

JB CURSOS TREINAMENTOS = CURSO REFRIGERAÇÃO NÍVEL (1) E NÍVEL (2)
WWW.JBCURSOS.NET

Introdução

Desde o ponto de vista da refrigeração, refrigerante pode ser definido como uma substância que serve como meio de transporte de calor, absorvendo calor a baixa temperatura e rejeitando a temperaturas mais elevadas. Em princípio, qualquer substância que mude de fase, de líquido a vapor durante a absorção de calor e de vapor para líquido durante a rejeição de calor pode funcionar como refrigerante. Sua utilidade comercial depende das faixas de temperatura e pressão em que irá operar e, mais recentemente, dos impactos ambientais que eventualmente possa contribuir quando liberado no meio. A água e o ar também podem ser considerados refrigerantes, apesar de não apresentarem mudança de fase durante o processo assim como outros fluidos, sintéticos ou não, formando soluções aquosas que se caracterizam por operar a temperaturas abaixo de 0 °C sem cristalizar.

Em termos históricos, a água foi o primeiro refrigerante utilizado e apresenta uso continuado até nossos dias. O uso do gelo para resfriamento em vários processos é bem conhecido por todos. Uma melhora significativa nos processos de resfriamento foi decorrente da descoberta, nos anos 1600, de que uma mistura de gelo mais sal produzia temperaturas mais baixas que somente o gelo. No final do século XVIII já havia máquinas para diminuir a pressão do vapor de água de modo a acelerar sua evaporação.

Tabela 7.1. Cronologia do uso de diversos refrigerantes utilizados.

Data	Fato	Refrigerante	Autor
1830s	Compressão de vapor	Éter	Jacob Perkins
1851	Patente do ciclo a ar	Ar	John Gorrie
1859	Ciclo de absorção água-amônia	R-717/R-718	Ferdinand Carre
1866	Aplicações marinhas	CO ₂	
1873	Refrigeração comercial	R-717	Carl Linde
1875	Uso do dióxido de enxofre	R-764	
1920s	Uso de hidrocarbonetos	R-600a e R-290	
1922	Uso do dieleno	R-1130	Willis Carrier
1926	Uso do cloreto de metileno	R-30	

Durante a primeira metade do século XIX foram desenvolvidas máquinas para compressão de vapor, dando origem ao que entendemos hoje por refrigeração por compressão mecânica do vapor. Os primeiros refrigerantes utilizados foram a amônia, o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre e o cloreto de metila. Na Tab. 7.1 apresenta-se uma cronologia histórica dos diversos refrigerantes utilizados até o final da década de 20 do século passado (Calm e Didion, 1997). Assim, durante esse período, os refrigerantes mais usuais foram: amônia (NH₃), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), hidrocarbonetos (C_nH_m), cloreto de metila (CH₃Cl) e água (H₂O), chamados de refrigerantes de primeira geração.

Nas primeiras décadas no século XX foram desenvolvidas as primeiras unidades domésticas de refrigeração. Os refrigerantes anteriormente mencionados apresentavam uma série de problemas para seu uso nesses equipamentos: toxicidade elevada, inflamabilidade ou operação em elevadas pressões. Pensando no futuro da refrigeração, C.F. Kettering, em 1928, vice-presidente da General Motors solicitou a Thomas Midgley, Fig. 7.1, que desenvolvesse um refrigerante seguro e estável, não tóxico, não corrosivo ou inflamável e que tivesse características

adequadas para trabalhar em sistemas compactos de refrigeração. Midgley, junto com um grupo de engenheiros, experimentaram combinações em alguns compostos químicos comuns de carbono, cloro e hidrogênio, substituindo átomos de hidrogênio por átomos de flúor. Em poucos dias de trabalho sintetizaram o R-21 para avaliação inicial. No outono desse mesmo ano já haviam sintetizado o R-12 e avaliado a maioria de suas propriedades físicas. Em 1930 o R-12 foi apresentado por Migley durante um encontro da Sociedade Americana de Química. A produção comercial desse refrigerante iniciou em 1931 e o R-11 em 1932. No final de 1950, com a introdução de outros compostos, os flúor-químicos se tornaram os refrigerantes dominantes em sistemas de refrigeração por compressão de vapor e chamados assim de refrigerantes de segunda geração. Um dos poucos refrigerantes que permaneceu no mercado foi a amônia.

O sucesso dessas descobertas originou uma empresa, resultante da união da DuPont e General Motors, chamada Kinetic Chemicals Inc, quando então foi registrada a marca Freon®.



Figura 7.1. Thomas Midgley Jr. (1889-1944) e Charles F. Kettering.

A questão ambiental

Conforme citado por Jabardo (2001), a história da refrigeração moderna registra alguns momentos significativos: a introdução do ciclo de compressão a vapor e o uso de compressores acionados por motores elétricos, a partir da metade do século XIX; o desenvolvimento dos refrigerantes da família dos compostos halogenados e sua introdução no mercado no final da década de 20 do século passado que viabilizou a refrigeração doméstica e a substituição dos refrigerantes conhecidos como CFC (hidrocarbonetos a base de flúor e cloro), determinada pelo Protocolo de Montreal, em 1986, em função do seu efeito sobre a camada de ozônio estratosférico.

Durante os anos 70 do século passado, alguns cientistas demonstraram, através de experimentos realizados em laboratório, a existência de uma relação direta entre a destruição da camada de ozônio e o uso dos compostos CFC pela indústria, não só como refrigerantes, mas como propelentes de aerossóis, agentes expansores de espumas, etc. Esses compostos caracterizam-se possuir átomos de cloro na molécula. Segundo os modelos de reações fotoquímicas envolvendo a irradiação ultra-violeta, a diminuição da camada de ozônio é o resultado de um efeito em cadeia promovido pelos átomos de cloro (ou bromo). Esse processo é rudimentarmente explicado na Fig. 7.2 (a e b). Na Fig. 7.2 (a) o processo natural, cíclico, onde a molécula de oxigênio rompe, devido à energia recebida do Sol, liberando dois átomos de oxigênio. Esses átomos por sua vez se combinam com outra molécula de O_2 , formando uma molécula de O_3 . Na Fig. 7.2 (b) a quebra de uma molécula de um composto a base de cloro

libera um átomo de cloro que, por sua vez irá combinar-se com uma molécula de ozônio, formando uma molécula de O_2 e um cloreto. Esse átomo livre de cloro é o responsável pela diminuição da camada de ozônio. Os átomos de cloro atingiriam a estratosfera, permanecendo aí um tempo estimado em torno de 100 anos. O trabalho mais importante deve-se a Molina e Rowland (1974). Com as imagens de satélite disponíveis a partir dos anos 80 os resultados apresentados tornaram-se mais convincentes, conforme mostrado na Fig. 7.3.

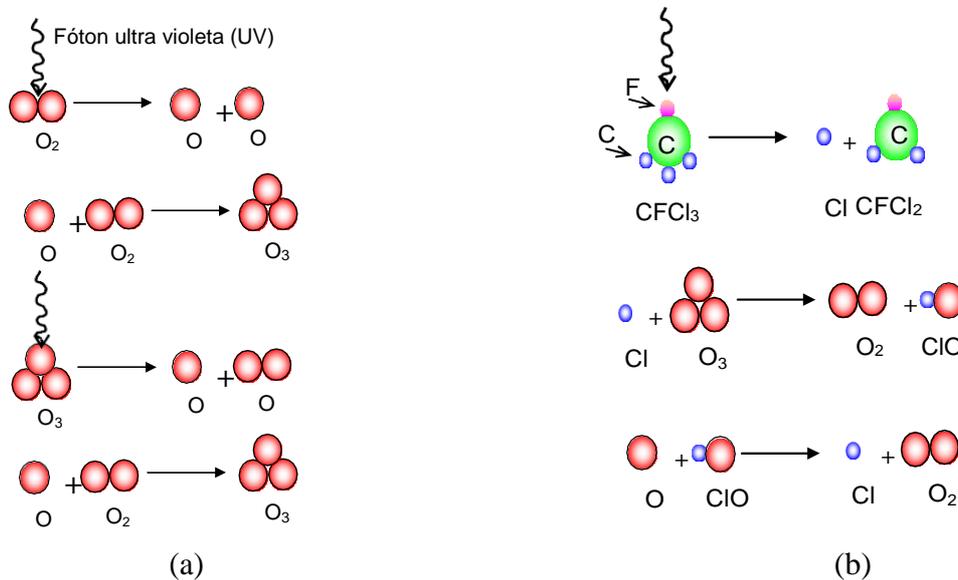


Figura 7.2. Descrição básica do processo químico de diminuição da camada de ozônio.

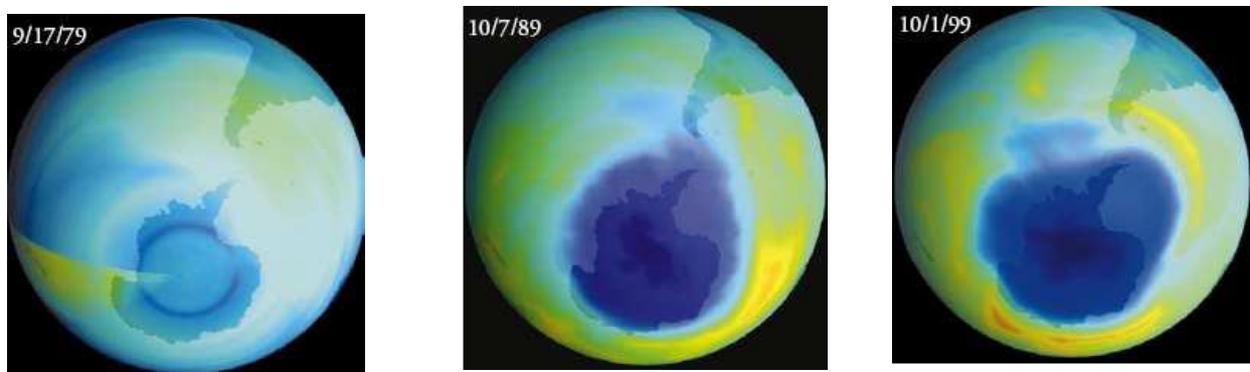


Figura 7.3. Sequência de fotos de satélite, disponibilizadas pela NASA, apresentando as baixas concentrações de ozônio sobre a Antártica e o aumento de extensão desse efeito.

