor de incêndio quando a

válvula da abertura é pressionada².

A queda de temperatura verificada em uma “expansão adiabática” pode ser justificada pela **Primeira Lei da Termodinâmica**, que é outra forma de enunciar o **Princípio de Conservação de Energia**. Qualquer substância ou material possui uma **Energia Interna** associada ao movimento (Energia Cinética) e à interação entre seus átomos ou moléculas (Energia Potencial). A Energia Interna de um corpo tende a variar quando ele perde ou “absorve” calor de sua vizinhança. Assim, quando um corpo entra em contato com outros corpos com temperatura superior à sua, ele recebe calor dessa “vizinhança” e isso tende a aumentar a Energia Interna do corpo. Em contrapartida, quando um corpo entra em contato com outros corpos com temperatura *inferior* à sua, ele perde calor para essa “vizinhança” e isso tende a diminuir sua Energia Interna.

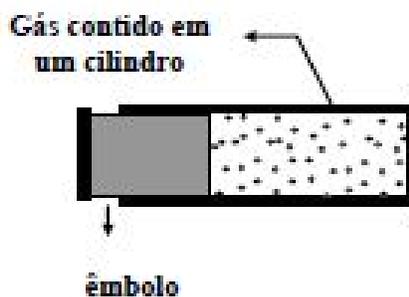


Figura 8.3: Trabalho e variação de volume de um gás

Acontece que a Energia Interna de um corpo pode variar mesmo quando não existem diferenças entre a temperatura inicial do corpo e a temperatura de sua vizinhança. Essa possibilidade é particularmente importante para corpos ou substâncias que se encontram no estado gasoso. Afinal, no estado gasoso, as substâncias podem sofrer grandes variações de volume quando realizam uma expansão ou sofrem uma compressão na interação com outros corpos situados em sua vizinhança. Isso pode ser evidenciado pelo comportamento de um gás em uma seringa (figura 8.3).

Quando não há trocas de calor, um gás pode trocar energia com sua vizinhança por meio da realização de trabalho. O Trabalho é o processo de troca de energia que se dá pela realização de forças e deslocamentos. Um gás contido em um cilindro, **isolado termicamente da vizinhança**, pode realizar trabalho sobre um êmbolo ao expandir-se. **A temperatura do gás diminui, pois parte de sua energia interna transforma-se no trabalho que ele realiza sobre sua vizinhança.**

De forma inversa, um gás pode sofrer a ação de uma força capaz de comprimi-lo. Nesse caso, ao ser comprimido, sem trocar calor com a vizinhança, o gás sofrerá certa elevação de temperatura. **Sua temperatura aumenta, pois o trabalho realizado sobre o gás aumenta sua energia interna.** É o que acontece na etapa de compressão adiabática do motor de combustão interna.

²Em todos esses processos a expansão rápida ou “adiabática” ocorre porque o sistema passa de um ambiente a alta pressão para outro de pressão menor. Afinal, as substâncias mantidas nos recipientes dos aerossóis só encontram-se liquefeitas por que são mantidas sob alta pressão. Sob pressão atmosférica normal, tais substâncias, assim como o gás GLP dos bujões de cozinha, apresentam-se na forma de vapor. Ao pressionarmos as válvulas dos recipientes que contêm essas substâncias permitimos sua expansão. Ao expandir-se elas realizam trabalho sobre suas vizinhanças às custas de sua energia interna.

Questões

1. Retorne à seção 7.1 e reveja a descrição e o gráfico da expansão adiabática 3-4, etapa do ciclo Otto do motor de combustão. Responda as questões a seguir:

a) Por que ela pode ser considerada adiabática?

b) A energia interna dos gases resultantes da combustão aumenta, diminui ou permanece constante durante essa expansão? Justifique o que acontece com a energia interna considerando a possibilidade ou não dos gases resultantes da combustão trocarem calor ou trabalho com a vizinhança.

2) A figura 8.4 mostra que, ao se abrir uma garrafa de refrigerante, forma-se uma nuvenzinha, indicando que o gás aprisionado na parte superior da garrafa condensou.



Figura 8.4: Abertura da tampa de um refrigerante (Fonte: Gaspar, 2013, p. 274)

a) Que tipo de transformação termodinâmica aconteceu com o gás, ao se abrir a tampa da garrafa?

b) O que provocou a condensação do gás? Justifique com base na equação da primeira lei da termodinâmica.

3. a) Que tipo de transformação termodinâmica acontece quando se comprime rapidamente o ar dentro de uma bomba, como mostrado na figura 8.5?

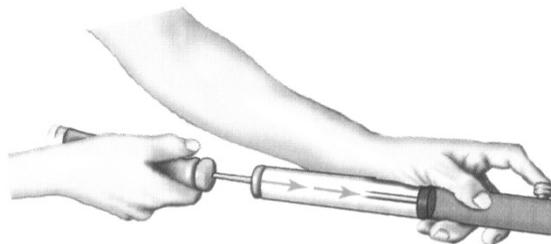


Figura 8.5: Compressão rápida do ar em uma bomba (Alvarenga e Máximo, 2006, p. 121)

b) O que acontece com a temperatura do gás dentro da bomba, durante essa compressão? Justifique com base na equação da primeira lei da termodinâmica.

8.2 Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna permanecer constante?

4. Assista ao vídeo, acessível no link <https://www.youtube.com/watch?v=iMsvEmXKqmM>, no qual um pedaço de algodão desfiado é queimado por meio de uma rápida compressão do ar, dentro de um tubo de vidro. A figura 8.6 mostra uma das imagens do vídeo. Responda, com base na 1ª lei da termodinâmica:

- O que provoca a queima do algodão? Utilize o conceito de transformação adiabática em sua explicação.
- Como esse processo de aquecimento do ar por compressão rápida é aplicado na tecnologia dos motores a diesel?



Figura 8.6: Queima do algodão por compressão

8.2 Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna permanecer constante?

A resposta é afirmativa. Vejamos como justificar essa resposta com base na equação da primeira lei da termodinâmica:

Se a **energia interna** fica **constante**, então $\Delta U = 0$. Logo:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow 0 = Q - W \rightarrow Q = W$$

Como interpretar o resultado de $Q = W$?

A energia que o sistema cede para a vizinhança na forma de trabalho, durante a expansão, é igual à energia que ele absorve na forma de calor. De acordo com as condições enunciadas na questão, calor e trabalho são positivos: o trabalho é realizado pelo sistema e o calor é absorvido pelo sistema.

Se a energia interna do gás permanece constante, o que acontece com a sua temperatura? Com base na estreita correlação entre temperatura e energia interna para um gás, **se a energia interna permanece constante, a temperatura permanece constante**. Por isso, a transformação termodinâmica de um gás, cuja energia interna permanece constante, é chamada **transformação isotérmica**.

Um exemplo de transformação isotérmica

As transformações isotérmicas, em geral, são produzidas em condições controladas no laboratório. Considere um recipiente, com uma tampa móvel (êmbolo), contendo um gás (figura 8.7). A tampa móvel pode se deslocar com atrito desprezível pelas paredes do recipiente. Sobre o êmbolo móvel são colocados pequenos pesos. O recipiente está colocado sobre uma fonte de calor, de grande capacidade térmica, que pode ceder ou absorver calor para o recipiente, mantendo o gás a uma temperatura constante. A base do recipiente é constituída de um material com ótima condutividade térmica.

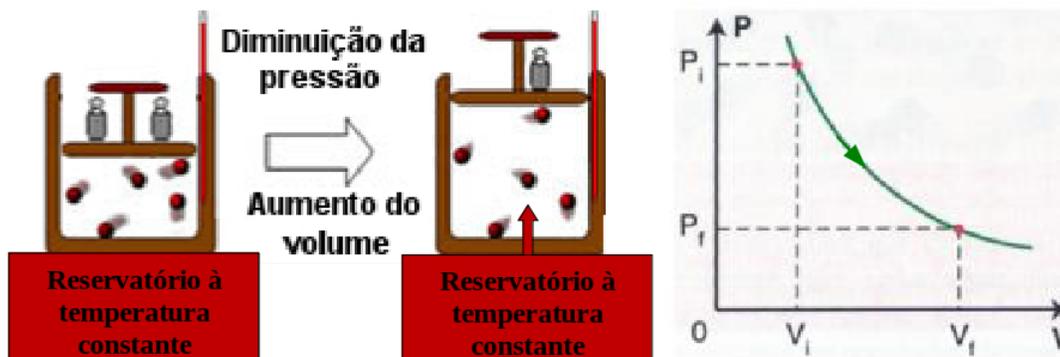


Figura 8.7: Expansão isotérmica (Fonte: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/transformacao-isotermica-ou-lei-boyle.htm> - modificada)

O gás e a fonte de calor se encontram à mesma temperatura inicial t_0 . Um dos pesos é, então, retirado, de modo que o êmbolo se desloca lentamente para cima. Há um aumento de volume, de V_i para V_f , combinado com uma redução da pressão exercida pelo gás, de P_i para P_f . Nessa condição, pressão P e volume V variam de forma que o **produto PV é constante** ao longo da curva mostrada no gráfico $P \times V$. Essa curva é uma hipérbole. Nas condições do experimento ela é chamada de isoterma, uma vez que a pressão e o volume variam, sob **temperatura constante**.

Nessa transformação termodinâmica, o gás realiza trabalho sobre a vizinhança ao deslocar o êmbolo para cima. Essa realização de trabalho pelo gás se faz com ele utilizando sua energia interna. Porém a fonte de calor repõe essa energia interna gasta para realizar trabalho, cedendo calor para o gás.

Sob essas condições, acontece, portanto, uma **expansão isotérmica**. O gás realiza trabalho, na expansão, deslocando o êmbolo para cima. A energia interna gasta na realização de trabalho é reposta pelo calor absorvido da fonte térmica (**$Q = W$ e ambos são positivos**). **A energia interna fica constante e, conseqüentemente, sua temperatura.**

Se pesos forem colocados, um a um, ocorrerá o processo inverso, isto é, uma **compressão isotérmica** (figura 8.8). Agora a vizinhança realiza trabalho sobre o sistema. Entra energia no sistema (o gás) por meio de trabalho. Para o gás se manter à mesma temperatura da fonte térmica, ele cede calor para ela na quantidade igual à energia recebida na forma de trabalho realizado pela vizinhança (**$Q = W$ e ambos são negativos**). **A energia interna do gás permanece constante e, por conseguinte, sua temperatura.**

8.2 Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna permanecer constante



Figura 8.8: Compressão isotérmica (Fonte: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/transformacao-isotermica-ou-lei-boyle.htm> - modificada)

Exemplo

O gráfico $p \times V$, mostrado na figura 8.9, representa uma transformação termodinâmica realizada por um gás, por meio de uma isoterma. A área hachurada no gráfico é igual a 300J.

