

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
BAHIA
Campus Santo Amaro



APOSTILA DE REFRIGERAÇÃO

-  **O HISTÓRICO DA REFRIGERAÇÃO**
-  **FLUIDOS REFRIGERANTES**
-  **OZÔNIO/PROCESSO DE FORMAÇÃO/DESTRUIÇÃO**
-  **SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

março/2009

O HISTÓRICO DA REFRIGERAÇÃO

O emprego dos meios de refrigeração já era do conhecimento humano mesmo na época das mais antigas civilizações. Pode-se citar a civilização chinesa que, muitos séculos antes do nascimento de Cristo, utilizava o gelo natural (colhido nas superfícies dos rios e lagos congelados e conservado com grandes cuidados, em poços cobertos com palha e cavados na terra) com a finalidade de conservar o chá que consumiam. As civilizações gregas e romanas que também aproveitavam o gelo colhido no alto das montanhas, a custo do braço escravo, para o preparo de bebidas e alimentos gelados.

Já a civilização egípcia, que devido a sua situação geográfica e ao clima de seu país, não dispunham de gelo natural, refrescavam a água por evaporação, usando vasos de barro, semelhantes às *moringas*¹, tão comuns no interior do Brasil. O barro, sendo poroso, deixa passar um pouco da água contida no seu interior, a evaporação desta para o ambiente faz baixar a temperatura do sistema. Entretanto, durante um longo período de tempo, na realidade muitos séculos, a única utilidade que o homem encontrou para o gelo foi a de refrigerar alimentos e bebidas para melhorar seu paladar.

No final do século XVII, foi inventado o microscópio e, com o auxílio deste instrumento, verificou-se a existência de microorganismos (micróbios e bactérias) invisíveis à vista sem auxílio de um instrumento dotado de grande poder de ampliação. Os micróbios existem em quantidades enormes, espalhados por todas as partes, água, alimentos e organismos vivos.

Estudos realizados por cientistas, entre eles o célebre químico francês Louis Pasteur, demonstraram que alguns tipos de bactérias são responsáveis pela putrefação dos alimentos e por muitos tipos de doenças e epidemias. Ainda através de estudos, ficou comprovado que a contínua reprodução das bactérias podia ser impedida em muitos casos ou pelo menos limitada pela aplicação do frio, isto é, baixando suficientemente a temperatura do ambiente em que os mesmos proliferam. Essas conclusões provocaram, no século XVIII, uma grande expansão da indústria do gelo, que até então se mostrava incipiente.

Antes da descoberta, os alimentos eram deixados no seu estado natural, estragando-se rapidamente. Para conservá-los por maior tempo era necessário submetê-los a certos tratamentos como a salgação, a defumação ou o uso de condimentos. Esses

¹ *Moringa* é um vaso de barro arredondado, de gargalo estreito para água.

tratamentos, na maioria dos casos, diminuía a qualidade do alimento e modificavam o seu sabor. Com a descoberta, abria-se a possibilidade de se conservar os alimentos frescos, com todas as suas qualidades, durante um período de tempo maior.

Contudo, o uso do gelo natural trazia consigo uma série de inconvenientes que prejudicavam seriamente o desenvolvimento da refrigeração, tornando-a de valia relativamente pequena.

Assim, ficava-se na dependência direta da natureza para a obtenção da matéria primordial, isto é, o gelo, que só se formava no inverno e nas regiões de clima bastante frio. O fornecimento, portanto, era bastante irregular e, em se tratando de países mais quentes, era sujeita a um transporte demorado, no qual a maior parte se perdia por derretimento, especialmente porque os meios de conservá-lo durante este transporte eram deficientes. Mesmo nos locais onde o gelo se formava naturalmente, isto é, nas zonas frias, este último tinha grande influência, pois a estocagem era bastante difícil, só podendo ser feita por períodos relativamente curtos.

Por este motivo, engenheiros e pesquisadores voltaram-se para a busca de meios e processos que permitissem a obtenção artificial de gelo, liberando o homem da dependência da natureza. Em consequência desses estudos, em 1834 foi inventado, nos Estados Unidos, o primeiro sistema mecânico de fabricação de gelo artificial e, que constituiu a base precursora dos atuais sistemas de compressão frigorífica.

Em 1855 surgiu na Alemanha outro tipo de mecanismo para a fabricação do gelo artificial, este, baseado no princípio da absorção, descoberto em 1824 pelo físico e químico inglês Michael Faraday.

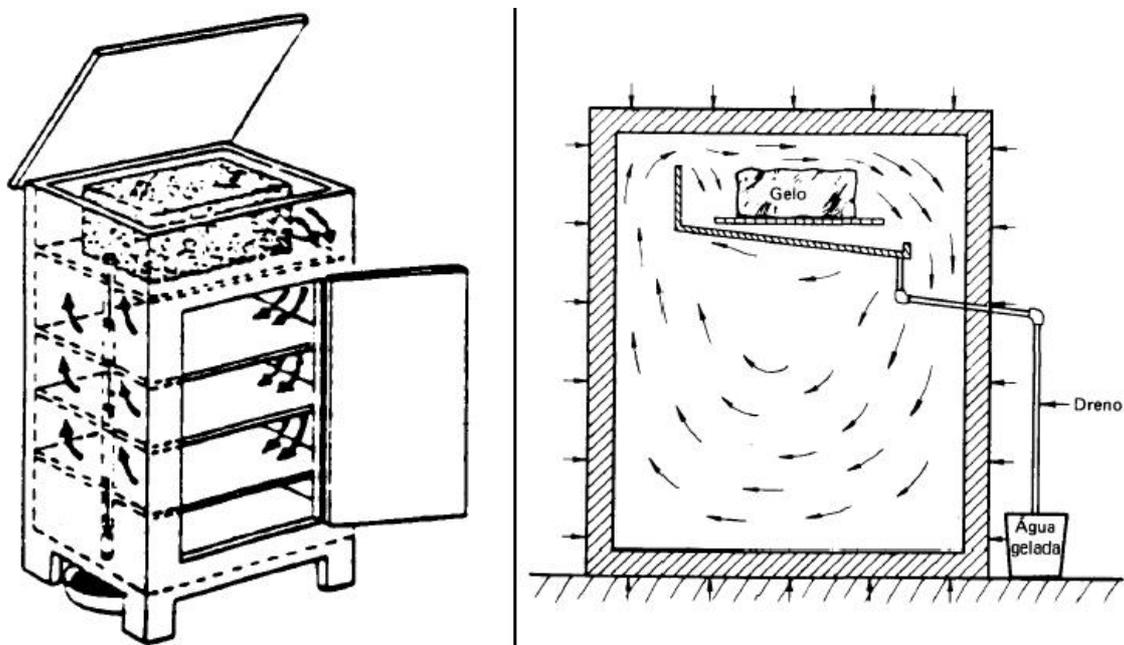
Durante por cerca de meio século os aperfeiçoamentos nos processos de fabricação de gelo artificial foram se acumulando, surgindo sistematicamente melhorias nos sistemas, com maiores rendimentos e melhores condições de trabalho. Entretanto, a produção propriamente dita fez poucos progressos neste período, em consequência da prevenção do público consumidor contra o gelo artificial, pois apesar de todos estarem cientes das vantagens apresentadas pela refrigeração, era crença geral que o gelo produzido pelo homem era prejudicial à saúde humana.

