

## 2. Fundamentos da Refrigeração e da Climatização

A refrigeração e o ar condicionado baseiam-se na utilização direta de componentes que funcionam a partir de princípios físicos, desenvolvidos por meio do conhecimento do comportamento térmico das substâncias e dos fenômenos da transferência de calor. Os ciclos térmicos (Figura 2.1) funcionam sempre entre duas fontes de calor (quente = reservatório quente e fria = reservatório frio).

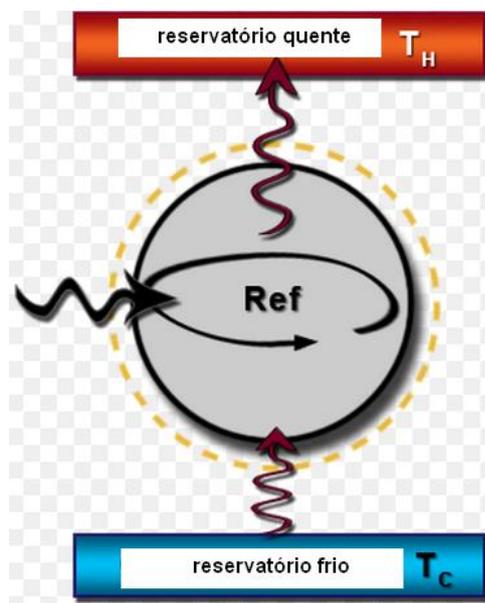


Figura 2.1- Máquina térmica funcionando entre duas fontes de calor.

A Termodinâmica pode ser definida como a área do conhecimento que estuda as relações entre calor e trabalho e suas aplicações no desenvolvimento das máquinas térmicas. Já a Transferência de Calor estuda os diferentes mecanismos de troca de calor. Foi através destes conhecimentos que se fundamentaram a invenção da máquina a vapor, dos motores automotivos e das máquinas de refrigeração.

Entende-se energia como um elemento capaz de causar transformações na natureza. Estas transformações podem ocorrer de diversas formas. Em sua expressão mais simples, energia é a capacidade de realizar trabalho. Ela pode existir sob diversas formas, como energia térmica (calor), energia mecânica, energia química, energia elétrica etc., e pode ser transformada de uma destas formas para outra. Por exemplo, a energia química de uma bateria de acumuladores transforma-se em energia elétrica que passa em um circuito e acende uma lâmpada (energia luminosa ou energia térmica) ou aciona um motor (energia mecânica). Embora a energia possa ser transformada de uma forma para outra, num sistema fechado, ela não pode ser criada ou destruída. É o famoso princípio da conservação da energia. Na termodinâmica, trataremos apenas das transformações de energia mecânica (através do trabalho) e da energia térmica (através do calor).

Calor é uma forma de energia transferida de um corpo a outro devido às diferenças de temperatura. No processo de aquecimento de água em um fogão, por exemplo, temos a energia térmica sendo transferida da chama (que tem elevada temperatura) para o corpo (que tem baixa temperatura).

Na Figura 2.2 ilustra-se o processo de troca térmica entre um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura. A energia em trânsito recebe o nome de calor.

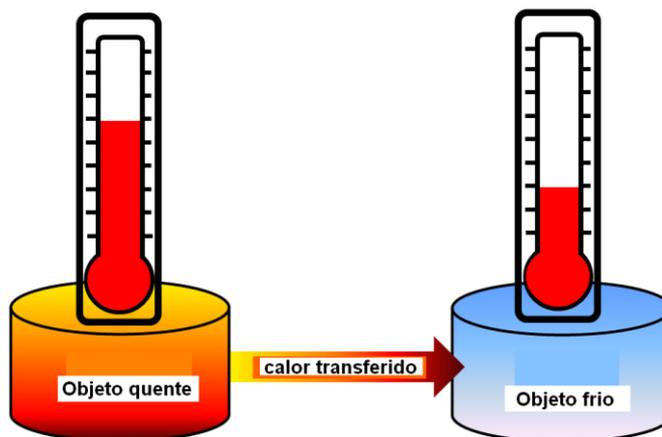


Figura 2.2 – Ilustração das trocas de calor entre corpo quente e frio.

[http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Anima%C3%A7%C3%B5es\\_em\\_Flash](http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Anima%C3%A7%C3%B5es_em_Flash).

Nesse caso, o calor recebido pelo corpo pode ser calculado por meio de equações que levam em consideração a massa do corpo sendo aquecido, seu calor específico e a variação de temperatura que ocorre durante o processo. No link recomendado anteriormente você poderá compreender melhor e exercitar seus conhecimentos com exemplos resolvidos. Na Figura 2.3 é possível visualizar que um corpo quente em contato com um corpo mais frio tende a ceder calor. No final há uma temperatura de equilíbrio que se situa entre a temperatura do corpo quente e do corpo frio. No caso da figura temos massas iguais de mesmo material trocando calor.

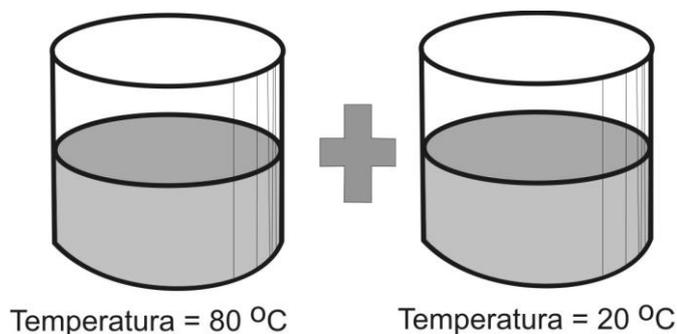


Figura 2.3 – Ilustração sobre trocas de calor.

Supondo que nos dois copos tenhamos a mesma quantidade de água podemos afirmar que a temperatura de equilíbrio é  $T_{FINAL}$ , calculados por:  $(m.c.\Delta T)$  do corpo quente =  $(m.c.\Delta T)$  do corpo frio. Nesse exemplo.  $(80 - T_{FINAL}) = (T_{FINAL} - 20)$ . Calculamos então  $T_{FINAL} = 100/2 = 50$ .

O calor pode ser trocado de um corpo a outro por três processos: São eles: a condução, a convecção e a radiação. Na condução, há necessidade de um meio sólido para a transferência do calor; já a convecção necessita de um meio fluido, no qual o calor é levado por esse de um corpo a outro. Este meio já não é necessário quando se fala na radiação, que é a transferência de calor de um corpo a outro por meio de ondas eletromagnéticas.

Trabalho é uma forma de energia mecânica capaz provocar movimentação de um corpo. Em refrigeração, tem-se o processo de compressão como exemplo mais simples de aplicação do conceito de trabalho. Dentro do compressor, há um pistão realizando trabalho sobre um determinado volume de fluido refrigerante que é comprimido. O pistão se movimenta porque recebe energia mecânica do eixo do compressor, alimentado pela rede elétrica.

Uma dada quantidade de energia pode ser disponibilizada em um tempo maior ou menor. De acordo com o tempo que se pode disponibilizar a energia, tem-se mais ou menos potência. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade característica de potência é o Watt (Joule/segundo). Também é comum encontrar a potência expressa em Btu/h, CV, HP, kcal/h e toneladas de refrigeração (1TR=12.000 Btu/h = 3517 Watts).