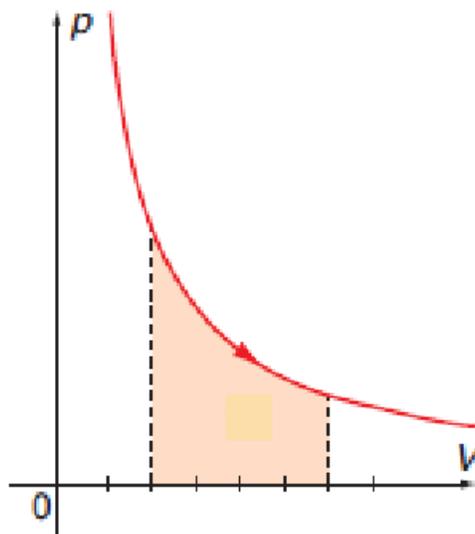


Figura 8.9: Expansão isotérmica (Fonte: Gaspar, 2013, p. 273 - modificada)

- Por que o gás necessariamente troca calor com a vizinhança nessa transformação?
- Determine a quantidade de calor trocado com a vizinhança e indique se foi calor absorvido ou liberado pelo gás. Justifique a resposta a partir da equação da Primeira Lei da Termodinâmica.
- É correto afirmar que, nessa transformação, $p \propto \frac{1}{V}$?

Solução:

- O gás troca calor necessariamente com a vizinhança porque se trata de uma expansão isotérmica, em que a temperatura e a energia interna do gás permanecem constantes. Ao expandir, o gás

gasta energia interna. Para que esta fique constante, o gás precisa absorver calor da vizinhança em quantidade igual ao trabalho realizado na expansão.

b) Expansão isotérmica $\rightarrow U$ constante $\rightarrow \Delta U = 0$

$$\Delta U = Q - W \rightarrow 0 = Q - W \rightarrow Q = W \rightarrow Q = 300J$$

Uma vez que se trata de uma expansão, é trabalho realizado pelo gás, portanto, trabalho positivo. Consequentemente, o calor também é positivo, indicando, conforme explicado em (a) que o gás absorveu calor na expansão.

c) Sim, pois o produto pV é constante em uma transformação isotérmica, isto é, se o volume dobrar a pressão é dividida por 2, de modo que o produto pV permanece constante.

8.3 Um gás pode realizar trabalho e sua energia interna aumentar?

A resposta é afirmativa. Vejamos como justificar essa resposta com base na equação da primeira lei da termodinâmica:

De acordo com a equação da primeira lei: $\Delta U = Q - W$. Se a energia interna aumenta, então:

$$\Delta U > 0 \rightarrow Q - W > 0 \rightarrow Q > W$$

Como interpretar $Q > W$?

Nessa inequação, W é positivo, pois o gás realiza trabalho sobre a vizinhança, gastando energia interna. Para a energia interna do gás aumentar, é necessário que ele receba da vizinhança uma quantidade de calor maior que o trabalho realizado ($Q > W$ e ambos positivos).

Um exemplo de transformação em que $Q > W$ é a **transformação isobárica**. Na transformação isobárica, **a pressão exercida pelo gás permanece constante**.

Um exemplo de transformação isobárica

A transformação isobárica de um gás também é produzida, geralmente, em condições controladas no laboratório.

Um gás é mantido dentro de um recipiente com uma tampa móvel, que pode se deslocar, livremente, com atrito desprezível (figura 8.10). Sobre a tampa está colocada um corpo com certa massa, de modo que a pressão exercida pelo gás, inicialmente, é superior à pressão atmosférica local.

A base do recipiente está em contato com uma fonte de calor que se mantém a uma temperatura superior ao gás. Na medida em que essa fonte cede calor para o gás, este se expande e desloca o êmbolo para cima, com a pressão se mantendo constante. O deslocamento do êmbolo para cima aumenta o volume ocupado pelo gás. Isso deveria implicar uma redução de pressão. Porém essa permanece constante, justamente, porque a temperatura do gás aumenta e, consequentemente, sua energia interna.

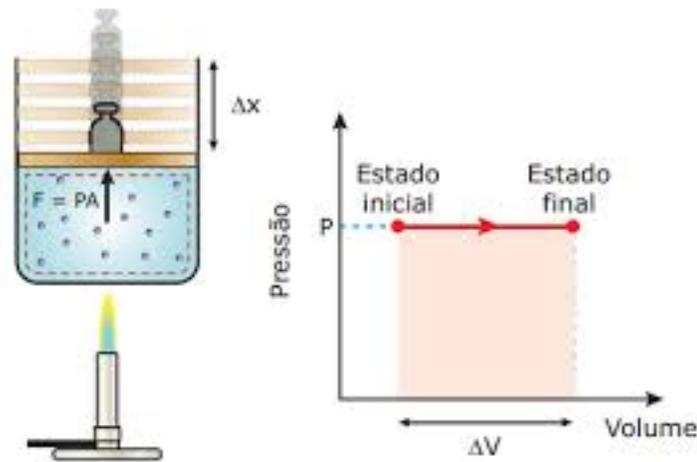


Figura 8.10: Expansão isobárica (Fonte: FIS. Professor: Leonardo Gomes; Monitor: Leonardo Brigagão; pdf, p. 3)

Essa manutenção do valor da pressão, apesar do aumento de volume, pode ser mais bem explicada se interpretarmos a pressão em termos do comportamento das moléculas de um gás. Como foi feito para a temperatura, esse comportamento macroscópico da pressão pode ser interpretado do ponto de vista microscópico.

A pressão exercida por um gás, nas paredes do recipiente que o contém, resulta do grande número de colisões que as moléculas do gás realizam com essas paredes. Cada molécula que bate contra as paredes do recipiente exerce sobre ele uma força. Entretanto, o número de moléculas que constitui o gás é infinitamente grande, resultando em uma força média, exercida pelo gás sobre as paredes do recipiente. Essa força média, que resultará na pressão exercida pelo gás, depende, portanto, da energia cinética com que as moléculas atingem as paredes do recipiente e de quantas colisões acontecem em certo intervalo de tempo:

- **Quanto maior a energia cinética das moléculas, maior a força média exercida pelo gás e maior a pressão.**
- **Quanto maior o número de colisões das moléculas com as paredes, maior a força média exercida pelo gás e maior a pressão.**

No caso da expansão isobárica, o aumento de volume não implica em redução da pressão, porque a energia interna do gás aumenta, ou seja, aumenta sua temperatura e, portanto, a energia cinética média das moléculas. Esse aumento na energia cinética média das moléculas compensa o aumento do volume do recipiente, mantendo constante a pressão. Por isso na expansão isobárica, a energia interna deve aumentar e, conseqüentemente, o gás deve absorver uma quantidade de calor maior do que o trabalho que realiza na expansão ($\Delta U > 0 \rightarrow Q > W$, **ambos positivos**).

Na compressão isobárica, ocorre o processo inverso. Uma diminuição no volume ocupado pelo gás deveria resultar em um aumento de pressão. Para que a pressão fique constante, a energia interna do gás deve diminuir, logo, o gás deve liberar para a vizinhança uma quantidade de calor maior que o trabalho realizado sobre ele, na compressão:

$$\Delta U < 0 \rightarrow Q - W < 0 \rightarrow Q < W \text{ (ambos negativos)} \rightarrow |Q| > |W|$$

Exemplo

O gráfico $p \times V$, figura 8.11, representa a expansão isobárica de um gás. Nessa transformação, a energia interna do gás aumenta em 1940J.

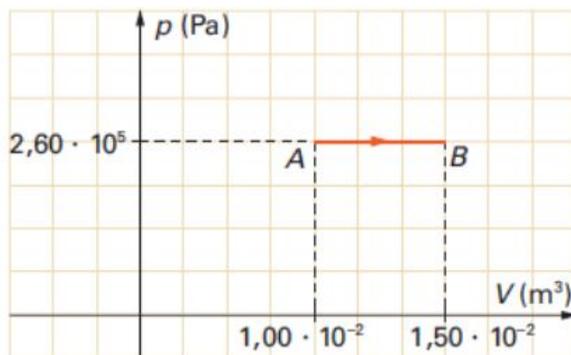


Figura 8.11: Expansão isobárica, (Fonte: Gaspar, 2013, p. 271)

- Por que o sistema, necessariamente, absorveu calor nessa transformação?
- Calcule o trabalho realizado pelo gás na expansão.
- Determine a quantidade de calor absorvida pelo gás nessa transformação.

Solução:

a) Se a energia interna aumentou, então $\Delta U > 0$. De acordo com a equação da 1ª Lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - W \rightarrow Q - W > 0 \rightarrow Q > W.$$

Uma vez que se trata de uma expansão: $W > 0 \rightarrow Q > 0$. Se o calor trocado com a vizinhança é maior que o trabalho e este é um número positivo, então o calor é positivo. O sistema, portanto, absorveu calor da vizinhança.

b) A pressão exercida pelo gás é constante. O trabalho pode ser calculado pela equação $W = p\Delta V$

$$W = p\Delta V \rightarrow W = 2,60 \times 10^5 \frac{N}{m^2} \times (1,50 \times 10^{-2} - 1,00 \times 10^{-2}) m^3 \rightarrow$$

$$W = 2,60 \times 10^5 \times 0,50 \times 10^{-2} N \cdot m \rightarrow W = 1,30 \times 10^3 J$$

c)

$$\Delta U = Q - W \rightarrow 1,94 \times 10^3 = Q - 1,30 \times 10^3 \rightarrow Q = 1,94 \times 10^3 + 1,30 \times 10^3 \rightarrow Q = 3,24 \times 10^3 J$$

Portanto o calor absorvido é parcialmente transformado em trabalho realizado na expansão ($1,30 \times 10^3 J$) e o restante ($1,94 \times 10^3 J$) é distribuído entre as moléculas do gás para aumentar sua energia interna, resultando em uma expansão a pressão constante.

Em qual das transformações, apresentadas a seguir, o calor absorvido é maior?

Duas amostras idênticas, (a) e (b), de um mesmo gás, sofrem respectivamente um aquecimento isovolumétrico (a) e uma expansão isobárica (b). Nas condições iniciais, as amostras têm a mesma temperatura e ocupam o mesmo volume (figura 8.12). Sabemos que em ambas as transformações, a

temperatura aumenta e, conseqüentemente, a energia interna aumenta também. Considere que essas duas transformações sejam realizadas de modo a proporcionar a mesma variação de temperatura. Compare o calor absorvido a volume constante Q_V com o calor absorvido a pressão constante Q_P , indicando se há uma igualdade ou qual deles é maior. (Tente responder, antes de seguir com a leitura).