A camada de ozônio protege a Terra dos raios ultra-violetas (UV-B) provenientes do Sol, responsáveis por problemas tanto nos seres humanos (câncer de pele, catarata, etc.) quanto para a vida terrestre. A partir dessas observações, um grupo de países, baixo o auspício da ONU, assinaram o Protocolo de Montreal, cujo objetivo era a fixação de datas para a eliminação de substâncias agressivas à camada de ozônio. Após a definição das datas para eliminação dos CFC, o cronograma atual, em suas sucessivas modificações busca a eliminação completa das substâncias contendo cloro, como os HCFC. No Brasil, esse processo é controlado pelo Ministério do Meio Ambiente e as datas definidas podem ser vistas na Tab. 7.2.

Tabela 7.2. Cronograma de redução e eliminação da produção e consumo de hidroclorofluorcarbonos (HCFC).

	Linha de base	Congelamento	2010	2015 ¹	2020 ²	2025 ³	2030	2040
Países Artigo 5	Consumo: média 2009/2010	2013		10,0%	35,0%	67,5%	97,5%	100,0%
	Produção: média 2009/2010							
Países Artigo 2	Consumo de HCFC em 1989 + 2,8% do consumo de CFC em 1989	1996	75%	90%	99,5% (serviço)		100%	
	Produção: média da produção de HCFC de 1989 + 2,8% da produção de CFC em 1989 + 2,8% do consumo de CFC em 1989							

1 Limite para as Partes do Artigo 2 encaminharem a possibilidade ou necessidade de uso essencial de 5% para serviços;

2 Limite para as Partes do Artigo 5 encaminharem a possibilidade ou necessidade de uso essencial;

3 Limite para as Partes do Artigo 5 revisarem a necessidade de 2,5% para serviços.

Na Fig. 7.4 encontram-se apresentadas as projeções de impacto das substâncias responsáveis pela destruição da camada de ozônio baixo o Protocolo de Montreal e suas diversas emendas, até o ano de 2100. Pela análise dessa figura e no caso da existência efetiva da relação causa-efeito entre o cloro presente atmosfera e a redução da camada de ozônio, os efeitos previstos para o ano 2050, sem o Protocolo, seriam devastadores para a maioria da população terrestre. Pelo controle efetuado atualmente, a previsão é que até o ano de 2050 a camada de ozônio volte até seu valor pré 1980. Cabe ressaltar, no entanto, que o tamanho das áreas mostradas na Fig. 7.3 varia de ano para ano devido a outros efeitos como, por exemplo, as baixas temperaturas do ar estratosférico nessa região, as oscilações polares, etc.

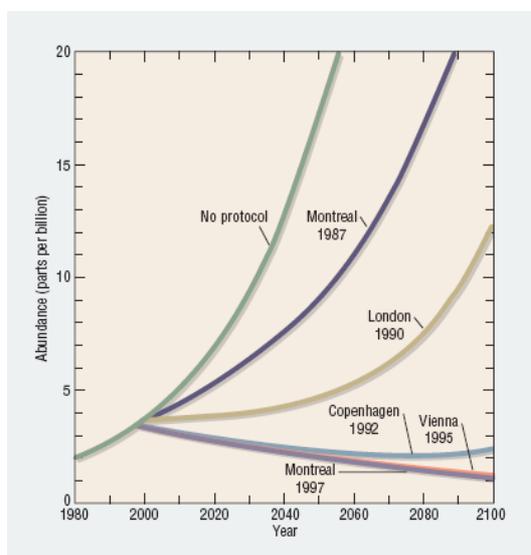


Figura 7.4. Impactos projetados das substâncias destruidoras da camada de ozônio e as reduções previstas sob o Protocolo de Montreal e suas emendas. Fonte: World Meteorological Organization, Scientific Assesment of Ozone Depletion: 1998.

Para quantificar o poder de destruição da camada de ozônio pelos diversos compostos utilizados como refrigerantes, foi estabelecido um indicador, chamado ODP na sigla em inglês, “ozone depletion potencial” ou *potencial de destruição da camada de ozônio*. O ODP é um indicador normalizado, baseado em um valor de 1,0 (um) para o CFC R-11. Assim, novos refrigerantes foram sintetizados, eliminando o cloro de sua composição. Esses novos

refrigerantes, chamados do hidro-flúor-carbonos, foram lançados no mercado no final da década de 80 e nos anos 90 em diante. São denominados de refrigerantes da terceira geração.

Nos anos recentes, além da destruição da camada de ozônio, outro fator prejudicial dos refrigerantes tem sido discutido. O efeito estufa consiste na retenção de parte da energia solar incidente na superfície da Terra, pelo fato de certos gases presentes na sua atmosfera atuarem de forma semelhante a um vidro. O vidro é transparente para comprimentos de onda da irradiação solar na faixa do visível (entre 0,4 a 0,7 μm), mas opaco para comprimentos de onda na faixa do infra-vermelho (radiação emitida pela Terra em função de seu aquecimento). Assim, parte dessa energia térmica que deveria ser enviada de volta ao espaço, fica armazenada na superfície terrestre contribuindo para a elevação de sua temperatura. Esse efeito é conhecido como “efeito estufa”.

A maioria dos compostos halogenados utilizados na refrigeração, inclusive os substitutos atuais dos CFCs apresentam, em maior ou menor grau, caráter seletivo quanto à irradiação solar. Como suas emissões são muito inferiores às do CO_2 , principal responsável pelo efeito estufa, sua ação não é significativa. Entretanto, como será visto adiante, o efeito do uso de determinado refrigerante pode apresentar um efeito direto, devido à sua emissão para o ambiente ou indireto, devido a um consumo adicional de energia pela sua ineficiência no ciclo de refrigeração. Essa ineficiência seria então a responsável por uma produção adicional de energia para compensá-la, liberando na atmosfera mais CO_2 devido aos processos de geração de energia elétrica.

Da mesma forma que foi utilizado para a quantificação do potencial de destruição da camada de ozônio, foi criado um indicador para quantificar os efeitos direto e indireto do gás na atmosfera, chamado de GWP na sigla em inglês, “*global warming potential*” ou *potencial de aquecimento global*. Na Tab. 7.3 são apresentados valores de ODP e GWP para alguns refrigerantes comumente utilizados em sistemas de refrigeração, além do tempo de vida na atmosfera. O GWP é definido em relação ao efeito de aquecimento de uma massa similar de CO_2 para um período fixo de 100 anos. Esse período de integração mais longo reflete melhor o impacto total das emissões. O CO_2 é utilizado como referência química para o GWP em função de seu elevado impacto. Outros químicos, como os refrigerantes, por exemplo, são gases de efeito estufa muito mais potentes que o próprio CO_2 . A diferença vem da crescente abundância do dióxido de carbono na atmosfera como resultado, principalmente, do uso de combustíveis fósseis, dos processos de combustão, etc.

Tabela 7.3. Valores de tempo de vida na atmosfera, ODP e GWP para alguns refrigerantes usuais.

Refrigerant	Atmospheric Lifetime (Years)	ODP	GWP (100 Years)
R-22	12.0	0.034	1780
R-134a	14.0	-0.0	1320
R-407C	a	-0.0	1700
R-407E	a	-0.0	1400
R-410A	a	-0.0	2000
R-32	4.9	-0.0	543
R-32/600 (95.0/5.0)	a	-0.0	520
R-32/600a (90.0/10.0)	a	-0.0	490
R-290 (Propane)	b	0.0	-20
R-717 (Ammonia)	b	0.0	<1
R-744 (Carbon Dioxide)	>50	0.0	\equiv 1
R-1270 (Propylene)	b	0.0	-20

a. Atmospheric lifetimes are not given for blends since the components separate in the atmosphere.
b. Unknown.

Atualmente, estão sendo definidos prazos para eliminação de todos os refrigerantes, incluindo os HFC, que apresentarem valores de GWP superiores a 150. Essas novas substâncias são chamadas de refrigerantes da quarta geração. Na Fig. 7.5 é mostrada uma linha do tempo dos refrigerantes desde o surgimento da refrigeração mecânica.

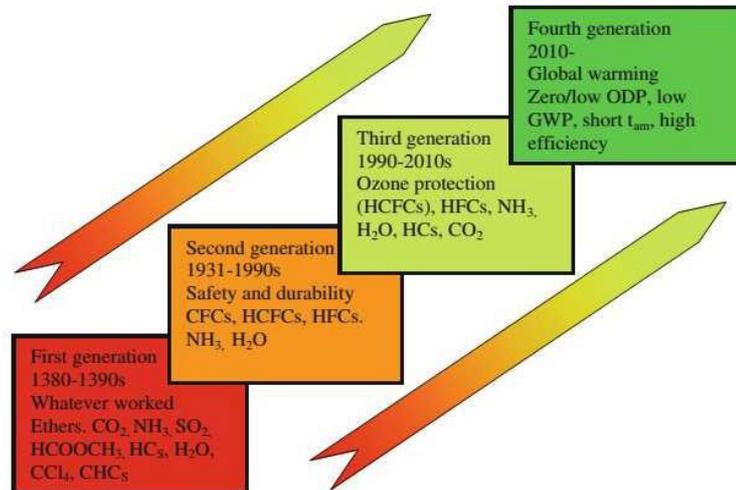


Figura 7.5. Linha de tempo apresentando o desenvolvimento dos refrigerantes.