Em geral, a matéria pode ser encontrada na natureza nas formas gasosa, líquida e sólida. Através da aplicação de uma energia, tem-se a modificação de estado termodinâmico. Como exemplo pode-se observar a água. Comumente, podemos encontrá-la no estado sólido (gelo), líquido e gasoso (vapor), conforme esquematizado na figura 2.4.



Figura 2.4– Mudanças de estado da matéria.

Além da água, trabalha-se na refrigeração com fluidos refrigerantes. Estes fluidos sofrem uma série de transformações cíclicas capazes de produzir o efeito da refrigeração, tais como condensação e vaporização. Desta forma, podemos encontrá-los nos estados de líquido, mistura de líquido com vapor e de vapor dentro de um sistema. Na Figura 2.5 ilustramos alguns cilindros de fluidos refrigerantes encontrados na área de refrigeração.



Figura 2.5 – cilindro de fluidos refrigerantes

As propriedades termodinâmicas representam as características que uma substância possui. Estas propriedades são muitas vezes tabeladas para um determinado estado em que a substância se encontra. Para cada substância, tem-se na literatura técnica diversas tabelas com as propriedades termodinâmicas de interesse.

As principais propriedades termodinâmicas são: temperatura, pressão, energia interna, entalpia, volume específico, condutividade térmica, calor latente de fusão, calor latente de vaporização, entropia, título e massa específica. A seguir, exploraremos algumas destas propriedades:

A TEMPERATURA é associada à agitação molecular de um corpo. Quanto mais quente um corpo, maior sua agitação molecular. Do ponto de vista subjetivo, a temperatura está associada a uma sensação térmica de quente e de frio. Porém, esta sensação não é suficiente para se afirmar que um corpo está quente ou frio, pois nossa sensação é relativa. Por esse motivo, foram criados os termômetros, que são equipamentos capazes de medir a temperatura dos corpos.

Os mais comuns são os termômetros de coluna, os termopares e as termoresistências. Diversas escalas de temperatura são encontradas, tais como: Kelvin (K), Celsius (C), Fahrenheit (F) e Rankine (R). Podemos converter F para C utilizando a seguinte regra de conversão: Graus Celsius =  $0,55 \times (\text{Graus Fahrenheit} - 32)$ . Por exemplo: 75 Graus Fahrenheit são iguais a 23,8 Graus Celsius. Já para converter Graus Celsius para Kelvin devemos somar 273,15 a temperatura em Graus Celsius. Na Figura 2.6 é possível visualizar a relação entre estas escalas.

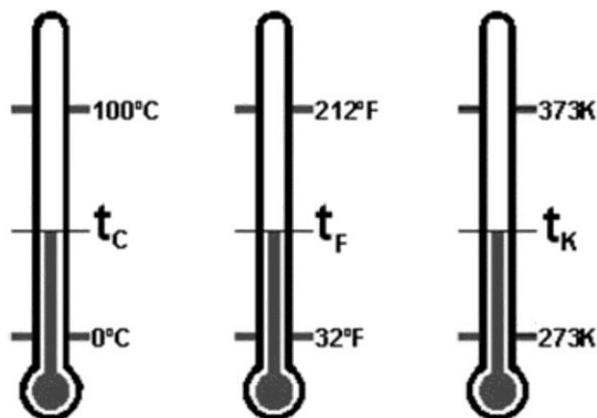


Figura 2.6–Escala termométricas para medição de temperatura.

Para transformar uma temperatura da escala Celsius para Fahrenheit utilizamos a equação:

$$\frac{TC}{5} = \frac{(TF - 32)}{9} \Rightarrow TC = \frac{5}{9} \times (TF - 32)$$

Já para transformar uma temperatura da escala Kelvin para Celsius utilizamos a equação:

$$TC = TK - 273,15 \quad \Rightarrow \quad TK = TC + 273,15$$

| <b>T(°C)</b> | <b>T KELVIN</b> | <b>T FAHRENHEIT</b> |
|--------------|-----------------|---------------------|
| 0            | 273,15          | 32                  |
| 4            | 277,15          | 39,2                |
| 8            | 281,15          | 46,4                |
| 12           | 285,15          | 53,6                |
| 16           | 289,15          | 60,8                |
| 20           | 293,15          | 68                  |
| 24           | 297,15          | 75,2                |
| 28           | 301,15          | 82,4                |
| 32           | 305,15          | 89,6                |
| 36           | 309,15          | 96,8                |
| 40           | 313,15          | 104                 |
| 44           | 317,15          | 111,2               |
| 48           | 321,15          | 118,4               |
| 52           | 325,15          | 125,6               |
| 56           | 329,15          | 132,8               |
| 60           | 333,15          | 140                 |
| 64           | 337,15          | 147,2               |
| 68           | 341,15          | 154,4               |
| 72           | 345,15          | 161,6               |
| 76           | 349,15          | 168,8               |
| 80           | 353,15          | 176                 |
| 84           | 357,15          | 183,2               |
| 88           | 361,15          | 190,4               |
| 92           | 365,15          | 197,6               |
| 96           | 369,15          | 204,8               |
| 100          | 373,15          | 212                 |

Um conceito também importante é o de temperatura de saturação. Nessa temperatura, ocorre a vaporização do fluido refrigerante a uma dada pressão, chamada de pressão de saturação. Para a água, por exemplo, ao nível do mar, a temperatura de saturação é de 100 graus Celsius. Se uma substância se encontra como líquido à temperatura de saturação, dizemos que ela está no estado de líquido saturado. Mas se a temperatura do líquido for menor que a temperatura de saturação para a pressão existente, o líquido é chamado de subresfriado.

Quando em um recipiente fechado, o fluido encontrar-se no estado de mistura de líquido mais vapor, dizemos que a mistura se encontra na condição de saturação. Nessa condição, coexistem os estados líquido e vapor (Figura 2.7).

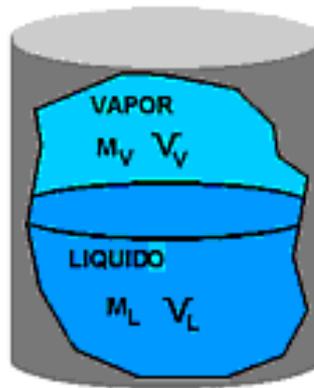


Figura 2.7- Coexistência das fases líquida e vapor (fluido saturado).

Para os fluidos utilizados na área de refrigeração, essa informação é importante porque, nessa condição, basta informar a pressão, uma vez que a temperatura de saturação é tabelada. Da mesma forma, nessa condição, basta definir a temperatura porque, em uma tabela de propriedades, obtemos facilmente a pressão de saturação. Por exemplo, se medimos no manifold que a pressão de um fluido dentro de um cilindro é de 28psi, então para o fluido R134a a temperatura será de -10 Graus Celsius.

A grandeza que informa o percentual de vapor na mistura de fluido saturado é chamada de título (representado normalmente pela letra "X"). Para o líquido saturado (quando só há líquido no recipiente), o título é zero. Para a condição de vapor saturado (há somente vapor no recipiente), o título é 1,0 (um). Quando uma substância encontra-se completamente como vapor na temperatura de saturação, chamamos essa condição de vapor saturado.

Quando o vapor encontra-se a uma temperatura maior que a temperatura de saturação, dizemos que, nessa condição, o fluido encontra-se como vapor superaquecido. Na Figura 2.8 ilustramos a obtenção do vapor superaquecido. Observamos que o fluido, já na condição de vapor saturado, recebe um aquecimento adicional. Nessa condição, o vapor se torna superaquecido.

