

# MÉTODOS E EQUIPAMENTOS PARA AQUECER (TRANSFERÊNCIA DE CALOR) E RESFRIAR OS ALIMENTOS

Prof. Dr. Sergio Oliveira Moraes

Disciplina: LEB0140 – Física

## 1) Introdução:

Já passamos por situações do tipo: 1) o bolo que está no forno a gás está assado ou não; 2) queimar a boca com uma batata quente, quando o restante do cozido não produz a mesma sensação.

O que essas situações têm em comum, além de se referirem a alimentos, é que envolvem dois conceitos distintos mas facilmente confundidos no dia a dia: calor e temperatura. Os dois não são sinônimos!

Começemos pela primeira situação: “o bolo que está no forno a gás está assado ou não”

Já vimos ou fizemos o teste de pegar um palito de dentes ou um garfo, abrir a tampa do forno e espetar o objeto na massa que está assando. Retiramos a mão, fechamos a porta e observamos o objeto e se estiver com massa grudada, ainda falta um pouco, caso contrário o bolo está assado! Salvo um descuido, que já veremos, não queimamos a mão na operação. Bem, as paredes do forno estão a, por exemplo, 180° C (lê-se 180 graus Celsius), o ar em seu interior também, o mesmo acontecendo com o bolo, a forma. E a nossa mão está a, por exemplo, 36,5° C !

Voltando ao descuido, aí de nós se encostarmos o dedo na forma do bolo! Ela está a 180° C, nosso dedo a 36,5° C, mas a dor que sentiremos da queimadura....

A segunda situação: “queimar a boca com uma batata quente, quando o restante do cozido não produz a mesma sensação”, até deu origem à expressão: “passar a batata quente para fulano”, e ocorre com dado alimento (no exemplo a batata) que mesmo estando à mesma temperatura que os demais produtos (por exemplo a carne do cozido) do preparado, não nos queimam como a batata!

Falando agora de maneira genérica, as duas situações nos mostram que temperatura elevada (paredes e ar do forno, forma e bolo a 180° C) não necessariamente significa queimadura e mesma temperatura, também não significa que as queimaduras terão a mesma intensidade (batata e carne do cozido). Poderíamos apresentar outros exemplos, mas o que está por trás das situações é a diferença entre “calor” e “temperatura”.

## 2) Calor, uma forma de energia

Dizer que “calor” é uma forma de energia<sup>1</sup>, não satisfaz totalmente pois permanece a dúvida, o que é “energia”. Embora a física atual ignore o que é energia (Feynman, 1999), vamos adotar Hémyery, Debeir e Deléage, 1993 (que por sua vez seguiram C. Bienvenu) e definir *energia: algo, que se deve fornecer a um sistema material, ou retirar dele, para transformá-lo ou deslocá-lo*. Cremos que a definição mais encontrada: “energia é capacidade de realizar trabalho”, não esclarece, por exemplo, casos que nos interessam como uma panela no fogo, um prato no forno a microondas, nos quais não ocorre trabalho, mas energia é transferida....ou seja, o sistema material (a água numa panela, por exemplo) é *transformado* (sua temperatura passa de 22° C para 80° C).

Mas e o trabalho, como “entra na história”? vamos defini-lo: *Trabalho é uma maneira de transferir energia para um sistema, aplicando-se uma força ao sistema e causando um deslocamento do ponto de aplicação da força*. Ou seja, trabalho envolve a mudança de posição de um objeto no espaço e poderíamos aquecer a água, colocando-a num recipiente fechado e agitando-a, mas não seria um modo prático de fazer um cafezinho...

E calor?

---

<sup>1</sup> Outras formas seriam: energia gravitacional, energia cinética, energia elástica, energia elétrica, energia química, energia radiante, energia nuclear, energia da massa. No Sistema Internacional de Unidades, trabalho, energia são expressos em Joule (J). Outra unidade bastante utilizada é a caloria (cal, 1cal=4,18J ) ou seu múltiplo 1kcal (1kcal=1000cal) e comumente os produtos alimentícios utilizam Cal, sendo 1Cal=1kcal.

*Calor é um método para transferir energia para um sistema em virtude de uma diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança e escoar de um ponto à temperatura mais alta para outro à temperatura mais baixa. Em termos moleculares, calor é a transferência de energia que se aproveita do movimento caótico das moléculas, isto é, é um método de transferir energia por meio de colisões microscópicas.*

Bem, agora ficou mais fácil definir a temperatura: *Temperatura é a propriedade que nos informa o sentido do fluxo<sup>2</sup> de calor. Se a energia passa de A para B quando os dois corpos estão em contato, dizemos que a temperatura de A é mais elevada que a de B. A temperatura é a propriedade que nos diz se dois corpos estão em equilíbrio térmico, se forem postos em contato. O equilíbrio térmico é atingido quando não há qualquer mudança de estado nos dois corpos A e B. Microscopicamente, a temperatura é proporcional à energia cinética média dos átomos ou moléculas de um corpo, quanto mais alta a temperatura, maior a agitação dos átomos ou moléculas.*

Duas observações muito importantes sobre temperatura:

A temperatura é uma propriedade intensiva de um corpo, isto é, quando a medimos ela é a mesma não importando se a medimos em uma parte do corpo ou em sua totalidade (supondo que a temperatura seja uniforme no corpo). Como a **temperatura** é independente da massa do corpo, ela **não nos informa qual é a quantidade de energia** nele contida.