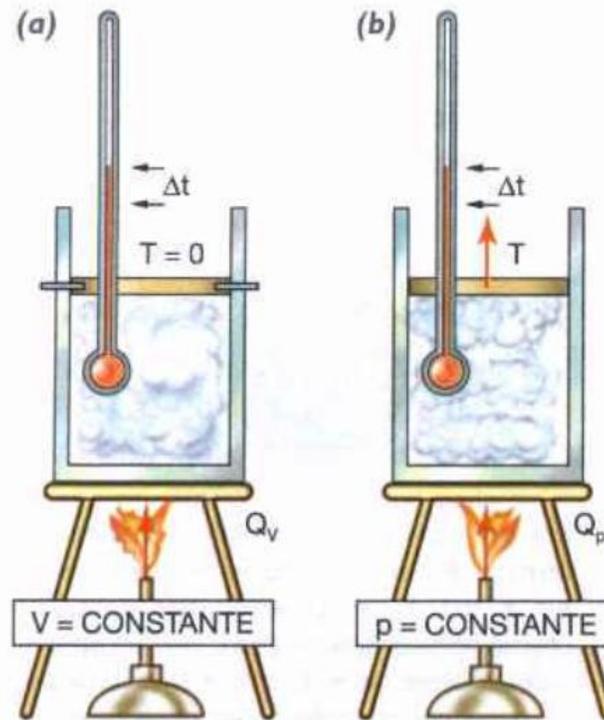


Figura 8.12: Aquecimento isovolumétrico e expansão isobárica, com a mesma variação de temperatura (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2006, p. 122)

Resposta

No aquecimento isovolumétrico (a): $Q_V = \Delta U_V + W_V$. Não há realização de trabalho, o volume do recipiente é constante, não há deslocamento de suas paredes: $Q_V = \Delta U_V + 0 \rightarrow Q_V = \Delta U_V$. Portanto, no aquecimento isovolumétrico, todo o calor absorvido é usado para aumentar a energia interna da amostra de gás.

Na expansão isobárica (b): $Q_P = \Delta U_P + W_P$. Há realização de trabalho positivo pelo gás, pois se trata de uma expansão. Portanto, o calor absorvido na transformação, além de promover o aumento da energia interna do gás, é utilizado também para realizar trabalho, na expansão.

Se a variação de temperatura das amostras é a mesma então: $\Delta U_V = \Delta U_P$

Temos, portanto, que:

$$\left. \begin{array}{l} Q_V = \Delta U_V \\ Q_P = \Delta U_P + W_P \\ \Delta U_V = \Delta U_P \end{array} \right| \rightarrow Q_P = Q_V + W_P \rightarrow Q_P > Q_V$$

Portanto, o calor absorvido na expansão isobárica é maior que o calor absorvido no aquecimento isovolumétrico, embora a variação de temperatura para essas transformações seja a mesma.

8.4 Exercícios

As respostas às questões a seguir devem ser justificadas com cálculos e/ou comentários escritos.

1. O gráfico $p \times V$, figura 8.13, representa uma transformação termodinâmica realizada por um gás, por meio de uma isoterma. No processo, o gás troca com a vizinhança 300J de calor.

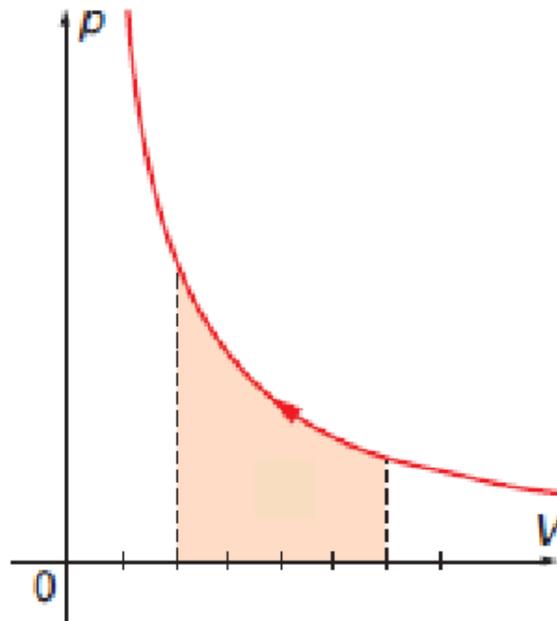


Figura 8.13: Gráfico $p \times V$ da transformação (Fonte: Gaspar, 2013, p. 271 - modificada)

a) Por que nesta transformação o gás, necessariamente, libera calor para a vizinhança?

b) Determine a área hachurada no gráfico e indique seu significado físico.

2. O gráfico $p \times V$, na figura 8.14, representa o trecho AB de uma transformação isobárica de um sistema termodinâmico constituído por uma amostra de gás. Durante a compressão, o gás troca com a vizinhança $7,60 \times 10^3 \text{ J}$.

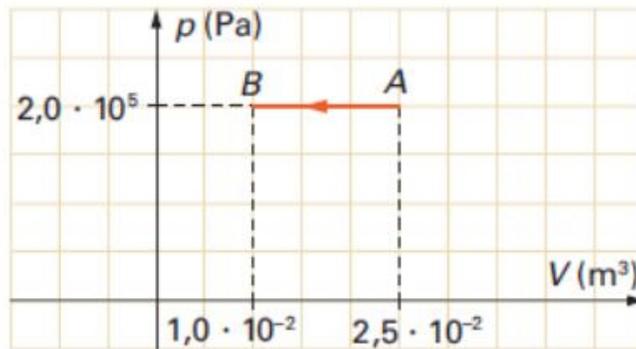


Figura 8.14: Compressão isobárica (Fonte: Gaspar, 2013, p. 271)

- Calcule o trabalho realizado sobre o gás na transformação AB.
 - Determine a variação de energia interna da amostra.
 - A temperatura do gás aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma, após essa transformação?
3. No gráfico $p \times V$, mostrado na figura 8.15, está representada uma transformação isométrica de uma amostra de gás. A energia interna da amostra variou de 3000J, após a transformação.

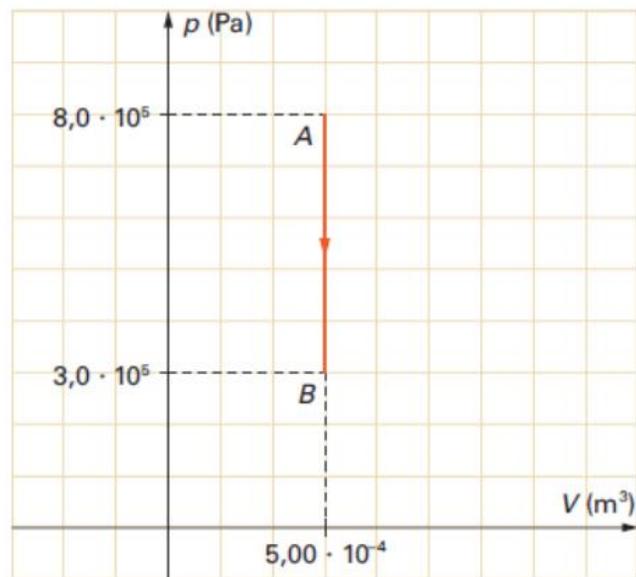


Figura 8.15: Gráfico $p \times V$ da transformação (Fonte: Gaspar, 2013, p. 272)

- A amostra troca energia com a vizinhança na forma de trabalho?
- Determine o calor que a amostra troca com a vizinhança, indicando se é calor cedido ou calor absorvido.
- A temperatura do gás aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma, após essa transformação?

4. Considere a situação experimental e a discussão sobre os calores absorvidos à pressão constante (Q_p) e à volume constante (Q_V) tratados na questão ‘em qual das transformações o calor absorvido é maior?’, referente à figura 8.12.

a) Com base na equação fundamental da calorimetria, escreva as equações que calculam, respectivamente os calores específicos à pressão constante (c_p) e à volume constante (c_V) das amostras de gás do experimento. Indique o significado de cada termo da equação.

b) Com base nas equações escritas em (a) e na discussão já realizada sobre esse experimento, o valor de c_p é maior, menor ou igual ao de c_V ?

5. No sistema da figura 8.16, um agente externo comprime um gás aprisionado em um cilindro por meio de um êmbolo feito de material adiabático. Das condições dadas a seguir, indique se é possível promover uma compressão isotérmica:

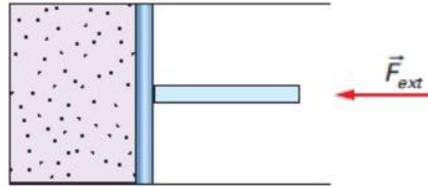


Figura 8.16: Compressão de um gás (Fonte: Gaspar, 2013, p.273)

a) quando as demais paredes forem adiabáticas, isto é, com isolamento térmico praticamente perfeito;

b) quando pelo menos uma parede permitir a troca de calor entre sistema e vizinhança.

6. Uma massa de água de 200kg cai de uma altura de 300m até atingir o repouso, dentro de um reservatório. Responda às questões seguintes, considerando que: 1cal é igual a 4,2J; o calor específico da água é 1 cal/(g.°C); a aceleração da gravidade é $10 \frac{m}{s^2}$.

a) Calcule o trabalho realizado pelas paredes laterais e pelo fundo do reservatório, de modo a levar toda essa massa de água ao repouso. Despreze as forças dissipativas durante a queda e considere adiabático o processo de acomodação da água no poço, até ela atingir o repouso. Justifique seu raciocínio explicando todas as etapas de conversão de energia desde a altura de 300m até a água atingir o repouso no reservatório.

b) Determine a elevação de temperatura provocada pelo trabalho realizado sobre a massa de água. Justifique seu raciocínio considerando, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, os processos que podem elevar a energia interna de um sistema.

7. O gráfico deste problema (figura 8.17) mostra como a energia interna de 4g de gás hélio, mantido a volume constante, varia com sua temperatura absoluta. Calcule o calor específico, em $\frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$, a volume constante, desse gás.

Justifique sua resposta com base na primeira lei da termodinâmica.

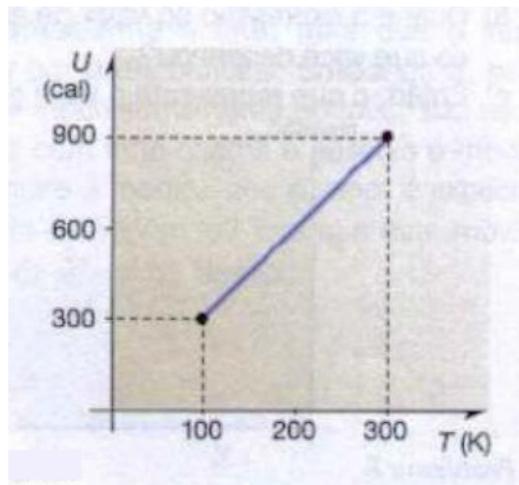


Figura 8.17: Aquecimento isovolumétrico, (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2013, p. 136)

8. Considere que a amostra de gás hélio do exercício 7 sofra uma expansão isobárica, que promova nela a mesma variação de temperatura, de 100K para 300K.