Tal crença é completamente absurda, mas como uma minoria aceitava o gelo artificial, o seu consumo era relativamente pequeno. Todavia, a própria natureza encarregou-se de dar fim a tal situação. Em 1890, o inverno nos Estados Unidos, um dos maiores produtores de gelo natural da época, foi muito fraco e quase não houve formação de gelo, naquele ano, no país. Como não havia gelo natural, a situação

obrigou que se usasse o artificial, quebrando o tabu existente contra este último e mostrando, inclusive, que o mesmo era ainda melhor que o produto natural, por ser feito com água mais pura e poder ser produzido à vontade, conforme as necessidades de consumo.

A utilização do gelo natural levou a criação, no princípio do século XIX, das primeiras geladeiras.

Tais aparelhos eram constituídos simplesmente por um recipiente, quase sempre isolado por meio de placas de cortiça, dentro do qual eram colocadas pedras de gelo e os alimentos a conservar, ver figura abaixo. A fusão do gelo absorvia parte do calor dos alimentos e reduzia, de forma considerável, a temperatura no interior da geladeira.



Surgiu, dessa forma, o impulso que faltava à indústria de produção mecânica de gelo. Uma vez aceito pelo consumidor, a demanda cresceu vertiginosamente e passaram a surgir com rapidez crescente as usinas de fabricação de gelo artificial por todas as partes.

Apesar da plena aceitação do gelo artificial e da disponibilidade da mesma para todas as classes sociais, a sua fabricação continuava a ter de ser feita em instalações especiais, as usinas de gelo, não sendo possível a produção do mesmo na própria casa dos consumidores. A figura típica da época era o geleiro, que, com sua carroça isolada, percorria os bairros, e entregava nas casas dos consumidores, periodicamente, as pedras de gelo que deviam ser colocadas nas primeiras geladeiras.

No alvorecer do século XX, começou a se disseminar outra grande conquista, a eletricidade. Os lares começaram a substituir os candeeiros de óleo e querosene e os lampiões de gases, pelas lâmpadas elétricas, notável invenção de Edison, e a dispor da eletricidade para movimentar pequenas máquinas e motores. Com esta nova fonte de energia, os técnicos buscaram meios de produzir o frio em pequena escala, na própria residência dos usuários. O primeiro refrigerador doméstico surgiu em 1913, mas sua aceitação foi mínima, tendo em vista que o mesmo era constituído de um sistema de operação manual, exigindo atenção constante, muito esforço e apresentando baixo rendimento.

Só em 1918 é que apareceu o primeiro refrigerador automático, movido a eletricidade, e que foi fabricado pela Kelvinator Company, dos Estados Unidos. A partir de 1920, a evolução foi tremenda, com uma produção sempre crescente de refrigeradores mecânicos.

FLUIDOS REFRIGERANTES

Fluido refrigerante é o fluido que absorve calor de uma substância do ambiente a ser resfriado.

Não há um fluido refrigerante que reúna todas as propriedades desejáveis, de modo que, um refrigerante considerado bom para ser aplicado em determinado tipo de instalação frigorífica nem sempre é recomendado para ser utilizado em outra. O bom refrigerante é aquele que reúne o maior número possível de boas qualidades, relativamente a um determinado fim.

As principais propriedades de um bom refrigerante são:

- ✚ Condensar-se a pressões moderadas;
- ✚ Evaporar-se a pressões acima da atmosférica;
- ✚ Ter pequeno volume específico (menor trabalho do compressor);
- ✚ Ter elevado calor latente de vaporização;
- ✚ Não ser corrosivo;
- ✚ Não ser tóxico;
- ✚ Deve permitir fácil localização de vazamentos;
- ✚ Ter miscibilidade com óleo lubrificante e não deve atacá-lo ou ter qualquer efeito indesejável sobre os outros materiais da unidade;
- ✚ Em caso de vazamentos, não deve atacar ou deteriorar os alimentos, não deve contribuir para o aquecimento global e não deve atacar a camada de ozônio.
- ✚ Ser estável, sem tendência a se decompor nas condições de funcionamento;
- ✚ Não apresentar efeito prejudicial sobre metais, lubrificantes e outros materiais utilizados nos demais componentes do sistema;
- ✚ Não ser combustível ou explosivo nas condições normais de funcionamento;
- ✚ Ter um odor que revele a sua presença;
- ✚ Ter um custo razoável;
- ✚ Existir em abundância para seu emprego comercial.

Classificação

Os refrigerantes podem ser divididos em três classes, conforme sua maneira de absorção ou extração do calor das substâncias a serem refrigeradas. São elas:

✚ **Classe 1** – essa classe inclui os refrigerantes que resfriam materiais por absorção do calor latente. São exemplos dessa classe os CFC's, HCFC's e os HFC's;

✚ **Classe 2** – os refrigerantes dessa classe são os que resfriam substâncias pela absorção de seus calores sensíveis. São elas: ar, salmoura de cloreto de cálcio, salmoura de cloreto de sódio (sal comum) e álcool;

✚ **Classe 3** – esse grupo consiste de soluções que contêm vapores absorvidos de agentes liquidificáveis ou meios refrigerantes. Essas soluções funcionam pela natureza de sua habilidade em conduzir os vapores liquidificáveis que produzem um efeito de resfriamento pela absorção do calor latente. Um exemplo desse grupo é a água amônia ou amoníaco, NH_3 , que é uma solução composta de água destilada e amônia pura. A amônia é também usada em grandes máquinas com finalidades industriais. É um gás incolor, com odor forte e característico. Sua temperatura de ebulição à pressão atmosférica é aproximadamente -33°C . É combustível ou explosiva quando misturada com ar em certas proporções (um volume de amônia para dois volumes de ar). Devido ao seu alto calor latente, são possíveis grandes efeitos de refrigeração com maquinaria relativamente reduzida. É muito tóxica e necessita de embalagens de aço.

Com a proibição de importação dos CFC's e as restrições já anunciadas para o uso dos HCFC's no futuro, os fluidos refrigerantes alternativos estão ganhando espaço no mercado. Por um lado avançam as pesquisas e a utilização de refrigerantes naturais, tais como dióxido de carbono, hidrocarbonetos e amônia.

No contexto da mudança climática e de custos crescentes da energia, os usuários estão considerando cada vez mais importante contar com sistemas de refrigeração que usam a energia eficientemente. É por isso que cada vez mais operadores de sistemas de refrigeração são encorajados a optar por refrigerantes naturais, em vista do cronograma de restrições ao uso dos HCFC's.

Os refrigerantes da Classe 1 são empregados no tipo de compressão padrão dos sistemas de refrigeração. Os refrigerantes da classe 2 são empregados como agentes resfriadores imediatos entre a Classe 1 e a substância a ser refrigerada, e fazem o mesmo trabalho que a Classe 3. Esses últimos são empregados no tipo de absorção padrão dos sistemas de refrigeração.

Principais tipos e características de fluidos refrigerantes:

1. **CFC** - São moléculas formadas pelos elementos cloro, flúor e carbono. (Exemplos: R-11, R-12, R-502, etc.).

Utilização: ar condicionado automotivo, refrigeração comercial, refrigeração doméstica (refrigeradores e freezers) etc.

