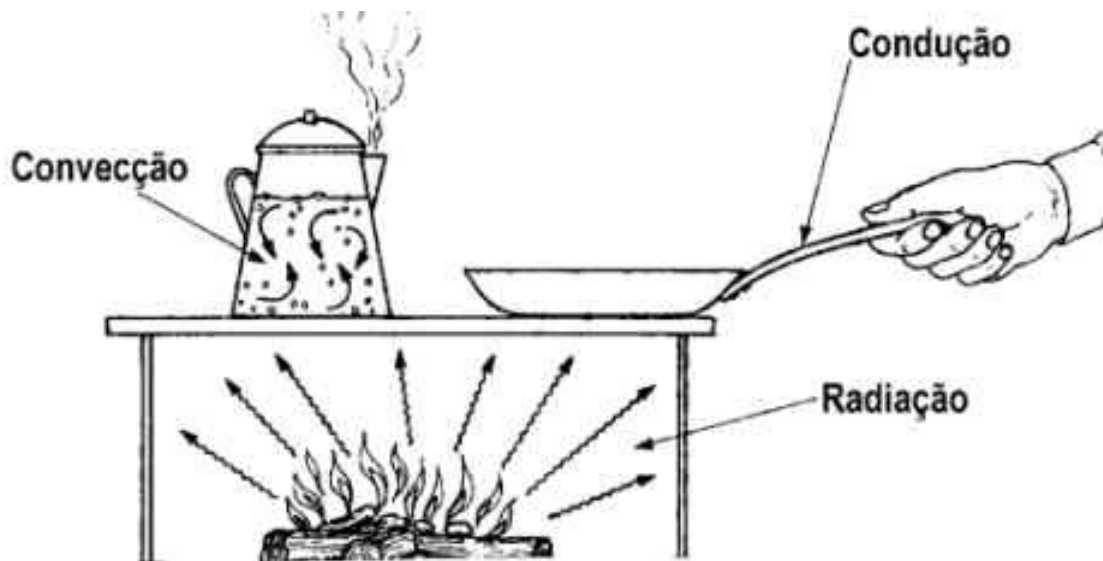


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

CAMPUS SÃO JOSÉ

ÁREA TÉCNICA DE
REFRIGERAÇÃO E
CONDICIONAMENTO DE AR



TRANSFERÊNCIA DE CALOR (TCL)

Volume I

Prof. Carlos Boabaid Neto, M. Eng.

2010

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR	
1.1 - Importância.	02
1.2 – Taxa de Transferência de Calor	02
1.3 – Unidades	04
1.4 - Modos de transferência de calor e seus princípios físicos	06
Exercícios	14

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR

1.1 - IMPORTÂNCIA.

Toda a tecnologia da área de Refrigeração e Condicionamento de ar depende dos conhecimentos de Transferência de Calor. Refrigeradores domésticos, condicionadores de ar, “freezers”, câmaras frigoríficas, etc., são todos equipamentos e/ou instalações cujo objetivo primário é o de efetuar trocas de calor. Portanto, para executarem bem esta função, é necessário que quem as construa, instale, mantenha ou opere conheça muito bem os mecanismos físicos de Transferência de Calor.

Está provado que o técnico que projeta, instala e faz manutenção de equipamentos de refrigeração e condicionamento de ar, que têm conhecimento teórico, isto é, sabe o **porquê** do que está fazendo, tem muito menos chances de cometer erros e, conseqüentemente, estará sempre fazendo um trabalho de melhor qualidade.

As aplicações do conhecimento adquirido nesta disciplina incluem, entre muitas outras, a seleção e especificação adequada de trocadores de calor, como evaporadores e condensadores de sistemas de refrigeração, projetos de equipamentos térmicos, cálculo de cargas térmicas de refrigeração e condicionamento de ar, seleção de isolamento adequado para equipamentos, sistemas de dutos, etc.

1.2 – TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A primeira pergunta que se apresenta é: *o que é a transferência de calor?* Este conceito vem da Termodinâmica:

Calor é o nome dado à energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura

Sempre que ocorrer uma diferença de temperatura entre dois meios, ou entre regiões diferentes do mesmo meio, a transferência de calor deverá ocorrer. E esta transferência ocorrerá do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura.

No estudo da Termodinâmica foi visto então o *porquê* da ocorrência da transferência de calor, e calculou-se *quanto* calor era transferido; não havia, entretanto, preocupação quanto à duração de tempo em que se daria esta transferência.

Exemplo

1.1. Um recipiente contém 0,5 kg de água pura a 25°C. O recipiente é aquecido em um forno de microondas, e a temperatura da água passa a ser de 50°C. Qual foi a quantidade de energia fornecida para a água?

Solução. Com a fórmula clássica da calorimetria:

$$Q = m.c.\Delta T$$

e sabendo-se que o calor específico da água, em unidades SI, é de 4,186 kJ/kg.K, chega-se a:

$$Q = 0,5 \cdot 4,186 \cdot (50 - 25) = 52,3 \text{ kJ}$$

Veja que se pode afirmar a quantidade de calor transferido p/ a água (52,3 kJ). Porém, não se sabe em quanto tempo ocorreu essa transferência de calor.

Nas situações práticas, entretanto, é necessário levar em consideração o tempo decorrido para a ocorrência de determinada transferência de calor. Isto é o que faz a diferença entre diferentes técnicas, ou entre diferentes equipamentos ou sistemas, e também é o que determina se esta técnica, equipamento ou sistema é adequado ou não. Por exemplo: um determinado congelador pode ser capaz de congelar um frango, porém, se este congelamento demorar, digamos, 48 horas para ser realizado, a qualidade da carne do frango poderá ser comprometida. Da mesma forma, um condicionador de ar que demore, digamos, 6 horas para climatizar uma sala também não será satisfatório.

Então, no estudo da Transferência de Calor, o interesse é definir a taxa de transferência de calor, ou seja, quanto calor foi transferido por unidade de tempo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{transferência} \\ \text{de calor} \end{array} \right\} = \left\{ \frac{\text{quantidade de} \\ \text{calor transferido}}{\text{intervalo de tempo} \\ \text{em que ocorreu a troca}} \right\}$$

Vamos representar esta taxa de transferência de calor pela letra \dot{Q} , de tal maneira que:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \left[\frac{\text{Joule}}{\text{segundo}} \right] = [\text{Watt}] \quad (1.1)$$

No caso de um processo que envolva uma quantidade de massa finita (um corpo), a equação acima pode ser expressa por:

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \quad \text{ou} \quad \dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})}{t} \quad (1.2)$$

onde “c” representa o calor específico do material de que é feito o corpo, e m representa sua massa.