TEWI – Total Equivalent Warming Impact

Sistemas de ar condicionado, bombas de calor, refrigeração comercial e industrial e outros sistemas contribuem para o aquecimento global tanto pela liberação de gases refrigerantes para a atmosfera como pela emissão de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa devido o consumo de energia desses equipamentos. Estudos têm demonstrado que o componente relacionado com o consumo de energia, comumente chamado de “efeito indireto” é maior que o “componente direto”, devido às emissões de refrigerantes.

Uma forma criada para quantificar esses dois efeitos é chamada de Total Equivalent Warming Impact, ou TEWI. Ao contrário do ODP e do GWP, que podem ser determinados diretamente através de medidas dos compostos envolvidos no processo, a determinação do TEWI requer a utilização de uma quantificação através da Eq. 7.1:

$$TEWI = \underbrace{(GWP \cdot L \cdot n)}_{\text{Vazamentos}} + \underbrace{(GWP \cdot m [1 - \alpha_{recovery}])}_{\text{Perdas na recuperação}} + \underbrace{(n \cdot E_{anual} \cdot \beta)}_{\text{Consumo de energia}} \quad (7.1)$$

onde GWP é o potencial de aquecimento global; L é a taxa de vazamentos por ano, em kg; n é o tempo de operação do sistema, em anos; m é a carga de refrigerante, em kg; $\alpha_{recovery}$ é o fator de reciclagem; E_{anual} é o consumo de energia por ano, em kWh e β é a emissão de CO_2 por kWh, dependente de um mix-energético.

Os dois primeiros termos do lado direito da Eq. 7.1 estão relacionados ao efeito direto do potencial de aquecimento global e o terceiro termo ao efeito indireto. Alguns dados para essa equação são de difícil quantificação como, por exemplo, a taxa de vazamento de refrigerante. Como exemplo, valores publicados por Palm (2007) para cadeias de supermercado na Suécia podem ser vistos na Fig. 7.6, para diferentes refrigerantes.

Para refrigeração comercial (supermercados, por exemplo), taxas típicas de vazamento estão na ordem de 15 a 20% da carga anual e, apesar dos esforços realizados, parece bastante difícil reduzir esses valores em um futuro próximo.

Considerando a situação no Brasil, a ausência de informações confiáveis sobre vazamentos em sistemas de refrigeração impede uma análise mais aprofundada. De qualquer forma, dados informais obtidos de empresas que operam no segmento indicam que as taxas anuais de vazamentos podem estar entre 40 a 100%, dependendo da frequência de manutenção realizada.

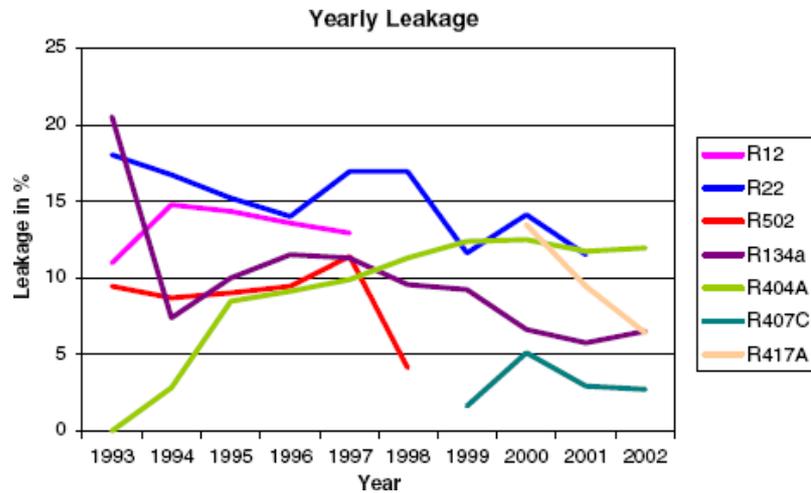


Figura 7.6. Taxas de vazamentos anuais em supermercados na Suécia.

Mesmo que o TEWI seja um indicador dos efeitos de aquecimento global produzidos pelos sistemas de refrigeração durante sua vida útil, aspectos ecológicos e econômicos não são considerados. De um ponto de vista técnico, a redução do impacto ambiental de qualquer sistema envolve frequentemente questões de custo, enquanto que sistemas de baixo custo são propensos a produzir danos ambientais. Para avaliar mais objetivamente esses aspectos, criou-se o conceito de Eco-Eficiência, baseado na relação entre valor agregado e os impactos ambientais resultantes. Com essa metodologia, o ciclo de vida completo de um sistema é levado em consideração em termos de desempenho ecológico de acordo com o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (de acordo com a ISO 14040) e o desempenho econômico, através da Análise do Custo do Ciclo de Vida. Como exemplo ilustrativo, apresenta-se a Fig. 7.7.

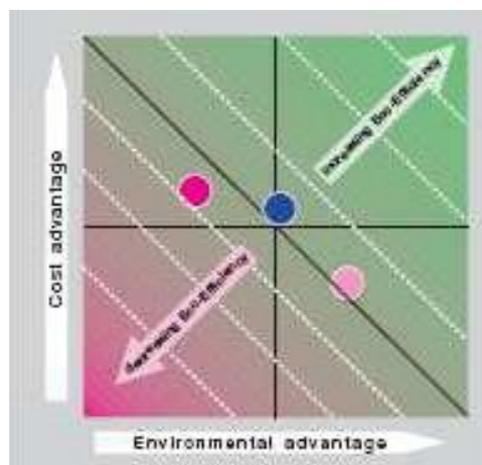


Figura 7.7. Exemplo de avaliação Eco-Eficiente.

A origem dos refrigerantes halogenados

Ao iniciar os trabalhos, Thomas Midgley e seus associados buscaram elementos químicos com o desejado ponto de ebulição. Restringiram a busca para aqueles elementos conhecidos por serem estáveis, mas não tóxicos ou inflamáveis. Graças a um erro nas tabelas de propriedades disponíveis então, a atenção foi dirigida para os compostos a base de flúor. Em função da precariedade das informações, utilizaram a tabela periódica como ferramenta. Eliminando as substâncias com baixa volatilidade, as que originariam compostos instáveis ou tóxicos assim como os gases inertes, em função de seus baixos pontos de ebulição, sobraram oito elementos: carbono, nitrogênio, enxofre, hidrogênio, flúor, cloro e bromo. Como pode ser visto esses elementos, com exceção do hidrogênio, estão localizadas na parte direita da tabela periódica, conforme pode ser visto na Fig. 7.8. Na mesma figura, destacado, está como foram arranjados esses elementos. Três observações foram feitas sobre esse arranjo: (a) a inflamabilidade diminui da esquerda para a direita; (b) a toxicidade geralmente diminui a partir dos elementos mais pesados, abaixo da tabela, para os mais leves, para cima e (c) todos os refrigerantes conhecidos naquela época eram feitos de combinações desses elementos, com exceção do flúor (conferir com a Tab. 7.1). Trabalhos mais recentes, utilizando métodos e bases de dados sobre propriedades mais modernos chegaram às mesmas conclusões de Midgley.

Os refrigerantes da família dos hidrocarbonetos halogenados se caracterizam por moléculas com átomos de flúor e cloro (e eventualmente bromo), além de carbono e hidrogênio. Assim, podem ser classificados em três grupos: os hidrocarbonetos puros, CH, os derivados de hidrocarbonetos completamente halogenados, que não apresentam nenhum átomo de hidrogênio, como os CFCs (com átomos de cloro e flúor nas moléculas) e os hidrocarbonetos parcialmente halogenados, incluindo os HCFCs (com átomos de hidrogênio, cloro e flúor na molécula). Na Fig. 7.9 são mostrados os triângulos com os hidrocarbonetos halogenados derivados do metano e etano.

The figure shows a standard periodic table with several elements highlighted in red. A legend identifies the categories: hydrogen (green), alkali metals (yellow), alkali earth metals (light blue), transition metals (orange), poor metals (blue), nonmetals (white), noble gases (red), and rare earth metals (grey). The highlighted elements are H, C, N, O, F, S, Cl, and Br. A red arrow points from the legend to the highlighted elements. A yellow arrow points from the highlighted elements to a diagram below. The diagram shows the elements arranged in a cross shape: H at the top, C, N, O, F in a horizontal row, S and Cl in a vertical row below O and F, and Br at the bottom.

Periodic Table of the Elements																	
H																	He
Li	Be																
Na	Mg																
K	Ca																
Rb	Sr																
Cs	Ba																
Fr	Ra																

			H	
C	N	O	F	
		S	Cl	
			Br	

Figura 7.8. Tabela periódica com os elementos destacados, que foram utilizados por Midgley para elaborar os primeiros compostos halogenados.

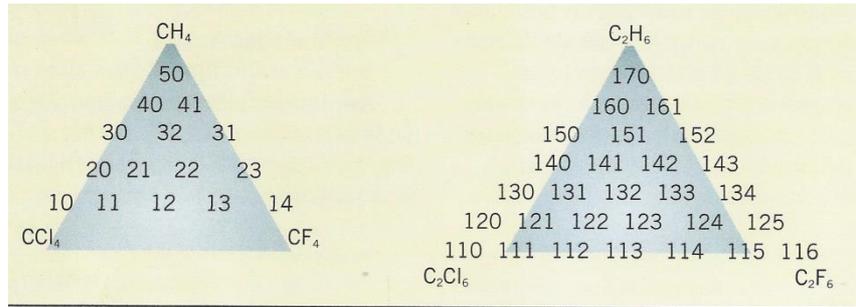


Figura 7.9. Triângulos representando os refrigerantes da série etano e metano.