Mas vamos ver se estamos acompanhando, a partir de uma receita do “site” Panelinha – Receitas que Funcionam

<[http://panelinha.ig.com.br/site\\_novo/home/](http://panelinha.ig.com.br/site_novo/home/)>

## **Bolo delícia de limão**

*Para a massa*

*Ingredientes*

3 xícaras (chá) de farinha de trigo  
 2 colheres (chá) de fermento em pó  
 1/2 colher (chá) de sal  
 200 g de manteiga em temperatura ambiente  
 2 xícaras (chá) de açúcar  
 4 ovos  
 1 xícara (chá) de leite  
 raspas de 2 limões  
 manteiga e farinha de trigo para untar e polvilhar

*Modo de Preparo*

1. *Preaqueça o forno a 180°C (temperatura média).* Unte uma fôrma redonda ou de pudim com manteiga e polvilhe com farinha de trigo.
2. Passe pela peneira a farinha, o fermento e o sal. Reserve.
3. Na batedeira, bata a manteiga até que fique fofo. Adicione o açúcar e bata apenas para misturar. Junte os ovos, um a um, batendo bem entre cada adição. Diminua a velocidade e adicione os

---

<sup>2</sup> Fluxo trás a idéia de movimento de matéria ou energia no tempo, semelhante à vazão. Assim falamos em fluxo de veículos em uma estrada, de água em um rio, de calor em um forno, etc, sempre pensando na quantidade de matéria ou energia que atravessa uma superfície imaginária perpendicular, na unidade de tempo. Quando o fluxo é de energia, a unidade é o Watt (1W=1J/1s, ou seja se eu compro uma lâmpada de 60W (L<sub>1</sub>), significa que ela produz um fluxo de 60J de energia em cada segundo. Uma lâmpada mais “forte”, de 100W (L<sub>2</sub>) produzirá um fluxo de 100J de energia em cada segundo e portanto gastará mais energia, se permanecerem o mesmo tempo ligadas. Imagine então que cada lâmpada permaneça ligada uma hora por dia durante 30 dias: para a lâmpada L<sub>1</sub> (60W), o consumo mensal será: 60 W x 30 dias x 1h/dia, “acertando” as unidades: Consumo de L<sub>1</sub>= 60W x 30horas= 1800 Wh= 1,8kWh; Consumo de L<sub>2</sub>= 100W x 30 dias x 1h/dia= 3000Wh= 3kWh.

ingredientes peneirados aos poucos, alternando com o leite. A cada adição, bata apenas para misturar.

4. Desligue a batedeira, adicione as raspas de limão, misture com uma espátula e transfira para a fôrma. Nivele a massa girando a fôrma rapidamente sobre a mesa.

5. Leve ao forno preaquecido e deixe assar por aproximadamente 45 minutos. Espete um palito no bolo para verificar o ponto. Se o palitinho sair sujo de massa, deixe assar mais um pouco. Depois de assado, retire o bolo do forno e deixe esfriar por mais 5 minutos.

6. Num prato grande, desenforme o bolo e espalhe o glacê com uma colher. Se quiser, decore com fatias bem finas de limão e sirva a seguir.

*Para o glacê*

*Ingredientes*

1/3 xícara (chá) de suco de limão peneirado 2/3 xícara (chá) de açúcar

*Modo de Preparo*

*Enquanto o bolo esfria*, numa tigelinha misture bem o suco de limão e o açúcar. Reserve.

Interpretando:

- 1) 200 g de manteiga em temperatura ambiente: significa que se a manteiga estava no compartimento de frios e laticínios da geladeira, ela estava em equilíbrio térmico com tudo o que se encontrava nesse compartimento, isto é, todos os alimentos ali guardados estavam à, por exemplo, 6 °C. Ao ser retirada da geladeira, a manteiga deverá atingir novo equilíbrio térmico (novo estado), agora com o interior da cozinha, que pode estar, por exemplo, a 22 °C. Como ela conseguirá isso? Ocorrerá um fluxo de calor (energia térmica), do interior da cozinha para a manteiga<sup>3</sup>, até que tudo esteja a 22 °C!!!
- 2) Preequeça o forno a 180°C (temperatura média): significa que inicialmente seu forno estava (supondo que você não o havia utilizado um pouco antes) em equilíbrio térmico com a cozinha (isto é com o ar, fogão, mobília, ...), ou seja 22 °C. Aí você o liga, significa, aciona uma fonte de energia térmica e espera até que novo equilíbrio térmico ocorra, agora no sistema isolado<sup>4</sup> forno;
- 3) Leve ao forno preaquecido e deixe assar por aproximadamente 45 minutos: significa que o interior do forno, isto é paredes e o ar em seu interior atingiram a temperatura desejada de 180°C;
- 4) Enquanto o bolo esfria: significa que novo equilíbrio térmico terá ocorrido, agora entre bolo e cozinha.

Esperamos ter ficado clara a diferença entre temperatura e calor: quando há diferença de temperatura e as fronteiras do sistema permitem (não é um sistema isolado), há transferência de energia na forma de calor (energia térmica) e o sistema muda seu estado. Mas o que significa *mudar de estado*? Nem sempre é mudar a temperatura....

---

<sup>3</sup> Mais corretamente, ocorrerá fluxo de energia térmica (calor) da manteiga (6 °C) para o ar, móveis, paredes, enfim de todos os objetos da cozinha e, reciprocamente fluxos de todos os objetos (22 °C), em direção à manteiga. O balanço de energia levará ao aquecimento da manteiga, até atingir a temperatura de 22 °C, no equilíbrio térmico. Mais a frente, veremos as formas de transferência de calor entre objetos à temperaturas distintas, e que contribuem para o fluxo.

<sup>4</sup> Um sistema isolado é um sistema no qual não ocorrem transferências de energia através da fronteira. Assim, a energia no sistema isolado é conservada. Um forno ideal seria um sistema isolado, isto é, não trocaria a energia térmica produzida em seu interior pelas chamas do gás em combustão, com a energia térmica do ar em seu entorno...Inversamente, se um refrigerador fosse um sistema isolado, não ganharia energia térmica do exterior, quando estivesse com a porta fechada...