Os CFC's destroem a camada de ozônio. A camada de ozônio sendo danificada permite que raios ultravioleta (UV) do sol alcancem a superfície da Terra. As indústrias químicas nacionais cessaram a produção de CFC's e a importação destas substâncias virgens está controlada. Para converter ou substituir um equipamento operado com CFC foram criados dois tipos de refrigerantes alternativos: HCFC's e HFC's.

2. **HCFC** - Alguns átomos de cloro são substituídos por hidrogênio (Exemplos: R-22, R-141b, etc.).

Utilização: ar condicionado de janela, split, self, câmaras frigoríficas, etc.

3. **HFC** - Todos os átomos de cloro são substituídos por hidrogênio (Ex: R-134a, R-404A, R-407C, etc.).

Utilização: ar condicionado automotivo, refrigeração comercial, refrigeração doméstica (refrigeradores e freezers), etc.

O R-134a (Tetrafluoretano) tem propriedades físicas e termodinâmicas similares ao R-12. Pertence ao grupo dos HFC's Fluorcarbonos parcialmente halogenados, com potencial de destruição do ozônio (ODP) igual a zero, devido ao menor tempo de vida na atmosfera, apresenta uma redução no potencial de efeito estufa de 90% comparado ao R-12. Além disso, é não inflamável, não tóxico, possui alta estabilidade térmica e química, tem compatibilidade com os materiais utilizados e tem propriedades físicas e termodinâmicas adequadas.

O R-134a é compatível com todos os metais e ligas normalmente utilizados nos equipamentos de refrigeração. Deve-se evitar o uso de zinco, magnésio, chumbo e ligas de alumínio com mais de 2% de magnésio em massa.

Testes de armazenamento com refrigerante úmido apresentaram boa estabilidade à hidrólise e nenhum ataque corrosivo em metais como aço inoxidável, cobre, latão e alumínio.

O R-134a é isento de cloro e, por isso, apresenta boa compatibilidade com elastômeros.

Na refrigeração a palavra Retrofit (abreviatura da expressão inglesa “retroactive refit” que significa “readaptação posterior”) vem sendo empregada para designar as adaptações que são realizadas em equipamentos que trabalham com CFC’s para que esses possam trabalhar com os fluidos alternativos, tornando-os eficientes, modernos e econômicos.

A linha de fluidos alternativos, também chamada de “blends”, é uma boa alternativa para a conversão de equipamentos que estão em operação no campo, pois exigem mínimas alterações no sistema original e na maioria dos casos não é necessária a substituição do compressor.

Alguns fluidos alternativos substitutos:

R-12: R-401A, R-401B, R-409A e R-413A

✚ R-409A - Mistura de fluidos refrigerantes tais como R-22, R-142b e R-124, tem propriedades similares ao R-12 e pode ser utilizado com óleo lubrificante mineral, poliolester e aquilbenzeno.

✚ R-413A - Mistura de fluidos refrigerantes tais como R-218, R-134a e R-600a, é compatível com óleo lubrificante mineral, poliolester e aquilbenzeno, tem performance similar ao R-12.

R-502: R-402A, R-402B, R-408A e R-403A

✚ R-408A - Mistura de fluidos refrigerantes tais como R-22, R-134a e R-125, possui performance similar ao R-502 e é compatível com óleo lubrificante mineral, poliolester e aquilbenzeno.

R-22: R-407C, R-410A e R-417A

✚ R-407C - Mistura de fluidos refrigerantes tais como R-134a, R-32 e R-125, possui propriedades e performance similares ao R-22, porém é necessária a mudança do óleo lubrificante.

✚ R-410A - Mistura de fluidos refrigerantes de alta pressão tais como R-32 e R-125, possui melhor capacidade de resfriamento, porém requer uma reavaliação do projeto do sistema.

A tabela a seguir mostra algumas misturas de fluidos refrigerantes foram aprovadas para uso com os compressores Embraco:

| REFRIGERANTE (ASHRAE) | FABRICANTE | COMPOSIÇÃO | APLICAÇÃO RECOMENDADA |
|-----------------------|---------------|----------------------------------|--|
| SUVA MP66 (R401b) | DuPont | 61% R22 11% R152a 28% R124 | Temperatura de evaporação menor do que -23°C |
| SUVA MP39 (R401a) | DuPont | 53% R22 13% R152a 34% R124 | Temperatura de evaporação maior do que -23°C |
| FX56 (R409a) | Elf Atochem | 60% R22 15% R42b 25% R124 | Aplicações de média e baixa evaporação |
| ISCEON – 49 (R413a) | Rhône Poulenc | 88% R134a 9% R218 3% R600a | Aplicações de média e baixa evaporação |

Vantagens dos fluidos alternativos:

✚ São utilizados nos equipamentos de refrigeração não havendo necessidade de troca de componentes (dispositivo de expansão, compressor, etc.);

✚ São compatíveis com óleo mineral, óleo alquilbenzeno e com os materiais existentes. Obs: somente na aplicação do R-407C, deve ser trocado o óleo mineral por óleo Poliolester;

✚ A carga de fluido refrigerante do equipamento com fluido alternativo é 80% da carga de fluido original. Obs: A carga do fluido refrigerante deve ser feita somente na forma líquida.

Compatibilidade de alguns fluidos com óleos lubrificantes

| | Óleo Mineral | Óleo Alquil-benzeno | Óleo Poliol-ester | | Óleo Mineral | Óleo Alquil-benzeno | Óleo Poliol-ester |
|-------|--------------|---------------------|-------------------|-------|--------------|---------------------|-------------------|
| R12 | ✓ | ✓ | ✓ | R402A | ✗ | ✓ | ✓ |
| R134a | ✗ | ✗ | ✓ | R402B | ✗ | ✓ | ✓ |
| R401A | ✗ | ✓ | ✓ | R408A | ✗ | ✓ | ✓ |
| R401B | ✗ | ✓ | ✓ | R22 | ✓ | ✓ | ✓ |
| R502 | ✓ | ✓ | ✓ | R407C | ✗ | ✗ | ✓ |
| R409A | ✓ | ✓ | ✓ | R410A | ✗ | ✗ | ✓ |
| R413A | ✓ | ✓ | ✓ | R404A | ✗ | ✗ | ✓ |

Durante os últimos anos, vários refrigerantes alternativos foram avaliados e o R134a, por apresentar propriedades físicas e termodinâmicas relativamente semelhantes às do R12 e por não conter Cloro, tem sido considerado o substituto do R12 nas suas aplicações.

Mais recentemente, outro fator ambiental, não menos importante que a destruição da camada de ozônio, tem sido considerado: *o potencial de aquecimento global*, mais conhecido como efeito estufa.

Dentre os refrigerantes alternativos que atendem ambas características ambientais, estão os hidrocarbonos. Estes refrigerantes não tinham até então sido considerados uma alternativa à substituição do R12, pois são inflamáveis.

Na tabela a seguir são apresentadas as principais propriedades físicas dos refrigerantes hidrocarbonos comparadas às do R12 e R134a.