O vértice superior corresponde ao hidrocarboneto puro e os inferiores, à esquerda e à direita, aos compostos em que os átomos de hidrogênio foram substituídos, respectivamente, por átomos de cloro e flúor. Pela análise dessa figura, pode ser notado que os CFCs localizam-se no lado esquerdo, os HFCs no lado direito e no centro os HCFCs.

Outro aspecto importante que pode ser verificado nesses triângulos é que cada região, conforme descrito na Fig. 7.10, descreve determinadas características físicas dos compostos que as ocupam. Aumentando o conteúdo de hidrogênio nos compostos, diminui o tempo de vida na atmosfera, mas aumenta sua inflamabilidade. A primeira característica é desejável enquanto a segunda não. Os CFCs, que não contêm hidrogênio, apresentam tempo de vida na atmosfera extremamente elevado, mas não são inflamáveis.



Figura 7.10. Relação entre inflamabilidade, toxicidade e tempo de vida na atmosfera em função da composição dos refrigerantes.

Aumentando o número de átomos de cloro, há uma tendência em aumentar a temperatura do ponto normal de ebulição. Aumentando o número de átomos de flúor há uma redução da toxicidade.

Classificação dos refrigerantes

A classificação e as designações numéricas dos refrigerantes seguem o padrão utilizado pela ANSI/ASHRAE Standard 34-1992.

Compostos halogenados

São substâncias químicas derivadas de hidrocarbonetos simples (das séries metano, etano e propano) onde os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de elementos halógenos (cloro, flúor ou bromo), o que dá origem à outra denominação pela qual estas substâncias são também conhecidas - hidrocarbonetos halogenados.

Além da utilização como refrigerantes em sistemas de refrigeração por compressão de vapor, os halocarbônicos e compostos similares passaram também a ser utilizados como agente expensor para espumas rígidas e flexíveis, solventes para limpeza de circuitos microeletrônicos e equipamentos cirúrgicos e como propelentes de aerossóis.

Designação numérica

- a) o primeiro dígito da direita é o número de átomos de flúor no composto;
- b) o segundo dígito (direita para a esquerda) é o número de átomos de hidrogênio, adicionado de um;
- c) o terceiro dígito é o número de átomos de carbono subtraído de um.

Na Fig. 7.11 é representada a designação numérica correspondente. Por exemplo: o refrigerante clorodifluormetano, CHClF_2 , possui dois átomos de flúor ($a=2$), um átomo de hidrogênio ($b=1+1=2$) e um átomo de carbono ($c=1-1=0$), cujo resultado é o R-22.



Figura 7.11. Designação numérica para os halogenados.

Os isômeros são designados por sufixos “a”, “b”, “c”, etc. em ordem crescente de assimetria espacial. Assim, o refrigerante R-134a corresponde a um composto da série etano (dois átomos de carbono), composto de quatro átomos de flúor e dois de hidrogênio, constituindo-se em um dos isômeros espaciais do composto 134.

Compostos inorgânicos

Grupo ao qual correspondem os fluidos utilizados desde os primórdios da refrigeração por compressão mecânica do vapor. Desse grupo destacam-se a amônia (R-717) e o dióxido de carbono (R-744).

Designação numérica

A designação numérica é composta acrescentando-se ao algarismo 7, os algarismos correspondentes ao peso molecular do fluido. Como exemplo, a amônia, cuja fórmula química é NH_3 é designada conforme os pesos moleculares de seus constituintes, isso é: $\text{N}=14$ e $\text{H}=1$. Assim: $(14+3 \times 1)=17$. Na Tab. 6.4 encontram-se alguns exemplos desses refrigerantes.

Compostos orgânicos

Embora sejam bons refrigerantes são extremamente inflamáveis e explosivos. Seu uso em aplicações comerciais e residenciais está restringido por códigos severos na maioria dos países da Europa, Estados Unidos, Japão e Austrália. Encontram uso em aplicações industriais, particularmente em refinarias, onde há procedimentos estabelecidos de manejo com gases

inflamáveis. Atualmente, em função das restrições ambientais, seu uso em sistemas de refrigeração doméstica está em crescimento, principalmente o isobutano. Fazem parte também, em pequenas quantidades, de inúmeras misturas não azeotrópicas.

Designação numérica

A designação numérica segue a dos halogenados. Como exemplo, o propano, cuja fórmula química é $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$, não possui nenhum átomo de flúor ($a=0$), oito átomos de hidrogênio ($b=8+1=9$) e três átomos de carbono ($c=3-1=2$), cujo resultado é o R-290.

Misturas azeotrópicas

Uma mistura azeotrópica de duas ou mais substâncias é aquela que não pode ser separada em seus componentes por destilação. Essas misturas se comportam como substâncias puras, isso é, durante a mudança de fase à pressão constante, a temperatura permanece constante, possuindo propriedades diferentes daquelas de cada um de seus constituintes. Na Fig. 7.12 são apresentados os comportamentos dessas misturas para duas situações diferentes. Em ambas, para uma dada concentração de seus constituintes, obtém-se o ponto azeotrópico.

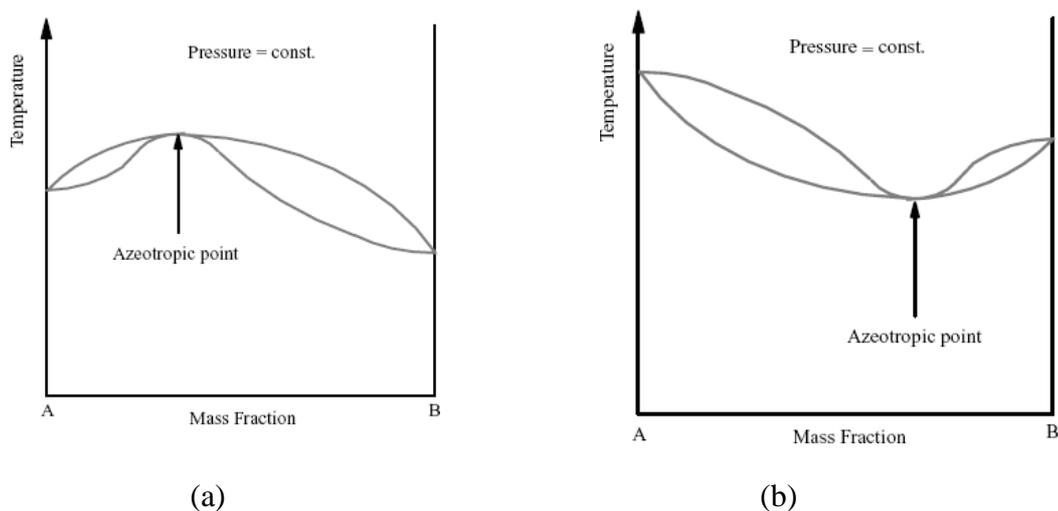


Figura 7.12. Diagrama T-x para uma mistura azeotrópica: (a) T_{sat} do ponto azeotrópico $>$ T_{sat} do fluido puro e (b) T_{sat} do ponto azeotrópico $<$ T_{sat} que o fluido puro.

Designação numérica

A designação numérica é feita em ordem cronológica crescente do seu aparecimento, adicionadas ao algarismo “5”. Atualmente, a numeração do último composto disponível comercialmente⁺ é do R-512A.

Misturas não azeotrópicas

⁺<https://www.ashrae.org/standards-research--technology/standards--guidelines/standards-activities/ashrae-refrigerant-designations#p>. Acesso em 02/06/2015.

São misturas cujo comportamento durante a mudança de fase é o típico das misturas, com variações da temperatura para pressões constantes, além de mudança de composição das fases líquido e vapor. O comportamento dessas misturas é apresentado na Fig. 7.13, onde podem ser identificados os pontos de orvalho e de ebulição para uma dada composição em massa de duas diferentes substâncias. A diferença entre as duas temperaturas, para uma mesma concentração, é conhecida como “glide” ou deslizamento.

Para demonstrar o uso desse diagrama, um processo de vaporização em equilíbrio de uma mistura contendo R-134a e R-32 é apresentado na Fig. 7.14, conforme Rademacher e Hwang (2005). O processo inicia com o líquido subresfriado no ponto 1'. Os pontos com uma linha representam a fase líquida e com duas a fase vapor. À medida que a mistura aquece, a temperatura aumenta e a linha de ebulição é alcançada (ponto 2'), formando as primeiras bolhas de vapor. A fração em massa da primeira bolha de vapor é encontrada no ponto 2''. Esse vapor está em equilíbrio térmico com a fase líquida no ponto 2'. Esse vapor é rico de R-32 em comparação com o líquido, possuindo uma fração em massa de x_2 , como consequência de que, na mesma temperatura, o R-32 possui uma pressão de vapor maior que o R-134a e a fase vapor contém mais moléculas de R-32.

Continuando o processo de aquecimento, a vaporização alcança o ponto 3 onde a fração mássica do vapor é representada pelo ponto 3'' e a do líquido pelo ponto 3'. Nesse ponto, a quantidade de R-32 no líquido restante foi reduzida, quando comparada ao ponto 2', enquanto que o vapor continua enriquecendo-se de R-32. Entretanto, o vapor contém uma fração mássica menor de R-32 e mais de R-134a do que no ponto 2'. O mesmo ocorre para o líquido restante. Quando o ponto 4'' é alcançado, o processo de vaporização cessa. O vapor tem a mesma fração mássica do líquido subresfriado original e a fração mássica da última gota de líquido que vaporiza é indicada pelo ponto 4'. Qualquer aquecimento posterior produz o superaquecimento do vapor, indicado pelo ponto 5''.

