

**CEJA** >>

**CENTRO DE EDUCAÇÃO**  
de JOVENS e ADULTOS

**CIÊNCIAS DA  
NATUREZA**

e suas **TECNOLOGIAS** >>

**Física**

**Fascículo 4**

**Unidades 9 e 10**

**Edição revisada 2016**

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Governador  
**Luiz Fernando de Souza Pezão**

Vice-Governador  
**Francisco Oswaldo Neves Dornelles**

---

SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

---

Secretário de Estado  
**Gustavo Reis Ferreira**

---

SECRETARIA DE ESTADO DE EDUCAÇÃO

---

Secretário de Estado  
**Antônio José Vieira de Paiva Neto**

---

FUNDAÇÃO CECIERJ

---

Presidente  
**Carlos Eduardo Bielschowsky**

---

PRODUÇÃO DO MATERIAL CEJA (CECIERJ)

---

Coordenação Geral de  
Design Instrucional

**Cristine Costa Barreto**

Elaboração

**Claudia Augusta de Moraes Russo**

**Ricardo Campos da Paz**

Revisão de Língua Portuguesa

**Ana Cristina Andrade dos Santos**

Coordenação de  
Design Instrucional

**Flávia Busnardo**

**Paulo Miranda**

Design Instrucional

**Aline Beatriz Alves**

Coordenação de Produção

**Fábio Rapello Alencar**

Capa

**André Guimarães de Souza**

Projeto Gráfico

**Andreia Villar**

Imagem da Capa e da Abertura das Unidades

**[http://www.sxc.hu/browse.](http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=1381517)**

**[phtml?f=download&id=1381517](http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=1381517)**

Diagramação

**Equipe Cederj**

Ilustração

**Bianca Giacomelli**

**Clara Gomes**

**Fernando Romeiro**

**Jefferson Caçador**

**Sami Souza**

Produção Gráfica

**Verônica Paranhos**

# Sumário

**Unidade 9 | Calor e Energia: a primeira lei da termodinâmica 5**

---

**Unidade 10 | Entropia e a segunda lei da termodinâmica 37**

---

# Prezado(a) Aluno(a),

Seja bem-vindo a uma nova etapa da sua formação. Estamos aqui para auxiliá-lo numa jornada rumo ao aprendizado e conhecimento.

Você está recebendo o material didático impresso para acompanhamento de seus estudos, contendo as informações necessárias para seu aprendizado e avaliação, exercício de desenvolvimento e fixação dos conteúdos.

Além dele, disponibilizamos também, na sala de disciplina do CEJA Virtual, outros materiais que podem auxiliar na sua aprendizagem.

O CEJA Virtual é o Ambiente virtual de aprendizagem (AVA) do CEJA. É um espaço disponibilizado em um site da internet onde é possível encontrar diversos tipos de materiais como vídeos, animações, textos, listas de exercício, exercícios interativos, simuladores, etc. Além disso, também existem algumas ferramentas de comunicação como chats, fóruns.

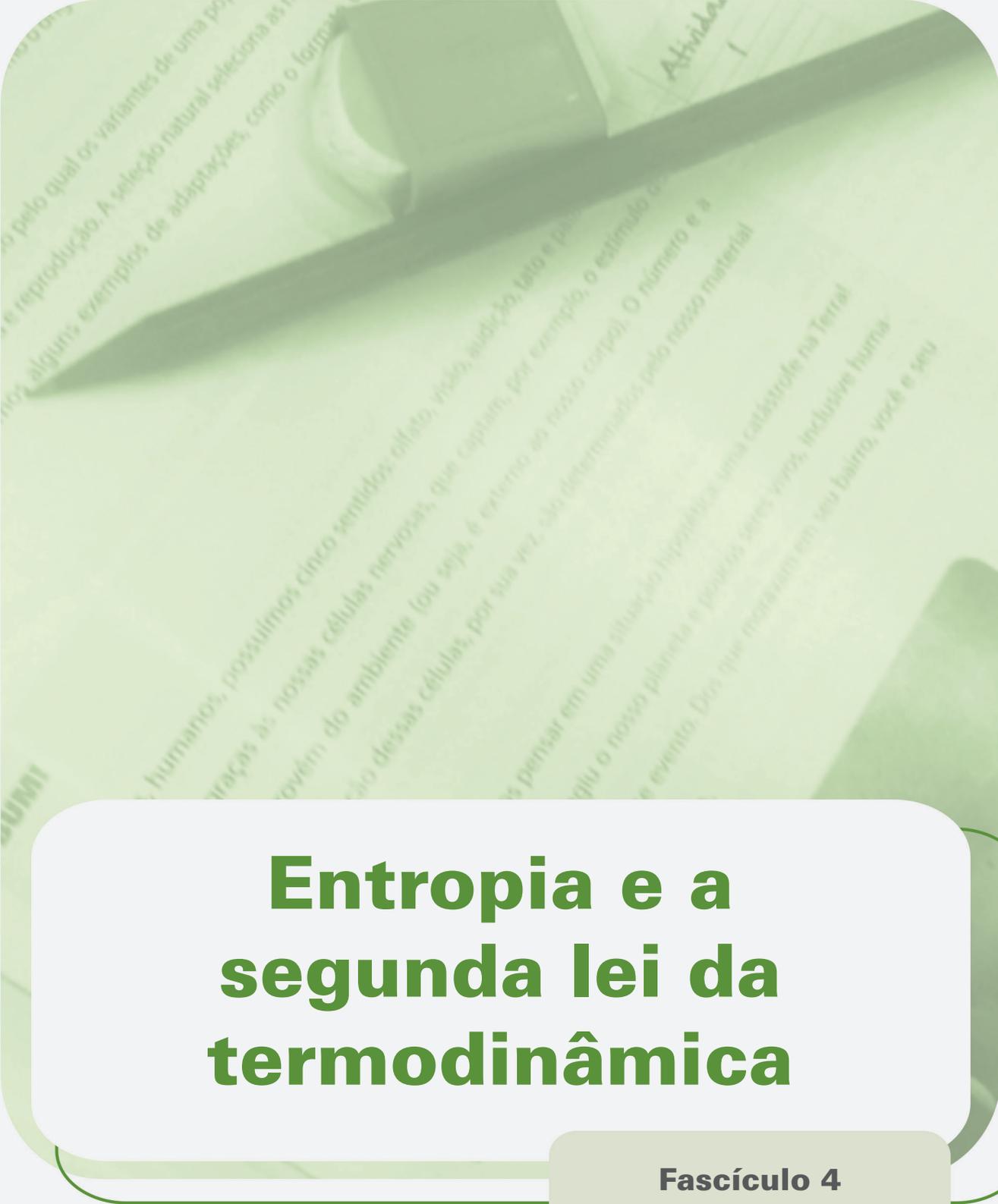
Você também pode postar as suas dúvidas nos fóruns de dúvida. Lembre-se que o fórum não é uma ferramenta síncrona, ou seja, seu professor pode não estar online no momento em que você postar seu questionamento, mas assim que possível irá retornar com uma resposta para você.