Propriedades físicas do R12, R134a e refrigerantes hidrocarbonos.

| REFRIGERANTE | ESTRUTURA MOLECULAR | PESO MOLECULAR | TEMPERATURA CRÍTICA (°C) | PRESSÃO CRÍTICA (bar) | PONTO DE EBULIÇÃO (°C) |
|-----------------------|---|----------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| R 12 | $\begin{array}{c} \text{F} \\ \\ \text{F} - \text{C} - \text{Cl} \\ \\ \text{Cl} \end{array}$ | 120,9 | 111,8 | 41,8 | - 29,8 |
| R 134a | $\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{F} - \text{C} - \text{C} - \text{F} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{H} \end{array}$ | 102,0 | 101,2 | 40,6 | - 26,0 |
| PROPANO (R 290) | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{H} \end{array}$ | 44,1 | 96,7 | 42,4 | - 41,7 |
| BUTANO (R 600) | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ | 58,1 | 151,0 | 37,2 | - 0,5 |
| ISOBUTANO (R 600a) | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ | 58,1 | 136,1 | 36,8 | - 11,7 |

Como pode-se verificar na tabela acima, os refrigerantes hidrocarbonos apresentam menor peso molecular quando comparados ao do R-12 e R-134a. Isto é devido à ausência de halogêneos como cloro (peso atômico 35,453) e flúor (peso atômico 18,998) na sua estrutura molecular, que é composta apenas de carbono (peso atômico 12,011) e hidrogênio (peso atômico 1,079).

Tal característica torna os refrigerantes hidrocarbonos menos agressivos ao meio ambiente, como mostra a tabela abaixo.

Impacto ambiental dos refrigerantes hidrocarbonos, R12 e R134a

| REFRIGERANTE | ODP | GWP | TEMPO DE VIDA |
|-----------------|------|------|---------------|
| R 12 | 1,00 | 7100 | 120 anos |
| R 134a | 0 | 3200 | 16 anos |
| PROPANO (R 290) | 0 | < 5 | meses |
| BUTANO (R 600) | 0 | < 5 | semanas |

ODP – Potencial de Destruição do Ozônio.

GWP – Potencial de Aquecimento Global (comparado ao CO₂).

Observa-se na tabela anterior que o refrigerante R134a, não destrói a camada de ozônio (ODP = 0). Tal característica deve-se à ausência de cloro nas suas moléculas. Entretanto os refrigerantes propano e butano exercem efeito desprezível (GWP < 5) sobre o aquecimento da Terra, ao contrário do R12 e R134a. Outro fator ambiental favorável aos refrigerantes propano e butano é seu menor tempo de vida na atmosfera.

Os principais impactos de cada refrigerante hidrocarbono sobre o compressor e o dispositivo de expansão dos sistemas de refrigeração, baseados na análise teórica do ciclo ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), são resumidos na tabela abaixo.

| Refrigerante | Características principais em relação ao R12 | Impacto sobre o compressor e o tubo capilar |
|--------------------|---|--|
| PROPANO (R 290) | -Menor deslocamento volumétrico (-33%); -Maior diferença de pressão (37%); -Maior vazão volumétrica no tubo capilar (8,7%); | -Reprojeto dos mancais, válvulas e outros componentes do compressor; -Redução da resistência ao escoamento de refrigerante no tubo capilar; |
| ISOBUTANO (R 600a) | -Maior deslocamento volumétrico (90%); -Menor diferença de pressão (-42%); -Similar vazão volumétrica no capilar (1,5%); | -Reprojeto dos componentes do compressor; -Mudanças no tubo capilar parecem desnecessárias; |
| BUTANO (R 600) | -Maior deslocamento volumétrico (181%); -Menor diferença de pressão (-57%); -Menor vazão volumétrica no capilar (-10,4%); | -Reprojeto dos componentes do compressor; -Aumento tamanho total do compressor; -Aumento da resistência ao escoamento de refrigerante no tubo capilar; |

Nomenclatura dos refrigerantes segundo a ASHRAE:

Segundo a ASHRAE os refrigerantes são classificados por 3 algarismos:

1. Número de átomos de Carbono menos 1 (omitir o zero);
2. Número de átomos de Hidrogênio mais 1;
3. Número de átomos de Flúor.

Ex:

- Diclorodifluormetano (CCl_2F_2) = R-12;
- Monoclorodifluormetano (CHClF_2) = R-22;
- Tetrafluoretano ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$) = R-134a.

Para um Hidrocarbono usa-se a mesma regra com o zero no final.

Ex:

- Propano ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$) = R-290;
- Etano (CH_3CH_3) = R-170;
- Metano (CH_4) = R-50.

Para os compostos inorgânicos a nomenclatura começa com o número 7 seguido do seu peso molecular.

Ex:

- Amônia (NH_3) = R-717;
- Água (H_2O) = R-718;
- Dióxido de carbono (CO_2) = R-744.

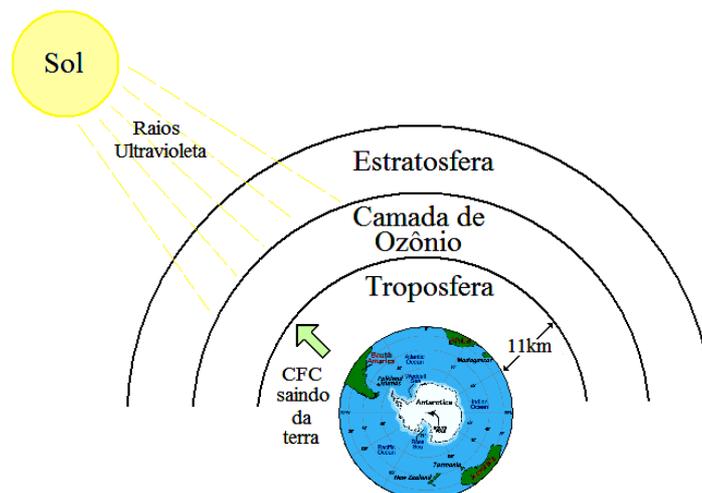
OZÔNIO / PROCESSO DE FORMAÇÃO / DESTRUIÇÃO

O ozônio é formado quando as moléculas de oxigênio absorvem parte da radiação ultravioleta proveniente do sol, ocasionando a separação das moléculas em dois átomos de oxigênio. Estes átomos por sua vez, juntam-se com outras moléculas de oxigênio, formando assim o ozônio (O_3), que contém três átomos de oxigênio.

Aproximadamente 90% do ozônio da terra está localizado em uma camada natural, logo acima da superfície terrestre conhecida como estratosfera. Esta camada natural atua como um escudo protetor contra a radiação ultravioleta.

A primeira preocupação sobre a provável destruição da camada de ozônio pelos CFC's foi levantada com a publicação da teoria de que os átomos de cloro liberados pelos CFC's poderiam migrar até a estratosfera, destruindo as moléculas de ozônio (Molina e Rowland, 1974), conforme mostra a figura abaixo.

Alguns dos CFC's têm um tempo de vida na atmosfera superior a 120 anos, isto é, eles não se dissociam na baixa atmosfera (troposfera). Como resultado, os CFC's migram vagarosamente para a estratosfera onde são atingidos por maiores níveis de radiação, liberando o cloro, que por sua vez livre, liga-se repetidamente com moléculas de ozônio provocando a separação dos átomos de oxigênio da molécula em questão. Com a ocorrência da destruição do ozônio, maiores níveis de radiação tendem a penetrar na superfície terrestre. Além disso, devido ao longo tempo de vida dos CFC's na atmosfera e ao fato de que um átomo de cloro pode destruir repetidamente milhares de moléculas de ozônio, serão necessárias muitas décadas para que a camada de ozônio retorne aos níveis de concentração anteriores, mesmo após a eliminação completa dos CFC's.