### 3) Mudança de Estado, Temperatura, Calor e Alimentos

(Termodinâmica - Y.A. Çengel & M.A. Boler McGraw Hill)

Quando adicionamos calor ( $Q$ ) a uma substância e ocorre um aumento na sua temperatura, a seguinte relação é observada para a variação de temperatura ( $\Delta T$ ):

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

onde:  $Q$  = quantidade de calor adicionada ou removida (J ou cal);

$m$  = massa da substância (kg ou g);

$\Delta t$  = variação de temperatura (K ou °C)

$c$  = calor específico da substância (J/(kg°C) ou cal/(g °C))<sup>5</sup>

(outras unidades são possíveis para as variáveis  $Q$ ,  $m$ ,  $\Delta t$  e  $c$ , mas as indicadas entre parênteses são mais comuns)

A tabela 1 mostra alguns valores de calor específico para substâncias comuns, evidenciando que a mesma massa de substância diferentes, ao receberem (ou perderem) a mesma quantidade de calor, sofrerão diferentes  $\Delta T$ 's, em função de seus calores específicos:

Tabela 1 – Calores Específicos de Algumas Substâncias a 25,0 °C e 1 atmosfera de pressão.

Substância	Calor Específico, c	
	cal/(g°C)	J/(kg°C)
Água (15°)	1,00	4186
Alumínio	0,215	900
Ferro	0,107	448
Cobre	0,0924	387
Vidro	0,200	840
Gelo (-5,0°C)	0,50	2090
Rocha	0,201	840
Vapor d'água	0,480	2009,3
Silício	0,168	703
Madeira	0,41	1700
Aço inoxidável	0,116	486

O calor específico pode ser visualizado como a capacidade de armazenamento térmico de um corpo. Assim, o recipiente de alumínio de uma marmita pode se resfriar muito mais rapidamente do que seu conteúdo, que normalmente é rico em água.

Vamos a um exemplo:

Suponhamos que queremos elevar a temperatura de 600g de água, que se encontra à temperatura ambiente de 22 °C até 80 °C. Colocamos a água em uma panela de alumínio (também com massa igual a 600g) que está à mesma temperatura ambiente (afinal estão em equilíbrio...) e levamos ao fogo. Quantas calorias devemos fornecer?

<sup>5</sup> O calor específico é definido como a energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em 1o C. Então, dizer que o calor específico da água é 4186 J/(kg °C) , significa dizer que são necessários 4186 J (cerca de 997cal) para elevar a temperatura de 1 kg de água em 1o C. É uma propriedade muito importante dos materiais (juntamente com a condutividade térmica que será vista mais adiante)e muito utilizada na Ciência do Alimento, por exemplo, o calor específico do aço inox é 486 J/kg oC, e da madeira 1700 J/kg oC, ou seja entre duas colheres de mesma massa, para “mexer” a panela, a de madeira precisa de muito mais energia para sofrer a mesma variação de temperatura e portanto é a preferida, quando não há implicações de higiene.

**Resolução:**

Trata-se de aplicar a equação  $Q = mc\Delta T$ , eq. 1 e Tabela 1, para a água e o alumínio (temos que ter o cuidado de tapar a panela e supor que de toda energia fornecida para o sistema panela + água, nada é perdido para a vizinhança, isto é, grade do fogão, ar da cozinha, etc.).

Para a água temos:  $Q_{ág} = 0,6\text{kg} \times 4186 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C}) \times (80-22) ^\circ\text{C}$

Então  $Q_{ág} = 145\,672,8 \text{ J} = 34\,800 \text{ cal}$  (lembrando que  $1\text{cal} = 4,186\text{J}$ )

Para a panela de alumínio:  $Q_{Al} = 0,6\text{kg} \times 900 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C}) \times (80-22) ^\circ\text{C}$

Então  $Q_{Al} = 31\,320 \text{ J} = 7\,482,1 \text{ cal}$ .

O total de energia a ser fornecida para elevar a temperatura do sistema (panela + água) é de 42 282 cal ou aproximadamente 42kcal, sendo cerca de 83% devido ao aquecimento da água!

Nem sempre ao se adicionar calor a uma substância, sua temperatura irá mudar, poderá ocorrer mudança de fase. A quantidade de calor que deve ser adicionada a um líquido em seu ponto de ebulição, por unidade de massa, para que ele passe totalmente para a fase gasosa, **na mesma temperatura** é denominada calor de vaporização (ou calor latente de vaporização) do líquido (para a água, esse valor é de 2260 kJ/kg). A quantidade de calor que deve ser adicionada a um sólido, em seu ponto de fusão, por unidade de massa, para que ele passe totalmente para a fase líquida, **na mesma temperatura**, é denominada calor de fusão (ou calor latente de fusão) do sólido (para a água no estado sólido, esse valor é de 336 kJ/kg).

Se a mudança de fase ocorrer no sentido inverso, haverá a liberação de iguais quantidades de energia, respectivamente, isto é, caso ocorra mudança de fase no sentido oposto (vapor  $\rightarrow$  líquido ou líquido  $\rightarrow$  sólido), haverá liberação da energia inicialmente consumida nos respectivas mudanças de fase.

Lembrando que a temperatura é proporcional à energia cinética média dos átomos ou moléculas de um corpo, e que no caso da mudança de fase a temperatura não se altera, para que é utilizada a energia térmica fornecida? A resposta, pensando nas mudanças: sólido para líquido, líquido para gás, é que a energia térmica fornecida (calor) é utilizada para vencer as forças de atração entre os átomos e moléculas, isto é, mudar suas energias potenciais elétricas, permitindo que os átomos e moléculas se separem no sólido, para formar o líquido e se separem ainda mais para formar os gases. Quando as mudanças de estado ocorrem no sentido inverso, a energia térmica utilizada é devolvida ao meio, conforme exposto no parágrafo anterior.