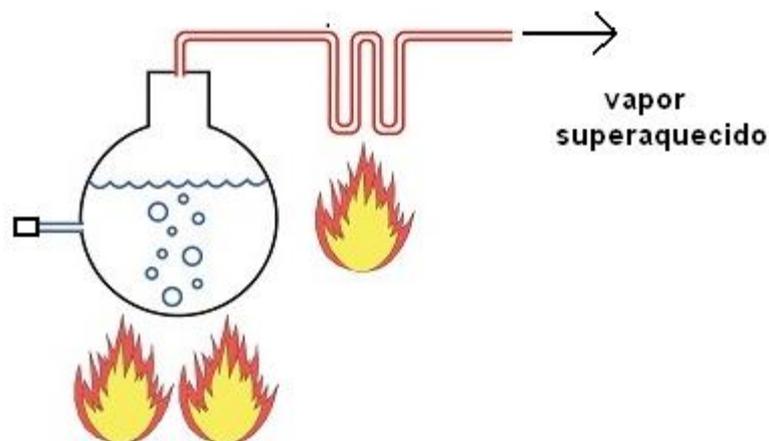


Figura 2.8- Ilustração da obtenção de vapor superaquecido.

A PRESSÃO atuando em um ponto de um fluido, é igual em todas as direções e pode ser definida pela componente normal da força aplicada por unidade de área de superfície. Considerando que pressão é calculada pela força aplicada sobre a área, na Figura 2.9 é possível afirmar que se a força distribuída for de mesma intensidade que a força pontual, a pressão aplicada no ponto será muito superior que a pressão aplicada do lado esquerdo, onde a área de aplicação é maior.

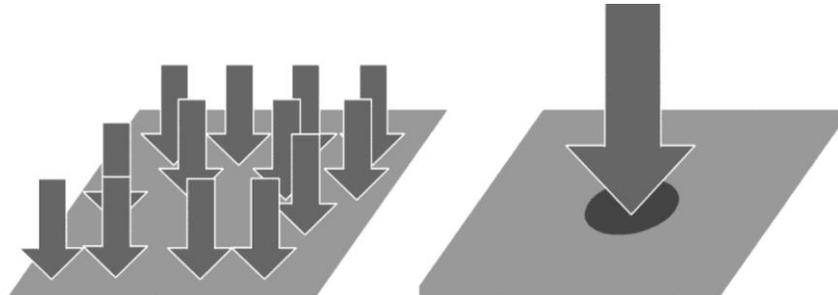


Figura 2.9- Ilustração do conceito de pressão.

Equipamentos como manômetros medem a pressão de fluidos tomando a pressão atmosférica como referência. A essa medida, dá-se o nome de pressão manométrica, conforme ilustrado na Figura 2.10.

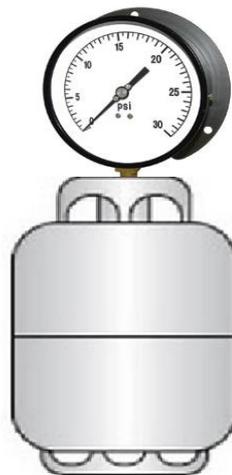


Figura 2.10- Ilustração da medição da pressão interna (cilindro vazio)

Na Figura 2.10 o manômetro está marcando zero. Mas vamos imaginar que esse valor fosse 100 psi.



Figura 2.11– Ilustração de um manifold típico.

O psi é uma escala de pressão muito utilizada nos manifolds, (Figura 2.11) equipamentos utilizados pelos profissionais da área de refrigeração. O valor de 14,7 psi corresponde a aproximadamente 101,325 kPa – que é a pressão atmosférica ao nível do mar (1 atmosfera). Logo, 100 psi correspondem a aproximadamente 689 kPa ou pouco mais de 6 atmosferas.

| kPa     | psi   |
|---------|-------|
| 101,325 | 14,7  |
| 151,325 | 22,0  |
| 201,325 | 29,2  |
| 251,325 | 36,5  |
| 301,325 | 43,7  |
| 351,325 | 51,0  |
| 401,325 | 58,2  |
| 451,325 | 65,5  |
| 501,325 | 72,7  |
| 551,325 | 80,0  |
| 601,325 | 87,2  |
| 651,325 | 94,5  |
| 701,325 | 101,7 |

É conveniente deixar claro que a unidade de pressão, o pascal (Pa), vem da sua própria definição, ou seja, força (expressa em newton) dividida pela área (expressa em metros quadrados). Um exemplo de pressão muito comum é a atmosfera. Esta pressão é resultado da camada de ar sobre nossos corpos e é avaliada ao nível do mar em 101,325 kPa (kilopascals) ou 1 atmosfera (1,0atm). Para fins práticos pode-se arredondar esta pressão para 100 kPa, que é exatamente igual a 1,0bar.

Podemos afirmar, ainda, que esta pressão de 1 atm equivale a uma camada d'água de cerca de 10 metros sobre nossas cabeças. Dessa forma, cada vez que um mergulhador mergulha 10 metros na água percebe um aumento de 1 atmosfera. Logo, um mergulhador a 30 metros de profundidade estará submetido a uma pressão de 4 atmosferas (deve-se somar a própria pressão atmosférica).

Num sistema de refrigeração, há pressões elevadas (da ordem de 20 bar), muito maiores do que a atmosférica; porém, em diversas situações, somos obrigados a trabalhar com pressões pequenas, ou até mesmo, com vácuo.

Se definirmos a pressão de um gás tendo como referência a pressão atmosférica, então, esta é chamada de pressão relativa ou manométrica. Senão, a pressão é dita absoluta. Por exemplo: uma garrafa de fluido refrigerante tem pressão manométrica de 200 psi. Logo, sua pressão absoluta é de 214,7 psi, pois 1 atmosfera equivale a 14,7 psi. A unidade “psi” é muito empregada nos manômetros e manifolds, sendo *psig* a pressão manométrica e *psia* a pressão absoluta.

Em refrigeração, trabalhamos em diversas situações com pressões abaixo da atmosfera nos procedimentos de realização de vácuo nas tubulações de fluido refrigerante.

Para a obtenção de níveis de vácuo aceitáveis, em um sistema de refrigeração, é fundamental o uso de bombas de vácuo (Figura 2.12). O uso destes equipamentos se deve ao fato de que é preciso que se reduza a pressão abaixo de 29,91 polegadas de Hg dentro das tubulações, de tal forma a evaporar qualquer umidade existente. Nessa situação, a umidade se evapora a -31 Graus Celsius.



Figura 2.12- Ilustração de uma bomba de vácuo.

Na Figura 2.13, ilustramos o uso de uma bomba de vácuo para evacuação de um circuito de refrigeração. Observamos que a bomba de vácuo é conectada no sistema de refrigeração por meio das mangueiras do manifold pela válvula de serviço. Um vacuômetro é utilizado para medição do nível do vácuo dentro da tubulação.