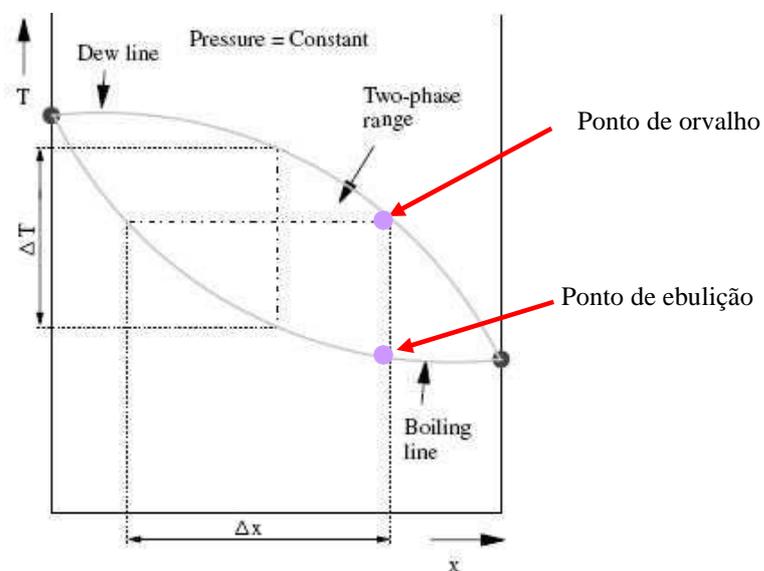


Figura 7.13. Diagrama temperatura vs. fração de massa com diferentes constituintes.

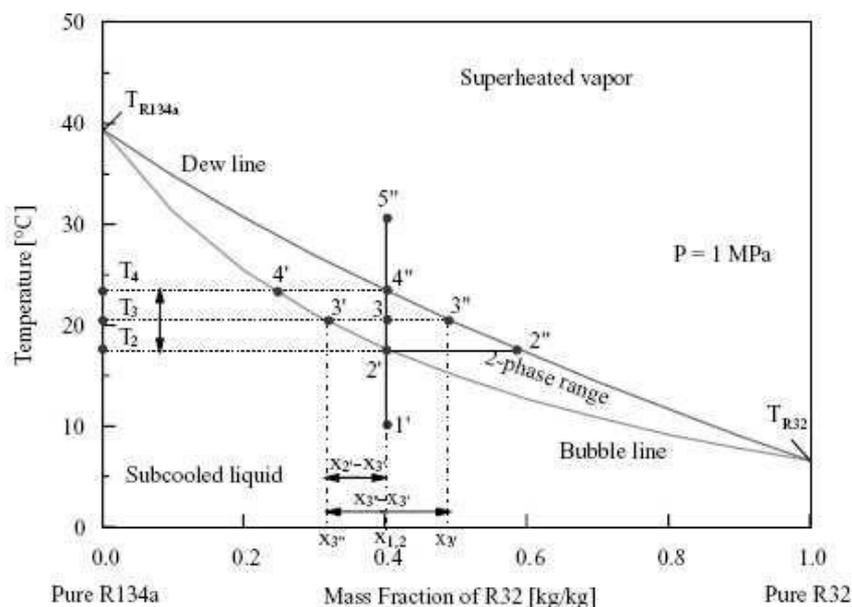


Figura 7.14. Processo de vaporização de uma mistura R-32/R-134a.

Durante o processo de vaporização a pressão constante, a temperatura de saturação mudou de T_2 para T_4 . Essa diferença de temperatura é o que se chamou anteriormente de glide ou deslizamento.

Designação numérica

Da mesma forma que para as misturas azeotrópicas, a designação numérica segue a ordem crescente, por cronologia de seu aparecimento, adicionadas ao algarismo “4”. Atualmente⁺ já existe o composto R-445A.

Hidro-flúor-olefinas

Em função de pressões regulatórias para a eliminação de refrigerantes com elevado GWP, principalmente para uso em sistemas de ar-condicionado automotivo com GWP maior que 150, os principais fabricantes de refrigerantes vem buscando, agressivamente, novas formulações a partir de produtos fluoroquímicos insaturados. Essas substâncias consistem de dois ou mais átomos de carbono com, no mínimo, uma ligação dupla entre dois ou mais átomos de carbono, além de flúor, hidrogênio e possivelmente outros halogênios. Fluorcarbonos insaturados também são identificados como flúor alcenos ou flúor olefinas.

A ligação dupla carbono-carbono torna o composto mais reativo, o que conduz a sua rápida decomposição na baixa atmosfera uma vez que são menos estáveis na presença de reagentes oxidantes. Alguns desses novos compostos também são sujeitos à decomposição fotolítica. Como resultado, apresentam tempo de vida na atmosfera muito curto, **de 6 a 18 dias** e, conseqüentemente, valores de ODP e GWP extremamente baixos. Atualmente já existem comercialmente alguns compostos, tais como o HFO-1234yf ($\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$), HFO-1234ze ($\text{CHF}=\text{CHCF}_3$) e HFO-1243zf ($\text{CH}_2=\text{CHCF}_3$).

Designação numérica

A designação numérica desses compostos é dada conforme a Fig. 7.15.

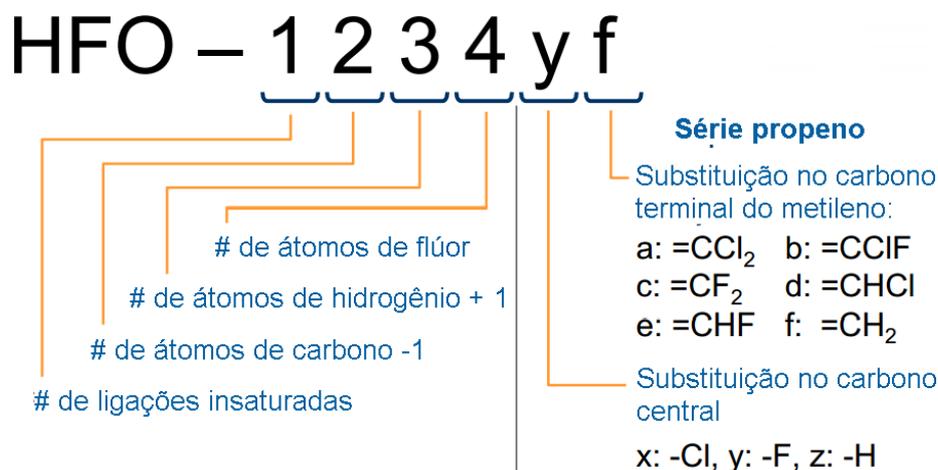


Figura 7.15. Exemplo de designação numérica para os HFO.

As Fig. 7.16 e 7.17 apresentam dois exemplos de HFO. Na Fig. 7.16 apresenta-se a cadeia original do propeno e a substituição no carbono central de um átomo de hidrogênio por um átomo de F, dando origem ao HFO-1234yf. Na Fig. 7.17 exemplo similar mostrando a origem do HFO-1234ze(E) e HFO-1234ze(Z), que são dois isômeros, com a mesma composição química.

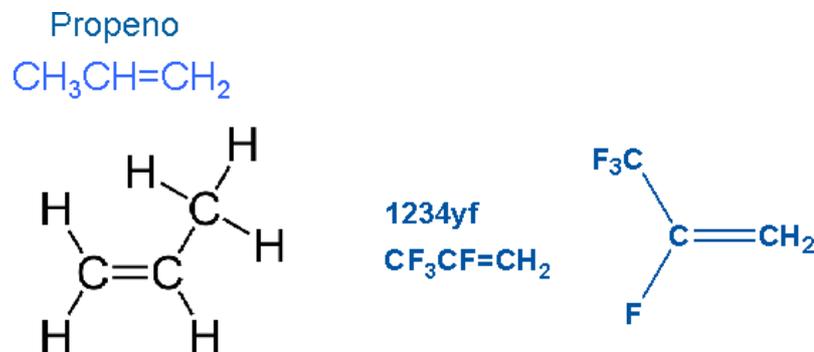


Figura 7.16. Exemplo de designação numérica HFO-1234yf.

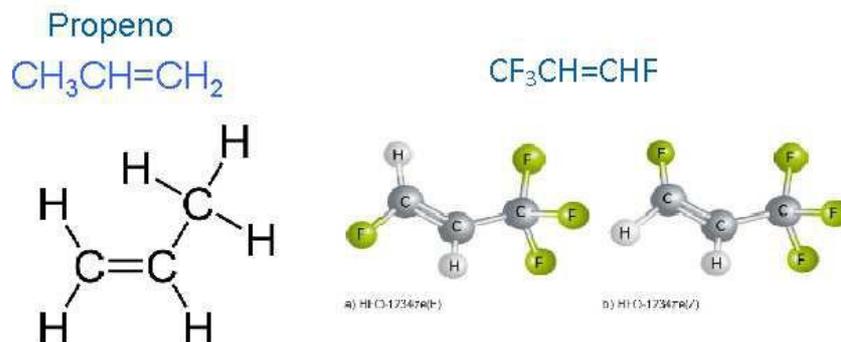


Figura 7.17. Exemplo de designação numérica HFO-1234ze(E) e HFO-1234ze(Z).

evaporação igual a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e operando em um ciclo padrão de refrigeração. Alguns parâmetros importantes que podem ser analisados nessa tabela são:

- Pressões de evaporação e de condensação, pela sua importância, que será comentada posteriormente;
- Relação entre pressões. Quanto menor essa relação melhor é o rendimento volumétrico do compressor, além de reduzir o trabalho de compressão;
- Efeito de refrigeração, caracterizado pela diferença entre as entalpias do refrigerante na entrada e na saída do evaporador, determinando a vazão mássica de refrigerante no circuito para uma dada capacidade de refrigeração;
- Efeito de refrigeração volumétrico, Q_E/v_1 . Quanto maior esse efeito, menor será a taxa de deslocamento necessária para o compressor e, conseqüentemente, menor será o tamanho do compressor em relação às suas dimensões;
- Trabalho de compressão volumétrico, W_m/v_1 , que representa o trabalho necessário para comprimir um volume unitário de vapor, isentropicamente e está relacionado com a potência necessária para acionar um compressor de dadas dimensões e velocidade;
- O título, x_4 , está de alguma forma associado às irreversibilidades durante o processo de expansão.
- O coeficiente de performance, COP , por sua relação com o consumo de energia no sistema para uma dada capacidade de refrigeração.