Como não há variação de temperatura, a equação que permite o cálculo da energia térmica envolvida nas mudanças de fase é dada por:

$$Q = mh \quad (\text{J ou cal}) \quad (2)$$

sendo:  $Q$  = quantidade de calor adicionada ou removida (J ou cal);

$m$  = massa da substância (kg ou g);

$h$  = calor específico latente (J/kg ou cal/g).

- Exemplo1: Calcular a quantidade de calor ( $Q$ , kcal e J) fornecida a 1 kg de água, inicialmente a  $-20^\circ\text{C}$ , até atingir  $100^\circ\text{C}$ .

**Resolução:**

Inicialmente, fazendo um diagrama da variação da temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) em função do calor adicionado, obtemos algo semelhante ao esquema da Figural. Por êle destacamos 4 etapas: A) ocorre mudança da temperatura da água, de  $-20^\circ\text{C}$  até  $0^\circ\text{C}$ , portanto trata-se de calor sensível; B) a água muda do estado sólido para o líquido, sem alterar a temperatura, portanto trata-se de calor latente de liquefação; C) ocorre mudança da temperatura da água, no estado líquido, de  $0^\circ\text{C}$  até

100°C, portanto trata-se novamente de calor sensível; D) toda massa de água a 100°C passa para o estado de vapor, portanto calor latente de vaporização. Na etapa E, toda a água terá novamente a temperatura alterada, mas na fase de vapor.

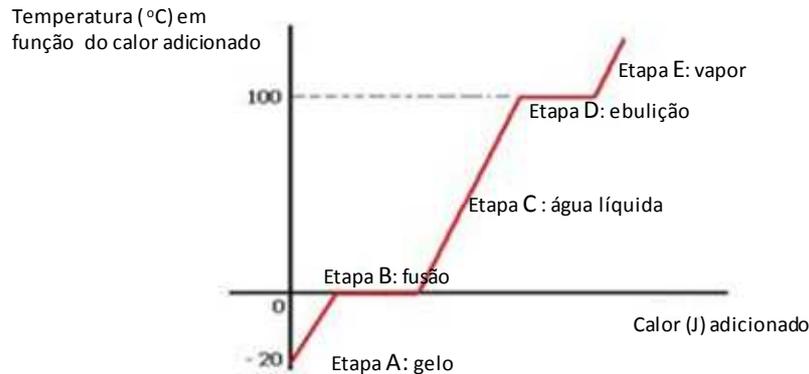


Figura 1 - Temperatura da água (°C) em função da quantidade de calor adicionado (J).

Etapa A) Por tratar-se de uma mudança de estado que envolve mudança de temperatura, utilizamos a equação 1:  $Q = mc\Delta T$ ,

Sendo:  $m = 1\text{kg}$ ,  $c = 2090(\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C})$ , assumido o calor específico da Tabela 1 e que permaneça constante em toda a faixa em que a água se encontra abaixo de  $0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}))$

Observe que estamos considerando a diferença entre a temperatura final,  $T_f = 0^\circ\text{C}$  e a temperatura inicial,  $T_i = -20^\circ\text{C}$ . Esta convenção tem a vantagem de fornecer um valor positivo para a quantidade  $Q$ , sempre que a temperatura final for maior que a inicial, indicando que o sistema, no caso a água, recebeu energia.

Fazendo as contas:

$$Q_A = 1\text{kg} \times 2090 (\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}) \times (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) = 41\,800\text{J};$$

Etapa B) Por tratar-se de uma mudança de estado que não envolve mudança de temperatura, utilizamos a equação (2):  $Q = mh$ ;

Sendo:  $m = 1\text{kg}$ ,  $h = 336 \text{ kJ}/\text{kg}$  (dado fornecido).

Fazendo as contas:

$$Q_B = 1\text{kg} \times 336 \text{ J}/\text{kg} = 336 \text{ J}$$

Etapa C) Por tratar-se de uma mudança de estado que envolve mudança de temperatura, utilizamos a equação 1:  $Q = mc\Delta T$ ,

Sendo:  $m = 1\text{kg}$ ,  $c = 4186 (\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C})$ ,  $\Delta T = (100^\circ\text{C} - (0^\circ\text{C}))$

Fazendo as contas:

$$Q_C = 1\text{kg} \times 4186 (\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}) \times (100^\circ\text{C} - (0^\circ\text{C})) = 418600 \text{ J};$$

Etapa D) Por tratar-se de uma mudança de estado que não envolve mudança de temperatura, utilizamos a equação (2):  $Q = mh$

Sendo  $m = 1 \text{ kg}$ ,  $h = 2260 \text{ kJ}/\text{kg}$ . Fazendo as contas:  $Q_D = 2260 \text{ kJ}$ . Portanto  $Q_{total} = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = 2720736 \text{ J}$  ou  $2,7 \text{ MJ}$ .

- Propriedades térmicas dos alimentos

A adequada refrigeração de alimentos não é uma tarefa simples pois sua estrutura, composição, propriedades térmicas e físicas podem variar durante o processo, dependendo também do tempo e temperatura! Frutas e vegetais continuam respirando durante o armazenamento, consumindo  $\text{O}_2$  e liberando  $\text{CO}_2$ , vapor d'água e energia térmica.

Dados os altos conteúdos de água dos frutos e vegetais, bem como os calores específico e latente da água terem valores comparativamente elevados ( Tabela 1), os calores específico e latente dos alimentos são calculados baseando-se apenas no seu conteúdo de água, de acordo com a equação de Siebel (com boa aproximação):

$$c_{\text{pfresco}} = 3,35a + 0,84 \quad (\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})) \quad (3)^6$$

$$c_{\text{pcong}} = 1,26a + 0,84 \quad (\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})) \quad (4)^6$$

onde  $c_{\text{pfresco}}$  e  $c_{\text{pcong}}$  representam os calores específicos dos alimentos antes e após o congelamento, respectivamente,  $a$  é a fração de água contida no alimento ( $a = 0,7$  se o conteúdo de água for 70%) e a constante  $0,84 \text{ kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$  representa o calor específico da fração sólida do alimento.