No caso de um processo que envolva vazão mássica (por exemplo, o evaporador de um condicionador de ar, onde o ar entra com uma certa temperatura, e sai com uma temperatura mais baixa, ter-se-ia:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad (1.3)$$

onde \dot{m} representa a vazão mássica, em [kg/s].

Exemplo

1.2: Suponha que no exemplo 1.1, o recipiente tenha ficado 1 minuto no forno. Qual foi então a taxa de transferência de calor?

Solução. 1 minuto → 60 segundos. Da equação acima:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{52,3}{60} = 0,87 \quad \frac{[\text{kJ}]}{[\text{s}]} = [\text{kW}]$$

Sabe-se agora que a taxa de transferência de calor fornecido pelo microondas para a água foi de 0,87 kW, ou seja, 870 Watts.

1.3. Ar com vazão de 2,5 kg/s é aquecido de -10 a 30°C em um trocador de calor. Qual é a taxa de transferência de calor?

Solução. Da Termodinâmica sabemos que:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})$$

onde C_p representa o calor específico do ar (1,007 kJ/kg.°C), \dot{m} representa o fluxo de massa (2,5 kg/s), e:

$$T_{\text{inicial}} = -10^\circ\text{C} \quad T_{\text{final}} = +30^\circ\text{C}$$

Assim:

$$\dot{Q} = 2,5 \times 1,007 \times (30 - (-10)) = 2,5175 \times (30 + 10) = 100,7 \quad \text{kW}$$

Observe as unidades:
$$\frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = \text{kW}$$

Então, se temos uma determinada quantidade de massa que flui em um certo tempo (fluxo de massa) e este ar está sendo aquecido, temos automaticamente uma taxa de transferência de calor.

Para estudar a taxa de transferência de calor, é necessário conhecer e estudar *como* o calor é transferido, ou seja, os mecanismos físicos pelo qual o calor é capaz de passar de um meio para o outro.

1.3 - UNIDADES

O Sistema Internacional de Unidades (SI) define o sistema de unidades utilizado legalmente no país, e será o sistema utilizado neste curso. Este sistema está baseado nas quatro dimensões básicas: comprimento [m], massa [kg], tempo [s], temperatura [K].

Apesar da unidade SI para temperatura ser o Kelvin [K], o uso da escala Celsius é o mais comum. O zero na escala Celsius (0 °C) é equivalente a 273,15 K. Assim:

$$T [\text{K}] = T [^\circ\text{C}] + 273,15$$

Entretanto, *diferenças* de temperatura são equivalentes para as duas escalas, e podem ser expressas por °C ou K. Ou seja:

$$\Delta T [K] = \Delta T [^{\circ}C]$$

Também, apesar da unidade SI para tempo ser o segundo, outras unidades de tempo (hora, minuto, e dia) são também comuns, e seu uso no SI é bastante aceito. Lembrando que:

$$1 \text{ dia} = 24 \text{ horas} \quad 1 \text{ hora} = 60 \text{ minutos} \quad 1 \text{ minuto} = 60 \text{ segundos}$$

Dessas unidades básicas, derivam todas as outras unidades utilizadas na transferência de calor, como se pode ver pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Unidades derivadas do SI p/ algumas grandezas

Quantidade	Nome e símbolo	Fórmula	Expressão em unidade de base do SI
Energia	joule (J)	N.m	m ² .kg/s ²
Potência	watt (W)	J/s	m ² .kg/s ³
Condutibilidade térmica	-	W/m.K	m.kg/s ³ .K
Coefficiente de transf. de calor	-	W/m ² .K	kg/s ³ .K

Eventualmente, poderemos nos deparar com unidades do sistema Inglês, ainda muito comuns. Como exemplo, a carga térmica muitas vezes é calculada em [Btu/h], pois os catálogos de fabricantes de equipamentos de condicionamento de ar trazem esta unidade na determinação da capacidade de seus equipamentos. Por isso, a seguinte tabela de conversão de fatores pode ser útil.

Tabela 1.2 - Fatores de conversão úteis

1 pol = 25,4 mm = 2,54 cm	1 cal = 4,1868 J
1 pé = 12 pol = 0,3048 m	1 Btu = 1055,06 J
1 yd (jarda) = 0,9144 m = 3 pés	1 kW = 3412 Btu/h
1 cm ³ = 1 ml	1 kcal/h = 1,163 W = 3,97 Btu/h
1 m ³ = 1000 litros	1 TR = 12000 Btu/h = 3,517 kW
1 ton = 1000 kg	1 HP (Inglês) = 0,7457 kW
1 lbm = 0,4536 kg	1 CV (SI) = 0,7355 kW

1.4 - MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E SEUS PRINCÍPIOS FÍSICOS

Sabe-se que calor é transferido de um corpo para outro desde que exista uma diferença de temperatura entre eles. Sabe-se que todas as substâncias naturais são formadas por átomos que, agrupados por meio de ligações químicas, formam moléculas. Em Termodinâmica, viu-se que estas moléculas estão em constante movimento, vibrando e se deslocando a uma determinada velocidade. Estudou-se, também, que o conceito de temperatura é associado à velocidade de movimentação destas moléculas, ou seja, quanto maior a temperatura, mais velozmente as moléculas estão vibrando (movimentando-se). A partir destas afirmações vamos analisar os três modos de transferência de calor.

Ao nível molecular, a transferência de calor está fundamentalmente associada ao choque entre moléculas com diferentes graus de agitação, onde uma molécula mais veloz choca-se com uma molécula menos veloz, "transferindo" energia cinética. Este mecanismo se chama *difusão* de energia térmica.