Para acessar o CEJA Virtual da sua unidade, basta digitar no seu navegador de internet o seguinte endereço:  
<http://cejarj.cecierj.edu.br/ava>

Utilize o seu número de matrícula da carteirinha do sistema de controle acadêmico para entrar no ambiente. Basta digitá-lo nos campos "nome de usuário" e "senha".

Feito isso, clique no botão "Acesso". Então, escolha a sala da disciplina que você está estudando. Atenção! Para algumas disciplinas, você precisará verificar o número do fascículo que tem em mãos e acessar a sala correspondente a ele.

Bons estudos!



# Entropia e a segunda lei da termodinâmica

**Fascículo 4**  
**Unidade 10**



# Entropia e a segunda lei da termodinâmica

## Para início de conversa...

Alguns acontecimentos na natureza ocorrem apenas em uma única direção. No início do jogo de bilhar, por exemplo, a bola branca bate nas outras e elas se espalham na mesa. Não se observa um ajuntamento como o original no decorrer do jogo. Tal observação pode parecer óbvia, no entanto incorpora um dos conceitos mais profundos e importantes da Física, o de entropia.



Figura 1: Quando jogamos bilhar, tiramos as bolas de uma posição inicial que não pode ser reconstituída naturalmente, durante o jogo, ou seja, as bolas não voltam a sua posição inicial sozinhas, mas sim quando arrumadas pelo jogador.

Há uma profunda assimetria em alguns processos da natureza: energia térmica na forma de calor só se propaga do corpo mais quente para o mais frio, uma bola, quicando no solo, rapidamente chega ao repouso, mas nunca se viu uma bola de repente começar a quicar do nada. Embora nos processos inversos a energia também se conserve, eles nunca acontecem. Por quê? Essa é a questão central desta aula.

## Objetivos de Aprendizagem

- Enunciar a segunda lei da termodinâmica;
- Conceituar entropia;
- Aplicar a segunda lei da termodinâmica a experimentos simples;
- Compreender o funcionamento de máquinas térmicas, como geladeira e ar condicionado.

## Seção 1

# A conservação de energia não explica tudo

Na aula passada, estudamos a primeira lei da termodinâmica, que é basicamente uma reafirmação do conceito de conservação de energia mecânica na presença de fenômenos térmicos.

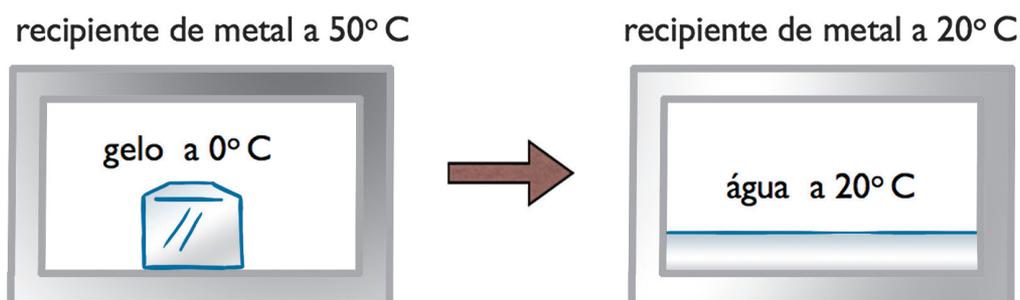
Vimos também que a energia interna de um corpo, de um cilindro, contendo gás, por exemplo, pode aumentar quando se realiza um trabalho sobre o corpo (comprimindo-se o gás) ou por meio da troca de calor. Lembremos que o calor foi definido como o mecanismo pelo qual energia é transferida de um corpo a outro por causa de uma diferença de temperatura entre eles. Também muitas vezes chamamos calor à quantidade de energia transferida por esse mecanismo.

Voltando à primeira lei, vemos que para um dado processo acontecer não é suficiente que a energia seja conservada. Por exemplo, quando um corpo é colocado em contato com outro corpo que possui temperatura mais elevada, o calor flui do corpo mais quente para o mais frio. Dizemos que esse é um processo irreversível, ou seja, ocorre naturalmente apenas em uma direção. Nunca se observou o calor fluindo do corpo mais frio para o mais quente, embora a energia total pudesse ser conservada num processo desse tipo.