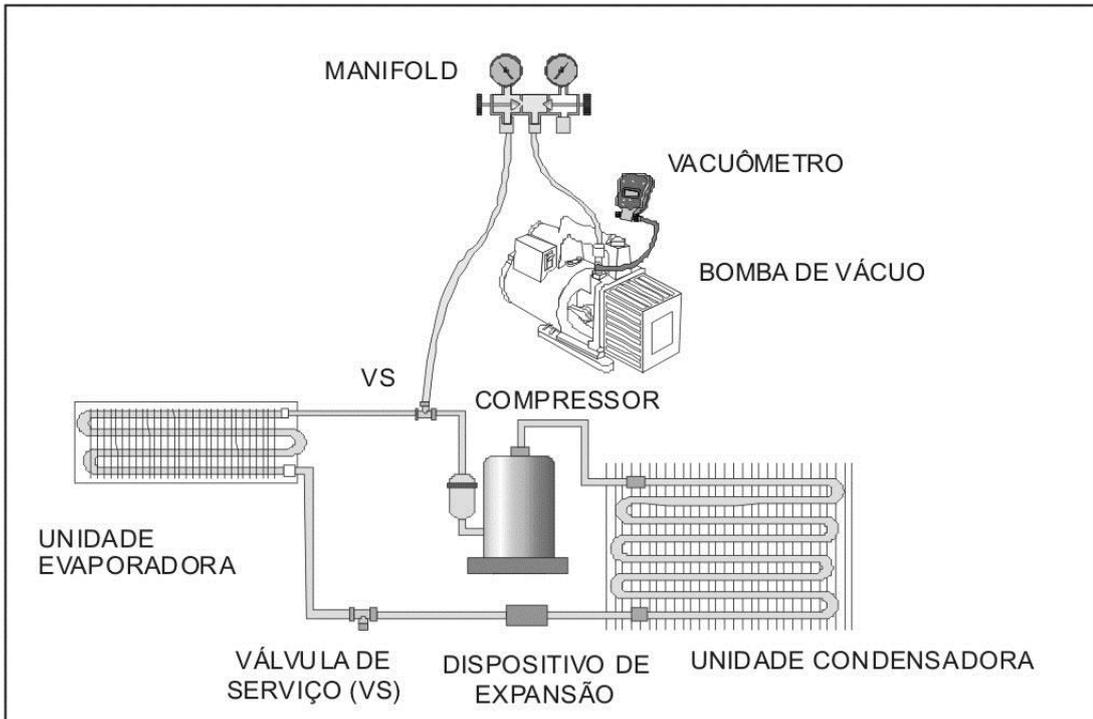


Figura 2.13 – Ilustração do uso de uma bomba de vácuo

Além da temperatura e da pressão, é importante que o técnico de refrigeração conheça o conceito de CALOR ESPECÍFICO DE UM CORPO, que é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa do corpo em um grau de temperatura. Em unidades métricas o calor específico foi definido como a quantidade de calor, em kcal, necessária para elevar a temperatura de 1kg do corpo em 1 Graus Celsius.

Pela própria definição das unidades de quantidade de calor, o calor específico da água é 1,0 kcal/(kg . Graus Celsius) ou ainda 4,186 kJoules / (kg. Graus Celsius). Observamos que a mesma quantidade de calor provoca diferentes variações de temperatura. No caso ilustrado na Figura 2.14, a temperatura da água varia muito pouco se comparada com a temperatura do ouro.

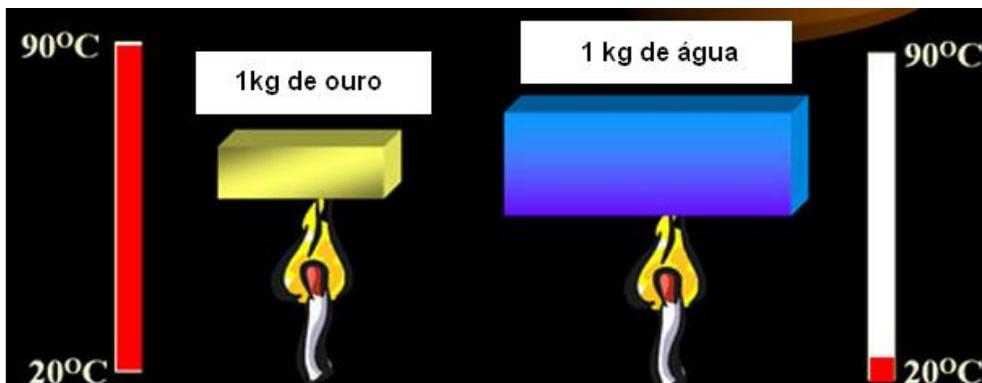


Figura 2.14 – Ilustração do uso de uma bomba de vácuo

Como a maioria dos corpos requer menos energia calorífica do que a água para uma dada alteração de temperatura, os seus calores específicos são menores que 1,0 kcal/(kg. Graus Celsius). Na Figura 2.15 ilustramos alguns valores típicos para calor específico.

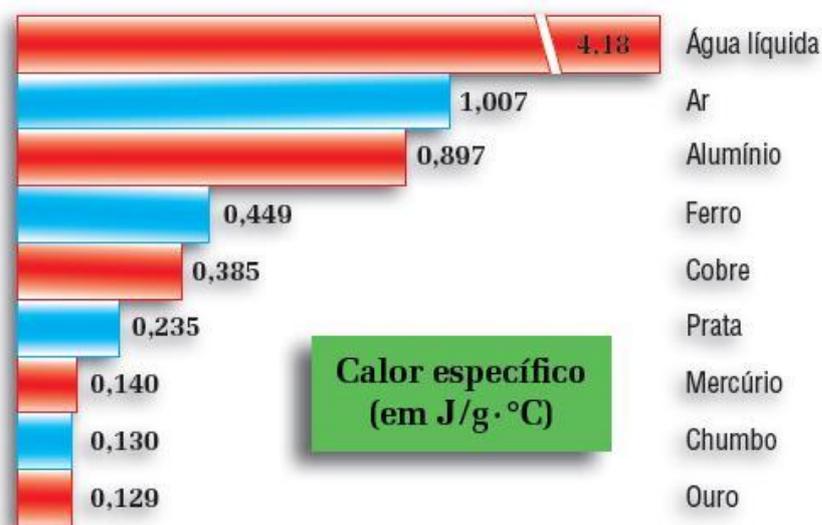


Figura 2.15– Valores típicos para calor específico.

Já a CONDUTIVIDADE TÉRMICA indica a facilidade ou dificuldade que um corpo apresenta para conduzir calor. Sabemos que os metais têm maior facilidade para transferir calor do que a madeira. Na literatura especializada é possível obter listas com diversos materiais e suas respectivas condutividades térmicas. Destacamos a condutividade térmica do poliuretano (0,024W/m.K), que é muito baixa comparada com materiais como tijolos (1,32W/m.K) e metais. Essa é a explicação para o uso desse tipo de material na construção das paredes das câmaras frias. Já o cobre tem elevada condutividade térmica (386W/m.K) e, por isso, é usado para construção dos trocadores de calor dos refrigeradores e condicionadores de ar. A troca de calor entre dois lados de uma parede pode ser visualizada na Figura 2.16.