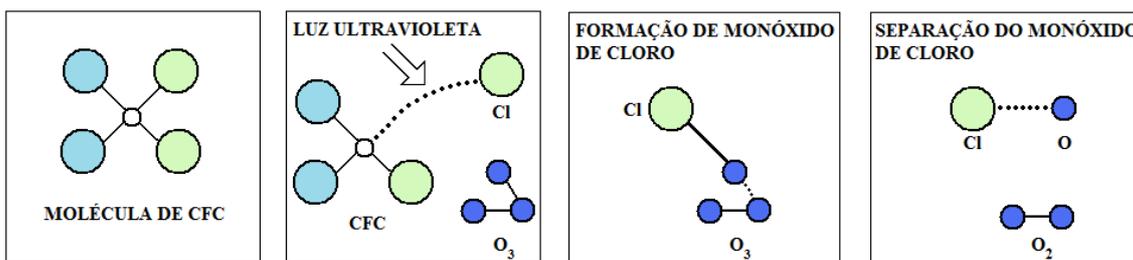


Desde que a teoria de destruição da camada de ozônio foi publicada pela primeira vez, pesquisas científicas têm mostrado uma preocupação geral com o aumento da concentração de cloro na estratosfera, que destruindo o ozônio, tem como resultado danos à saúde e ao meio ambiente, como por exemplo:

- ✚ Aumento dos casos de câncer de pele;
- ✚ Danos aos olhos (aumento dos casos de cataratas);
- ✚ Enfraquecimento do sistema imunológico;
- ✚ Danos às plantações;
- ✚ Danos aos organismos aquáticos (algas marinhas);
- ✚ Aumento da temperatura ambiente.

Como o ozônio é destruído?

Primeiramente, a luz ultravioleta quebra a ligação de um átomo de cloro da molécula de CFC. Em seguida, o átomo de cloro ataca a molécula do ozônio, quebrando a ligação entre os átomos. Forma-se uma molécula de O_2 e uma de monóxido de cloro. O monóxido de cloro é instável, tem sua ligação quebrada e forma-se novamente cloro livre, que vai atacar e destruir outra molécula de ozônio, repetindo-se o processo, ver figura abaixo.



SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Classificação da Refrigeração

A área de refrigeração cresceu de tal maneira no último século que acabou por ocupar os mais diversos campos. Para conveniência de estudos, as aplicações da refrigeração podem ser classificadas dentro das seguintes categorias: doméstica, comercial, industrial, para transporte e para condicionamento de ar. A refrigeração doméstica abrange principalmente a fabricação de refrigeradores de uso doméstico e de *freezers*. A capacidade dos refrigeradores domésticos varia muito, com temperaturas na faixa de -8°C a -18°C (no compartimento de congelados) e $+2^{\circ}\text{C}$ a $+7^{\circ}\text{C}$ (no compartimento dos produtos resfriados).

A refrigeração comercial abrange os refrigeradores especiais ou de grande porte usados em restaurantes, sorveterias, bares, açougues, laboratórios, etc. As temperaturas de congelamento e estocagem situam-se, geralmente, entre -5°C a -30°C .

Como regra geral, os equipamentos industriais são maiores que os comerciais (em tamanho) e têm como característica marcante o fato de requererem um operador de serviço.

São aplicações típicas industriais as fábricas de gelo, grandes instalações de empacotamento de gêneros alimentícios (carnes, peixes, aves), cervejarias, fábricas de laticínios, de processamento de bebidas concentradas e outras.

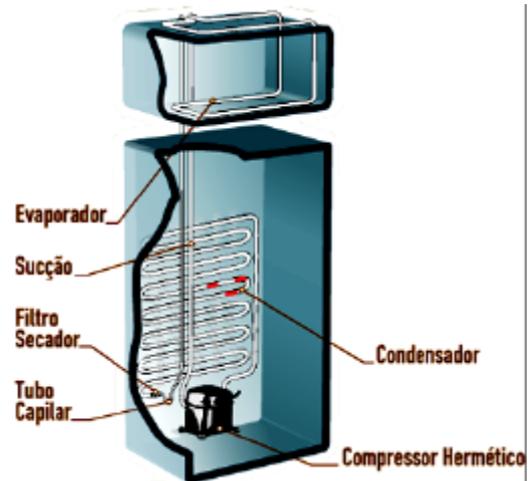
A refrigeração marítima refere-se à refrigeração a bordo de embarcações e inclui, por exemplo, a refrigeração para barcos de pesca e para embarcações de transporte de cargas perecíveis.

A refrigeração de transporte relaciona-se com equipamentos de refrigeração em caminhões e vagões ferroviários refrigerados.

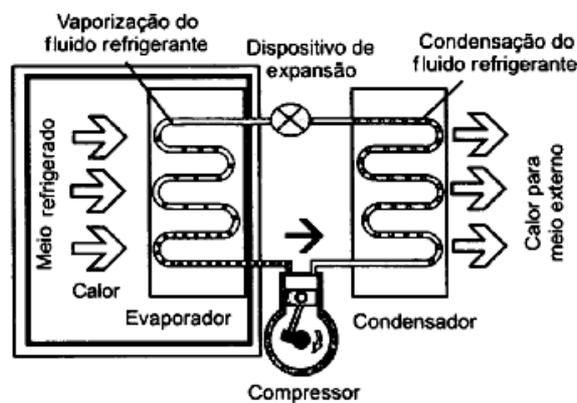
Como podemos observar, as aplicações da refrigeração são as mais variadas, sendo de certa forma bastante difícil estabelecer de forma precisa a fronteira de cada divisão.

Sistema de Compressão Mecânica de Vapor (CMV)

Pode-se entender a lógica de funcionamento dos principais sistemas de refrigeração atuais estudando o funcionamento de um refrigerador doméstico comum, também conhecido como sistema de compressão mecânica de vapor (figura ao lado). Ele funciona a partir da aplicação dos conceitos de calor e trabalho, utilizando-se de um fluido refrigerante. O fluido refrigerante,

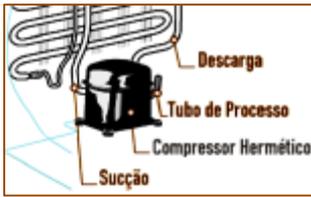


como dito anteriormente, é uma substância que, circulando dentro de um circuito fechado, é capaz de retirar calor de um meio enquanto se vaporiza a baixa pressão. Este fluido entra no evaporador a baixa pressão, na forma de mistura de líquido mais vapor, e retira energia do meio interno refrigerado (energia dos alimentos) enquanto passa para o estado 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 a resultante do trabalho de compressão para o meio exterior. O fluido, ao liberar energia, passa do estado de vapor superaquecido para líquido (condensação) e finalmente entra no dispositivo de expansão, onde tem sua pressão reduzida, para novamente ingressar no evaporador e repetir-se assim o ciclo. Esse processo é ilustrado através da figura a seguir.