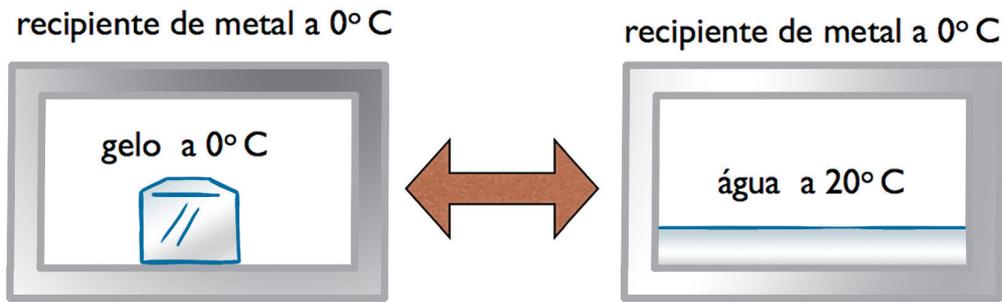
Apesar dessa direção privilegiada para os processos que ocorrem usualmente na natureza, podemos pensar numa classe de processos idealizados que seriam reversíveis. Um sistema que realiza um processo reversível está sempre perto do equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Qualquer mudança sempre acontece a partir de mudanças infinitesimais nas condições do sistema. Um exemplo que utilizaremos no futuro é a reversão do fluxo de calor entre dois corpos cujas temperaturas sejam muito próximas, ajustando de modo infinitesimal uma temperatura ou outra (veja figura 2). De forma geral, um processo cíclico reversível é um processo que se repete (cíclico) no qual não há atrito mecânico interno, as forças mecânicas opostas diferem de forma infinitesimal em magnitude e qualquer troca de calor ocorre com diferença de temperatura desprezível entre o sistema e o ambiente.

### Infinitesimal

é uma expressão utilizada para se referir a alguma coisa muito pequena, porém maior do que zero.



O calor flui sempre do recipiente para o gelo, derretendo-o. Depois o calor flui para a água, até que recipiente e água atinjam o equilíbrio térmico.



**Por uma mudança infinitesimal na temperatura do recipiente, podemos inverter o fluxo do calor de modo ou a derreter o gelo ou a congelar a água**

Figura 2: Exemplo de processo irreversível (acima) e processo reversível (abaixo). Estamos supondo que os recipientes de metal estão isolados termicamente (por exemplo, estão contidos em caixas de isopor) de modo que as trocas de calor sejam só entre o recipiente e o gelo e/ou água.

Do ponto de vista das aplicações práticas, veremos que não é possível fabricarmos um motor que seja 100% eficiente (nem perto disso), mesmo que tenhamos a melhor tecnologia do universo.

Do ponto de vista das propriedades fundamentais da Natureza, temos que explicar porque as leis básicas da física (por exemplo, a Mecânica Clássica) são reversíveis (ou seja, na mecânica, se eu filmar um choque de duas bolas de bilhar e passar depois o filme de trás para frente, o processo ao contrário parece - e é - um processo permitido e usual da mecânica). De modo mais geral, os processos microscópicos fundamentais de toda a física são reversíveis. No entanto sabemos que muitos processos só acontecem numa única direção como a troca de calor exemplificada acima, o envelhecimento dos seres vivos e até o próprio passar do tempo, ou seja, a distinção entre passado e futuro. A resposta a todas as questões acima é dada pela Segunda Lei da Termodinâmica.

Existem algumas formulações sobre a segunda lei (e todas são equivalentes). Uma delas foi enunciada por Rudolf Clausius (1822-1888) da seguinte forma: Calor pode fluir espontaneamente de um corpo quente para um corpo frio, mas o calor não flui espontaneamente de um corpo frio a um corpo quente.

Já a formulação de William Thompson (1824-1907), mais conhecido como Lorde Kelvin, é a seguinte: não é possível um processo cíclico no qual calor é retirado de uma fonte quente e convertido inteiramente em trabalho.

Veremos as implicações da segunda lei a seguir.

## Voltando atrás

Dentre os quatro processos a seguir quais deles podem ser considerados como reversíveis?

- Choque elástico de duas bolas de bilhar;
- Choque inelástico de duas bolinhas feitas de massa de modelar;
- Expansão adiabática de um gás num cilindro com êmbolo no qual a pressão externa é sempre mantida muito próxima da pressão interna.
- Expansão livre de um gás.

Anote suas  
respostas em  
seu caderno



O filme do Woody Allen "Tudo pode dar certo" apresenta um cientista que se apaixona por uma moça mais jovem. No filme, alguns conceitos científicos são utilizados de forma qualitativa e muitas vezes divertida. Por exemplo, quando um personagem explica o que é entropia: "Entropia é como uma pasta de dente, depois de expelida a pasta nunca mais voltará para sua embalagem." Veja o filme!



## Seção 2

# Máquinas térmicas e eficiência



Uma máquina térmica converte energia interna em energia mecânica. Um carro é um exemplo comum de máquina térmica.

A ideia básica por trás de uma máquina térmica é a obtenção de energia mecânica, quando o calor flui de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa, como esquematizado na Figura 3.

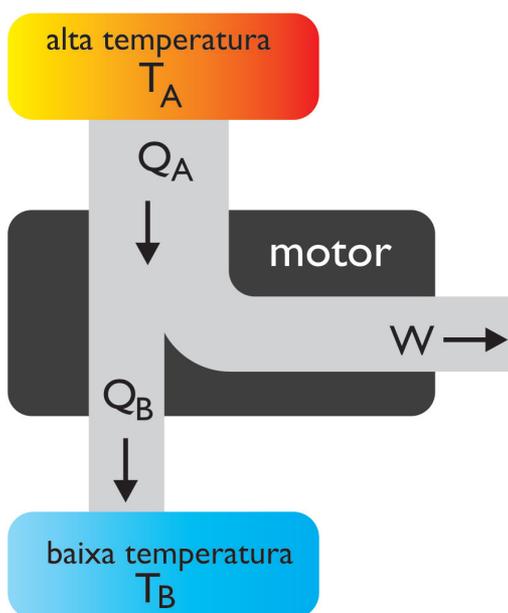


Figura 3: Diagrama de um motor. Calor  $Q_A$  é extraído do reservatório térmico à temperatura alta. Uma fração dele é convertida em trabalho  $W$  e o resto é depositado no reservatório térmico a baixa temperatura.