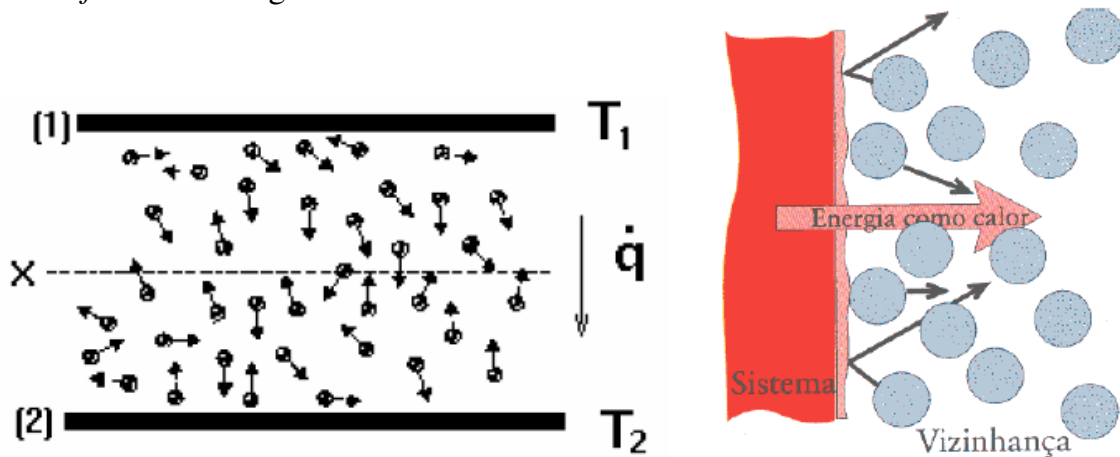


Figura 1.1 – Difusão de energia térmica

CONDUÇÃO.

Nos corpos sólidos, as moléculas apresentam forte ligação entre si, gerando uma estrutura “fixa” (Figura 1.2). Assim, mesmo com a transferência de energia cinética de uma molécula para outra, não ocorre alteração da posição espacial das moléculas. Ou seja, as moléculas trocam energia entre si, mas não mudam de lugar no espaço.

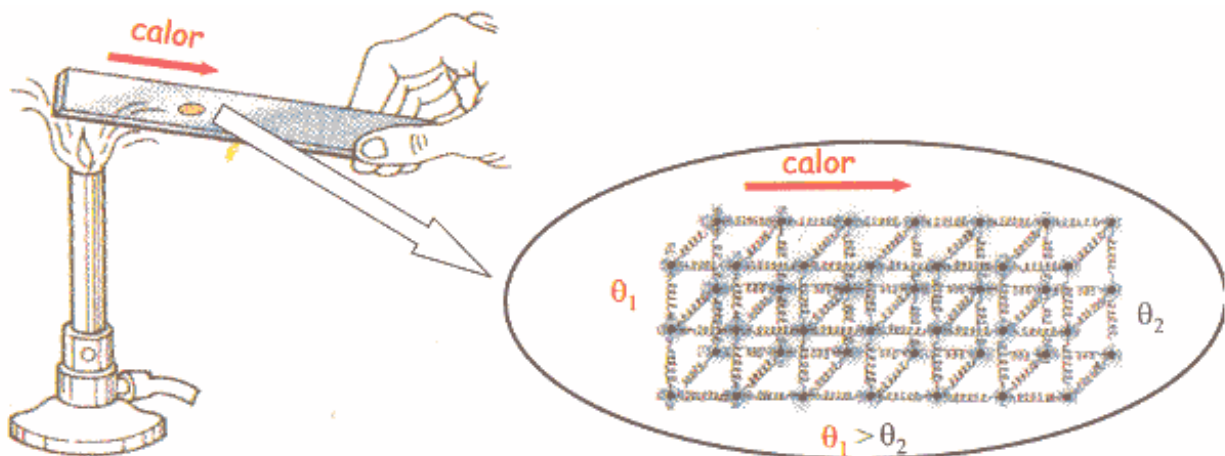


Figura 1.2 – Estrutura das moléculas em um corpo sólido

No experimento demonstrado na Figura 1.3, uma barra metálica é aquecida em uma de suas extremidades. Observa-se que a temperatura é diferente em cada ponto da barra. As moléculas próximas à chama recebem calor e são violentamente agitadas. Pelo contato com as moléculas mais próximas, transferem parte da energia recebida para estas últimas, e assim sucessivamente. Observa-se que o calor não é capaz de se propagar instantaneamente ao longo de toda a barra metálica.

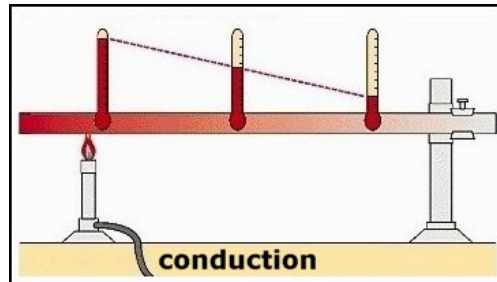


Figura 1.3 – Condução do calor

Então, em corpos sólidos, o mecanismo da difusão é o principal responsável pela transferência de calor (em materiais metálicos, há também uma contribuição dos elétrons livres). Assim:

Condução é a transferência de calor pelo mecanismo de difusão, sem o transporte das moléculas; é o mecanismo de transferência de calor característico de corpos sólidos.

CONVECÇÃO.

Nos fluidos (estados líquido e gasoso), as moléculas não apresentam uma ligação entre si, não estão rigidamente presas, como nos sólidos. Ou seja, as moléculas podem mudar livremente de lugar no espaço.

Então, por exemplo, moléculas de um fluido que entrem em contato com uma superfície sólida aquecida, recebem energia térmica por difusão, isto é, pelo choque entre as moléculas mais superficiais da superfície sólida e as moléculas do fluido coladas à superfície. Porém, como elas são livres para se movimentar (movimento do fluido), ao se deslocarem elas "carregam" consigo a energia térmica adquirida. Ao mesmo tempo, novas moléculas de fluido irão entrar em contato com a superfície sólida, aquecendo-se e reiniciando o processo.

A Figura 1.4 ilustra o mecanismo de convecção. O ar, em contato com um corpo quente (por exemplo, um aquecedor de ar), recebe calor por difusão e aquece-se. Ao aquecer-se, dilata-se e, por isso, fica menos denso (mais leve). Desta forma, adquire um movimento ascendente, subindo, enquanto o ar do restante da sala, mais frio (e por isto mais denso), adquire movimento descendente. Todavia, à medida que sobe, o ar mais aquecido entra em contato com o ar em temperatura inferior, e com as paredes, também mais frias, transferindo calor e, por isto, aumentando a sua densidade, pelo que acaba adquirindo um movimento descendente. Ao descer, entrará novamente em contato com a estufa ou aquecedor, criando assim uma movimentação constante do ar, denominada corrente de convecção.