- Ela absorveria ou cederia calor para a vizinhança?
- A variação de energia interna seria maior, menor ou igual à variação mostrada no gráfico da transformação isovolumétrica?
- A quantidade de calor trocada com a vizinhança seria maior, menor ou igual à quantidade de calor trocada na transformação isovolumétrica?

9. Uma amostra de gás sofre uma transformação termodinâmica na qual podem ocorrer os dois processos de transferência de energia: calor Q e trabalho W . Indique as afirmativas corretas e as erradas, com base na Primeira Lei da Termodinâmica. Justifique todas as opções.

- $W = Q$, se a transformação for isotérmica.
- $\Delta U = Q$, se a transformação for isovolumétrica.
- $\Delta U = 0$, se a transformação for adiabática.
- $Q > W$ se a transformação for uma expansão isobárica.
- $Q = 0$ se a transformação for isotérmica.

10. Um gás se expande rapidamente, empurrando a tampa do cilindro que o contém. Indique as afirmativas corretas e as erradas, com base na Primeira Lei da Termodinâmica. Justifique todas as opções.

- O calor que o gás troca com a vizinhança é desprezível.
- A expansão é praticamente adiabática.
- A temperatura do gás permanece constante.
- A pressão do gás diminui enquanto seu volume aumenta.
- A pressão (p) e o volume (V) variam de tal modo que o produto (pV) é constante.

11. Sobre uma expansão adiabática, são feitas as seguintes afirmações. Indique as afirmativas corretas e as erradas, com base na Primeira Lei da Termodinâmica. Justifique todas as opções.

- O trabalho realizado pelo gás foi positivo.
- A energia interna do gás não variou.
- O gás realiza trabalho usando parte de sua energia interna.
- A energia interna diminui de uma quantidade igual ao trabalho realizado pelo gás.
- O trabalho realizado pelo gás é igual à quantidade de calor que ele absorve.

12. É correto afirmar que:

- sempre que um gás recebe calor, sua temperatura sofre um acréscimo?
- se um gás recebe calor e sua energia interna não varia, seu volume aumenta obrigatoriamente?

13. Certa amostra de gás ideal passa de um estado A a um estado F por uma transformação termodinâmica ABCDEF e retorna à condição inicial por uma transformação FNMA, conforme figura 8.18. É correto afirmar que:

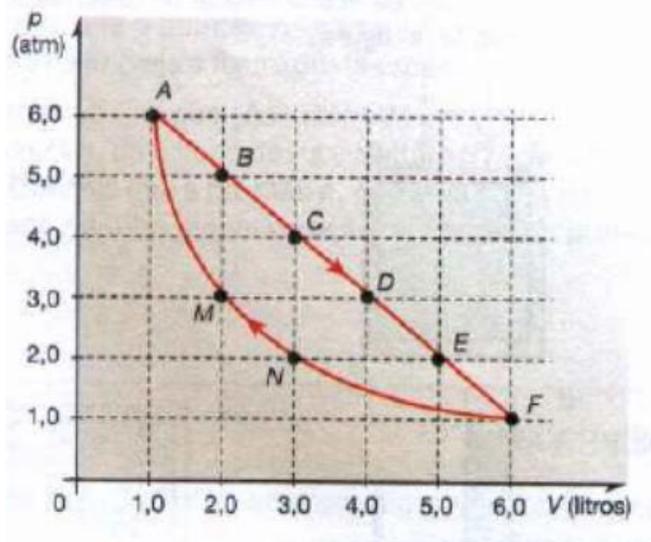


Figura 8.18: Ciclo termodinâmico de um gás, (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2013, p. 98)

- A temperatura do gás varia ao longo da transformação ABCDEF?
- A temperatura do gás em B é menor que a temperatura do gás em M?
- Na compressão FNMA o sistema libera calor, mas sua temperatura permanece constante?

8.5 Respostas das questões e dos exercícios

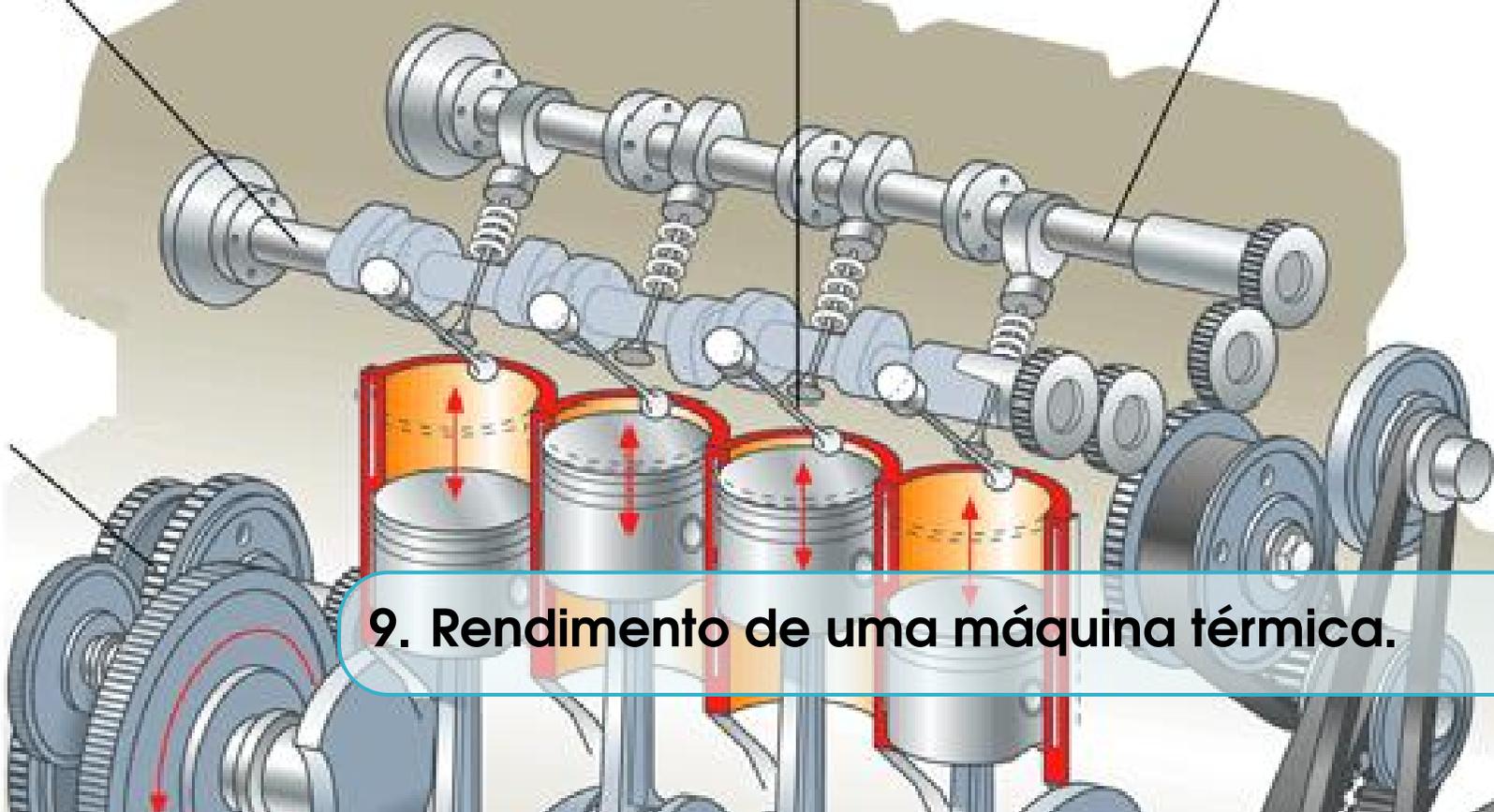
Questões

1. a) Por que a expansão dos gases movimentando o pistão ocorre em um intervalo de tempo muito curto, de modo que se pode desprezar o calor trocado entre os gases resultantes da combustão e a vizinhança, nesse intervalo de tempo.
b) A energia interna diminui, pois gastam essa energia interna para movimentar o pistão, realizando trabalho e, conforme indicado em (a), nesse pequeno intervalo de tempo despreza-se a troca de calor com a vizinhança.
2. a) Expansão adiabática.
b) A redução da energia interna e da temperatura provocaram a condensação do gás.
3. a) Compressão adiabática.
b) A temperatura aumenta.
4. As respostas estão dadas na narrativa do vídeo.

Exercícios

1. a) Discuta com seu professor.
b) A área hachurada no gráfico corresponde ao módulo do trabalho realizado sobre o sistema, durante a compressão. Seu valor é igual ao módulo do calor liberado para a vizinhança: 300 J.
2. a) $-3,00 \times 10^3 J$.
b) $-4,60 \times 10^3$.
c) A temperatura do gás diminuiu.
3. a) Não.
b) A amostra libera 3000J de calor.
c) A temperatura do gás diminuiu.
4. a) $c_p = \frac{Q_p}{m \cdot \Delta t}$; $c_v = \frac{Q_v}{m \cdot \Delta t}$.
b) $c_p > c_v$
5. a) Impossível.
b) Possível.
6. a) $-6,0 \times 10^5 J$.
b) $0,71^\circ C$.
7. $0,75 \frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$
8. a) Absorveria calor.
b) Igual.
c) Maior.
9. a) Correta.
b) Correta.

- c) Errada.
 - d) Correta.
 - e) Errada.
10. a) Correta.
- b) Correta.
 - c) Errada.
 - d) Correta.
 - e) Errada.
11. a) Correta.
- b) Errada.
 - c) Correta.
 - d) Correta.
 - e) Errada.
12. a) Incorreto.
- b) Correto.
- 13) a) Correto.
- b) Incorreto.
 - c) Correto.