Os motores reais (de uma locomotiva a vapor ou de um carro, por exemplo) operam de forma cíclica, ou seja, estão sempre retornando ao seu estado termodinâmico inicial e executando o ciclo de novo. Portanto, voltam ao seu estado termodinâmico inicial, nos permitindo afirmar que a energia interna durante o ciclo não varia e; portanto, num ciclo (da primeira lei, veja unidade anterior):

$$\Delta U = \Delta Q + W = 0$$

ou seja,

$$Q_A = W + Q_B,$$

onde estamos utilizando uma convenção de sinais onde  $Q_A$ ,  $Q_B$  e  $W$  são sempre positivos.

Num sistema real, por exemplo numa máquina a vapor, a chama e os gases quentes na caldeira são o reservatório a alta temperatura e a água fria e o ar utilizado para condensar e esfriar o vapor compõem o reservatório frio.

Idealmente, gostaríamos da máquina mais eficiente possível, ou seja, que todo o calor extraído do reservatório quente fosse transformado em trabalho e nenhum calor fosse desperdiçado no reservatório frio.

Define-se a eficiência de uma máquina térmica como sendo a razão entre o trabalho realizado e a quantidade de calor fornecido, da seguinte forma:

$$e = \frac{W}{Q_A}$$

Se a máquina fosse perfeita, ou seja, 100% eficiente, teríamos que  $e = 1$  (todo o calor fornecido seria utilizado para se realizar o trabalho). No entanto, tal eficiência não é possível, nem mesmo com a melhor das tecnologias.

Pela conservação da energia explicitada pela fórmula anterior, temos que  $W = Q_A - Q_B$  e, sendo assim:

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} = \frac{Q_A}{Q_A} - \frac{Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A}.$$

Portanto:

$$e = 1 - \frac{Q_B}{Q_A},$$

conforme demonstrado pelo engenheiro Sadi Carnot (1796-1832).

Aqui nos interessa especialmente uma máquina reversível. Esta máquina não tem atrito, ou seja, ela não desperdiça energia nem se aquece, quando está operando. Claro que esta máquina é ideal, uma abstração. Mas ela é útil para estabelecer o mais alto rendimento possível de uma máquina. Ela é denominada máquina de Carnot.

Clausius também mostrou que para uma máquina reversível pode-se escrever a equação anterior como

$$e = 1 - \frac{T_B}{T_A},$$

onde a temperatura é a chamada temperatura absoluta e medida em Kelvin.

A eficiência acima é a melhor eficiência possível de uma máquina térmica, seu limite teórico.

Outra propriedade da máquina térmica reversível é que ela pode ser operada ao contrário. Um motor operando ao contrário é denominado um refrigerador. Se uma quantidade de trabalho  $W$  for realizada na máquina, então  $Q_B$  pode ser extraído do reservatório à temperatura mais baixa e depositado no reservatório à temperatura mais alta, de modo que a relação

$$Q_A = W + Q_B$$

continua valendo. Para um refrigerador, a Figura 3 continua valendo, apenas agora todas as flechas (que simbolizam os fluxos de calor e trabalho) são invertidas. Mais à frente, vamos descrever com detalhes o funcionamento de um refrigerador real, um aparelho de ar condicionado.

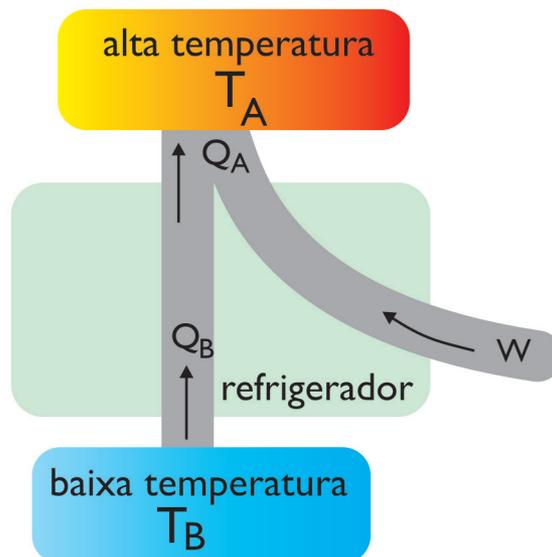


Figura 4: Diagrama de um refrigerador. Calor  $Q_B$  é extraído do reservatório térmico à temperatura baixa. Ele e o trabalho  $W$  são depositados no reservatório térmico a alta temperatura.

### Eficiência de um automóvel

Suponha que o motor de um automóvel tenha eficiência de 20% e que produza em média 15000J de trabalho mecânico por segundo, quando está em operação. Calcule quanto calor tem de ser fornecido ao motor por segundo e quanto calor é desperdiçado. Observe que aqui a “fonte quente” é o combustível do motor, queimando nas válvulas, e a fonte fria é o ar externo ao motor.



Anote suas respostas em seu caderno

## Seção 3

### Entropia e a segunda lei

Vamos agora discutir o conceito de entropia. De forma bem qualitativa, vamos identificar entropia como desordem. Se compararmos a matéria e a energia num gás com a matéria e a energia num cristal, vemos que a entropia é alta num gás e baixa num cristal: o gás é mais desordenado.

A entropia vai quantificar a “qualidade” da energia disponível. Energia sob uma forma ordenada e energia térmica não são iguais. Pode-se facilmente converter energia ordenada em energia térmica, mas o contrário é bem mais complicado. Por exemplo, se queimarmos um tronco de madeira, convertemos a energia química de ligação das moléculas em energia térmica das moléculas, mas é claro que recriar o tronco a partir da energia térmica das moléculas é impossível, embora esteja de acordo com a lei de conservação da energia.

Dessas observações pode-se afirmar que a entropia de um sistema isolado jamais decresce. Usualmente, a entropia é representada pela letra S.

A definição matemática de entropia é a seguinte:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T},$$

ou seja, a variação da entropia num certo processo é dada pela quantidade de calor fornecida de modo irreversível dividido pela temperatura (kelvin).