Para os calores específicos de frango fresco e congelado, cujo conteúdo de água é de 74% tem-se:

$$c_{\text{pfresco}} = 3,35a + 0,84 + 3,35 \times 0,74 + 0,84 = 3,32 \text{ kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$$

$$c_{\text{pcong}} = 1,26a + 0,84 = 1,26 \times 0,74 + 0,84 = 1,77 \text{ kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$$

(Termodinâmica - Y.A. Çengel & M.A. Boler McGraw Hill)

O **calor latente** do produto alimentício durante o congelamento ou descongelamento (calor latente de fusão) também depende do conteúdo de água presente no alimento e pode ser calculado por:

$$Q_{\text{latente}} = 334a \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (5)$$

onde  $a$  é a fração do conteúdo de água e  $334 \text{ kJ}/\text{kg}$  corresponde ao calor latente de solidificação da água durante o congelamento a  $0^{\circ}\text{C}$  e à pressão atmosférica.

Para o frango do exemplo acima:

$$Q_{\text{latente, frango}} = 334a = 334 \times 0,74 = 241 \text{ kJ}/\text{kg}.$$

Em geral, os produtos alimentícios congelam numa faixa de temperatura e não numa única, pois tanto o teor de água como a composição desta podem alterar a temperatura de congelamento. Emprega-se então uma temperatura média de congelamento ou uma temperatura na qual se inicia o congelamento, caso dos alimentos como alface que se deterioram com o frio.

Tabela 2 - Decréscimo da temperatura de congelamento do sorvete com composição 12,5% de gordura de leite; 10,5% de soro sólido; 15% de açúcar; 0,3% de estabilizante e 61,7% de água ( referência pág. 158)

Porcentagem de água(antes de congelar)	Temperatura de congelamento da fração líquida
0	-2,47 °C
10	-2,75 °C
20	-3,11 °C
30	-3,50 °C
40	-4,22 °C
50	-5,21 °C
60	-6,78 °C
70	-9,45 °C
80	-14,92 °C
90	-30,36 °C
100	-55,0 °C

<sup>6</sup> O sub índice “p” nas equações (3) e (4) indica que o processo transcorre a pressão constante.

Exemplo 2: Uma caixa de 1,6 kg feita de polipropileno ( $c_p = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ ) contém 32kg de bacalhau com um conteúdo de água de 83% (de massa) a  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . O peixe destina-se a ser congelado a uma temperatura média de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  em quatro horas, dentro da caixa ( a temperatura de congelamento do peixe é de  $-2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Determine (a) a quantidade de calor que deve ser removida do peixe e (b) a taxa média de energia térmica retirada do peixe.

#### 4) Processos de transferência de energia térmica

Hervé This (1996), em seu livro *Um cientista na cozinha* foi particularmente feliz ao escrever *Como esquentar os alimentos?* (pág. 66 e 67 da obra citada):

*A pergunta parece ingênua, mas tente, por exemplo, esquentar uma sopa espessa colocando um pequeno radiador elétrico acima da superfície: a camada mais superficial ferverá, mas a massa da sopa ficará fria.*

*Da mesma maneira, um bom churrasco no espeto deve ser feito diante do fogo em vez de diretamente acima dele: se você grelhar codornas, aves delicadas por excelência, envoltas, como se deve, com folhas de parreira entre o toucinho e a ave, você só sentirá gosto de fumaça se cozinhar diretamente acima do fogo.*

*Em compensação, se você conhecer os mecanismos da radiação e puser o espeto na mesma altura do fogo, mas ao lado, suas aves cozinharão devagar, mas intensamente, e sua carne se perfumará delicadamente com o gosto sutil da folha de parreira.*

*Eis a principal razão por que é útil saber que o calor se comunica aos pratos por três mecanismos: a convecção, a condução e a radiação.*