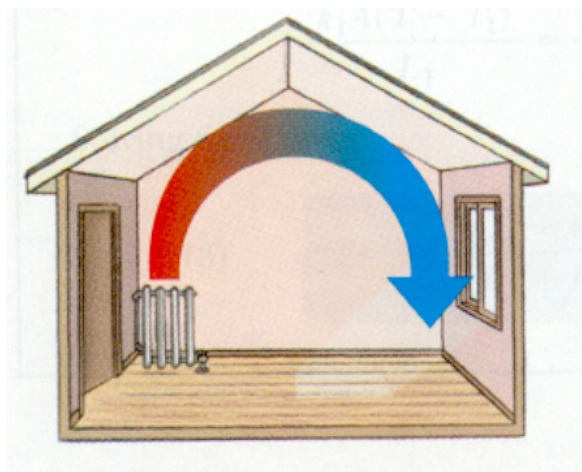
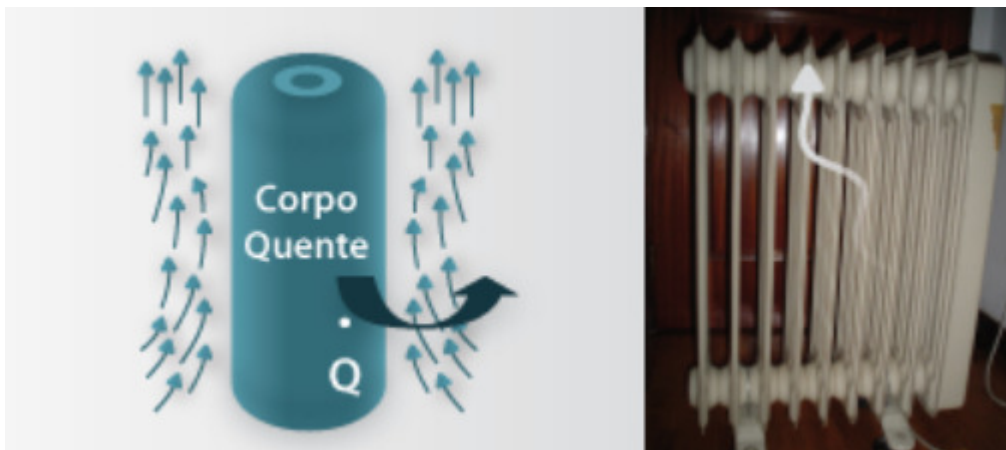


Figura 1.4 – Convecção

O mesmo tipo de circulação acontece na água que é aquecida numa chaleira (Figura 1.5). A água que entra em contato com o fundo aquecido recebe calor e dilata; como a densidade diminui, “bolsas” de água mais aquecida sobem até atingirem a superfície, originando assim correntes de convecção no interior do líquido.

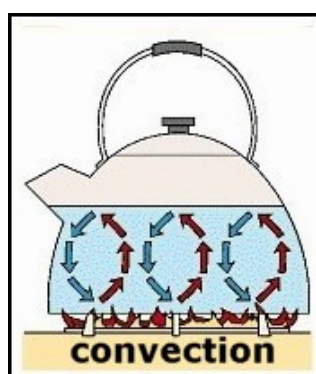


Figura 1.5 – Convecção

Desta forma, ocorre a superposição de dois mecanismos distintos: a difusão de energia entre as moléculas, e a movimentação destas moléculas. Então:

Convecção é a transferência de calor pela matéria em movimento; é o mecanismo que caracteriza a transferência de calor em fluidos.

O mecanismo de convecção explica, por exemplo, as brisas marítimas (Figura 1.6). Durante o dia, o solo aquece-se mais do que a água, por isto as massas de ar sobre a terra recebem mais calor do que as massas de ar sobre o mar. Desta forma, ocorre o deslocamento do ar no sentido do mar para a terra. Já durante a noite, a terra resfria-se mais do que a água, provocando o deslocamento do ar no sentido da terra para o mar.