Se imaginarmos uma biblioteca bem silenciosa, ela pode representar um sistema de baixa temperatura com pouco movimento térmico desordenado. Em oposição, uma rua cheia de carros barulhentos vai representar um sistema de alta temperatura, com muito movimento térmico desordenado. Se pensarmos num espirro como sendo uma transferência de energia na forma de calor, vemos que a ação do espirro na biblioteca é muito maior no sentido de aumentar a desordem do que a ação do espirro na rua barulhenta. Observe que essa conclusão está de acordo com a fórmula acima: a mesma quantidade de calor trocada produz mais entropia onde a temperatura é menor.

Agora vamos pensar num outro exemplo. Suponha que você queira resfriar sua casa (que está na temperatura  $T_A$ ), usando um lago cuja água está fria na temperatura  $T_B$ ). Bombeando a água do lago para um recipiente na sua casa – por exemplo, a banheira – ela seria aquecida e retornada ao lago. Assim você estaria transferindo calor para o lago. E como fica o balanço de entropia? A entropia da sua casa diminui, pois o calor está saindo dela a uma temperatura mais alta (na fórmula anterior, o calor é negativo quando sai e portanto a variação de entropia também). Mas a variação de entropia do lago é positiva, pois o mesmo calor que saiu da casa é transferido para o lago que está a uma temperatura menor e, portanto, a sua variação de entropia será maior (mesmo numerador e denominador menor):

$$\Delta S_{casa} = \frac{-\Delta Q}{T_A} \text{ e } \Delta S_{lago} = \frac{\Delta Q}{T_B}.$$

Aqui ilustramos um aspecto importante da entropia: ela pode diminuir num determinado sistema (aqui: a casa), mas tem de aumentar no universo como um todo (aqui: casa e lago).

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{casa} + \Delta S$$

Observe que calor é trocado (quanto de calor a casa perde o lago ganha) e estamos supondo que nenhum calor é trocado com o ar (estamos simplificando bastante o problema). Como o calor é o mesmo e as temperaturas são diferentes, a entropia sempre cresce, pois o calor sempre flui de um lugar (ou um corpo) com temperatura maior para outro de temperatura menor. Sendo o calor o mesmo, a entropia sempre cresce!

Assim, uma outra forma de enunciar a segunda lei da termodinâmica é a seguinte:



Nenhum processo é possível no qual a entropia do universo decresça, quando todos os sistemas que participam do processo são levados em conta.

### Cálculo da entropia

Calcule a variação de entropia num processo simples. Suponha que um quilograma de gelo a  $0^{\circ}\text{C}$  seja derretido e convertido em água a  $0^{\circ}\text{C}$  também. Calcule a variação em entropia, supondo que o processo seja reversível. O calor de fusão da água é  $L_f = 3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$ .



Anote suas respostas em seu caderno

## Seção 4

### Um exemplo de máquina térmica: o aparelho de ar condicionado

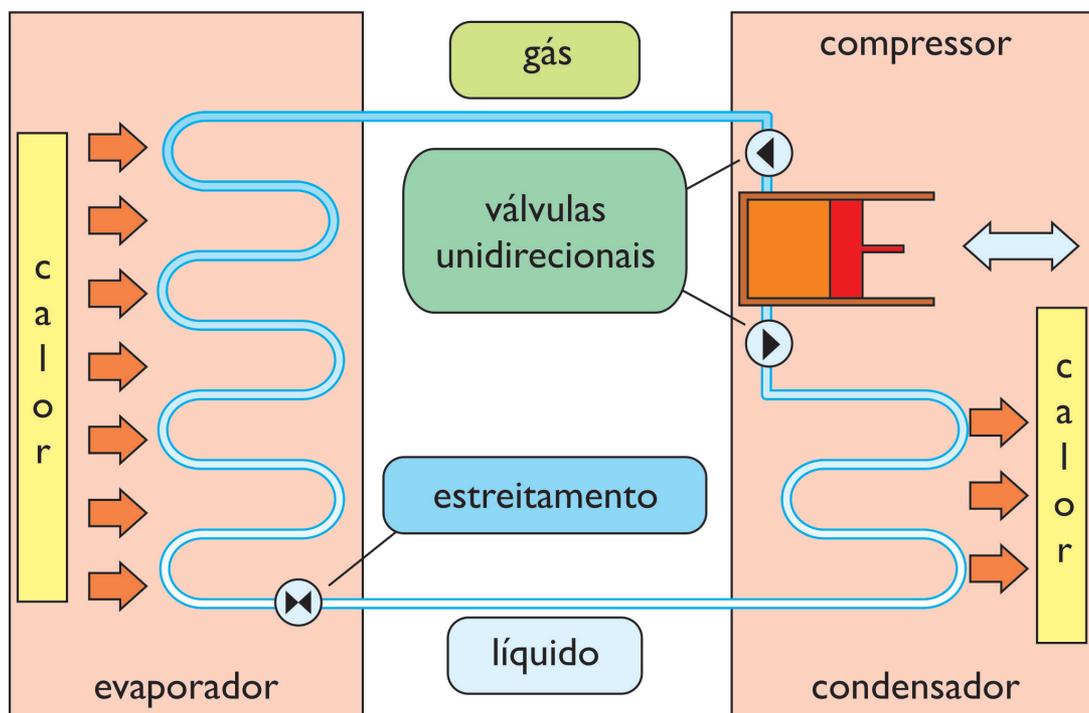


Figura 5: Esquema de um aparelho de ar condicionado. Ele é projetado para transferir calor de uma região mais fria para outra mais quente.

Vamos discutir em detalhe o funcionamento de uma máquina térmica: um aparelho de ar condicionado. Esse aparelho transfere calor de um corpo frio (seu quarto) para um corpo quente (o exterior da casa). Se lembrarmos o exemplo do lago, aqui parece que ocorre algo estranho. O calor sai de um corpo a temperatura mais baixa (ou seja, grande entropia) e é transferido para um corpo a temperatura mais alta (baixa entropia). Lembre que a temperatura está no denominador e o calor é o mesmo nos dois ambientes. Neste caso, parece que a entropia do universo diminuiu! Mas isso não é possível. Na realidade, temos de contar o aumento de entropia devido ao consumo de energia pelo ar condicionado (na Figura 4, o trabalho que é realizado no refrigerador pelo compressor, como veremos em seguida).