9. Rendimento de uma máquina térmica.

9.1 Máquinas Térmicas

Voltemos à figura do texto *Energia térmica, temperatura e calor* que apresentava as transformações de energia no motor de combustão interna:

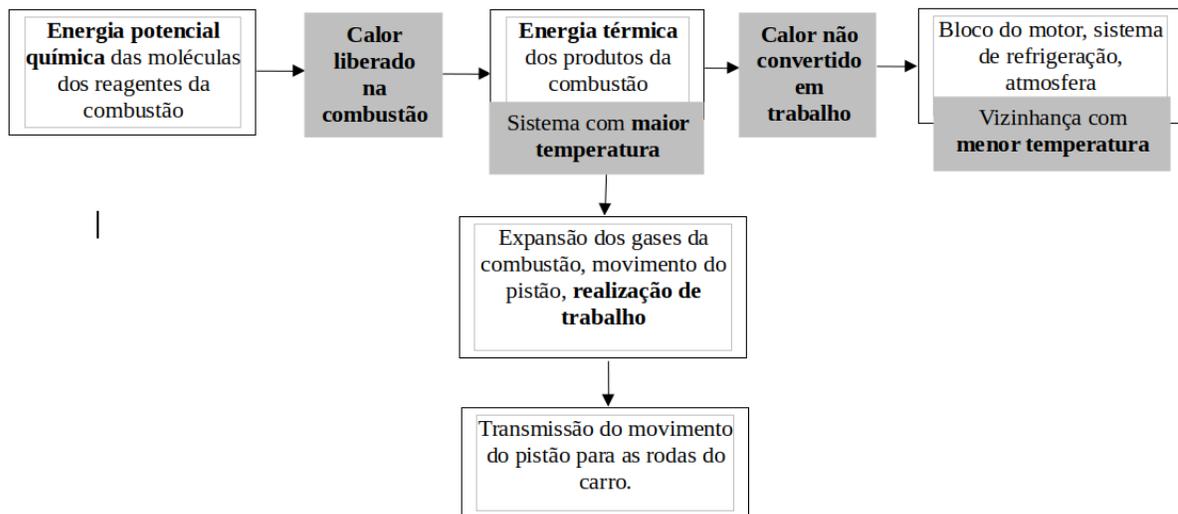


Figura 9.1: Transformações de energia em uma máquina térmica

A representação esquemática de uma máquina térmica é semelhante ao diagrama da figura 9.2.

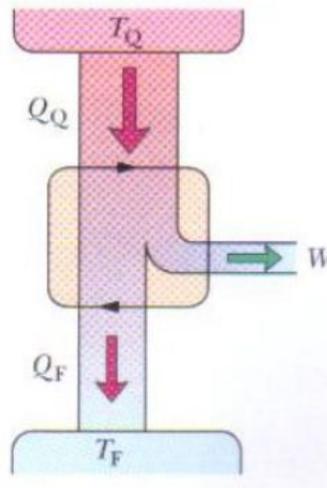


Figura 9.2: Representação esquemática de uma máquina térmica (Fonte: <https://www.respondeai.com.br/conteudo/fisica/termodinamica/ciclo-de-carnot/419> - modificada)

Nela temos algumas partes que estão detalhadas a seguir.

Fonte quente: Também denominado Reservatório Quente. A fonte quente encontra-se a temperatura T_Q .

Máquina térmica: é todo sistema que transforma calor em trabalho. Pode ser o motor de um carro, um reator nuclear de uma usina, o gerador de uma usina termoeleétrica, etc.

Fonte Fria: Também denominado Reservatório Frio - A fonte fria encontra-se a temperatura T_F . Para que haja fluxo de calor da fonte quente para a fonte fria, obrigatoriamente, $T_F < T_Q$.

Em uma máquina térmica, parte do calor (Q_Q) liberado pela fonte quente é convertida em trabalho (W). O restante (Q_F) é rejeitado para uma fonte fria.

Observe na figura 9.2 que a largura dos "ramos" por onde passam Q_Q , Q_F e W , estão relacionados aos valores dessas grandezas, isto é:

$$Q_Q = W + |Q_F| \quad (9.1)$$

A equação (9.1) é uma expressão da conservação de energia em uma máquina térmica. Nela, Q_F é tomado com valor absoluto.

A figura 9.3 mostra um esquema da máquina a vapor desenvolvida por James Watt, na segunda metade do século XVIII. Uma caldeira é aquecida de modo a produzir vapor d'água a alta pressão. Quando a válvula A é aberta, com B fechada, o pistão é empurrado para cima pelo vapor que entra no cilindro, fazendo girar uma roda. Quando o pistão atinge o ponto superior de seu curso, a válvula A é fechada e B é aberta. O vapor escapa para o condensador onde é resfriado e condensado. A queda de temperatura e pressão dentro do cilindro permite o retorno do pistão ao ponto mais baixo do seu curso. O sistema retorna às condições iniciais, a válvula B é fechada, a válvula A se abre e reinicia-se o ciclo. Nesse esquema da máquina a vapor, fica bem evidente o diagrama da figura 9.2.

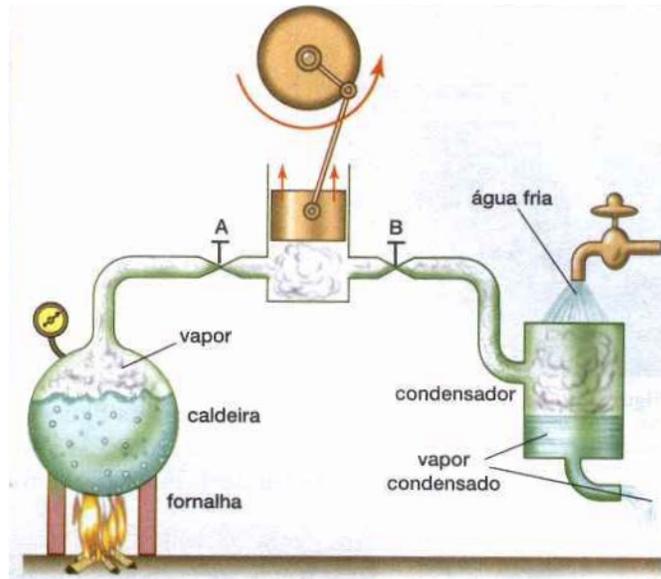


Figura 9.3: Máquina à vapor (Fonte: Alvarenga e Máximo, 2013, p. 127)

A fonte quente é a caldeira. A fonte fria é o condensador. Por meio do vapor a alta pressão, calor é transmitido da caldeira para o condensador. Parte desse calor é convertida em trabalho no cilindro.

No caso do motor de combustão, a fonte quente não é tão bem definida, parecendo se confundir com a substância que realiza trabalho, os gases resultantes da combustão. Para se aproximar do diagrama da figura 9.2, sem identificar com clareza a fonte quente, consideramos que o calor da fonte quente é a energia liberada na combustão. A fonte fria, por sua vez, no motor de combustão, é constituída pelo bloco do motor, pelo sistema de refrigeração e pela atmosfera. O calor liberado na combustão e não convertido em trabalho, aumenta a energia interna dos gases resultantes da combustão, sendo depois liberado para a fonte fria, de forma a reiniciar o ciclo do motor.

Ao se comparar a equação $Q_Q = W + |Q_F|$ com a equação da Primeira Lei da Termodinâmica ($Q = W + \Delta U$) aplicada ao ciclo do motor, Q_Q corresponde ao calor liberado na combustão (Q) e absorvido pelos gases resultantes da combustão, W é o trabalho realizado pelos gases resultantes da combustão e o aumento ΔU da energia interna desses gases corresponde justamente ao valor absoluto de Q_F , quantidade de calor rejeitado para a fonte fria, de modo que o sistema retorne à energia interna inicial para o reinício do ciclo.

Ao estudarmos o motor de combustão interna constatamos que os motores de gasolina têm, em média, um rendimento de 30%, implicando em grande desperdício de energia. Desse baixo rendimento do motor de combustão interna, surge a questão: em quanto esse rendimento pode ser ainda aumentado? Considerando mais de um século de investimento na tecnologia do motor de combustão interna e os resultados alcançados até aqui, devemos nos colocar a questão sobre os limites colocados ao aperfeiçoamento e melhoria do rendimento dessas máquinas.

Seria possível projetar uma máquina térmica que transforme TODA a energia recebida da fonte quente em trabalho, isto é, uma máquina que tivesse rendimento de 100%. Isso seria certamente desejável, mas seria possível?

Para responder a essa pergunta, serão considerados dois aspectos:

A situação viola o Princípio de Conservação da Energia?

A situação pode efetivamente acontecer?

9.2 A segunda lei da termodinâmica e as máquinas térmicas

Ao representarmos uma máquina térmica por meio da figura 9.2 perguntamos se uma máquina térmica, ao longo de um ciclo, pode converter integralmente o calor recebido da fonte quente Q_1 (ou Q_Q) em W .

Uma máquina, como a representada na figura 9.4, em que todo o calor liberado pela fonte quente é convertido em trabalho, não viola o Princípio de Conservação da Energia.

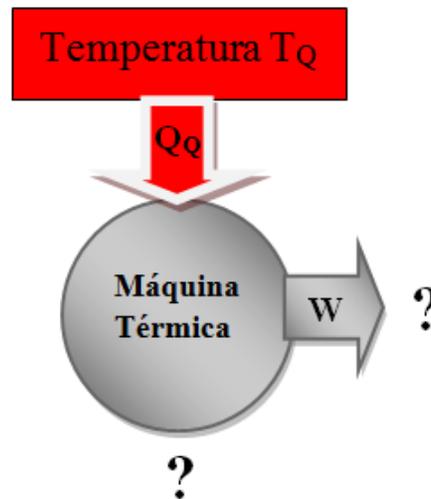


Figura 9.4: Máquina com rendimento 100%?

Entretanto, uma vez que uma máquina térmica converte calor em trabalho, seu funcionamento depende da existência de um fluxo de calor e, portanto, de uma fonte quente de onde sai o calor e de uma fonte fria que o absorve. Para que ocorra o fluxo de calor é preciso que parte desse calor seja entregue a uma fonte fria. Isso implica um necessário desperdício e, por isso, na impossibilidade de converter em trabalho todo o calor liberado pela fonte quente, ao longo de um ciclo. Esse limite de uma máquina térmica é expresso pela Segunda Lei da Termodinâmica.

2ª Lei da Termodinâmica

É impossível para uma máquina térmica, operando em ciclos, converter integralmente calor em trabalho.

Máquinas térmicas como o motor de carro, os motores de um avião a jato, os reatores nucleares e os geradores em uma usina termelétrica são máquinas que, após realizar um ciclo retornam às condições iniciais (Lembra-se do ciclo Otto?). Ao retornar às condições iniciais, qualquer máquina térmica deverá, necessariamente, rejeitar certa quantidade de calor para uma fonte fria.

Os estudos do engenheiro Sadi Carnot, no séc. XIX, sobre as condições ideais para a conversão de calor em trabalho determinaram um limite teórico para o rendimento de uma máquina térmica. Não é uma questão de reduzir o atrito entre as peças e utilizar novos materiais. Tudo isso pode ser feito, mas mesmo assim existirá um limite teórico, menor que 100%, para o rendimento máximo que uma máquina térmica pode alcançar.