Tabela 7.4. Características de desempenho de alguns refrigerantes operando em um ciclo padrão, sem superaquecimento ou subresfriamento, para temperatura de condensação de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de evaporação igual a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Parâmetros	R-22	R-134a	R-404A	R-410A	R-717	R-600a	R-290	R-744	R-1234yf
P_E , kPa	296,3	164,0	364,8	480,9	236,2	88,8	291,6	2.291	183,7
P_C , kPa	1.192	770,6	1.421	1.886	1.167	404,5	1.079	7.214	783,5
P_C/P_E	4,02	4,70	3,89	3,92	4,92	4,56	3,70	3,15	4,26
Q_E , kJ/kg	162,3	147,9	114,6	168,0	1.103	263,2	278,4	131,7	114,0
\dot{m} , kg/(skW)	0,00616	0,00676	0,0087	0,00595	0,00091	0,0038	0,00359	0,00759	0,00878
v , m^3/kg	0,0775	0,1206	0,0537	0,0541	0,5086	0,4002	0,1537	0,01647	0,09528
Q_E/v , kJ/m^3	2.095	1.227	2.132	3.104	2.168	657,6	1.811	7.998	1.196
W_{comp}/v , kJ/m^3	449,5	266,3	504,1	704,5	455,0	140,8	398,3	2.976	270,8
\dot{V} , $\text{m}^3/(\text{skW})$	0,00048	0,000815	0,00047	0,00032	0,00046	0,00152	0,00055	0,00013	0,00084
x_4	0,250	0,294	0,360	0,296	0,160	0,287	0,295	0,514	0,341
$\dot{W}_{comp,s}$, kW/kW	0,215	0,217	0,236	0,227	0,210	0,214	0,220	0,372	0,226
COP	4,66	4,61	4,23	4,41	4,77	4,67	4,55	2,69	4,42

Propriedades termodinâmicas e de transporte dos refrigerantes

Para um conjunto de temperaturas de evaporação e condensação definidas, os diferentes refrigerantes apresentarão diferentes irreversibilidades e, como resultado, apresentarão diferentes $COPs$. Os principais parâmetros termodinâmicos e de transporte que afetam o desempenho de um sistema de refrigeração são comentados a seguir. Essa análise pode ser feita utilizando os dados fornecidos na Tab. 75, que foi elaborada com os mesmos refrigerantes apresentados na Tab. 7.4 e considerando as mesmas temperaturas de saturação.

Tabela 7.5. Propriedades termodinâmicas e de transporte de alguns refrigerantes operando em um ciclo padrão, sem superaquecimento ou subresfriamento, para temperatura de condensação de 30 °C e de evaporação igual a -15 °C.

Parâmetros	R-22	R-134a	R-404A	R-410A	R-717	R-600a	R-290	R-744	R-1234yf
P_{cr} , kPa	4.989	4.059	3.735	4.901	11.333	3.640	4.247	7.377	3.382
T_{cr} , °C	96,13	101,0	72,12	71,34	132,3	134,7	96,68	30,98	97,7
M , kg/kmol	86,47	102,0	97,6	72,59	17,03	58,12	44,1	44,01	114,0
v_{lc} , m ³ /kg	0,00086	0,00084	0,00098	0,00097	0,00168	0,00184	0,00207	0,00169	0,00093
v_{li} , m ³ /kg	0,00075	0,00075	0,00083	0,00082	0,00152	0,00167	0,00182	0,00099	0,00082
v_{vc} , m ³ /kg	0,01971	0,02662	0,01316	0,01305	0,11040	0,09545	0,04259	0,00290	0,02288
v_{vi} , m ³ /kg	0,07747	0,12060	0,05372	0,05413	0,50860	0,40020	0,15370	0,01647	0,09528
μ_{lc} , Pa.s	0,0001556	0,000183	0,000118	0,0001149	0,0001255	0,000142	0,0000933	0,0000438	0,0001516
μ_{li} , Pa.s	0,0002465	0,000323	0,0002167	0,0001996	0,0002017	0,0002382	0,0001507	0,0001283	0,0002671
μ_{vc} , Pa.s	0,0000137	0,000012	0,0000134	0,0000136	0,0000099	0,0000079	0,0000089	0,0000252	0,0000125
μ_{vi} , Pa.s	0,0000113	0,000010	0,0000108	0,0000106	0,0000086	0,0000066	0,0000073	0,0000135	0,0000104
k_{lc} , W/mK	0,08261	0,08079	0,06645	0,08469	0,4713	0,08715	0,0925	0,1085	0,06311
k_{li} , W/mK	0,1032	0,1008	0,08174	0,1123	0,6059	0,1046	0,1165	0,1276	0,08029
k_{vc} , W/mK	0,01238	0,01507	0,01629	0,0163	0,02684	0,01749	0,01972	0,1328	0,01137
k_{vi} , W/mK	0,00879	0,01063	0,01101	0,01092	0,02212	0,01295	0,01415	0,01527	0,008126
$c_{v,lc}$, kJ/kgK	0,6981	0,9189	0,9431	0,9309	2,759	1,720	1,686	1,407	0,9152
$c_{v,li}$, kJ/kgK	0,6705	0,8609	0,8628	0,8717	2,824	1,559	1,530	0,9324	0,8274
$c_{v,vc}$, kJ/kgK	0,6493	0,8528	0,9142	0,9417	2,178	1,614	1,648	1,523	0,8904
$c_{v,vi}$, kJ/kgK	0,5500	0,7183	0,761	0,7721	1,811	1,364	1,376	0,7846	0,7603

Como a predição da perda de pressão bifásica no evaporador ou condensador é um dos fatores mais importantes para o projeto e otimização de sistemas de refrigeração, será analisada com mais atenção. Tomando um evaporador com expansão direta como exemplo, uma perda máxima de pressão tipicamente utilizada em projetos equivale a uma redução de 1,4 °C na temperatura de saturação desde a entrada até a saída. Existem diversos modelos para a estimada da perda de pressão, desde o modelo homogêneo mais simples até os modelos que consideram o escoamento separado de cada fase. Para essa análise, será apresentado brevemente o modelo homogêneo.

Determinação da perda de pressão por atrito pelo modelo homogêneo

Considerando o modelo homogêneo para escoamento interno em um tubo, a perda de pressão total do refrigerante é devida às variações de energia cinética e potencial do fluido e ao atrito nas paredes do canal de escoamento. Assim, a perda de pressão total, Δp_{total} é a soma da perda de pressão estática (altura de elevação), Δp_{stat} , da perda de pressão por aceleração, Δp_{acel} , e da perda de carga por atrito, Δp_{fric} , conforme a Eq. 7.2

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{acel} + \Delta p_{fric} \quad (7.2)$$

A perda de pressão estática é dada pela Eq. 7.3.

$$\Delta p_{stat} = \rho_H g H \sin \theta \quad (7.3)$$

onde H é a altura vertical, θ é o ângulo em relação à horizontal e ρ_H é a massa específica homogênea, dada pela Eq. 7.4.

$$\rho_H = \rho_l (1 - \varepsilon_H) + \rho_v \varepsilon_H \quad (7.4)$$

onde ρ_l e ρ_v são as massas específicas do líquido e do vapor, respectivamente. A fração de vazio homogênea, ε_H é determinada pela Eq. 7.5, a partir do título.

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_v (1-x) \rho_v}{u_l x \rho_l} \right)} \quad (7.5)$$

onde u_l e u_v são as velocidades das fases líquido e vapor, respectivamente e a razão entre as duas é chamada de **relação de escorregamento** e que para um escoamento homogêneo é igual a um.

O gradiente de pressão por aceleração, por unidade de comprimento, é dado pela Eq. 7.6.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{acel} = \frac{d \left(\frac{\dot{m}_{total}}{\rho_H} \right)}{dz} \quad (7.6)$$

Dessa forma, a perda de carga por aceleração para o modelo homogêneo é igual a zero, uma vez que o título do vapor é considerado constante desde a entrada até a saída.

A perda de pressão por atrito pode ser representada em função de um fator de atrito bifásico, f_{tp} e, para um escoamento em regime permanente em um canal com seção transversal constante é dado pelo Eq. 7.7.

$$A_{p \text{ fric}} = \frac{2 f_{tp} L \dot{m}_{total}^2}{d_i \rho_H} \quad (7.7)$$

onde d_i é o diâmetro interno do tubo, L o comprimento, e \dot{m}_{total} é a vazão mássica das duas fases juntas. O fator de atrito bifásico é dado pela Eq. 7.8.

$$f_{tp} = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (7.8)$$

onde o número de Reynolds, Re , é dado conforme a Eq. 7.9.

$$Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu_{tp}} \quad (7.9)$$

A viscosidade absoluta para o cálculo do Re pode ser escolhida como a viscosidade da fase líquida ou como a viscosidade ponderada pelo título, μ_{tp} , conforme a Eq. 7.10.

$$\mu_{tp} = x \mu_v + (1-x) \mu_l \quad (7.10)$$

onde μ_l e μ_v são as viscosidades absolutas das fases líquido e vapor, respectivamente.