Conforme a Figura 5, o aparelho de ar condicionado possui três componentes fundamentais: o evaporador, o condensador e o compressor. O condensador fica na parte de fora do quarto (ou ambiente que se deseja esfriar), assim como o compressor, já o evaporador fica no interior do recinto que será resfriado.

Na serpentina, mostrada na figura, corre um fluido (denominado fluido de trabalho) que se liquefaz no condensador e se evapora no evaporador e nesse processo absorve calor no interior do quarto (no evaporador) e o transfere para fora (no condensador). Como discutido anteriormente, a transferência de calor de um corpo mais frio (o quarto) para um mais quente (o exterior do quarto) só é possível porque o compressor fornece a energia necessária para que o balanço de entropia seja o correto.

O evaporador é basicamente um longo cano de metal (bom condutor de calor e parecido com uma serpentina) por onde circula o fluido de trabalho. Sempre que esse fluido estiver mais frio que o ambiente (dentro do quarto) ele vai absorver calor (conforme a Figura 5).

Durante o processo de funcionamento do ar condicionado, o fluido sai do condensador como um líquido a alta pressão e temperatura próxima à temperatura do exterior do quarto. Ao passar por um estreitamento do cano que impede o fluxo do fluido, sua pressão cai muito (depois do estreitamento). Essa queda brusca de pressão, ocasionada pela passagem no estreitamento, faz com que o líquido se evapore ao entrar no evaporador.

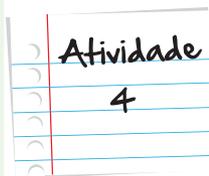
Ao evaporar dentro do cano, o fluido fica bem mais frio, pois para que as moléculas do líquido se separem ele necessita absorver energia térmica. Esse gás frio esfria o evaporador e o calor do interior do quarto é absorvido por ele. O fluido de trabalho sai do evaporador na forma de um gás a baixa pressão e se encaminha pelo cano para o compressor (na Figura 5, a parte de cima da serpentina).

O compressor então recebe esse fluido como um gás a baixa pressão e o comprime de modo que sua densidade fique muito maior. A compressão requer que haja trabalho e é nesse momento que o ar condicionado aumenta a sua conta de eletricidade. No processo de compressão o gás aumenta muito a sua temperatura. Ele a seguir vai para o condensador, que nada mais é do que um longo cano de metal na forma de serpentina (algo como o que se vê atrás da geladeira). Aqui o calor do fluido de trabalho é transferido para o meio ambiente, fora do quarto. O condensador está na temperatura ambiente e o fluido de trabalho se condensa de novo e volta a ser líquido. Quando o fluido de trabalho sai do condensador ele está na forma de um líquido frio a alta pressão.

## Ar condicionado e o enunciado da segunda lei

Um aparelho de ar condicionado viola a segunda lei como enunciada por Clausius?

Justifique.



Anote suas respostas em seu caderno



### A seta do tempo

Um aspecto muito interessante da segunda lei da termodinâmica é que ela especifica em que direção o tempo flui. Imagine que você esteja assistindo a um filme no qual todos os pedaços de um vaso que caiu no chão se juntam para formar o vaso de novo. Imediatamente, você percebe que o filme está rodando ao contrário. Este seria um processo típico no qual a segunda lei seria violada, ou seja, a entropia do universo diminuiria. Muitos outros processos semelhantes poderiam ser mencionados. Eles são impossíveis (ou melhor,

dizendo incrivelmente improváveis) no universo. É por isso que se diz que a segunda lei da termodinâmica fornece a "seta do tempo". Todos os processos que acontecem fazem com que a entropia do universo aumente.



## Resumo

Vimos as várias formulações da segunda lei. Definimos o conceito de entropia, que de forma bem qualitativa pode ser relacionado ao grau de desordem de um sistema. A entropia sempre cresce (ou, na melhor das hipóteses, fica constante) no universo. O exemplo de máquina térmica estudado foi um aparelho de ar condicionado, que transfere calor de um ambiente frio para um ambiente quente.

## Veja Ainda

### O choro da energia abandonada

A primeira lei da termodinâmica expressa algo que aprendemos ainda no Ensino Fundamental: a energia conserva-se. Eis um pequeno enunciado com grandes implicações sociais, econômicas e... biológicas.

A revolução industrial precisava converter calor (energia) em trabalho das máquinas para mover pistões, fábricas e trens. O engenheiro e físico francês Sadi Carnot (1796-1832) mostrou a ineficiência intrínseca dessa conversão: um motor transforma calor em trabalho, mas uma fração da energia é sempre perdida nessa transformação. Ou seja, é impossível construir uma máquina 100% eficiente.



Figura 6: Sadi Carnot.

Essa impossibilidade é consequência da segunda lei da termodinâmica – cujas implicações são ainda mais impactantes que as da primeira: corpos quentes esfriam-se, mas corpos frios não se esquentam espontaneamente; uma gota de tinta que cai na água se espalha e jamais se reagrupa. Essa assimetria da natureza tem uma implicação funesta para os seres vivos: o tempo corre sempre para frente.

### Funesto

lamentável, infeliz, cruel, aterrador.

A segunda lei pode ser enunciada em termos de entropia, fenômeno que pode ser entendido como o grau de desorganização de um sistema: os estados de entropia alta de um sistema (perda de calor e tinta espalhada, em nossos exemplos) são mais prováveis que os de entropia baixa (corpo se aquecendo e tinta reagrupada).

Lição da segunda lei: a entropia sempre cresce no universo.

Mas, em partes do universo (ou de outro sistema qualquer), a entropia pode diminuir. Vejamos: o Sol é uma fonte quente em um fundo frio e isso torna possível o uso de sua energia. A luz solar, em temperatura alta (entropia mais baixa), é absorvida pelas plantas, que fazem fotossíntese e baixam sua entropia. A energia é, depois, irradiada de volta ao espaço, em temperatura mais baixa (maior entropia).