O rendimento é uma grandeza que mede a eficiência com que uma máquina térmica converte calor em trabalho. Ele é definido como a fração do calor recebido da fonte a alta temperatura que é efetivamente transformada em trabalho. O rendimento pode ser assim expresso:

$$\text{Rendimento} = R = \frac{W}{Q_Q} \quad (9.2)$$

Na equação 9.2, W é o trabalho realizado em cada ciclo pela máquina e Q_Q é a quantidade de calor que a máquina recebe da fonte quente em cada ciclo. Uma vez que uma máquina térmica sempre entrega uma quantidade calor para a fonte fria, $W < Q_Q \rightarrow R < 1$, tal qual afirma a Segunda Lei da Termodinâmica. O Princípio de Conservação da Energia, aplicado à máquina térmica implica: $Q_Q = W + |Q_F|$. Substituindo(9.1) na equação 9.2

$$\text{Rendimento} = R = \frac{Q_Q - |Q_F|}{Q_Q} = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_Q} \quad (9.3)$$

Na medida em que Q_F nunca é igual a zero, o rendimento de qualquer dispositivo que transforma calor em trabalho é sempre menor que 1. Veja que considerar $Q_Q = W + |Q_F|$ significa pressupor que o calor que não foi liberado para a fonte fria, foi todo ele convertido em trabalho. Nesse caso, temos uma situação ideal em que a dissipação de energia por atrito foi desprezada. A conservação de energia seria ainda respeitada se $Q_Q > W + |Q_F|$. Nesse último caso, o calor liberado pela fonte quente é parcialmente convertido em trabalho útil, parcialmente dissipado por atrito e o restante é liberado para a fonte fria.

Exemplo

1. Uma máquina térmica recebe 5000J de calor da fonte quente e cede 4000J de calor para a fonte fria a cada ciclo.

a) Determine o trabalho realizado pela máquina em 1 ciclo.

$$W = Q_Q - Q_F = 5000J - 4000J \rightarrow W = 1000J$$

b) Determine o rendimento da máquina.

$$R = \frac{W}{Q_Q} = \frac{1000J}{5000J} = 0,20 \rightarrow R = 20\%$$

Esse resultado também poderia ser obtido por: $R = 1 - \frac{Q_F}{Q_Q} = 1 - \frac{4000J}{5000J} = 1 - 0,8 = 0,2 \rightarrow R = 20\%$

Rendimento teórico da máquina ideal de Carnot

A máquina ideal, também chamada de máquina de Carnot, é a que apresenta o máximo rendimento.

Carnot mostrou que o rendimento máximo de uma máquina térmica, operando em ciclos, depende apenas das temperaturas absolutas T_Q e T_F da fonte quente e fria, respectivamente. Determinou, teoricamente, o rendimento máximo dessa máquina ideal:

$$R_{MÁX} = \frac{T_Q - T_F}{T_Q} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (9.4)$$

Isso significa que, quando um reservatório quente estiver a 400K (127°C) e o reservatório frio estiver a 300K (27°C), o rendimento máximo de uma máquina que operar entre essas temperaturas será de

$$R_{máx} = \frac{(400\text{K} - 300\text{K})}{400\text{K}} = \frac{1}{4} \text{ ou } 25\%.$$

Esse é o rendimento máximo, de uma máquina ideal, na qual não há dissipação de energia por atrito. Uma máquina real, operando entre as mesmas temperaturas terá um rendimento menor que 25%.

Exemplo

2. Numa máquina a vapor, a caldeira está a 500 K. Determine o rendimento máximo que essa máquina pode ter quando:
- o vapor escapa diretamente na atmosfera a pressão normal, como nas antigas locomotivas a vapor;
 - há um condensador para resfriar o vapor na saída (fonte fria) a temperatura ambiente de 27°C .

Solução

a) Como o vapor escapa diretamente para a atmosfera, ele não condensa e, considerando a pressão de 1 atm, ele é resfriado até o ponto de vapor de vapor que é 373K. Portanto, esse é o valor da temperatura da fonte fria. A temperatura da fonte quente é a temperatura da caldeira: 500K. Nessas condições o rendimento máximo dessa máquina a vapor é :

$$R_{MÁX} = 1 - \frac{373}{500} = 1 - 0,75 = 0,25 \rightarrow R_{MÁX} = 25\%$$

b) Com a utilização de um condensador, há uma redução da temperatura da fonte fria, pois o vapor é resfriado, condensado até se transformar em água a 27°C (300K) . Isso resulta em aumento significativo do rendimento máximo da máquina:

$$R_{MÁX} = 1 - \frac{300}{500} = 1 - 0,60 = 0,40 \rightarrow R_{MÁX} = 40\%$$

Quanto maior T_Q em relação a T_F , ou seja, quanto maior é a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, tanto maior é o rendimento máximo. Portanto, se desejamos o máximo de rendimento é necessário que a máquina funcione entre uma temperatura muito alta e uma muito baixa.

A ampliação do desnível entre as temperaturas das fontes quente e fria coloca grandes desafios técnicos para materiais e processos operando seja em temperaturas muito altas, seja em temperaturas muito baixas. Alcançar esses valores de temperatura é também outro importante desafio técnico. Esses aspectos podem ajudar a explicar os limites práticos encontrados na busca de aperfeiçoar o rendimento do motor de combustão.

O Teorema de Carnot afirma que qualquer máquina real terá um rendimento menor que o de uma máquina ideal, também chamada de máquina de Carnot. Portanto, com base nos cálculos feitos

anteriormente, uma máquina real, em que a dissipação de energia por atrito não é desprezível, que opere entre as temperaturas de 400K e 300K, terá um rendimento necessariamente menor que 25%.

Lembre-se que mesmo apresentando o máximo rendimento, **a máquina ideal de Carnot também obedece a Segunda Lei da Termodinâmica. Portanto, tem rendimento menor que 100%.**

9.3 Ordem e desordem

O segundo princípio da Termodinâmica impõe limitações muito severas às transformações de calor em trabalho. No entanto, nada nos impede de transformar trabalho em calor com uma eficiência de 100%.

Concluimos que o trabalho mecânico e o calor são duas formas diferentes de energia em trânsito, mas podemos considerar que o trabalho é uma forma "superior", que se utiliza como se deseje, ao passo que o calor é uma energia de qualidade "inferior". Para poder utilizar o calor, somos torçados a convertê-lo em trabalho, com um desperdício que é inevitável. É como se estivéssemos trocando uma moeda "fraca" por outra "forte": ao fazê-lo, sempre acabamos perdendo algum dinheiro.

Tudo isso pode ser interpretado em termos de ordem e desordem. O calor não é senão a transferência da agitação das moléculas de um corpo para as de outro. Aquecer um corpo equivale, portanto, a aumentar sua energia interna, cedendo energia cinética desordenada a um enorme número de corpos microscópicos. Essa energia cinética é bem diferente, por exemplo, da energia de uma pedra que cai sobre uma mola e a comprime: nesse caso, a energia pode ser completamente transformada em trabalho.

O aquecimento de um corpo é um processo desordenado, em que a transferência de energia resulta em inúmeros choques caóticos que ocorrem entre as moléculas. Já a queda de uma pedra sobre uma mola é um fenômeno que envolve apenas 2 corpos e transcorre de modo ordenado: a pedra perde sua própria energia cinética realizando um trabalho sobre a mola, que adquire, assim, energia elástica. É bem compreensível, então, que os processos ordenados sejam de maior interesse prático do que os processos desordenados.

O segundo princípio da Termodinâmica exprime, portanto, a impossibilidade prática de ocorrer um processo durante o qual a energia interna desordenada seja convertida integralmente em energia ordenada. O processo inverso, porém não só é possível, como de fato acontece habitualmente.

Existe, portanto, na natureza, uma assimetria que favorece a transformação de energia ordenada em energia desordenada e impede que o processo inverso se realize espontaneamente.

Essa "preferência" da natureza permite estabelecer uma gradação entre as diferentes formas de energia.

Em geral, uma forma de energia é tanto mais proveitosa quanto mais se preste a ser convertida em outras formas. É isso o que torna valiosas a energia mecânica (potencial e cinética) e a energia elétrica. A energia interna, porém, é muito menos proveitosa, sobretudo quando o sistema apresenta baixa temperatura. Basta pensar, por exemplo, na inutilidade prática da enorme energia interna armazenada na água do mar, já que sua temperatura é baixa em relação à de outros corpos aos quais poderia ceder calor.

Para concluir, podemos interpretar o segundo princípio da Termodinâmica como uma seta que orienta a evolução dos fenômenos no decorrer do tempo: a tendência natural favorece as transformações

que resultam em formas de energia cada vez menos ordenadas. Enquanto o primeiro princípio da Termodinâmica afirma que, em qualquer processo, a quantidade total de energia permanece sempre igual, o segundo princípio estabelece que a *qualidade* dessa energia piora cada vez mais¹.

9.4 Exercícios

1. (Enem – 2012 - modificada) Aumentar a eficiência na queima de combustível dos motores a combustão e reduzir suas emissões de poluentes é a meta de qualquer fabricante de motores. É também o foco de uma pesquisa brasileira que envolve experimentos com plasma, o quarto estado da matéria e que está presente no processo de ignição. A interação da faísca emitida pela vela de ignição com as moléculas de combustível gera o plasma que provoca a explosão liberadora de energia que, por sua vez, faz o motor funcionar.

Disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br. Acesso em: 22 jul 2010 (adaptado).

No entanto, a busca da eficiência referenciada no texto apresenta como fator limitante:

- A) o tipo de combustível, fóssil, que utilizam. Sendo um insumo não renovável, em algum momento estará esgotado.
- B) um dos princípios da termodinâmica, segundo o qual o rendimento de uma máquina térmica, mesmo a ideal, nunca atinge 100%.
- C) o funcionamento cíclico de todos os motores. A repetição contínua dos movimentos exige que parte da energia seja transferida ao próximo ciclo.
- D) as forças de atrito inevitável entre as peças. Tais forças provocam desgastes contínuos que com o tempo levam qualquer material à fadiga e ruptura.
- E) a temperatura em que eles trabalham. Para atingir o plasma, é necessária uma temperatura maior que a de fusão do aço com que se fazem os motores.

2. (FCMMG 2008) - Os motores dos automóveis são considerados máquinas térmicas e possuem três elementos: uma fonte quente, uma fonte fria e a própria máquina térmica. Num motor, pode-se afirmar que:

- A) é realizado trabalho sobre a máquina térmica, cedendo calor para as duas fontes.
- B) a máquina térmica realiza trabalho, absorvendo calor das fontes quente e fria.
- C) a máquina absorve calor da fonte quente, realiza trabalho e cede calor para a fonte fria.
- D) é realizado trabalho sobre a máquina térmica, cedendo calor apenas para a fonte fria.

3. (FCMMG 2015) - Um pesquisador de uma empresa de motores projetou uma máquina térmica que realiza um trabalho de $24 \times 10^6 J$, trabalhando entre uma fonte quente a 300K, extraindo 20×10^6 cal dela e rejeitando 12×10^6 cal para a fonte fria a 240K. (Considere que $1 \text{ cal} = 4J$).

Entregando o projeto para o supervisor da empresa, este fez algumas verificações nos dados fornecidos da nova máquina e constatou que:

- A) seu rendimento era superior a 50%.
- B) seu rendimento de Carnot era inferior a 10%.