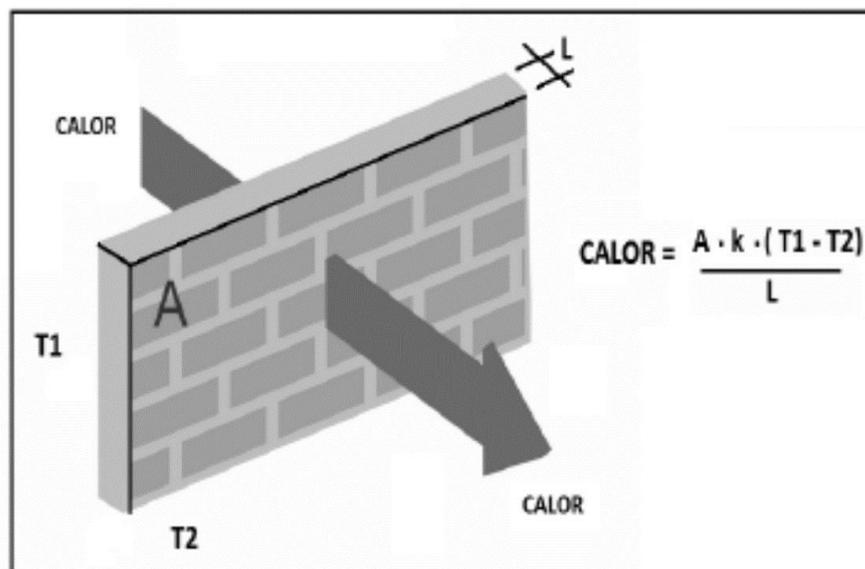


Figura 2.16- Ilustração de tubulação de cobre.

Na Figura 2.16, vamos imaginar que a parede de tijolos ( $k = 1,32 \text{ W/m.K}$ ) tenha espessura de 25cm. A área da parede é de  $12\text{m}^2$ , o que equivale a uma parede de 4m de largura por 3m de altura. A Temperatura da face externa da parede é de 30 graus Celsius. A temperatura da face interna da parede é de 20 graus Celsius. Nesse caso o calor trocado entre os dois lados da parede é de 633 Watts. Esse valor deve ser retirado pelo equipamento de climatização.

$$Q = \frac{k.A.\Delta T}{L} = \frac{1,32 \cdot 12 \cdot (30 - 20)}{0,25} = 633 \text{ W}$$

A ENTALPIA ESPECÍFICA indica o nível de energia por unidade de massa em que se encontra a substância devido a sua energia interna e a sua pressão. Seu valor é encontrado em tabelas de propriedades termodinâmicas. O símbolo empregado para representá-la é “h” e sua unidade é kJ/kg. A entalpia de um fluido refrigerante numa dada pressão pode ser dada através do líquido saturado ( $h_{\text{líquido}}$ ), do vapor saturado seco ( $h_{\text{vapor}}$ ) e do  $h_{\text{lv}}$  (entalpia para mudança de fase ou de vaporização). Na tabela 2.1, tem-se um exemplo de valores de entalpia para o R134a. Observe que  $h_{\text{líquido}}$  é quando o fluido refrigerante encontra-se totalmente condensado (estado de líquido). Já  $h_{\text{vapor}}$  é quando o fluido se encontra totalmente no estado de vapor saturado. Há, ainda, outras tabelas para situações em que o fluido se encontra no estado de vapor superaquecido ou no estado de líquido subresfriado.

Tabela 2.1- Propriedades do R134a para duas condições de temperatura

| T<br>(Graus Celsius) | P (kPa) | $h_{\text{líquido}}$ (kJ/kg) | $h_{\text{vapor}}$ (kJ/kg) | $h_{\text{lv}}$ de vaporização<br>(kJ/kg) |
|----------------------|---------|------------------------------|----------------------------|---|
| -10                  | 201,7   | 186,72                       | 392,28                     | 205,56                                    |
| 40                   | 1017,1  | 256,53                       | 419,82                     | 163,28                                    |

Considerando que definimos o conceito de entalpia para mudança de fase ( $h_{\text{lv}}$ ) é conveniente também, apresentar um conceito análogo, o calor latente de fusão ( $L_{\text{fusão}}$ ), que é definido como a quantidade de calor necessária para fundir (derreter) uma certa quantidade de massa de uma substância. O gelo, por exemplo, necessita de 80 kcal para que 1 kg do mesmo se derreta; já Calor Latente de vaporização ( $L_{\text{vapor}}$ ) é a quantidade de calor necessária para vaporizar uma certa quantidade de massa de uma substância. A água, por exemplo, necessita de 540 kcal para que cada quilograma se evapore.

A maioria dos fluidos refrigerantes comporta-se como substâncias puras. A substância pura muda de fase à temperatura constante (mantida a pressão constante). Desta forma, uma massa de água pura congelada, ao se derreter ao nível do mar, mantém sua temperatura constante em zero grau. Já para evaporar (ao nível do mar), a água manterá sua temperatura constante em 100 Graus Celsius. Outra característica importante é que uma substância pura apresenta uma relação entre a pressão e a temperatura, dada em diagramas, ou seja, para cada temperatura de saturação, tem-se uma pressão de saturação e vice e versa.

Em Termodinâmica, é muito comum representar o ciclo que ocorre num processo de refrigeração através de curvas características ou diagramas. O diagrama mais utilizado em refrigeração é o “pressão *versus* entalpia” (Figura 2.17). Este diagrama se mostra conveniente devido ao fato de trabalharmos, na maioria das vezes, com substâncias puras que se condensam e se vaporizam isobaricamente, isso é, em uma pressão constante. Conforme ilustrado na Figura 2.17 o fluido encontra-se na mesma temperatura nos pontos A, B e C porque estes pontos encontram-se sobre uma linha isotérmica.

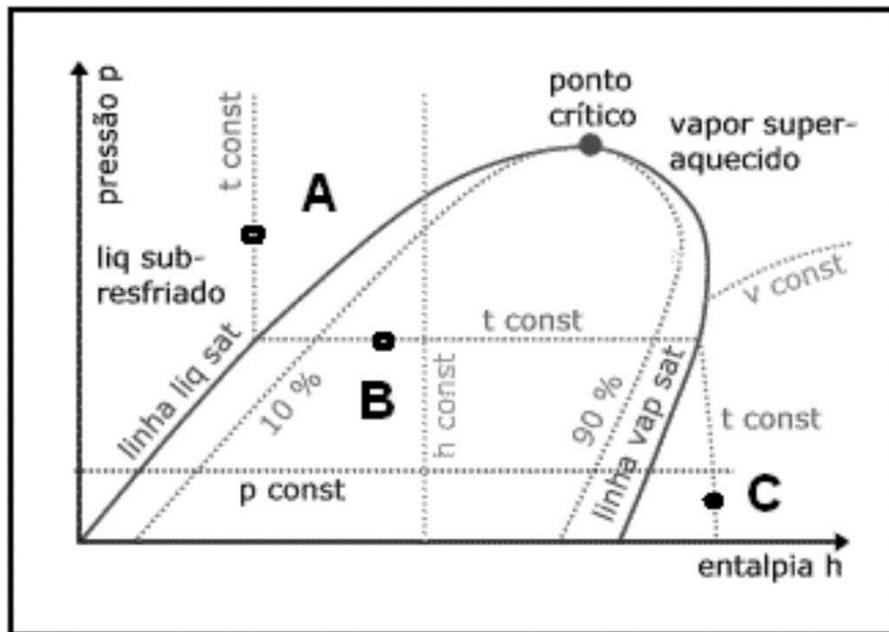


Figura 2.17– Diagrama esquemático entre pressão e entalpia específica

Observamos na Figura 2.17 a existência de linhas chamadas de isotermas, que significam que se o fluido tiver seu processo de transformação termodinâmica ocorrendo sobre essa linha, o processo é chamado de isotérmico. Da mesma forma acontece com linhas isovolumétricas, isoentrópicas e isobáricas (pressão constante). O diagrama apresenta 3 regiões bem definidas: a de líquido subresfriado, a de saturação e a região de superaquecimento. Dentro da região de saturação o fluido sempre se encontrará como uma mistura de líquido mais vapor. Na região de superaquecimento o fluido sempre se encontrará como superaquecido. A compressão do fluido no compressor acontece dentro da região de vapor superaquecido. Já a vaporização do fluido acontece na região de saturação, pois nessa situação o fluido está passando por uma transformação de líquido para vapor.