Assim, a Terra basicamente não absorve energia do Sol, mas sim a usa para baixar sua entropia: comemos as plantas – ou animais que as comem – e respiramos o oxigênio que elas produzem e, com isso, baixamos nossa entropia. Em outras palavras, mantemo-nos organizados.



Figura 7: A segunda lei, desde o meio do Século XIX, perturba cientistas, filósofos e inspira visões pessimistas sobre o futuro: o universo, em média, se dissipa, se desorganiza, inexoravelmente. “O fim do mundo para completar uma evolução inevitável: esse é o Crepúsculo dos Deuses. A doutrina da entropia é a versão última não religiosa do mito”, escreveu o historiador e filósofo alemão Oswald Spengler (1880-1936), em O declínio do Ocidente, no qual devota um capítulo à entropia.

Hoje, a segunda lei é um dos pilares da física e um conceito fundamental para químicos, engenheiros e bioquímicos, entre outros.

O poeta brasileiro Augusto dos Anjos (1884-1914), em trecho de “O lamento das coisas”, traz sua versão da segunda lei: “Ouço, em sons subterrâneos, do Orbe oriundos / O choro da Energia abandonada! / É a dor da Força

desaproveitada / – O cantochão dos dínamos profundos, / Que, podendo mover milhões de mundos, / Jazem ainda na estática do Nada!”

Adaptado de texto do autor publicado originalmente na revista Ciência Hoje, 294, Julho de 2012.



### Atividade 1

- A) Um choque elástico é reversível, foi o exemplo das bolas de bilhar citado no texto.
- B) Um choque inelástico não é reversível, pois um tanto da energia cinética das bolinhas foi utilizada para aquecer e deformar a massa de moldar. Um filme da colisão passado ao contrário mostraria duas bolas grudadas que se separariam de forma espontânea, claramente algo que não acontece.
- C) O processo é reversível pois a força causada pelo gás no interior do pistão é balanceada pela força externa (as pressões são quase iguais). Assim, o gás se expande lentamente, sem trocar calor com o ambiente externo, e pode ser comprimido de volta da mesma forma.
- D) A expansão livre de um gás não é um processo reversível, pois não é um processo onde haja transformações infinitesimais.

### Atividade 2

Da expressão

$$e = \frac{W}{Q_A},$$

podemos calcular  $Q_A$ , pois temos  $W = 15000 \text{ J}$  e  $e = 0,2$ . Assim  $Q_A = 75000 \text{ J}$  por segundo.

Sabemos também que  $Q_A - Q_B = W$ , portanto  $Q_B = 60000 \text{ J}$  por segundo.

### Atividade 3

Temos que calcular o calor absorvido pelo gelo. Da aula anterior, temos que  $\Delta Q = mL_f$ , ou seja, como  $m = 1\text{kg}$ ,  $\Delta Q = 1 \times 3,34 \times 10^5 = 3,34 \times 10^5\text{J}$ . Daí, como  $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{3,34 \times 10^5}{273} = 1,22 \times 10^3\text{ J/K}$ .

Observe que a temperatura absoluta deve ser sempre utilizada nos cálculos de entropia. A temperatura na qual o gelo derrete ( $0^\circ\text{C}$ ) é  $273\text{ K}$ .

### Atividade 4

Clausius enunciou a segunda lei com a afirmação de que o calor não flui espontaneamente de um corpo frio para o um corpo quente. Num aparelho de ar condicionado o compressor (que é um pequeno motor) força essa transferência, que não é espontânea. Sendo assim, um aparelho de ar condicionado não viola a segunda lei como enunciada por Clausius.



### Bibliografia

- Hewitt, Paul G. Física Conceitual. Bookman, Porto Alegre, 2000.
- Cassidy, David; Holton, Gerald; Rutherford, James. Understanding Physics. Springer, 2002.
- Giancoli, D. C. Physics, Principles with Applications. 6a. Edição, Prentice Hall, 2005.
- Atkins, P. The Laws of Thermodynamics - A very short introduction, Oxford University Press, 2010.

### Imagens



• André Guimarães



• <http://www.sxc.hu/photo/456134>.



• <http://www.sxc.hu/photo/1344508>



• <http://www.sxc.hu/photo/32647>



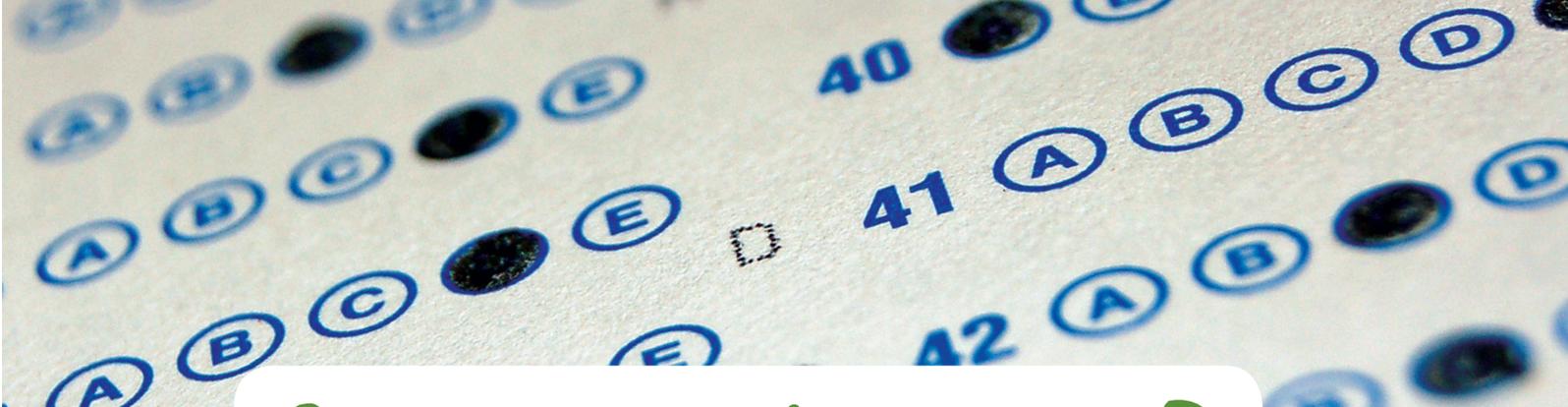
• <http://www.sxc.hu/photo/1396991>



• [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sadi\\_Carnot.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sadi_Carnot.jpg)



• <http://www.sxc.hu/photo/517386> • David Hartman.