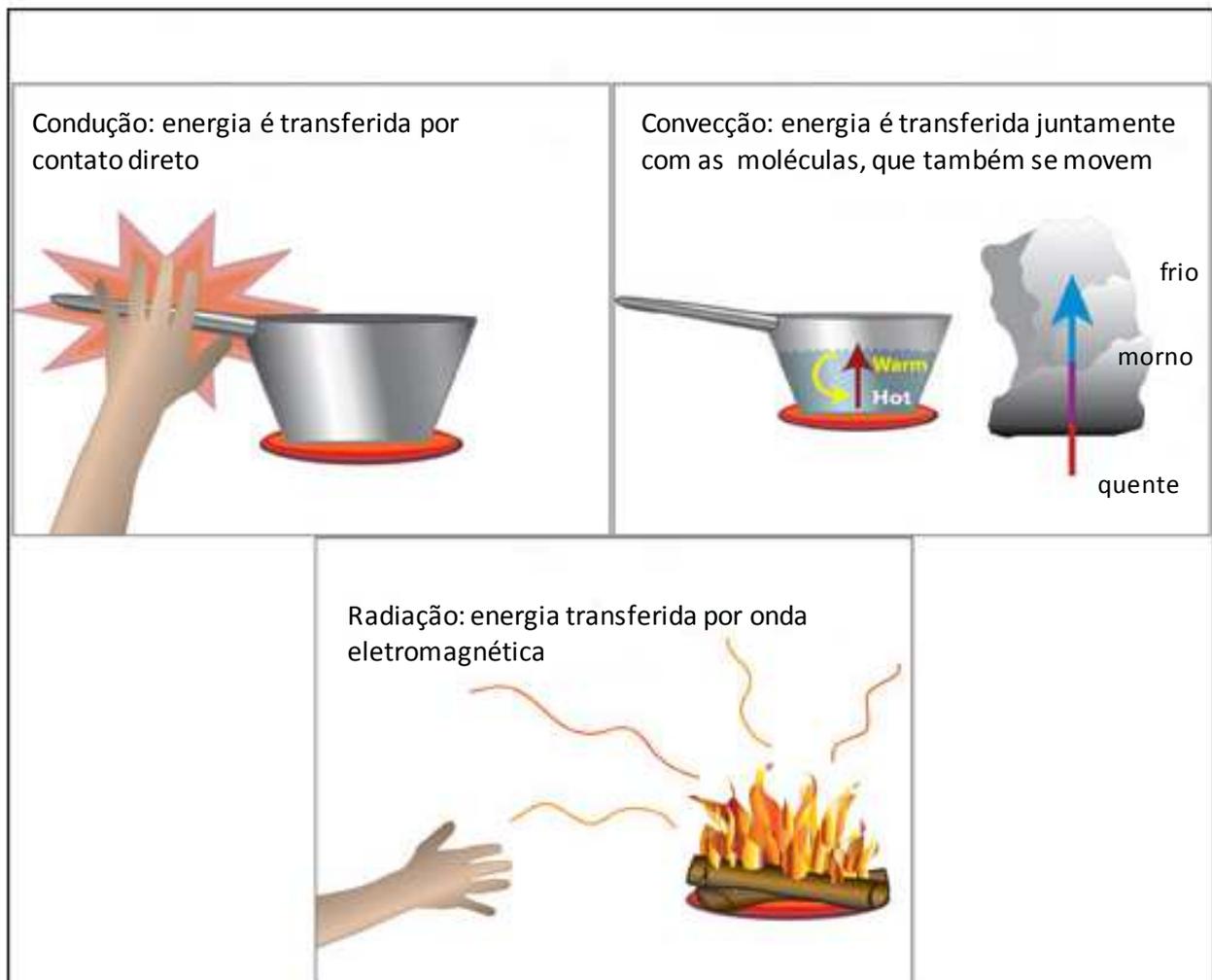


Figura 2 – Processos de transferência de energia térmica.

#### 4.1) Começando pela Condução ou Condução Térmica

Um dos processos de transferência de calor do corpo a maior temperatura para o de menor temperatura é conhecido por condução ou condução térmica. Neste processo, a transferência da energia dá-se pela colisão de moléculas mais energéticas (maior energia cinética) com moléculas menos energéticas. Há que se salientar que muitos autores consideram que este é o único processo de transferência de calor pois ocorre exclusivamente devido a uma diferença de temperatura e outros o incluem juntamente com a convecção e a radiação.

Consideremos uma superfície a ser aquecida, com área  $A$  e temperatura  $T_1$  na face superior (por exemplo o fundo de uma panela), espessura do material  $\Delta x$ , submetida a uma fonte de calor à temperatura  $T_2$ , na face inferior.

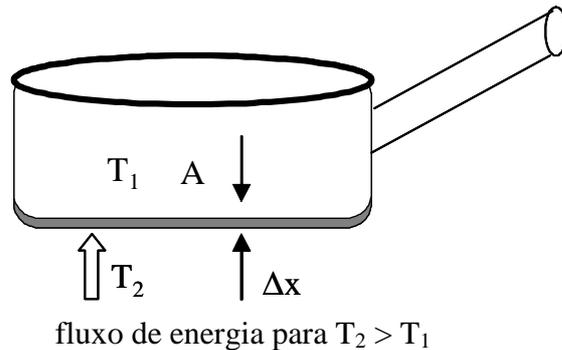


Figura 3 - Diagrama esquemático de uma panela sujeita a um fluxo de energia térmica devido a uma diferença de temperatura entre as faces inferior e superior de seu fundo.

O fundo da panela (desprezando-se as perdas laterais) permite que a energia seja transferida da região de maior para a de menor temperatura por meio da condução térmica. A taxa de transferência de energia na forma de calor<sup>7</sup>,  $H = Q/\Delta t$  é proporcional à área  $A$  do fundo e à diferença de temperatura entre suas faces inferior e superior e é inversamente proporcional à sua espessura,  $\Delta x$  :

$$H = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (6)$$

Para uma superfície de espessura infinitesimal  $dx$  e diferença de temperatura  $dT$ , a lei da condução torna-se

$$H = kA \left| \frac{dT}{dx} \right| \quad (7)$$

onde a constante de proporcionalidade  $k$  é chamada de condutividade térmica do material (Tabela 3) e  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura (a variação de temperatura de acordo com a posição).

Suponhamos uma substância na forma de uma barra longa e uniforme de comprimento  $L$ , como na Figura 2, em contato térmico com dois reservatórios à temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ . A barra está isolada termicamente em sua superfície lateral, de modo que o fluxo de energia térmica (calor) se dá exclusivamente pelas extremidades em contato com os reservatórios. Quando o estado estacionário

<sup>7</sup> A taxa de transferência de energia, que é a quantidade de energia térmica ou calor,  $Q$ , que atravessa o fundo da panela em um dado intervalo de tempo é outra maneira de nos referirmos ao fluxo de energia ou potência,  $1 \text{ joule}/1 \text{ segundo} = 1 \text{ watt}$ ,  $1 \text{ J}/1 \text{ s} = 1 \text{ W}$ , ver nota de rodapé número 5)

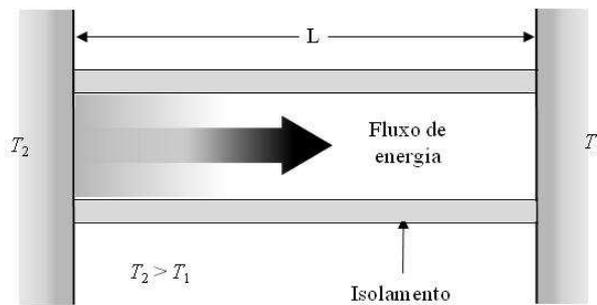


Figura 4 - Diagrama esquemático de um cilindro isolado em suas laterais, sujeito a um fluxo de energia térmica devido a uma diferença de temperatura entre suas extremidades.