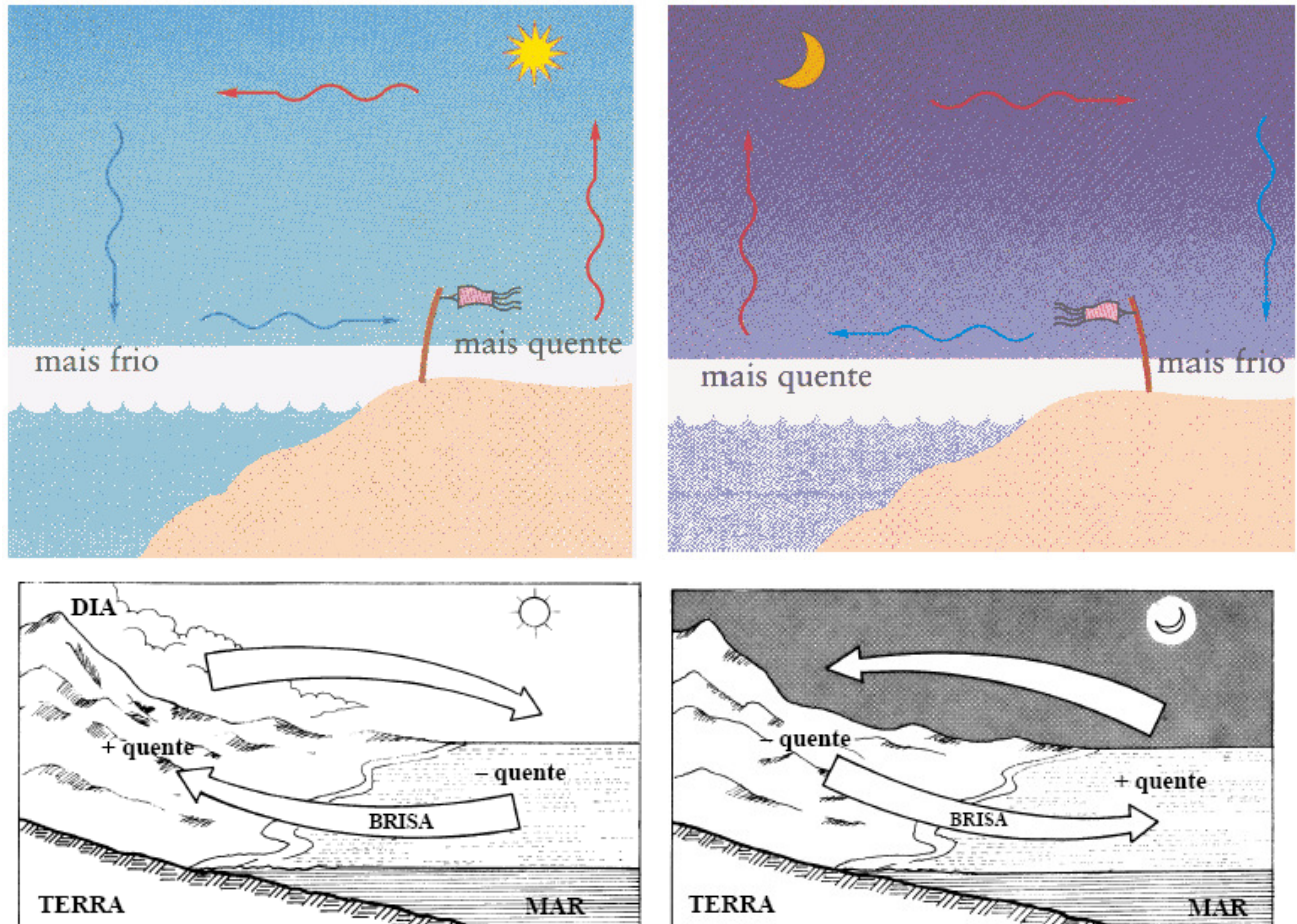


Figura 1.6 – Brisa diurna (mar-terra) (esq.), e brisa noturna (terra-mar) (dir.)

RADIAÇÃO.

As ondas eletromagnéticas são uma manifestação de energia, mais precisamente, uma manifestação de transmissão de energia. Esta transmissão se dá na forma de ondas. Os vários "tipos" de ondas estão relacionados com o comprimento e frequência desta onda, como se pode ver pelo **espectro eletromagnético**, mostrado na Figura 1.7.