# O que perguntam por aí?

## Questão 1 (Enem 2011)

Um motor só poderá realizar trabalho se receber uma quantidade de energia de outro sistema. No caso, a energia armazenada no combustível é, em parte, liberada durante a combustão para que o aparelho possa funcionar. Quando o motor funciona, parte da energia convertida ou transformada na combustão não pode ser utilizada para a realização do trabalho. Isso significa dizer que há vazamento da energia em outra forma. CARVALHO, A. X. Z. *Física Térmica*. Belo Horizonte: Pax, 2009 (adaptado).

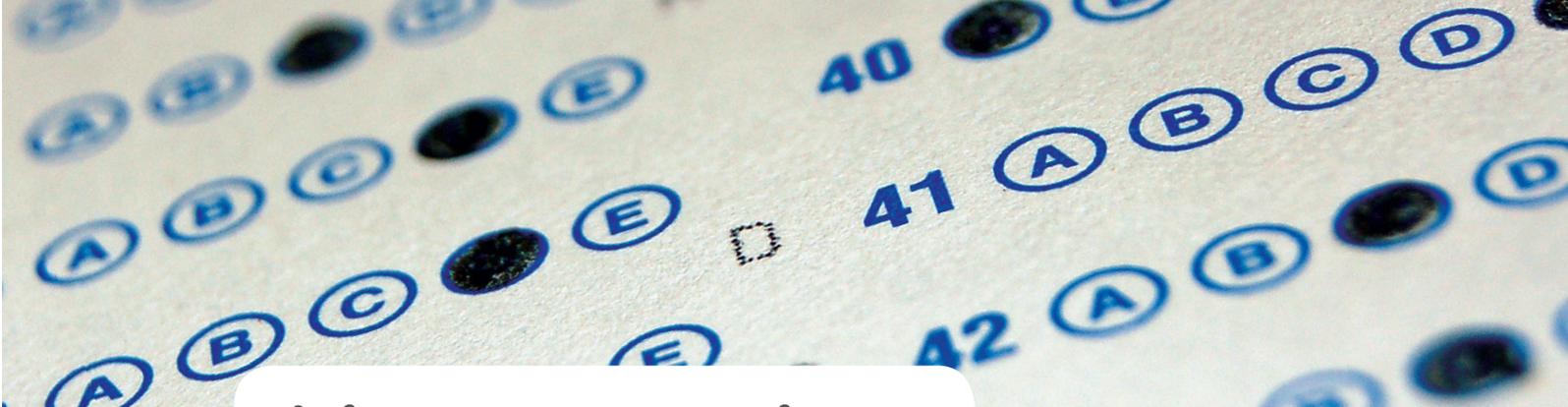
De acordo com o texto, as transformações de energia que ocorrem durante o funcionamento do motor são decorrentes de:

- a) a liberação de calor dentro do motor ser impossível.
- b) a realização de trabalho pelo motor ser incontrolável.
- c) a conversão integral de calor em trabalho ser impossível.
- d) a transformação de energia térmica em cinética ser impossível.
- e) a utilização de energia potencial do combustível ser incontrolável.

## Gabarito

1. Letra C. Como vimos, não é possível ser construída uma máquina perfeita, cuja eficiência seja de 100%. A conversão total de calor em trabalho é até possível mas não numa máquina que opera ciclicamente. A máquina sempre vai desperdiçar QB.





# Atividade extra

## Questão 1

Uma máquina térmica retira calor de uma fonte quente, utilizando parte desse calor na realização de trabalho e liberando o calor restante para uma fonte fria.

Esse processo ocorre devido à:

- a. conservação da energia no sistema;
- b. diminuição da energia interna;
- c. manutenção do equilíbrio térmico;
- d. variação da entropia na máquina.

## Questão 2

Em uma panela de pressão, usada para cozimento de alimentos, existe uma válvula que gira quando a temperatura no interior da panela aumenta em função da energia recebida da chama do fogão. Essa válvula possui furos convenientemente instalados que fazem com que o vapor aquecido saia tangencialmente, fazendo-a girar.

Esse fenômeno ocorre devido à:

- a. dilatação térmica da válvula;
- b. diminuição da pressão no interior da panela;
- c. transferência de calor da chama para a válvula;
- d. transformação do calor em trabalho.

### Questão 3

A cada ciclo, uma máquina térmica extrai 45000 J de calor da sua fonte quente e descarrega 36000 J de calor na sua fonte fria.

O rendimento máximo, em porcentagem, que essa máquina pode ter é de:

- a. 20;
- b. 25;
- c. 80;
- d. 100.

### Questão 4

Um motor de avião consome 10.000 J de calor e realiza 3000 J de trabalho mecânico por ciclo.

O rendimento do motor é de:

- a. 45 %;
- b. 60 %;
- c. 70 %;
- d. 90 %.

### Questão 5

Uma máquina térmica realiza, em cada segundo, quatro ciclos. Em cada ciclo, a máquina recebe 1000J da fonte quente e cede 600J para a fonte fria.

Qual a eficiência da máquina?

# Gabarito

## Questão 1

- A**   **B**   **C**   **D**

## Questão 2

- A**   **B**   **C**   **D**

## Questão 3

- A**   **B**   **C**   **D**

## Questão 4

- A**   **B**   **C**   **D**

## Questão 5

Temos  $Q_1 = 1000 \text{ J}$  e  $|Q_2| = 600 \text{ J}$

O rendimento a cada ciclo é dado por:  $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

Logo,  $\eta = 1 - \frac{600}{1000}$

Então,  $\eta = 0,4 = 40\%$