é alcançado, a temperatura em cada ponto ao longo da barra é constante ao longo do tempo. Nesse caso, o gradiente de temperatura é o mesmo em qualquer ponto da barra e é dado por:

$$\left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Logo a taxa de transferência de energia térmica (calor) é dada por:

$$H = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (8)$$

O sinal negativo na equação 7 indica que o fluxo de energia térmica é em sentido contrário ao gradiente de temperatura, isto é, o gradiente aponta no sentido das temperaturas crescentes, de  $T_1$  para  $T_2$ , mas o fluxo de energia é no sentido contrário, de  $T_2$  para  $T_1$ .

As substâncias que são boas condutoras térmicas têm valores elevados de condutividade térmica e reciprocamente, os bons isolantes têm valores baixos de condutividade térmica.

Tabela 3 - Densidade e condutividade térmica de alguns materiais

	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica W/mK
Alumínio	2800	238
Aço inox (0,2% de carbono em massa)	7860	52,9
Cobre	9000	397
Ferro	7800	79,5
Zinco	7200	110
mármore	2700	2,5
Vidro	2500	0,8
Lã de Vidro	150	0,04
Lã de rocha	35-200	0,04
Cortiça (expandida)	100-200	0,04-0,0045
Borracha	1200-1500	0,17-0,3
Madeira leve	550	0,14(seca), 0,17 (molhada)
Polietileno, Polipropileno	930	0,17
Cloreto de Polyvinyl	1400	0,17
Espuma de poliestireno, exp.	10-40	0,035

(Picosegundo)		
Espuma de poliuretano (PUR)	30-150	0,025-0,035
PVC-espuma	20-50	0,035
Água	1000	0,58
Gelo	900	2,2
Ar	1.2	0,023
Cortiça	200	0,06-0,07
Lã	400	0,07

(Modificado de <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>  
Consultado em 25/02/2011 , Serway e Jewett, 2004, <http://pt.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7o> ,  
Consultado em 25/02/2011)

Exemplo 3: Baseados em dados do trabalho “COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS DE PANEAS QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE, TEMPO DE AQUECIMENTO E DE ESFRIAMENTO (Dhiones Marca, Helene Mallmann, Marcelo Azambuja Vieira [http://143.54.70.55/pss/medterm/20072/RELATORIO\\_PANEAS.pdf](http://143.54.70.55/pss/medterm/20072/RELATORIO_PANEAS.pdf) , acessado em 25/02/2011 )

Vamos estimar a taxa de transferência de energia térmica em três painéis:

1) Painel com Corpo em Alumínio com 1,4 mm ( $l = 1,4 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do alumínio:  $k_{Al} = 190$  W/mK;

2) Painel de Fundo Triplo:

- Corpo em aço inox AISI 304 com 0,7 mm ( $l_1 = 0,7 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do aço inox AISI 304:  $k_1 = 16,2$  W/mK;

- Cápsula do fundo em aço inox AISI 430 com espessura de 0,6 mm ( $l_2 = 0,6 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do aço inox AISI 430:  $k_2 = 26,1$  W/mK;

- Alumínio entre corpo e cápsula com 5 mm ( $l_3 = 5 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do alumínio:  $k_3 = 190$  W/mK;

2) Painel com Paredes Triplas:

- Parte interna e externa em aço inox AISI 304 com 0,5 mm ( $l_1 = l_2 = 0,5 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do aço inox AISI 304:  $k_1 = k_2 = 16,2$  W/mK;

- Alumínio entre as duas partes com 1,6 mm ( $l_3 = 1,6 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do alumínio:  $k_3 = 190$  W/mK;

Resolução:

Da eq. (7):  $H = kA \frac{(T_2 - T_1)}{L}$ , podemos deduzir que<sup>8</sup>:

<sup>8</sup> Da eq. (7):  $H = kA \frac{(T_2 - T_1)}{L}$ , temos:

$$H = A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left[ \frac{(l_1 k_2 k_3 + l_2 k_1 k_3 + l_3 k_1 k_2)}{(k_1 k_2 k_3)} \right]} \quad (9)$$

Para a panela com corpo em alumínio com 1,4 mm ( $l = 1,4 \times 10^{-3}$  m) de espessura, condutividade térmica do alumínio:  $k_{Al} = 190$  W/mK podemos aplicar a eq. (7) diretamente:

$$H_{Al} = k_{Al} \frac{A(T_2 - T_1)}{L_{Al}} = 190 \text{ W/mK} \frac{A(T_2 - T_1)}{1,4 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1,4 \times 10^5 A(T_2 - T_1) \text{ W/Km}^2$$

Para a panela de fundo triplo ( $H_{FT}$ ) temos que aplicar a eq.(8), sendo: corpo em aço inox com  $l_1 = 0,7 \times 10^{-3}$  m e  $k_1 = 16,2$  W/mK; cápsula do fundo em aço inox com  $l_2 = 0,6 \times 10^{-3}$  m e  $k_2 = 26,1$  W/mK; alumínio entre corpo e cápsula com  $l_3 = 5 \times 10^{-3}$  m ) e  $k_3 = 190$  W/mK:

$$\begin{aligned} H_{FT} &= A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left[ \frac{(l_1 k_2 k_3 + l_2 k_1 k_3 + l_3 k_1 k_2)}{(k_1 k_2 k_3)} \right]} = \\ &= A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left[ \frac{(0,7 \times 10^{-3} \times 26,1 \times 190) + (0,6 \times 10^{-3} \times 16,2 \times 190) + (5 \times 10^{-3} \times 16,2 \times 26,1)}{(16,2 \times 26,1 \times 190)} \right]} = \\ &= 1,1 \times 10^4 A(T_2 - T_1) \text{ W/Km}^2 \end{aligned}$$