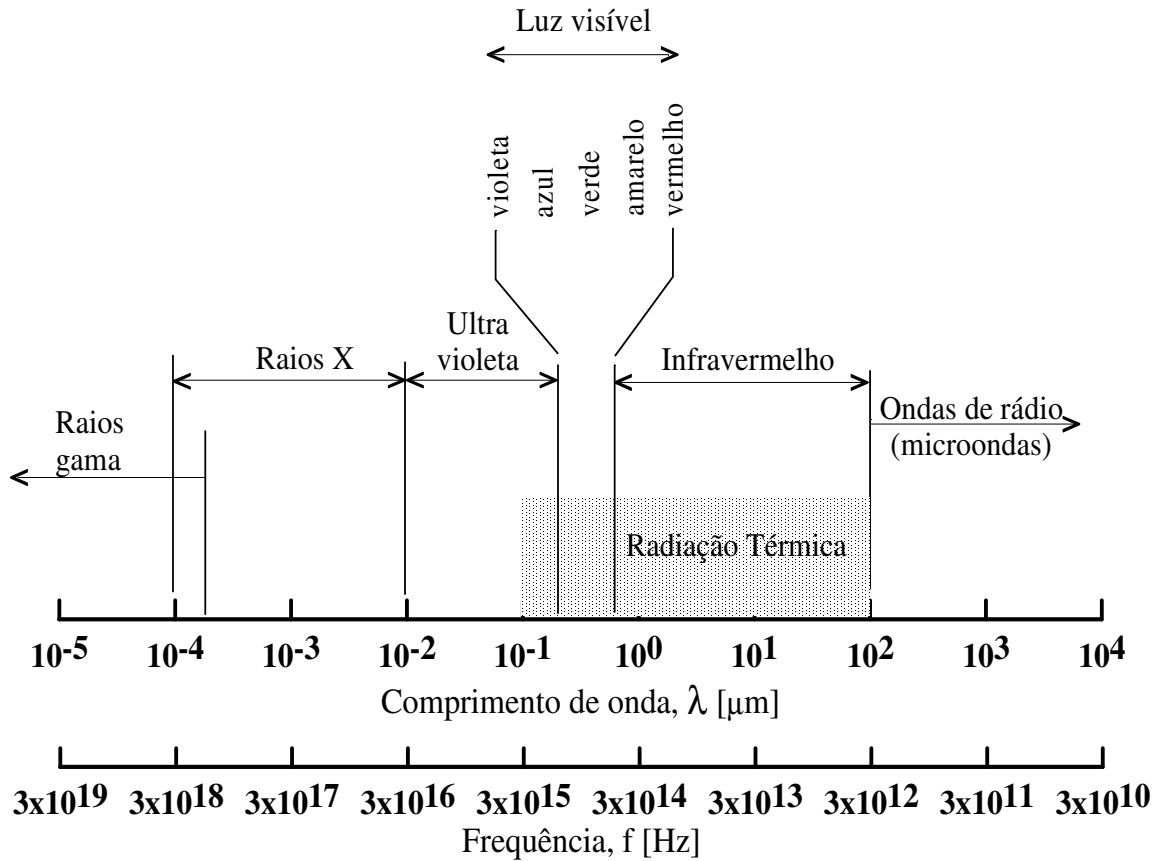


Figura 1.7 - Espectro da radiação eletromagnética

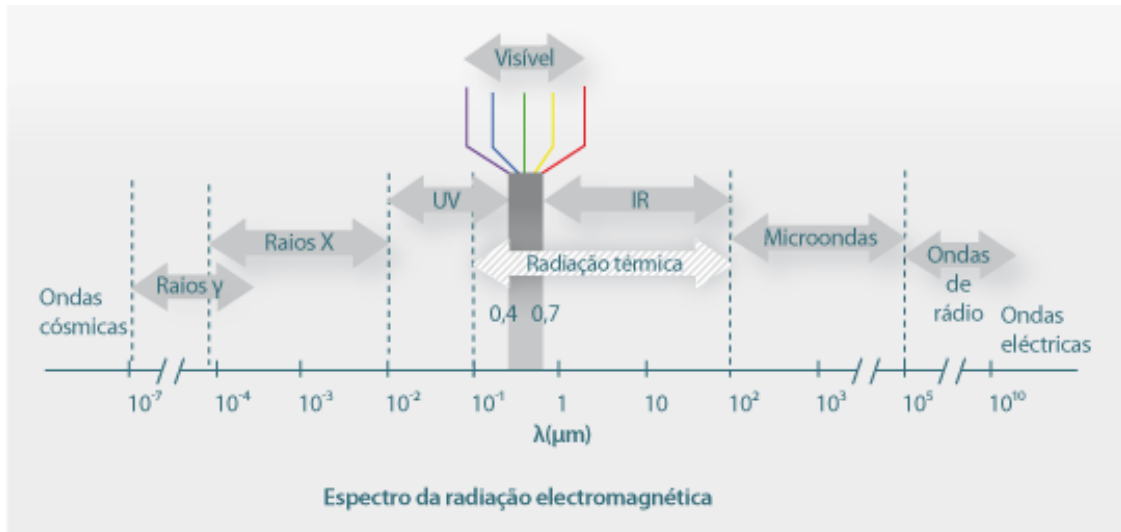


Figura 1.8 - Espectro da radiação eletromagnética

A quantidade de energia transportada é proporcional à frequência da radiação. Assim, as radiações de comprimentos de onda pequenos (altas frequências), como a radiação gama, raios-X e radiação ultravioleta (UV), transmitem muita energia, e são por isto relativamente perigosas. Já as radiações de comprimentos de onda grandes (baixas frequências), como as ondas de rádio, também conhecidas como microondas, transmitem pouca energia, e são utilizadas para transmissão de rádio e TV, e também para comunicação via satélite.

No entanto, é a porção intermediária do espectro, que vai de aproximadamente 0,1 a 100 μm , e que inclui uma parcela da radiação ultravioleta (UV), todo o espectro de radiação

(luz) visível (0,35 a 0,75 μm) e todo o espectro de radiação infravermelha (IR), e que é conhecida como *Radiação Térmica*, a parcela que interessa à Transmissão de Calor. Então:

Radiação é a transferência de calor por intermédio de ondas eletromagnéticas.

Toda matéria possui a propriedade de emitir energia na forma de ondas eletromagnéticas. Isto é consequência da própria constituição da matéria, que é formada por átomos. O mecanismo físico responsável por esta emissão de energia está relacionado com as oscilações e transições (alterações de posição) dos elétrons que constituem os átomos. Estas oscilações, por sua vez, são mantidas pela energia interna, e em consequência, pela temperatura da matéria. Quanto maior a temperatura, maior o nível de oscilações dos elétrons, e maior a energia emitida na forma de radiação térmica.

Então, por exemplo, em um aquecedor elétrico (radiador, Fig. 1.9), uma resistência elétrica é aquecida até temperaturas relativamente elevadas (chegam a ficar incandescentes) e, desta forma, emitem grande quantidade de calor por radiação.

Este tipo de transferência de energia não precisa de um meio material para se realizar, pois a radiação eletromagnética é capaz de se propagar no vácuo. Um exemplo é a energia do Sol. No espaço entre o Sol e a Terra praticamente não existe matéria, mas mesmo assim a energia do Sol alcança nosso planeta (Figura 1.9).

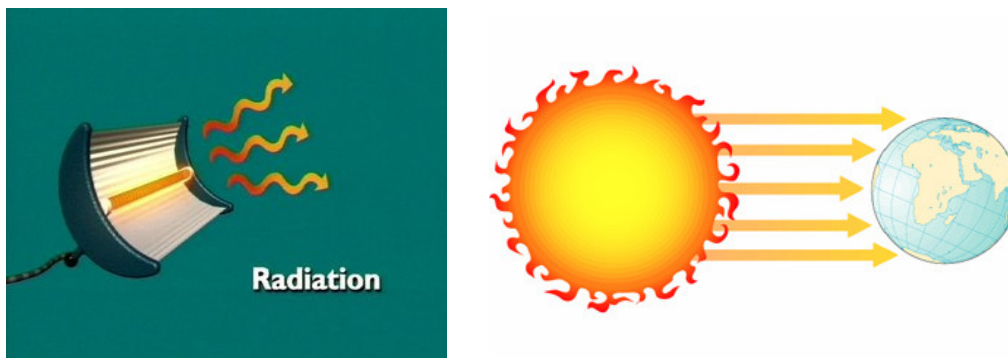


Figura 1.9 – Radiação

Na Figura 1.10 ilustra-se a diferença entre um aquecedor (*heater*) e uma lareira (*fireplace*). No primeiro caso, embora ocorra um pequeno efeito de radiação (pois a superfície do aquecedor encontra-se aquecida), o principal mecanismo atuante é a convecção, devido ao contato direto do ar do recinto com as superfícies aquecidas do aquecedor. No segundo caso, o efeito predominante de aquecimento é devido à radiação emitida pelo fogo (que alcança alta temperatura), que aquece diretamente as paredes, pisos e tetos, e outros objetos no recinto, inclusive as pessoas. O efeito de convecção, devido ao contato direto do ar com o fogo, é mínimo, pois, devido à fumaça, a maior parte deste ar precisa ser extraído através da chaminé, pois, do contrário, contaminaria todo o ambiente.

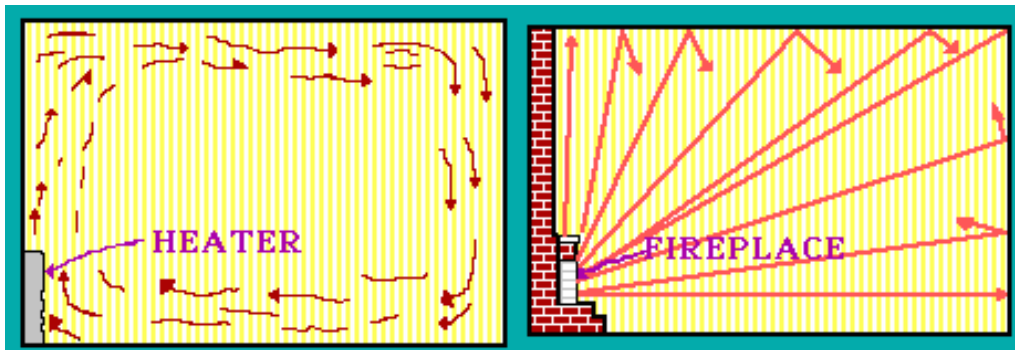


Figura 1.10 – Aquecimento de ambientes por convecção (esq.) e radiação (dir.)

O quadro e figura a seguir sintetizam o exposto acima.