¹O texto dessa seção foi retirado de AMALDI, 1997, p. 201-202

C) ela era incompatível com a 2ª Lei da Termodinâmica, pois seu rendimento era superior ao da máquina de Carnot.

D) ela estava de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, pois o trabalho realizado era maior que o calor cedido à fonte fria.

4. (UFMG - 2000) As máquinas térmicas funcionam em ciclos. Em cada ciclo, elas absorvem calor de uma fonte quente, produzem trabalho e cedem calor a uma fonte fria. Uma indústria precisa adquirir uma máquina que opere com a fonte quente a 600K e com a fonte fria a 300K. Foram-lhe apresentadas três propostas, resumidas abaixo, de máquinas com características básicas diferentes.

Para cada proposta, **explique** se o funcionamento da máquina descrita é compatível com as leis da Física. Em caso afirmativo, **calcule** a eficiência da máquina.

I. Proposta I: Em cada ciclo, a máquina retira 400J da fonte quente, realiza 200J de trabalho e cede 250J para a fonte fria.

II. Proposta II: Em cada ciclo, a máquina retira 400J da fonte quente e realiza essa mesma quantidade de trabalho.

III. Proposta III: Em cada ciclo, a máquina retira 400J da fonte quente, realiza 100J de trabalho e cede 300J para a fonte fria.

5. Uma máquina térmica de Carnot recebe de uma fonte quente 1000 cal por ciclo. Sendo as temperaturas das fontes quente e fria, respectivamente, 427°C e 127°C , determinar:

A) O rendimento da máquina.

B) O trabalho, em joules, realizado pela máquina em cada ciclo.

C) A quantidade de calor, em joules, rejeitada para a fonte fria.

Usar como equivalência $1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$

6. (FGV-SP) Sendo 27°C a temperatura da água do mar na superfície e de 2°C em águas profundas, qual seria o rendimento teórico de uma máquina térmica que aproveitasse a energia correspondente?

7. (UFF-RJ- modificada) O esquema mostrado na figura 9.5 representa o ciclo de operação de determinada máquina térmica cujo combustível é um gás. Ao término de cada ciclo, a máquina retorna às condições iniciais, com o gás alcançando a mesma temperatura que tinha no início do ciclo. Quando em funcionamento, a cada ciclo o gás absorve calor (Q_1) de uma fonte quente, realiza trabalho mecânico (W) e libera calor (Q_2) para uma fonte fria, sendo a eficiência da máquina medida pelo quociente entre W e Q_1 . Uma dessas máquinas, que, a cada ciclo, realiza um trabalho de $3,0 \times 10^4\text{ J}$ com uma eficiência de 60%, foi adquirida por certa indústria. Em relação a essa máquina, conclui-se que os valores de Q_1 , de Q_2 e da variação da energia interna do gás são, respectivamente:

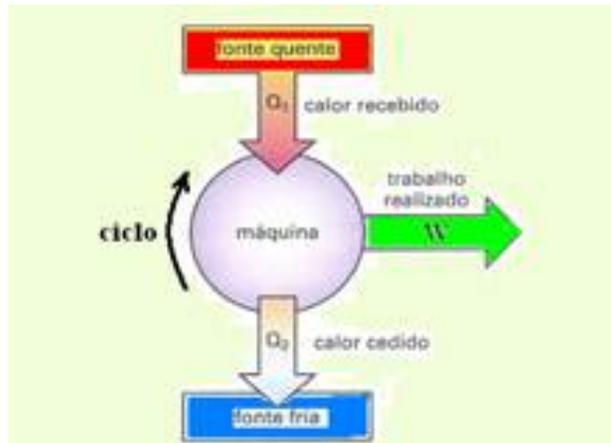


Figura 9.5: Diagrama de uma máquina térmica

a) $1,8 \times 10^4 J$; $5,0 \times 10^4 J$; $3,2 \times 10^4 J$

b) $3,0 \times 10^4 J$; zero ; zero

c) $3,0 \times 10^4 J$; zero ; $3,0 \times 10^4 J$

d) $5,0 \times 10^4 J$; $2,0 \times 10^4 J$; zero

e) $5,0 \times 10^4 J$; $2,0 \times 10^4 J$; $3,0 \times 10^4 J$

8. (UEL-PR) O reator utilizado na Usina Nuclear de Angra dos Reis – Angra II – é do tipo PWR (Pressurized Water Reactor). O sistema PWR é constituído de três circuitos: o primário, o secundário e o de água de refrigeração. No primeiro, a água é forçada a passar pelo núcleo do reator a pressões elevadas, 135atm, e à temperatura de $320^\circ C$. Devido à alta pressão, a água não entra em ebulição e, ao sair do núcleo do reator, passa por um segundo estágio, constituído por um sistema de troca de calor, onde se produz vapor de água que vai acionar a turbina que transfere movimento ao gerador de eletricidade. Na figura 9.6 estão indicados os vários circuitos do sistema PWR.

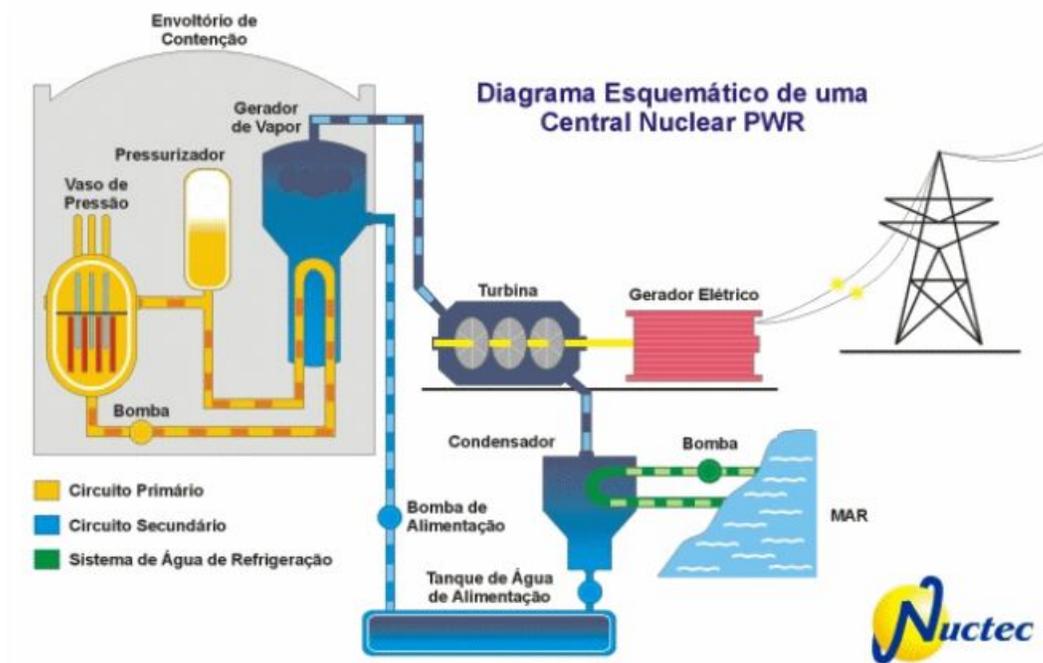


Figura 9.6: Diagrama esquemático de uma Central Nuclear PWR

Considerando as trocas de calor que ocorrem em uma usina nuclear como Angra II, é correto afirmar:

- A) O calor removido do núcleo do reator é utilizado integralmente para produzir trabalho na turbina.
- B) O calor do sistema de refrigeração é transferido ao núcleo do reator através do trabalho realizado pela turbina.
- C) Todo o calor fornecido pelo núcleo do reator é transformado em trabalho na turbina e, por isso, o reator nuclear tem eficiência total.
- D) O calor do sistema de refrigeração é transferido na forma de calor ao núcleo do reator e na forma de trabalho à turbina.
- E) Uma parte do calor fornecido pelo núcleo do reator realiza trabalho na turbina, e outra parte é cedida ao sistema de refrigeração.

9. Sobre o ciclo Otto, mostrado na figura 9.7, faz-se um conjunto de afirmações. Indique as afirmativas verdadeiras e as falsas. Justifique todas as indicações.

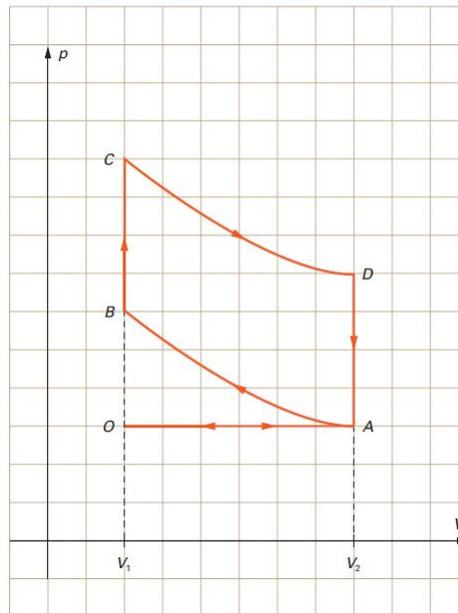


Figura 9.7: Ciclo Otto (Fonte: Gaspar, 2013, p. 288)

- a) O trabalho realizado pelo sistema na expansão OA somado ao trabalho realizado sobre o sistema na compressão AO é zero.
- b) Não há realização de trabalho nas etapas BC e DA.
- c) O trabalho realizado pelo sistema na expansão CD é maior que o módulo do trabalho realizado sobre o sistema na compressão AB.
- d) Em ciclos de sentido horário, em um diagrama $p \times V$, o trabalho total é sempre positivo.
- e) Há absorção de calor pelo sistema na etapa BC.
- f) Há liberação de calor pelo sistema nas etapas DA e AO.
- g) O ciclo de sentido horário no diagrama $p \times V$ representa a conversão de calor em trabalho, tal qual acontece em uma máquina térmica.

10. O diagrama $p \times V$, apresentado a seguir, representa o que acontece com o fluido refrigerante que circula no circuito interno de uma geladeira (figura 9.8). A figura 9.9 mostra o mecanismo da geladeira, representado nesse ciclo.

A etapa 1-2 é uma compressão adiabática realizada pelo compressor da geladeira. O compressor aspira o fluido refrigerante vaporizado a baixa pressão e temperatura e por meio de uma compressão aumenta a pressão e temperatura desse vapor bombeando-o para o condensador ou serpentina do refrigerador.

A etapa 2-4 é uma compressão isobárica. Nessa etapa o vapor inicialmente cede calor para a vizinhança, diminui a temperatura até alcançar a temperatura de liquefação, continua cedendo calor à vizinhança e se liquefaz. Nessa etapa, o calor extraído de dentro da geladeira somado ao trabalho realizado pelo compressor são transmitidos à vizinhança por meio do condensador ou serpentina do refrigerador.