Volume específico

O volume específico do refrigerante, v , ou sua massa específica ($\rho = 1/v$) influencia na perda de pressão através do circuito de escoamento bem como na capacidade do compressor. Quanto maior o volume específico, maior será a perda de pressão no evaporador e no condensador para uma mesma taxa de massa e maior deverá ser a taxa de deslocamento do compressor para a mesma capacidade de refrigeração.

Aplicando o modelo de escoamento homogêneo para as mesmas condições de temperatura e pressão estabelecidas na Tab. 7.5 e considerando uma vazão mássica de 0,02 kg/s e diâmetro interno do tubo de 10 mm para todos os refrigerantes, foram calculadas as perdas de pressão por atrito para um comprimento de tubo unitário.

Conforme os valores estimados apresentados na Tab. 7.6, os refrigerantes R-717 e R-600a foram os que apresentaram maiores perdas de pressão por atrito enquanto que as menores perdas foram para os refrigerantes R-744 e R-410A. O refrigerante R-404A também apresenta baixa perda de pressão.

Tabela 7.6. Estimativas da perda de pressão por atrito para um tubo liso de 10 mm de diâmetro interno e vazão mássica de 0,02 kg/s.

Parâmetros	R-22	R-134a	R-404A	R-410A	R-717	R-600a	R-290	R-744	R-1234yf
Δp_{frc} , Pa/m	1.894,0	3.598,13	1.759,4	1.471,3	7.678,8	10.762,5	3.854,3	661,8	3.099,1

Viscosidade absoluta

A viscosidade absoluta, μ , é uma propriedade de transporte associada às perdas de pressão no circuito do refrigerante, principalmente no evaporador e condensador. Uma maior perda de pressão no evaporador resulta em uma diminuição da pressão de sucção do compressor, um aumento na pressão de descarga e diminuindo a vazão mássica, resultando em uma menor capacidade do sistema. A potência de compressão também diminui, mas com uma taxa menor do que a da redução de capacidade. Esses efeitos podem ser vistos através da análise das Tab. 7.5 e 7.6. No entanto, a viscosidade afeta mais significativamente o coeficiente de transferência de calor.

Condutividade térmica

De uma maneira geral, quanto maior for a condutividade térmica do líquido, maior deverá ser o coeficiente de transferência de calor.

Capacidade térmica molar ou calor específico a volume constante

O calor específico molar a volume constante (c_v) afeta significativamente o desempenho do ciclo, principalmente pelo formato das linhas de saturação na mudança de fase. O refrigerante com elevado calor específico molar apresenta as linhas de saturação curvadas para a direita o que pode conduzir a **compressão úmida**, conforme apresentado na Fig. 7.19 (b). Nessa mesma figura está representado um ciclo com trocador de calor na linha de líquido-linha de descarga, o que poderia resolver o problema da “compressão úmida”.

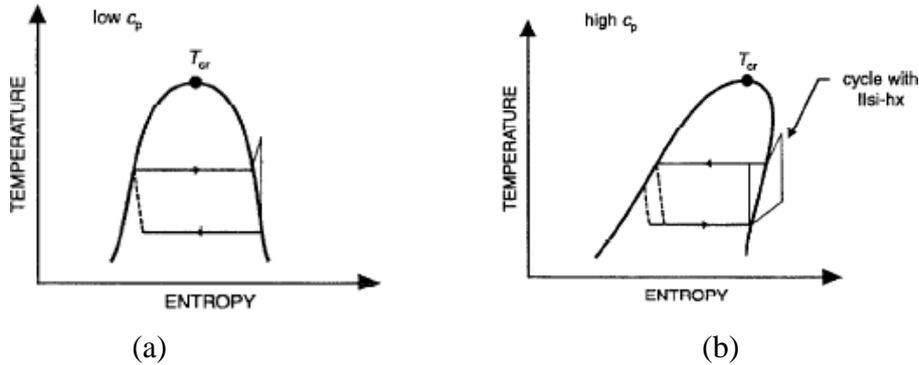


Figura 7.19. Efeito do calor específico molar na capacidade e no COP.

Conforme Domanski (1999) os refrigerantes com estrutura molecular mais complexa apresentam, provavelmente, maior capacidade térmica molar e, provavelmente, apresentem a linha de vapor saturado com inclinação negativa em baixas temperaturas e pressões. Quando a capacidade térmica é muito baixa, o trabalho de compressão será maior, incrementando a temperatura de descarga e reduzindo o rendimento térmico.

Na Fig. 7.20 é apresentado o incremento da complexidade molecular de alguns refrigerantes, conforme sua geração. Conforme o mesmo autor, quanto maior e mais complexa sua estrutura, maior a quantidade de graus de liberdade e maior a capacidade de armazenamento de energia e maior o calor específico molar. Outro aspecto importante é que quando maior a complexidade do composto maior será a complexidade de sua síntese, aumentando seu custo.

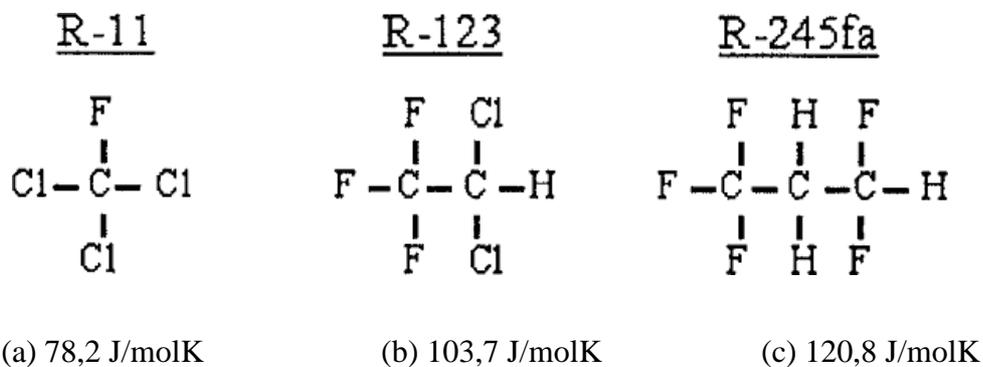


Figura 7.20. Aumento da complexidade e do calor específico molar de três refrigerantes. Calor específico molar do vapor a pressão constante para uma temperatura de 10 °C.

Efeito da temperatura crítica

Na Fig. 7.21 é apresentado o impacto da temperatura crítica considerando dois refrigerantes distintos. O refrigerante mais volátil, Fig. 7.21 (b) (menor temperatura crítica) começa a vaporização em títulos mais elevados e possui um “chifre” de superaquecimento na saída no compressor mais pronunciado, que são dois atributos que contribuem para a diminuição do COP. Entretanto, esse refrigerante terá uma maior capacidade volumétrica (kJ/m^3) visto que uma temperatura crítica menor resulta em maiores pressões na entrada do compressor. Esse compromisso entre COP e capacidade volumétrica é sempre inevitável.

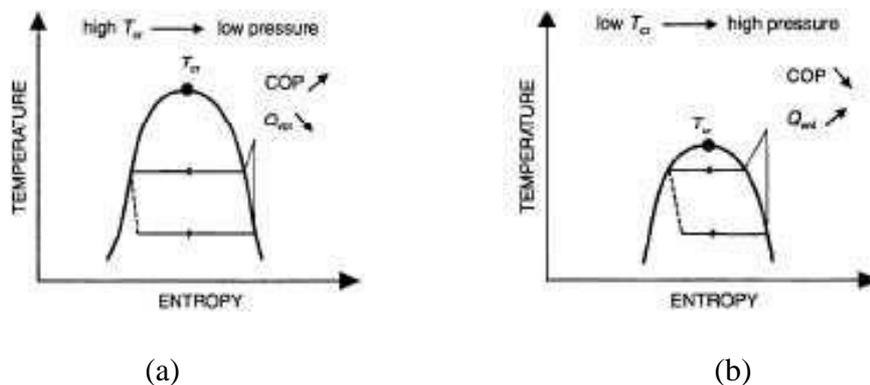


Figura 7.21. Efeito da temperatura crítica na capacidade e no COP.

Uma forma de analisar o comportamento de diversos refrigerantes, baseado nos parâmetros anteriores, é plotar em um diagrama temperatura vs. entropia normalizada, conforme proposto em Calm e Domanski (2004) e apresentado na Fig. 7.22. A entropia normalizada, calculada pela Eq. 7.11, permite tornar adimensional essa propriedade, facilitando a comparação entre vários refrigerantes e avaliar o impacto das propriedades termodinâmicas no COP.

$$s^* = \frac{s - s_v^0}{s_l^0 - s_v^0} \quad (7.11)$$

onde s é a entropia; s_v^0 é a entropia do vapor saturado a 0°C e s_l^0 é a entropia do líquido saturado a 0°C .

Pode-se notar nessa figura que o ponto crítico do R-134a é superior aos dos demais refrigerantes enquanto que é mais baixa para o R-410A e para o R-125.

Para as mesmas temperaturas de evaporação e condensação, o R-134a opera mais longe de seu ponto crítico que o R-22 e muito mais ainda em relação ao R-410A e para o R-125.