MODO	MECANISMO	OCORRÊNCIA
Condução	<i>difusão de energia devido a agitação molecular</i>	<i>Sólidos</i>
Convecção	<i>difusão de energia devido a agitação molecular + transporte da energia pelo movimento do fluido (advecção)</i>	<i>fluidos (líquidos e gases)</i>
Radiação	<i>transferência de energia por ondas eletromagnéticas</i>	<i>qualquer matéria, e no vácuo</i>

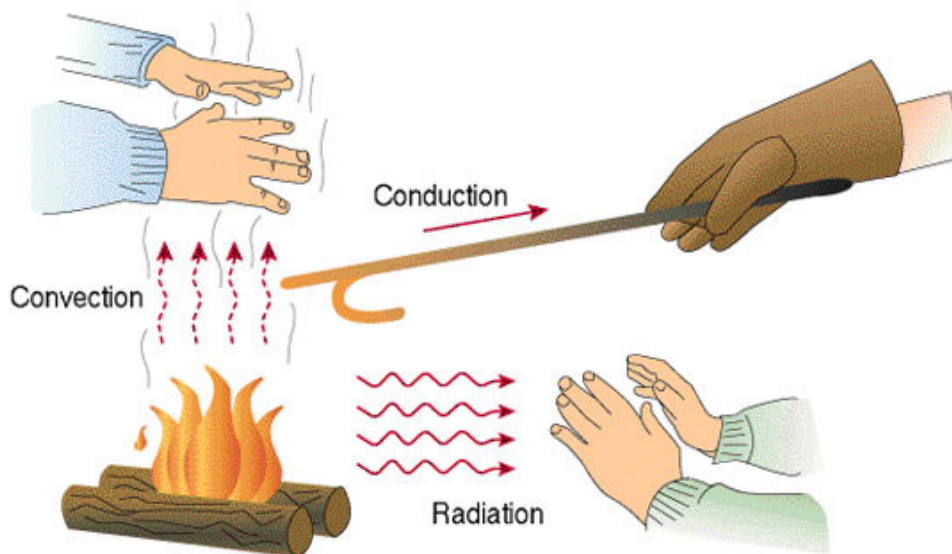


Figura 1.11 - Modos de transferência de calor

É importante ressaltar que os mecanismos de transferência de calor não ocorrem isoladamente. Em cada situação física real, os três mecanismos estão operando simultaneamente. Observe a Figura 1.12. No aquecimento de água em uma panela, todos os mecanismos de transferência estão agindo: a combustão do gás de cozinha gera uma chama, que consiste em gases em altíssima temperatura. Estes gases cedem calor para a superfície externa da panela (e para o ar em redor) por convecção e radiação; por condução, este calor atravessa o metal da a panela, e chega à água, aquecendo-a por convecção; o vapor d'água formado aquece o ar nas proximidades por convecção; ao perder calor, o vapor d'água

condensa-se, formando a névoa que se observa, que nada mais são do que minúsculas partículas de água líquida.

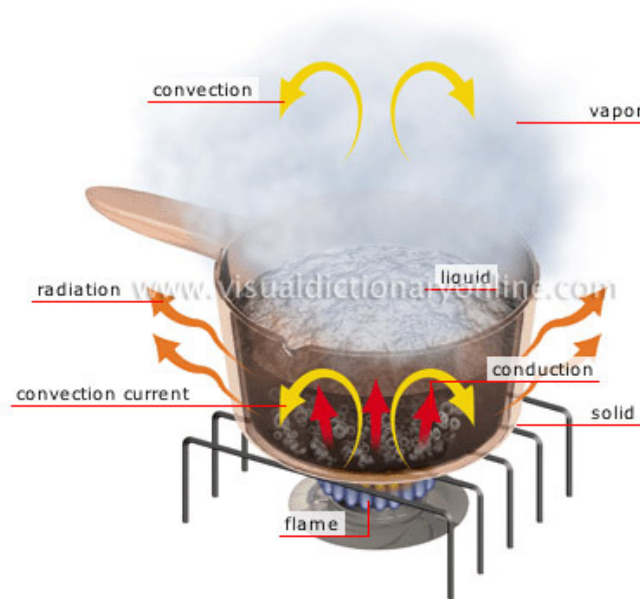


Figura 1.12 - Mecanismos de transferência de calor combinados

O corpo humano precisa dissipar calor para o ambiente continuamente, de forma a manter sua temperatura interna estável (por volta de $36,5^{\circ}\text{C}$, em média). Esta troca de calor ocorre através da pele e das vias respiratórias, e também é governada pelos diferentes mecanismos, de forma combinada (Figura 1.13). A condução do calor ocorre quando a superfície pele do corpo está em contato com alguma superfície sólida. A convecção se dá entre a pele e o ar que nos cerca. A troca de calor por radiação depende do balanço entre a radiação emitida por nosso corpo e a radiação incidente sobre nosso corpo, emitida pelo ambiente.

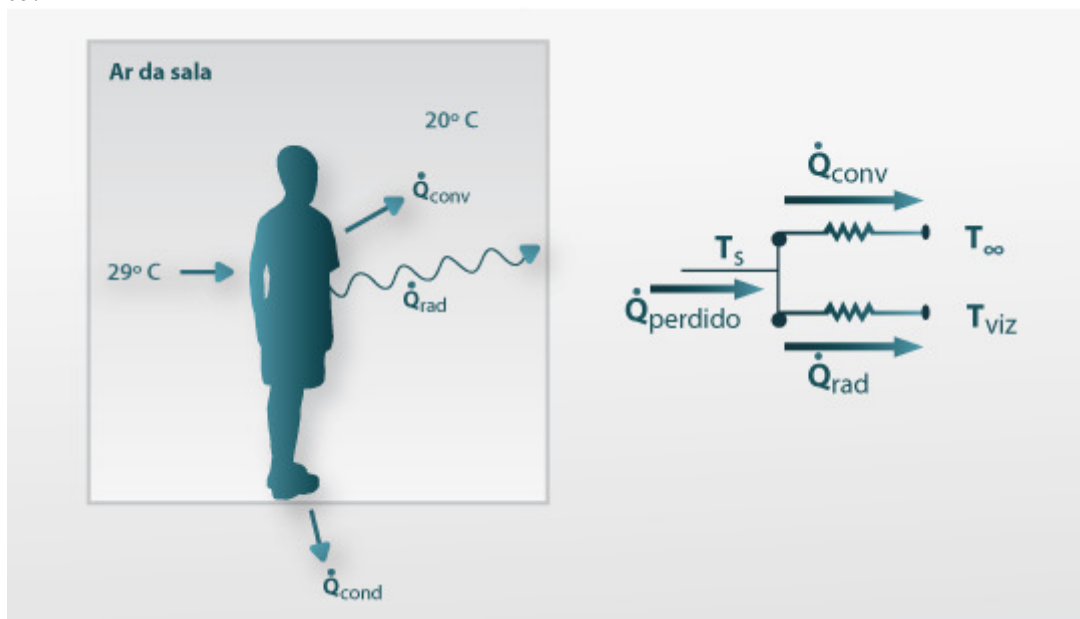


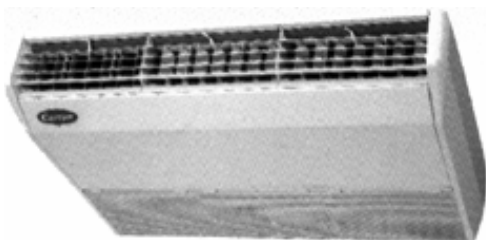
Figura 1.13 - Mecanismos de transferência de calor no ser humano