3) Para a panela com paredes triplas ( $H_{PT}$ ) temos que aplicar a eq. (8), sendo: parte interna e externa em aço inox com  $l_1 = l_2 = 0,5 \times 10^{-3}$  m e  $k_1 = k_2 = 16,2$  W/mK; alumínio entre as duas partes com  $l_3 = 1,6 \times 10^{-3}$  m e  $k_3 = 190$  W/mK;

$$\begin{aligned} H_{PT} &= A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left[ \frac{(0,5 \times 10^{-3} \times 16,2 \times 16,2) + (0,5 \times 10^{-3} \times 16,2 \times 190) + (1,6 \times 10^{-3} \times 16,2 \times 16,2)}{(16,2 \times 16,2 \times 190)} \right]} = \\ &= 2,4 \times 10^4 A(T_2 - T_1) \text{ W/Km}^2 \end{aligned}$$

Os resultados acima indicam que para uma mesma área e mesmo  $\Delta T$ , a panela com corpo em alumínio conduz melhor o calor (cerca de 13 vezes mais, no mesmo tempo) que a de fundo triplo e que a de paredes triplas (cerca de 6 vezes mais, no mesmo tempo).

Bem o resultado acima poderia sugerir que a escolha deveria recair sempre sobre a panela de alumínio, mas não é o caso. Além das implicações de saúde, devido à ingestão de alumínio (Quintaes, 2005), temos que lembrar que após a preparação, o alimento estará à uma temperatura mais elevada que o ambiente e como o alumínio conduz melhor, levará ao resfriamento mais rápido do preparado. Isto poderá não fazer diferença no verão, mas no inverno...Então, se necessitamos manter o alimento aquecido por mais tempo, deixá-lo em uma panela de inox poderá ser mais eficiente que embrulhá-lo em papel alumínio, e menos prejudicial ao ambiente! Mas o alumínio é

$$\begin{aligned} H &= kA \frac{(T_2 - T_1)}{(l_1 + l_2 + l_3)} = A(T_2 - T_1) \frac{(k)}{(l_1 + l_2 + l_3)} = A(T_2 - T_1) \frac{1}{\frac{(l_1 + l_2 + l_3)}{(k)}} = A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left( \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{l_3}{k_3} \right)} = \\ &= A(T_2 - T_1) \frac{1}{\left[ \frac{(l_1 k_2 k_3 + l_2 k_1 k_3 + l_3 k_1 k_2)}{(k_1 k_2 k_3)} \right]}, \text{ equação (8)}. \end{aligned}$$

A eq. (8), é um pouco mais geral que a (7), uma vez que assume a possibilidade de três materiais distintos justapostos, mas não tão geral à ponto de assumir áreas distintas para o fluxo.

importante, a colocação do material entre camadas de aço inox, deve-se à sua alta condutividade em relação ao inox, fazendo com que haja uma redistribuição de energia térmica pela área a ser aquecida. A ausência do alumínio entre as camadas de inox ou de uma película de cobre sobre o inox, impediria a uniformização da distribuição de calor sob a área da panela, privilegiando o fluxo na região diretamente sobre a chama, podendo levar à queima do alimento nesta região.

#### **4.2) Convecção**

Como vimos anteriormente, na condução, a transferência de energia pode ser representada numa escala atômica como uma troca de energia cinética entre partículas microscópicas, isto é moléculas, átomos e elétrons livres, em que moléculas menos energéticas ganham energia em colisões com outras mais energéticas. Em Jewett Jr. & Serway, 2011, por exemplo, você encontrará elementos para a compreensão desse processo, mas o que importa é que ocorre em sólidos e as preparações culinárias envolvem também líquidos e gases. Nestes casos, a convecção poderá ser um processo tão importante quanto.

O aquecimento convectivo pode ser definido como a transferência de energia térmica de um fluido (gás ou líquido) para suas vizinhanças. Ocorre quando um fluido, como o ar ou a água está em contato com um corpo cuja temperatura é maior que a da vizinhança. A temperatura do fluido que está em contato com o corpo quente aumenta e geralmente o fluido se expande. Tornando-se menos denso que o fluido frio da vizinhança, ele sobe por causa do empuxo. O fluido do meio mais frio desce para tomar o lugar do fluido quente que subiu, formando-se então uma corrente convectiva. A transferência convectiva de energia é um processo que ocorre tanto na natureza ( a famosa sensação térmica que sentimos quando nos expomos ao vento, por exemplo) quanto no preparo de alimentos, como veremos a seguir.

Quando colocamos uma panela com água sobre a chama de um fogão, inicialmente a energia térmica distribui-se pelo fundo ao mesmo tempo em que vai atingindo a superfície interna e todo esse processo é condutivo. Quando a temperatura da superfície interna da panela vai aumentando, a transferência de calor para as moléculas adjacentes de água ainda é condutivo, mas o aquecimento desse volume adjacente torna-o menos denso, fazendo com que por empuxo, desloque-se para a superfície, permitindo que volumes de água mais frias, isto é à menor temperatura ocupem esse espaço, dando continuidade ao processo.

#### **Referências:**

- Feynman, R.P. Física em 12 Lições- Fáceis e Não Tão Fáceis/ Ediouro. 1999  
Hémery, D.; Debier, J-C; Deléage, J-P. Uma História da Energia. Edunb. 1993  
Çengel, Y.A.; Boles, M.A. termodinâmica. Editora Mc Graw-Hill de Portugal. 3ª. Ed. 2001