A etapa 4-5 é uma expansão adiabática. O líquido passa por uma válvula que provoca sua expansão rápida, de modo que as trocas de calor do fluido com a vizinhança são desprezíveis. A pressão e a temperatura do líquido diminuem. Ele então alcança o congelador ou evaporador na parte interna da geladeira como líquido a baixa temperatura e pressão.

A etapa 5-1 é uma expansão isobárica, provocada pela vaporização do fluido a temperatura e pressão constantes. Nessa etapa o fluido retira calor de dentro da geladeira, durante a vaporização.

Analise as seguintes afirmações sobre o ciclo da geladeira e indique as verdadeiras e as falsas. Justifique todas as indicações.

- Durante a expansão adiabática o fluido refrigerante realiza trabalho e sua energia interna diminui.
- Durante a vaporização, o fluido refrigerante também realiza trabalho, porém usando o calor absorvido dos alimentos que estão dentro da geladeira.
- Durante a compressão adiabática há realização de trabalho sobre o fluido e aumento de sua energia interna.
- Durante a compressão isobárica, há realização de trabalho sobre o fluido e liberação de calor para a vizinhança da geladeira.
- O ciclo no diagrama $p \times V$ é anti-horário e o trabalho total é negativo.
- Considerando o ciclo completo, o trabalho total é realizado sobre o sistema, com a consequente liberação de calor para a vizinhança da geladeira.

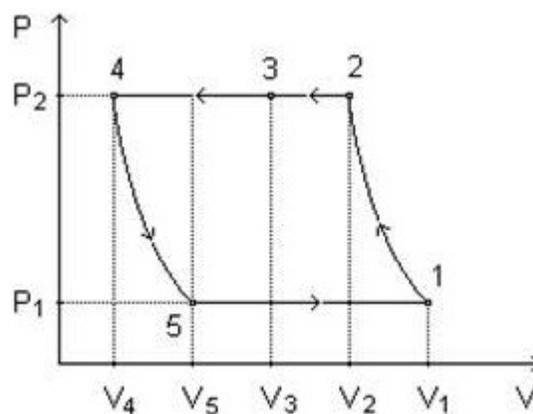


Figura 9.8: Ciclo de um refrigerador (Fonte: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/curiosidades/refrigeradores3.php>)

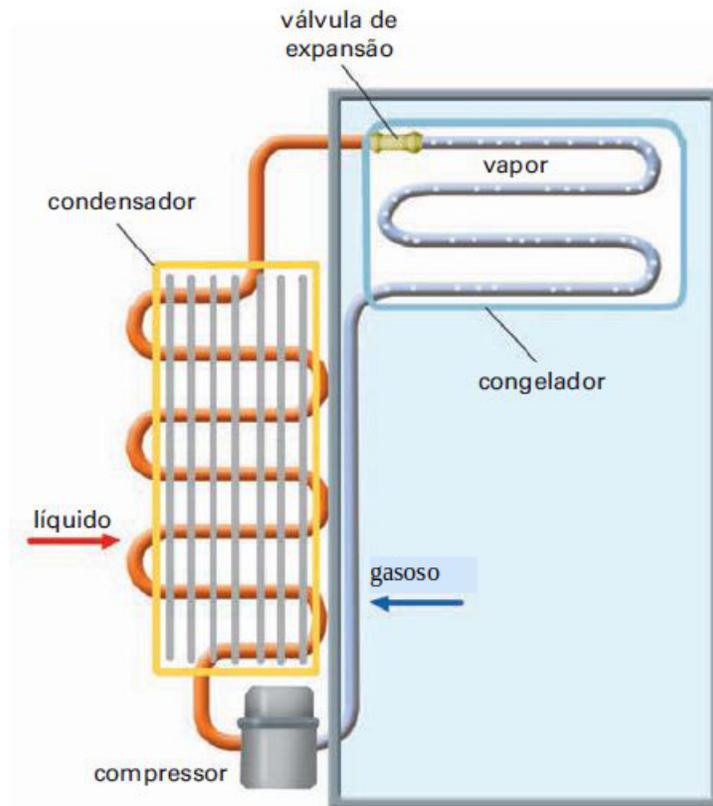


Figura 9.9: Mecanismo da geladeira (Fonte: Gaspar, 2013, p. 291)

9.5 Respostas das questões e dos exercícios

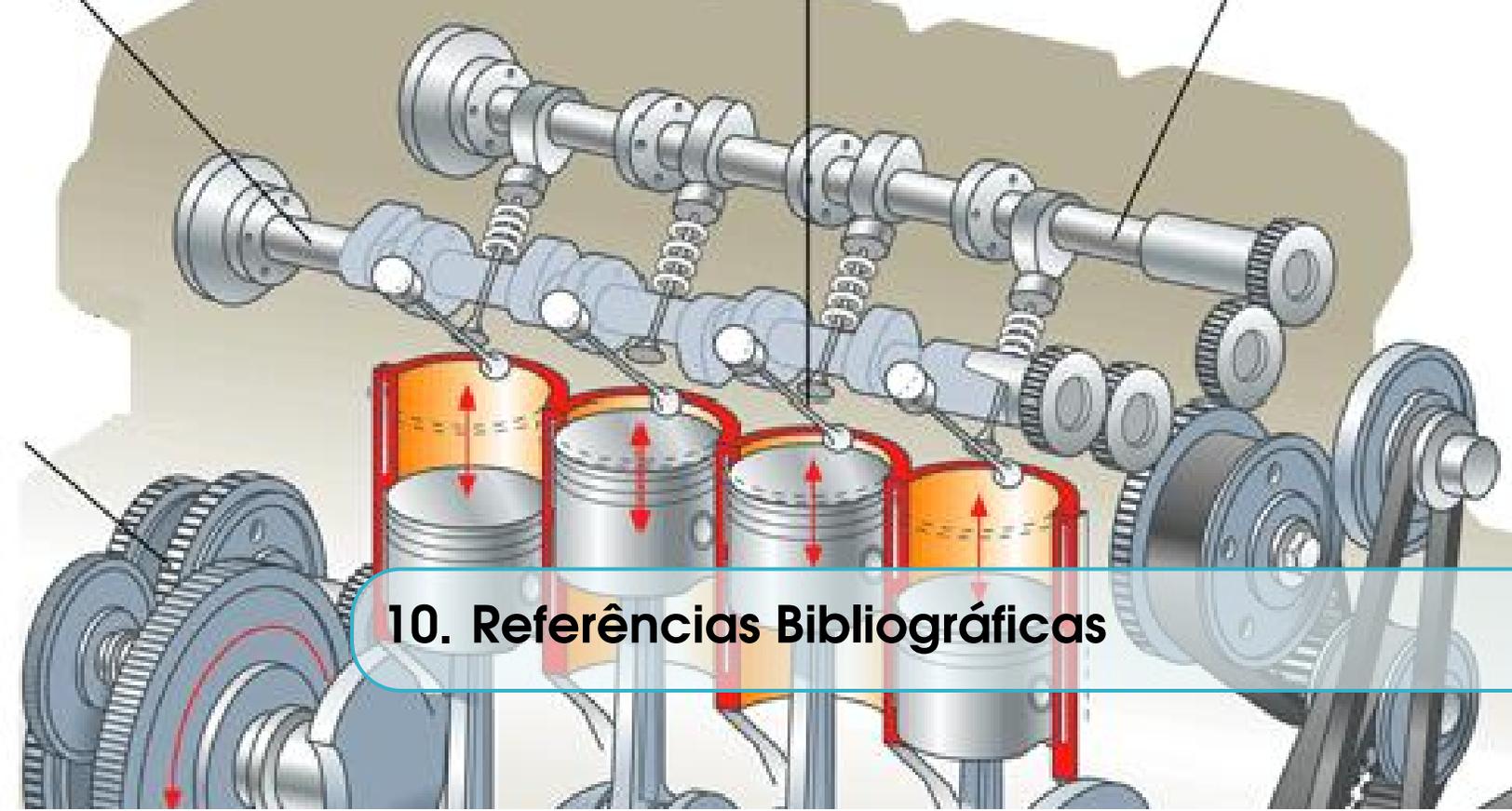
Exercícios

1. B
2. C
3. C
4. I. Impossível. Contraria a 1a lei da termodinâmica ou princípio de conservação de energia.
II. Impossível. Contraria a 2a lei da termodinâmica.
III. Possível. Trata-se de uma máquina real com rendimento de 25%, menor que o rendimento de máquina de Carnot (50%), operando entre as temperaturas dadas.
5. A) 43%
B) 1806J
C) 2394J
6. 8%
7. D

8. E

9. Todas são corretas.

10. Todas são corretas.



10. Referências Bibliográficas

ALVARENGA, Beatriz Álvares; MÁXIMO, Antônio Ribeiro da Luz. Física. Ensino Médio. São Paulo: Scipione, 2006. v.2.

AMALDI, Ugo. Imagens da física. São Paulo: Scipione, 1997.

AULER, Décio et al. Transporte particular x transporte coletivo: intervenção curricular pautada por interações entre ciência-tecnologia-sociedade. ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, NÚMERO EXTRA. VII CONGRESO, 2005.

EMBRAPA. Mitigação das emissões de gases na substituição do diesel ou gasolina convencional por bioetanol da cana. AgroAnalysis. Revista de Agronegócios da FGV. Abr, 2009.

GASPAR, A. Compreendendo a Física. São Paulo: Ática, 2013.

GRF (Grupo de Reelaboração de Ensino de Física). Física 2: Física térmica/Optica. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1991.

GRF (Grupo de Reelaboração de Ensino de Física). Leituras de Física. Física Térmica. 1998. Disponível em www.if.usp.br/gref/pagina01.html (Acesso em agosto/2019).

MELK, Alfredo de Carvalho. Análise de uma experiência de ensino de termodinâmica baseada em uma abordagem CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) em uma escola técnica federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Educação/UFMG. 2017. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br> (Acesso em agosto de 2019).

MELK, Alfredo de Carvalho; AGUIAR JR., Orlando; MOREIRA, Adelson Fernandes; COUTO, Francisco Pazzini. Motor a combustão interna, mobilidade urbana e leis da termodinâmica: atividades inovadoras no ensino de física com abordagem CTS. In: AGUIAR JR., Orlando (org.) Sequências de ensino de física orientadas pela pesquisa: experiências do PIBID e do PRÓ-MESTRE-UFMG. Belo Horizonte: FAPEMIG, 2018.

MTE- THOMSON. Sistema de Arrefecimento. Disponível em <https://pt.slideshare.net/35Carlos/manual-de-arrefecimento-mtethomson> (Acesso em agosto/2019).

TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. Motores de combustão interna e seus sistemas. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Pelotas, RS, 2013. Disponível em http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf (Acesso em fevereiro/2016).

VARELLA, Carlos Alberto Alves. Sistemas auxiliares de motores de combustão interna. Rio de Janeiro: Seropédica, UFRRJ, 2012.