EXERCÍCIOS

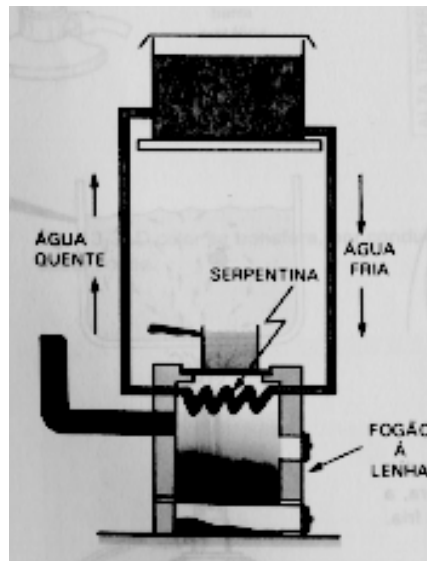
- 1.1. Qual a diferença entre temperatura e calor?
- 1.2. Conceitue taxa de transferência de calor.
- 1.3. O que é condução do calor?
- 1.4. O que é convecção do calor?
- 1.5. O que é radiação?
- 1.6. Qual o mecanismo dominante de transmissão de calor nos sólidos? Por que?
- 1.7. Qual o mecanismo dominante de transmissão de calor nos fluidos? Por que?
- 1.8. É possível ocorrer transmissão de calor no vácuo? Se afirmativo, de que forma?
- 1.9. Baseado nos mecanismos físicos de transferência de calor, explique como ocorre o resfriamento dos alimentos em um refrigerador.



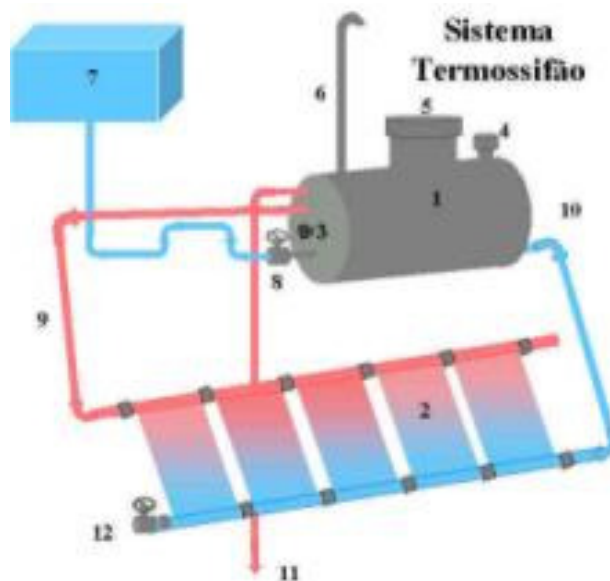
- 1.10. Tendo em mente os mecanismos físicos de transferência de calor, comente sobre o correto posicionamento de uma unidade evaporadora de um sistema “split” (ou de um condicionador de ar de janela) em um ambiente.



1.11. Baseado nos mecanismos físicos de transferência de calor, explique o funcionamento do sistema de aquecimento de água mostrado na figura a seguir.



1.12. Baseado nos mecanismos físicos de transferência de calor, explique o funcionamento do sistema de aquecimento de água mostrado na figura a seguir.



1.13. Identifique qual é o principal mecanismo de transferência de calor nos três fenômenos a seguir:

- (a) circulação do ar em refrigeradores;
- (b) aquecimento de uma barra de ferro;
- (c) variação da temperatura do corpo humano num banho de Sol.

1.14. Com relação a um refrigerador, explique por que:

- (a) o congelador fica na parte de cima;
- (b) as prateleiras são em forma de grade (e não placas inteiras);
- (c) periodicamente, o gelo que se forma no congelador deve ser retirado.

- 1.15.** Quando se passa roupa com um ferro elétrico, qual a principal processo de transmissão de calor para a roupa ?
- 1.16.** No inverno, usamos agasalhos porque eles:
- (a) mantém o frio fora do corpo;
 - (b) fornecem calor para o corpo;
 - (c) reduzem a perda de calor pelo corpo;
 - (d) reduzem a transpiração;
 - (e) retiram calor do corpo.
- 1.17.** Uma chapa utilizada para cozinhar é capaz de aquecer 1 litro de água, de 20°C para 80°C em 8 minutos. Determine a potência calorífica deste equipamento.
- 1.18.** A potência de uma fonte térmica é 120 W. Determine a quantidade de calor que um corpo recebe dessa fonte após permanecer 30 minutos em presença dela.
- 1.19.** Um forno de microondas tem potência elétrica de 1500 W. Admite-se que 90% desta potência seja efetivamente convertida em calor de aquecimento. Ao utilizar este forno para aquecer dois litros de sopa, inicialmente a 22°C, até 65°C, quanto tempo demorará o aquecimento? (Considere as propriedades da sopa iguais às da água).
- 1.20.** Um pequeno frigobar deve ser capaz de resfriar 8 latas de cerveja (300 ml), da temperatura ambiente (25°C), até 2°C, em 20 min. Calcule a capacidade (potência) de resfriamento que este equipamento deve ter.
- 1.21.** Um equipamento condicionador de ar precisa ser capaz de reduzir a temperatura do ar de uma sala, de 15 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de altura. A temperatura inicial do ar na sala é 32°C, e esta temperatura deve ser baixada para 22°C em 15 min. Neste período, a taxa de transferência de calor que penetra no ambiente, através das paredes, é de 1,0 kW. Desprezando as demais fontes de calor, pede-se a potência (capacidade) de resfriamento que o condicionador precisa ter. Determine o resultado em [kW], [Btu/h] e [TR].