“Na natureza nada se cria e nada se perde tudo se transforma.” Esta frase ficou famosa e é atribuída ao físico-químico francês chamado Lavoisier. Benjamim Thompson formulou a tese de que calor é uma forma de energia, a qual poderia ser transferida de um corpo para outro, sem ser destruído. Essa constatação ficou conhecida como a equivalência entre calor e trabalho. Desta forma, pode-se observar que é possível a conversão de energia mecânica em energia térmica, um exemplo é quando atritamos dois pedaços de madeira (a maneira primitiva de se fazer fogo). Experimentos do físico inglês Joule (Figura 2.18) permitiram medir o trabalho necessário para produzir uma certa quantidade de calor, determinando o equivalente mecânico de calor, representado por joule.

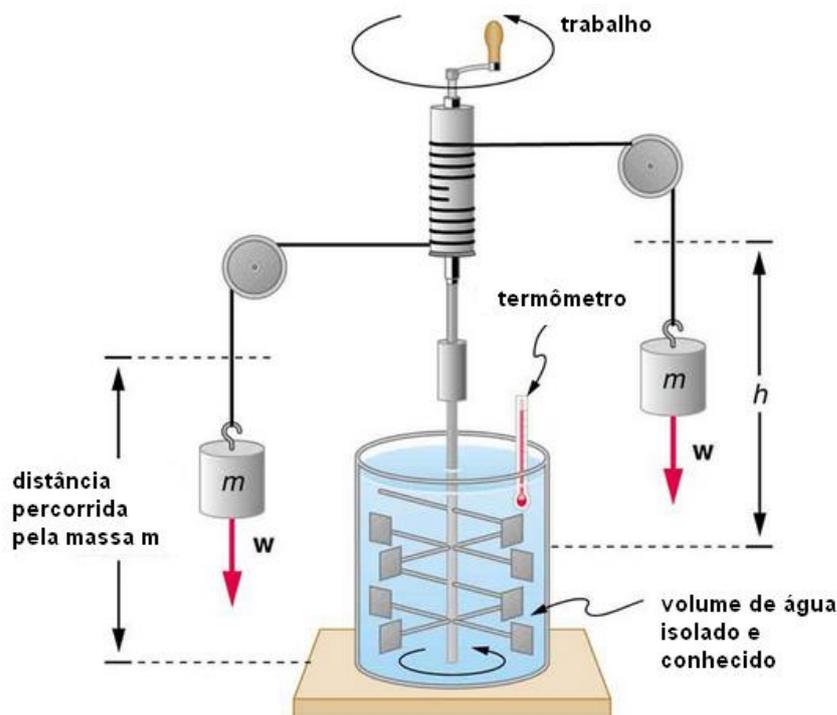


Figura 2.18– Experimento de equivalência trabalho e calor.

Ou seja, 4,186 joules de energia mecânica quando convertidos em calor elevarão a temperatura de 1 grama de água em grau Celsius. (Designou-se, portanto, 1 caloria como sendo equivalente a 4,186 Joule).

Para compreendermos melhor o princípio da equivalência entre calor e trabalho, é conveniente definirmos o que é um SISTEMA e o que é um VOLUME DE CONTROLE. Sistema termodinâmico é o nome dado a uma quantidade de matéria com massa e identidade constantes, sobre a qual nossa atenção é dirigida. O volume de controle é um sistema aberto que admite a variação da sua massa. Esse conceito é bastante importante na análise de máquinas térmicas como compressores, bombas, ventiladores e turbinas. Em um volume de controle a massa, o calor e o trabalho podem ser transportados através da superfície de controle (Figura 2.19).

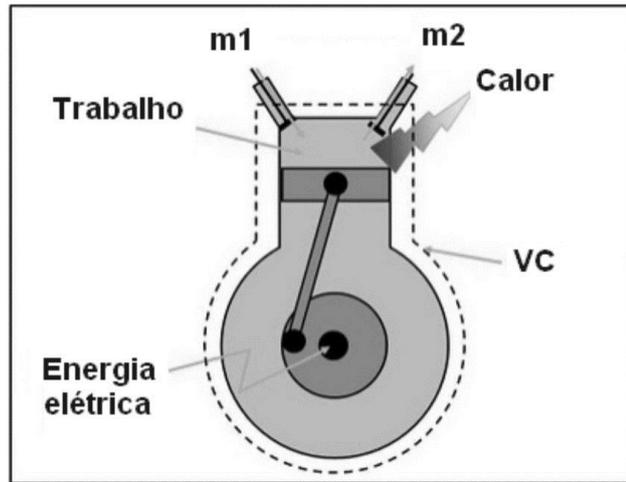


Figura 2.19- Ilustração de um volume de controle envolvendo um compressor.

O fluido refrigerante circula internamente por dentro das tubulações do sistema, atravessando o evaporador, o compressor, o condensador e o dispositivo de expansão conforme explicaremos em detalhes no próximo capítulo.

As leis da conservação da energia e da massa devem ser aplicadas para cada processo termodinâmico pelo qual passa o fluido refrigerante.

Os efeitos das trocas de calor entre um corpo e outro podem ocorrer na forma sensível e na forma latente. Observa-se que, quando o calor aplicado apenas modifica a temperatura do corpo, é chamado de calor sensível. Porém, se há modificação do estado físico da matéria (mudança de fase), então dizemos que houve troca de calor latente. O calor latente é calculado pela multiplicação da massa pelo coeficiente “L” de mudança de fase. Para a água  $L = 80$  calorias por grama para a fusão ou solidificação e 540 calorias por grama para a vaporização ou condensação. O calor sensível é calculado pela multiplicação da massa pelo calor sensível da substância e pela variação de temperatura que ocorreu no processo. O calor sensível da água no estado sólido (gelo) é de 0,5 calorias / (grama x graus Celsius). Para a água no estado líquido, o calor sensível é 1,0 calorias / (gramas x graus Celsius).

Para exemplificar, vamos supor que uma massa de 1kg de gelo a  $-10$  Graus Celsius seja aquecida. O cálculo da quantidade de calor necessária durante este processo pode ser realizado por meio de uma expressão composta por 3 parcelas. A primeira parcela da equação se refere ao cálculo do calor sensível; a segunda se refere ao calor latente e a terceira se refere ao calor sensível.

$$Q_{total} = [(m \cdot c_{sólido} \cdot \Delta T_1) + (m \cdot L_{fusão}) + (m \cdot c_{líquido} \cdot \Delta T_2)]$$

Onde: m é a massa da substância a ser aquecida; c é o calor específico (o calor específico do gelo é a metade do calor específico da água líquida);  $\Delta T = T_{final} - T_{inicial}$ ;  $T_{final}$  é a temperatura final e  $T_{inicial}$  é temperatura inicial da substância. Já “L<sub>fusão</sub>” é o calor latente de fusão, que é a quantidade de calor que se acrescenta ao corpo e que causa uma mudança de estado, sem mudança de temperatura. A Figura 2.20 ilustra esse processo.