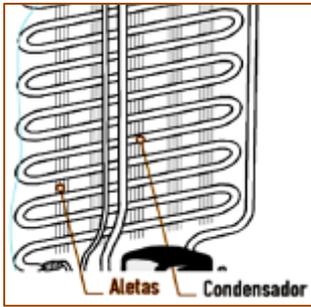


Ciclo de compressão mecânica de vapor

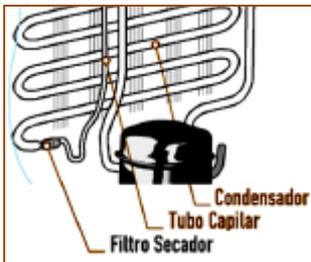
Os detalhes do funcionamento de uma geladeira é descrito a seguir:



COMPRESSOR: sua principal função é succionar o fluido refrigerante a baixa pressão da linha de sucção e comprimí-lo em direção ao condensador a alta pressão e alta temperatura na fase gasosa (*vapor super aquecido*²).



CONDENSADOR: através do condensador e suas aletas, o fluido refrigerante proveniente do compressor a alta temperatura, efetua a troca térmica com o ambiente externo, liberando o calor absorvido no evaporador e no processo de compressão. Nesta fase, ocorre uma transformação de vapor superaquecido para *líquido sub resfriado*³ a alta pressão.

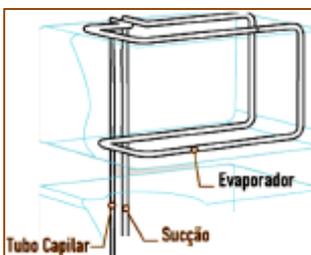


FILTRO SECADOR: exerce duas funções importantes:

A *primeira* é reter partículas sólidas que em circulação no circuito, podem ocasionar obstrução ou danos à partes mecânicas do compressor. A *segunda* é absorver totalmente a umidade residual do circuito que porventura não tenha sido

removida pelo processo de vácuo, evitando danos ao sistema como: formação de ácidos, corrosão, aumento das pressões e obstrução do tubo capilar por congelamento da umidade.

TUBO CAPILAR: é um tubo de cobre com diâmetro reduzido que tem como função receber o fluido refrigerante do condensador e promover a perda de carga do fluido refrigerante separando os lados de alta e de baixa pressão.



EVAPORADOR: recebe o fluido refrigerante proveniente do tubo capilar, no estado líquido a baixa pressão e baixa temperatura. Nesta condição, o fluido evapora absorvendo o calor da superfície da tubulação do evaporador, ocorrendo a transformação de líquido sub resfriado para vapor saturado a

baixa pressão. Este efeito acarreta o abaixamento da temperatura do ambiente interno do refrigerador.

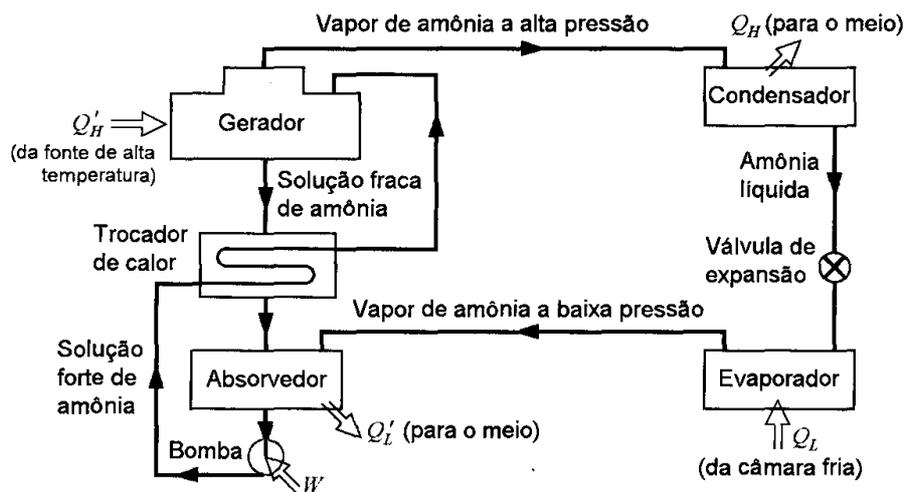
² Vapor superaquecido é quando o vapor está a uma temperatura maior do que a temperatura de saturação, que é a temperatura na qual se dá a vaporização de uma substância pura a uma dada pressão.

³ Líquido sub resfriado é quando a temperatura do líquido é menor do que a temperatura de saturação para a pressão existente. Se a pressão for maior do que a pressão de saturação para a temperatura dada, o líquido é chamado de líquido comprimido.

De maneira similar funcionam também os grandes sistemas de refrigeração, como câmaras frigoríficas. O que difere os sistemas pequenos dos de grande porte é o número de unidades compressoras, evaporadoras, de expansão e condensadoras envolvidas, que nestes últimos podem ser múltiplos, bem como o sistema de controle, que pode alcançar elevada complexidade.

Sistema de Refrigeração por Absorção

O ciclo frigorífico por absorção de amônia difere do ciclo por compressão de vapor na maneira pela qual a compressão é efetuada. No ciclo de absorção, o vapor de amônia a baixa pressão é absorvido pela água e a solução líquida é bombeada a uma pressão superior por uma bomba de líquido. A figura abaixo, mostra um arranjo esquemático dos elementos essenciais deste ciclo.



Ciclo de refrigeração de absorção de amônia.

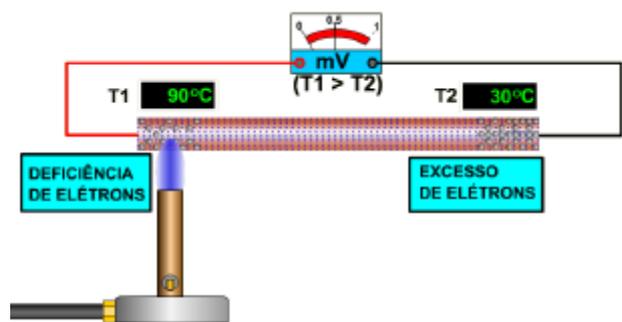
O vapor de amônia a baixa pressão, que deixa o evaporador, entra no absorvedor onde é absorvido pela solução fraca de amônia. Esse processo ocorre a uma temperatura levemente acima daquela do meio e deve ser transferido calor ao meio durante esse processo. A solução forte de amônia é então bombeada através de um trocador de calor ao gerador (onde são mantidas uma alta pressão e uma alta temperatura). Sob essas condições, o vapor de amônia se separa da solução devido a da transferência de calor da fonte de alta temperatura. O vapor de amônia vai para o condensador, onde é condensado, como no sistema de compressão de vapor, e então se dirige para a válvula

de expansão e para o evaporador. A solução fraca de amônia retorna ao absorvedor através do trocador de calor.

A característica particular do sistema de absorção consiste em requerer um consumo muito pequeno de trabalho porque o processo de bombeamento envolve um líquido. Isso resulta do fato de que, para um processo reversível, em regime permanente e com variações desprezíveis de energias cinéticas e potencial, o trabalho é igual a $-v.(P_2-P_1)$ e o volume específico do líquido (v) é muito menor que o volume específico do vapor. Por outro lado, deve-se dispor de uma fonte térmica de temperatura relativamente alta (100 a 200 °C). O equipamento envolvido num sistema de absorção é um tanto maior que num sistema de compressão de vapor e pode ser justificado economicamente apenas nos casos onde é disponível uma fonte térmica adequada e que, de outro modo, seria desperdiçada.

Refrigeração Termoelétrica

Em 1821, Seebeck observou que, em um circuito fechado constituído por dois metais diferentes, uma corrente elétrica circula, sempre que as junções sejam mantidas a temperaturas diferentes.