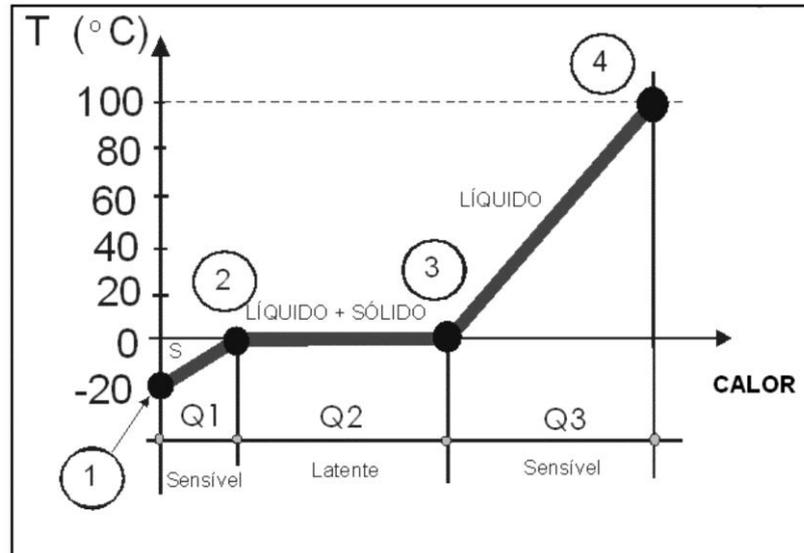


Figura 2.20– Curva de aquecimento de uma massa de água

Em um primeiro momento, ocorre a elevação da temperatura do gelo de  $-10$  Graus Celsius até  $0$  (zero) Grau Celsius (Esta é uma parcela do calor sensível sendo trocado). Essa parcela é calculada como sendo  $Q_1=5$  kcal que é igual a  $1\text{kg} \times 0,5$  (kcal / kg. graus Celsius)  $\times$   $10$  Graus Celsius. Nesse caso  $0,5$  representa o calor específico da água no estado sólido (gelo) e  $10$  representa a variação de temperatura do gelo que passa de  $-10$  até  $0^\circ\text{C}$ .

A água tem como característica ser uma substância pura e, desta forma, muda de fase à temperatura constante. Nesta etapa, há apenas troca de calor latente:  $Q_2=80\text{kcal}$ . Todo o gelo transforma-se em água líquida e, neste momento, inicia-se o processo de aquecimento, no qual há troca de calor sensível. O aquecimento prossegue até que a água atinja o ponto de vaporização a  $100$  Graus Celsius, sendo o calor trocado de  $0$  a  $100$  Graus Celsius,  $Q_3=100\text{kcal}$ . Neste instante, a variação de temperatura cessa e a troca de calor latente é iniciada. O calor total envolvido no processo é de  $185$  kcal.

Sabemos que calor é transferido de um corpo para outro desde que exista uma diferença de temperatura entre eles. Sabemos ainda que todas as substâncias são formadas por átomos. Esses, por sua vez, agrupam-se formando moléculas. Também, já apresentamos que o conceito de temperatura está associado à velocidade de movimentação destas moléculas, ou seja, quanto maior a temperatura, mais velozmente as moléculas estão vibrando (se movimentando). Agora, para compreender melhor as trocas térmicas, vamos apresentar mais detalhes dos três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação (Figura 2.21).

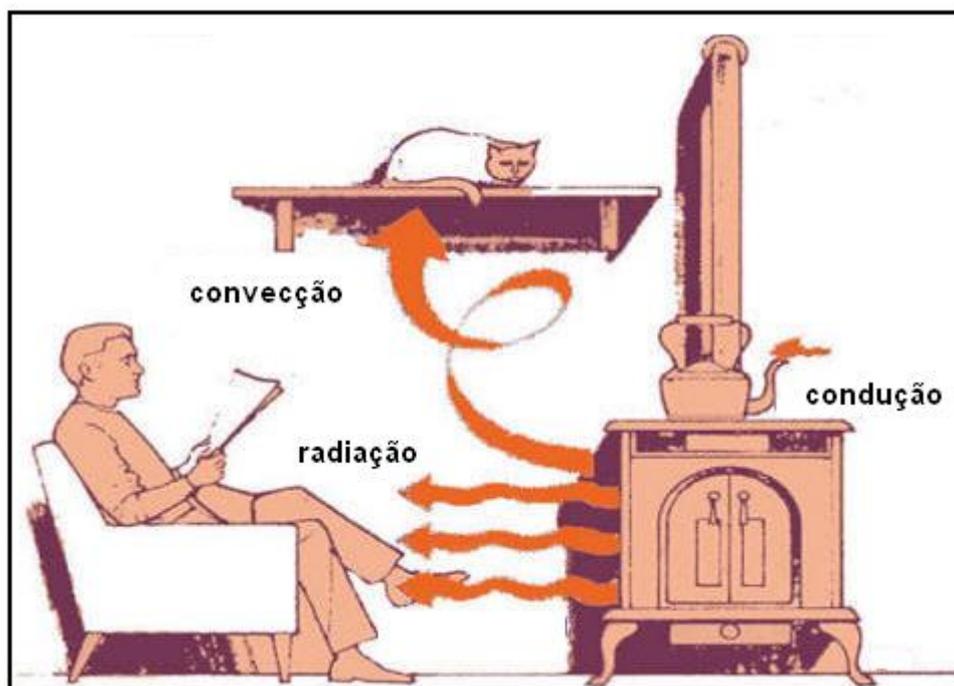


Figura 2.21– Três mecanismos de transferência de calor.

A **condução** está fundamentalmente associada ao choque entre moléculas com diferentes velocidades de vibração, com a molécula mais veloz chocando-se com a molécula menos veloz, "passando" energia cinética. Ela acontece a partir de um corpo. Para se reduzir a taxa de condução entre ambientes quentes e frios utilizamos materiais isolantes ( $k \sim 0,02$  W/m.K)). Na Figura 2.22 ilustramos uma parede isolante utilizada para construção de câmaras frias. Podemos dizer que quanto menor a condutividade térmica da parede, menor é a troca de calor entre o ambiente interno e externo e menor a capacidade de refrigeração requerida. Por isso é fundamental se calcular e se utilizar os isolantes mais apropriados para cada situação.



Figura 2.22- Parede isolante utilizada em câmaras frias.

Em diversas situações, como por exemplo, na distribuição de água gelada e nas tubulações utilizadas para conexão entre as unidades condensadoras e evaporadoras dos splits temos trocas de calor entre o fluido movimentado dentro da tubulação e o meio exterior. Estes tubos precisam ser convenientemente isolados porque há transferência de calor por condução através das paredes (Figura 2.23).



Figura 2.23- Isolamento térmico para tubulações de cobre.

O segundo modo de transferência de calor, a **convecção**, ocorre em fluidos (líquidos e gases). Nos fluidos, as moléculas não apresentam uma ligação tão forte entre si, não estão rigidamente presas, como nos sólidos. Ou seja, elas podem mudar livremente de lugar no espaço. 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 entram em contato com a superfície sólida, aquecendo-se e reiniciando o processo.

Todo corpo com temperatura maior que zero Kelvin emite energia na forma de radiação. Essa energia é tanto maior quanto maior for a temperatura da matéria (isso é, sua agitação molecular). Este tipo de transferência de calor não precisa de um meio material para se realizar. Um exemplo é a energia do Sol. No espaço entre o Sol e a Terra, praticamente não existe matéria (vácuo). Mesmo assim, a energia do Sol alcança nosso planeta. Essa transferência de energia (calor) se dá por meio de ondas eletromagnéticas (radiação).

A radiação absorvida penetrará até o ambiente interno por condução. Se a superfície for transparente (vidros), a radiação incidente se divide em 3 partes: uma parte é refletida, principalmente quando se utilizam películas refletivas; outra parte é absorvida pelo material e outra é transmitida para dentro do ambiente diretamente.

A radiação solar incidente varia de acordo com a latitude e com a época do ano. Na literatura especializada, há tabelas, com essas informações, que são importantes para estimativa da carga térmica. Uma curiosidade sobre a penetração de calor por radiação é o fato de que o “efeito estufa” que sentimos quando deixamos o carro fechado no sol se explica porque as ondas eletromagnéticas vinda do sol possuem comprimento de onda curto, e por isso atravessam o vidro do carro. Essa radiação aquece os estofamentos e painéis, que emitem calor em comprimento de onda longo, que não consegue atravessar o vidro e sair (Figura 2.24).

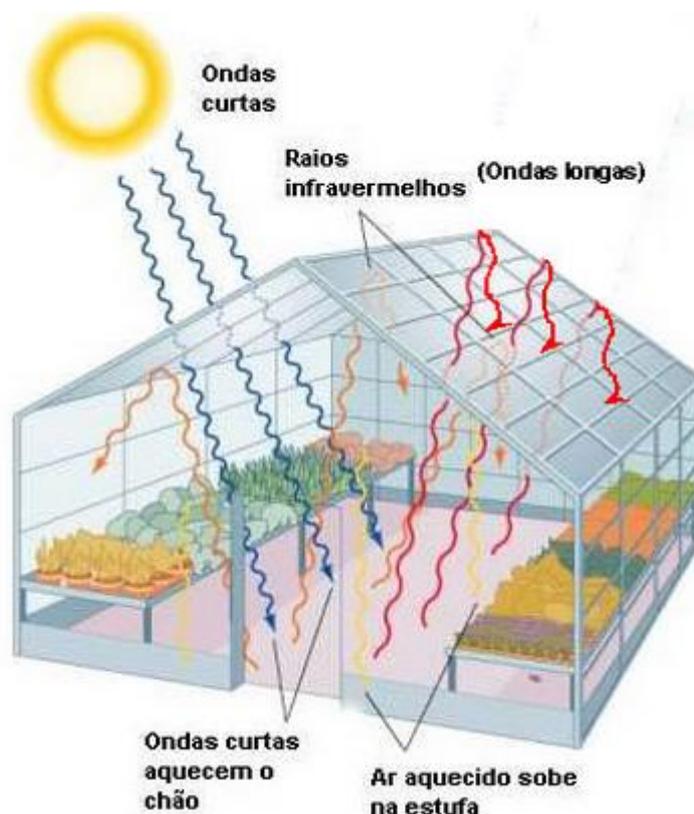


Figura 2.24- Efeito estufa decorrente da penetração dos raios solares.

O entendimento do funcionamento de um refrigerador comum é a base para a compreensão do funcionamento de sistemas mais complexos. A seguir, apresentaremos os principais processos utilizados para produzir os efeitos da refrigeração, tais como: a refrigeração por compressão mecânica de vapor, a refrigeração por absorção e a refrigeração termoelétrica.

A maioria dos refrigeradores comuns opera por meio da COMPRESSÃO MECÂNICA DE VAPOR. Nesse processo, o fluido refrigerante, localizado no interior da tubulação que interliga os quatro componentes principais do refrigerador, sofre transformações termodinâmicas e há troca de calor e trabalho. O fluido refrigerante é uma substância que circulando dentro de um circuito fechado é capaz de retirar calor de um meio enquanto vaporiza-se a baixa pressão. Esse fluido entra no evaporador a baixa pressão, na forma de mistura de líquido mais vapor, e retira energia do meio interno refrigerado (energia dos alimentos) enquanto vaporiza-se e passa para o estado de vapor. Esse processo é ilustrado através da tabela e das Figuras 2.25.

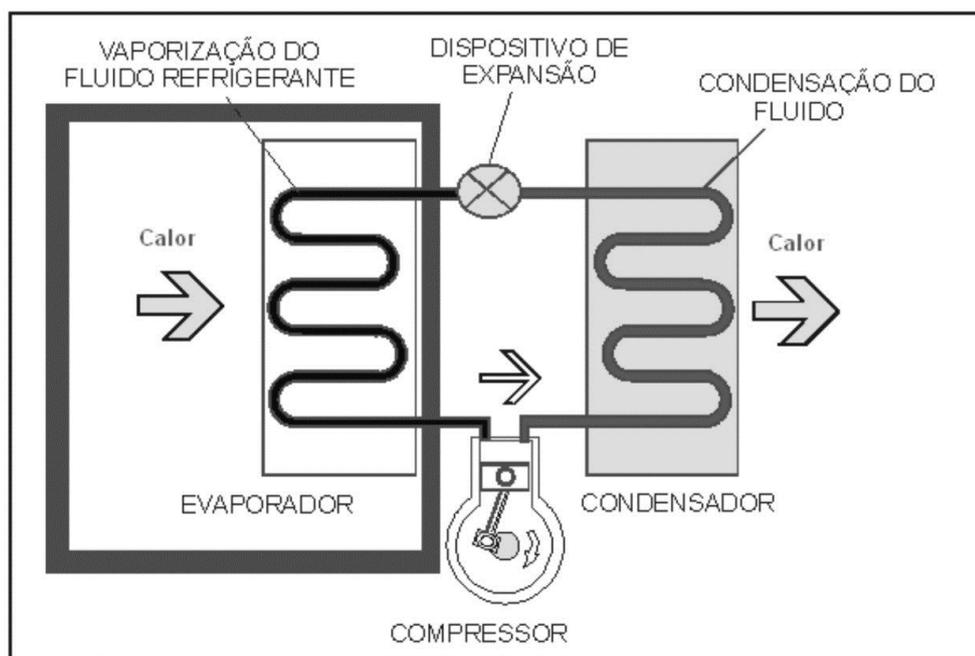


Figura 2.25– Ciclo de compressão mecânica de vapor

O vapor entra no compressor, onde é comprimido e bombeado, tornando-se vapor superaquecido e deslocando-se para o condensador, que tem a função de liberar a energia retirada dos alimentos e resultante do trabalho de compressão para o meio exterior.

O fluido, ao liberar sua energia, passa do estado de vapor superaquecido para líquido (condensa) e, finalmente, entra no dispositivo de expansão, onde tem sua pressão reduzida para, novamente, ingressar no evaporador e repetir-se, assim, o ciclo.

Tabela 2.1– Processos termodinâmicos em um ciclo de refrigeração.

| <b>Componente</b>       | <b>Características das transformações sofridas pelo fluido refrigerante</b> |
|-------------------------|---|
| Evaporador              | Vaporização do fluido refrigerante a baixa pressão                          |
| Compressor              | Compressão do fluido refrigerante   |
| Condensador             | Condensação a uma pressão elevada   |
| Dispositivo de Expansão | Expansão do fluido refrigerante   |