Em 1834, Peltier observou o efeito inverso. Isto é, fazendo-se circular uma corrente elétrica na mesma direção da F.E.M. gerada pelo efeito Seebeck, verifica-se o esfriamento do ponto de junção, e vice-versa.

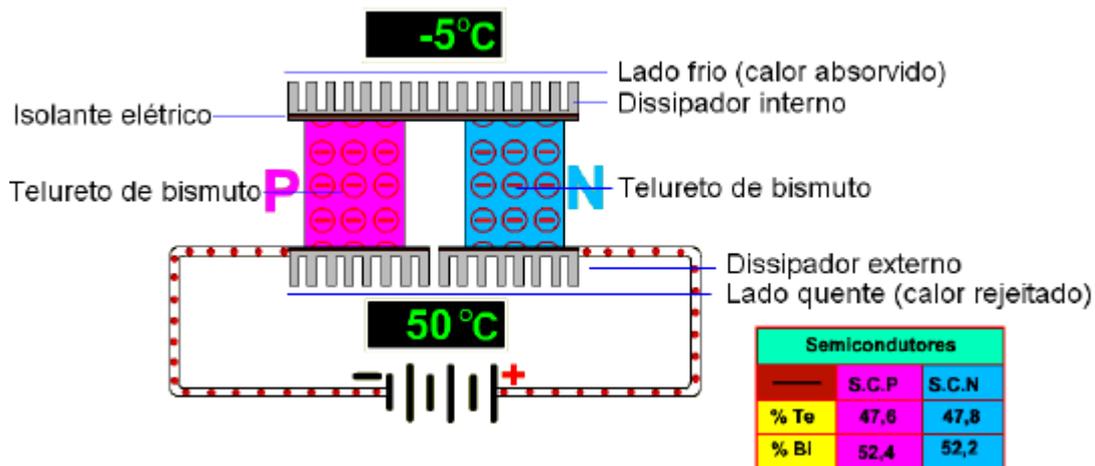
Em 1857, Willian Tomphson (Lord Kelvin) descobriu que um condutor simples, submetido a um gradiente de temperatura sofre uma concentração de elétrons em uma de suas extremidades, e uma carência dos mesmos na outra.

A aplicação da termoeletricidade se restringiu, durante muito tempo, quase que exclusivamente à mensuração de temperaturas através dos chamados termopares. As primeiras considerações objetivas a respeito da aplicação do efeito Peltier à refrigeração foram feitas pelo cientista alemão Alternkirch, que demonstrou que o material termoelétrico é qualitativamente bom quando apresenta um alto coeficiente Seebeck (ou poder termoelétrico), alta condutividade elétrica e uma baixa condutividade térmica.

Infelizmente, até 1949, não existiam materiais termoelétricos adequados. A partir de 1949, com o desenvolvimento da técnica dos semicondutores, que apresentam um coeficiente Seebeck bastante superior ao dos metais, é que a refrigeração termoelétrica tomou um grande impulso, permitindo criar maiores gradientes de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria.

O refrigerador termoelétrico utiliza-se de dois materiais diferentes, como os pares termoelétricos convencionais. Há duas junções entre esses dois materiais em um refrigerador termoelétrico. Uma está localizada no espaço refrigerado e outra no meio ambiente.

Quando uma diferença de potencial é aplicada, a temperatura da junção localizada no espaço refrigerado decresce e a temperatura da outra junção cresce. Operando em regime permanente, haverá transmissão de calor do espaço refrigerado para a junção fria. A outra junção estará a uma temperatura acima da ambiente e haverá então a transmissão de calor para o local, conforme mostra a figura a seguir.



Esquema de um sistema de refrigeração termoelétrica

Vantagens expostas pelos fabricantes:

- ✚ Mais leve e compacto (pode ser transportado para qualquer lugar);
- ✚ Melhor custo/benefício;
- ✚ Não utiliza gás ajudando na preservação do ambiente;
- ✚ Mais silencioso e não causa vibração;
- ✚ Modernidade – Tecnologia Peltier, um novo sistema de refrigeração eletrônica;
- ✚ Possibilidade do produto ser ligado de 100 a 240 Volts e possuir indicadores luminosos (LED's) que informam o status de funcionamento do produto.

Algumas limitações do sistema Peltier segundo Marcos Ferreira de Souza, especialista de produtos da unidade de negócios Cooling Solutions da Embraco:

✚ Para começar, um bebedouro com compressor tem consumo de energia elétrica muito menor. Isso significa maior eficiência energética, resultando em menor gasto com a conta de eletricidade e menor impacto ao meio ambiente.

✚ “O processo de refrigeração do compressor, baseado na compressão de vapor, proporciona uma performance superior para essa aplicação”, diz Marcos. Isso significa que, com o compressor, o bebedouro deixa a água mais gelada e a resfria mais rapidamente. Quando o uso e a necessidade de água gelada são mais intensos, como ocorre em países mais quentes, o sistema Peltier não dá conta de repor logo o que é consumido. “Condições climáticas como as do Brasil são desfavoráveis aos bebedouros Eletrônicos. Em países de clima frio, seu uso é até aceitável, pois não há tanta demanda por água gelada. Mas aqui, numa escola ou num centro comercial com bastante movimento, não há como atender ao ritmo de consumo”, explica Marcos.

✚ A robustez e a resistência do compressor às oscilações de tensão da rede são outras vantagens que precisam ser consideradas.

✚ Há ainda outro fator favorável à escolha dos compressores no momento de projetar um novo bebedouro: a inexistência de componentes como microventilador, fonte, transformador e placa eletrônica, que são parte obrigatória de qualquer sistema à base do processo Peltier.

✚ Nas pesquisas com bebedouros que realizou, Marcos aponta ainda um caso extremo de projeto inadequado com o uso de Peltier. “Examinei bebedouros em que as pastilhas termoelétricas ficavam dentro do reservatório de água, como medida para ganhar espaço. Há uma possibilidade séria de contaminação da água que será bebida”, adverte.

Climatização Evaporativa

O condicionamento de ar por resfriamento evaporativo é um método ambientalmente amigável e energeticamente eficiente, que utiliza água como fluido de trabalho e pode ser uma alternativa econômica aos sistemas convencionais de ar condicionado.

A evaporação da água é um processo endotérmico, isto é, nesse processo retira-se muito calor do que quer que esteja em contato com ela. Um litro de água consome cerca de 580 kcal para evaporar à temperatura ambiente.

No resfriamento evaporativo de ar, é o próprio ar que cede calor sensível para a água evaporar, tendo assim a sua temperatura reduzida. Além disso, o resfriamento evaporativo é um processo adiabático, ou seja, não rejeita calor para o ambiente porque calor sensível é trocado apenas por calor latente, por esse motivo é chamado também de resfriamento adiabático.

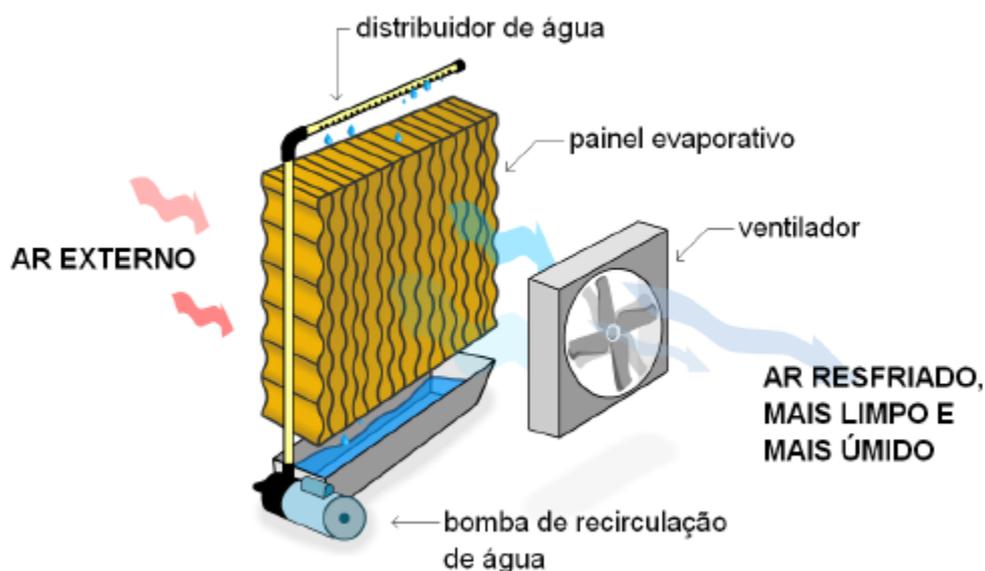
A humanidade observando a natureza, já utiliza o processo de resfriamento evaporativo desde a antiguidade. Panos molhados pendurados nas janelas na direção dos ventos predominantes e chafarizes em pátios fechados são alguns dos recursos utilizados há milhares de anos para criar um clima agradável, usando o processo de resfriamento evaporativo. O corpo humano em dias de calor controla a temperatura eliminando milhares de gotículas de água pelos poros, que ao evaporarem resfriam o corpo. Animais que tem pouca superfície de pele exposta, por estar ela coberta por pelos ou penas, utilizam a grande superfície interna dos pulmões para evaporar água e esfriar o corpo, é por isso que em dias quentes, cachorros, galinhas e outros bichos respiram rapidamente, assim evaporam mais água e conseguem reduzir a sua temperatura interna. Outro exemplo muito usado, como já foi dito, é a moringa de barro para guardar água potável, onde a evaporação pela parede porosa, mantém a água da moringa fresca o dia todo.

Princípio de funcionamento:

O climatizador de ar possui um ventilador que força o ar externo através de um painel evaporativo, sobre o qual a água circula continuamente pela ação de uma bomba. Nesta passagem do ar pelo painel, há a troca de calor entre a água e o ar. A água que evapora garante uma maior umidade do ar resfriado e é repostada por uma bóia que

mantém o nível do reservatório constante. Tal processo garante uma perda de temperatura de até 12°C. Porém, o aparelho possui algumas condições para um bom funcionamento.

A troca contínua do ar ambiente por ar resfriado é fundamental para manter as condições de conforto térmico no ambiente. A recirculação do ar já resfriado não é interessante em questões de resfriamento já que com o aumento da umidade do ar, a diminuição de temperatura será menor. Esta característica faz com que o aparelho possa ser usado com portas abertas sem prejudicar o conforto térmico assim como o funcionamento do aparelho.



Como citado, o resfriamento oferecido pelo climatizador por evaporação depende juntamente da umidade relativa do ar, tendo uma relação inversamente proporcional. Isto é, quanto menor a umidade relativa do ar, maior é o resfriamento obtido pelo aparelho, conforme podemos verificar na tabela a seguir:

| Temperatura de Entrada | 25°C | 32°C | 37°C |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|
| Umidade Relativa | Redução de Temperatura | | |
| 30% | 8,5°C | 9,5°C | 12°C |
| 40% | 7,0°C | 8,0°C | 8,5°C |
| 50% | 5,5°C | 6,5°C | 7,0°C |
| 60% | 4,5°C | 5,0°C | 5,5°C |
| 75% | 2,5°C | 2,5°C | 3,0°C |

Vantagens expostas pelos fabricantes:

✚ Os custos de instalação e operação são uma fração dos custos de sistemas de ar condicionado convencionais.

✚ A necessidade de manutenção é mínima, e não exige mão de obra especializada.

✚ Não há compressores, condensadores, circuitos de alta pressão ou tubos isolados.

✚ Comparado a um ar condicionado equivalente, a economia de energia é de até 95%.

✚ O custo da adequação do ambiente ao sistema de climatização por resfriamento evaporativo também é muito baixo porque, ao contrário do que ocorre com sistemas de ar condicionado, o espaço a ser climatizado não deve ser fechado nem precisa ser tão bem isolado.

✚ É um sistema ecológico, pois os resfriadores de ar evaporativos funcionam apenas com água e têm um consumo de energia muito baixo, não utilizam gases e não geram calor para resfriar.

BIBLIOGRAFIA

- 1º. Anderson, E. P., Palmquist, R. E. *Manual de Geladeiras Residenciais, Comerciais e Industriais*. Editora Hemus;
- 2º. Silva, J. G. *Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização*. 1ª edição. Editora Artliber, São Paulo, 2003;
- 3º. *Refrigeração e ar condicionado – Parte I*. Prof. Dr. Marcelo José Pirani – UFBA;
- 4º. *Refrigeração e ar condicionado – Parte I e Parte II*. Prof. Luiz Carlos Martinelli Jr. – UNIJUÍ;
- 5º. Carlos A. Lauand. *Manual Prático de Geladeiras - Refrigeração Industrial e Residencial*. Editora Hemus, 2004;
- 6º. Informativo técnico da Embraco – *Manual de aplicação de compressores*;
- 7º. Informativo técnico da Embraco - *Refrigerantes hidrocarbonos como substitutos ao R-12*. Código 93650, ago/95 - revisão nº 00, página 03 de 03;
- 8º. Informativo técnico da Embraco - *Misturas de Fluidos Refrigerantes Aprovadas pela Embraco (Blends)*. Código 97040, set/97 - revisão nº 00, página 02 de 02;
- 9º. Wilen V., G. J., Sonntag, R. E. & Borgnakke, C. *Fundamentos da Termodinâmica*. 5ª edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1995.
- 10º. Luiz Magno de Oliveira Mendes. *Refrigeração e Ar Condicionado*. Editora Ediouro. Rio de Janeiro, 1984;
- 11º. Aleksandro Guedes de Lima e Márcio Gomes da Silva. *Introdução à Refrigeração Doméstica*. CEFET-PB;
- 12º. *eLearningFull* – Software da Tecumseh, disponível em: www.tecumseh.com.br;
- 13º. *Revista Fic Frio* – Tecumseh, nº 70, agosto/2006, disponível em: www.tecumseh.com.br;
- 14º. *Revista Bola Preta* – Embraco, nº 83, junho/2006, disponível em: www.bolapreta.com.br;
- 15º. *Revista Bola Preta* – Embraco, nº 94, março/2008, disponível em: www.bolapreta.com.br;
- 16º. *Revista Bola Preta* – Embraco, nº 97, dezembro/2008, disponível em: www.bolapreta.com.br;
- 17º. *Climatização Evaporativa*, disponível em: www.gjbrasil.com.br;
- 18º. *Climatização Evaporativa*, disponível em: www.climatizadorescampinas.com.br.
- 19º. *Arquivos em Flash*. Fernandes – UFC – SENAI /CE, 2007.