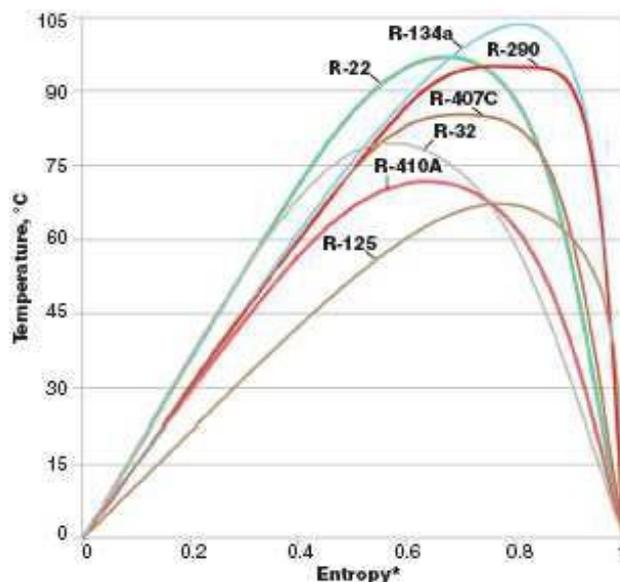


Figura 7.22. Diagrama temperatura vs. entropia normalizada para diversos refrigerantes.

Efeito da pressão de saturação

Um dos pontos determinantes para a seleção de um refrigerante para uma dada aplicação de refrigeração é a pressão exercida. Se por um lado pressões elevadas exigem tubulações e reservatórios de espessuras superiores às normais, por outro refrigerantes com pressões baixas podem ser inadequados para aplicações com temperaturas de evaporação reduzidas em virtude da possibilidade de ocorrência de pressões sub-atmosféricas em determinadas regiões do circuito, possibilitando a entrada de ar atmosférico, o que sempre deve ser evitado.

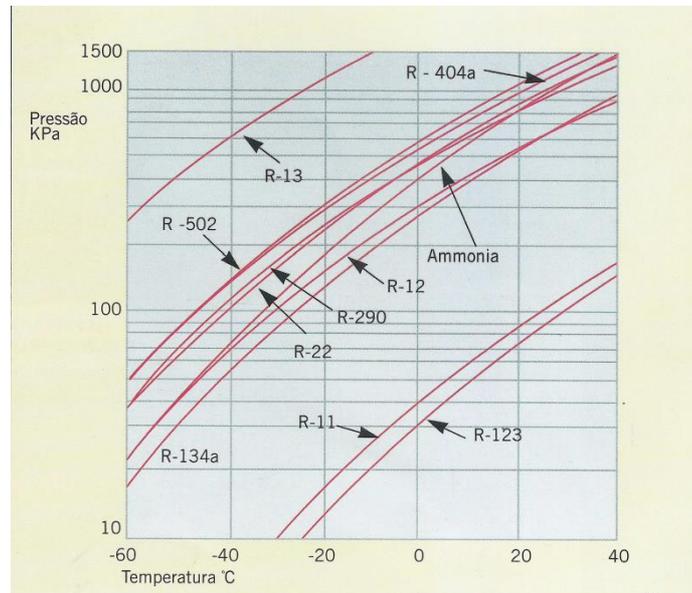


Figura 7. 23. Curvas de pressão de saturação em função da temperatura.

Na Fig. 7.23 são apresentadas as curvas de pressão de saturação em função da temperatura para alguns refrigerantes. Aqueles refrigerantes que apresentam pressões mais altas são adequados para operar a baixas temperaturas de evaporação. Como exemplo, o R-404A foi desenvolvido para substituir o R-502 em aplicações comerciais de baixa temperatura de evaporação, tais como balcões e câmaras de produtos congelados.

Já o R-12 e o R-134a apresentam pressões de saturação menores, razão pela qual são utilizados em aplicações com temperaturas de evaporação mais elevadas, tipicamente entre 0°C e -20°C. Conforme visto anteriormente, as pressões exercidas pelos refrigerantes estão associadas à suas temperaturas críticas. Quanto maior for a temperatura crítica, menos volátil é o refrigerante e menores serão as pressões exercidas.

Efeito da massa molar

Valores de entalpia de vaporização elevados são inversamente proporcionais à massa molar, como pode ser visto comparando os valores das Tab. 7.4 e 7.5. O refrigerante R-717 apresenta massa molar igual a 17,03 enquanto sua entalpia de vaporização para as condições dadas na Tab. 7.4 é igual a 1.103,0 kJ/kg. Para o refrigerante R-1234yf, cuja massa molar é igual a 114 kJ/kg.

Efeito de refrigeração volumétrico

Em geral, refrigerantes com elevadas pressões de vapor apresentam valores também elevados do efeito de refrigeração volumétrico, necessitando de compressores com baixas taxas de deslocamento para fornecer a mesma capacidade. Essa observação pode ser vista com os dados fornecidos nas Tab. 7.4 e 7.5.

Na Fig. 7.24 são apresentados dados relativos do efeito de refrigeração volumétrico para diversos refrigerantes.

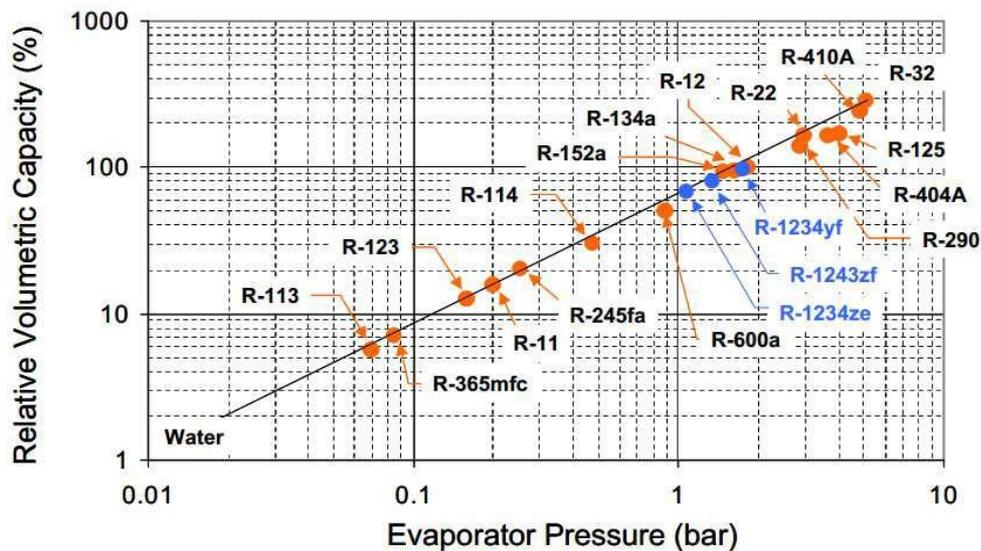


Figura 7.24. Efeito de refrigeração volumétrico para diversos refrigerantes.

Aspectos relacionados à segurança

Quatro aspectos básicos devem ser considerados quando se relacionam as questões de segurança na utilização e manuseio de uma instalação de refrigeração. São: toxicidade, potenciais carcinogênicos e mutagênicos e a inflamabilidade.

A norma ASHRAE 34-92, e seus adendos, classifica os refrigerantes quanto ao nível de toxicidade e inflamabilidade. A designação dada aos refrigerantes possui dois caracteres, sendo o primeiro uma letra que caracteriza o nível de toxicidade e o segundo um número que indica o grau de inflamabilidade. Os compostos são classificados em dois grupos, de acordo com a toxicidade para concentrações abaixo de 400 ppm. Os efeitos considerados são: irritação; danos crônicos ou irreversíveis nos tecidos, narcose a um nível capaz de acarretar um acidente pessoal, de impedir um auto salvamento ou até reduzir a eficiência no trabalho.

- Classe A: compostos cuja toxicidade não foi identificada;
- Classe B: compostos com evidências identificadas de toxicidade.

Quanto ao nível de inflamabilidade, os refrigerantes são divididos em três grupos, designados pelos algarismos 1, 2 e 3, conforme os seguintes critérios:

- Classe 1: não se observa propagação da chama no ar a 18 °C e pressão igual a 101,325 kPa;
- Classe 2: Limite inferior de inflamabilidade superior a 0,10 kg/m³ a 21 °C e pressão igual a 101,325 kPa e com poder calorífico inferior a 19.000 kJ/kg;

- Classe 3: Inflamabilidade elevada, caracterizando-se por possuir limite inferior de inflamabilidade inferior ou igual a $0,10 \text{ kg/m}^3$ a 21°C e pressão igual a $101,325 \text{ kPa}$ e com poder calorífico superior a 19.000 kJ/kg .

Com a inclusão de novos refrigerantes no mercado, sendo que alguns deles apresentam pequena inflamabilidade, essa classificação está sendo reconsiderada através da criação de um sub-grupo ou nova sub-classe, 2L. Essa classificação provisória é apresentada na Fig. 7.25.

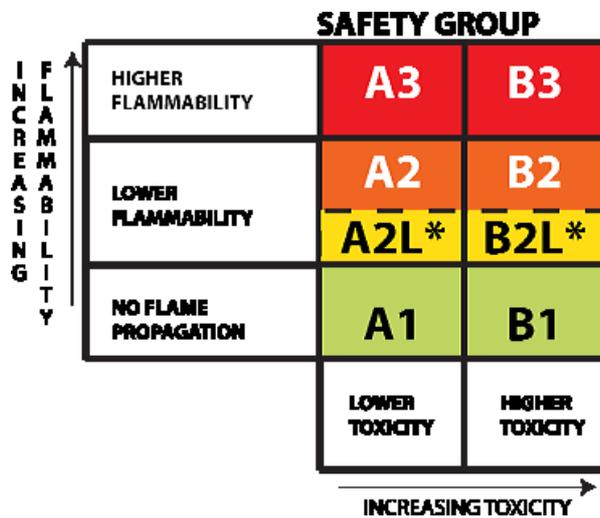


Figura 7.25. Classificação provisória da norma ASHRAE 34 para o novo grupo L.

Para esses estudos, foi incluída como parâmetro adicional a velocidade de propagação da chama. Assim, para velocidades de chama de até 10 cm/s , o refrigerante é considerado como de média baixa inflamabilidade, originando uma subdivisão na tabela original como classe 2L, conforme a Fig. 7.26.

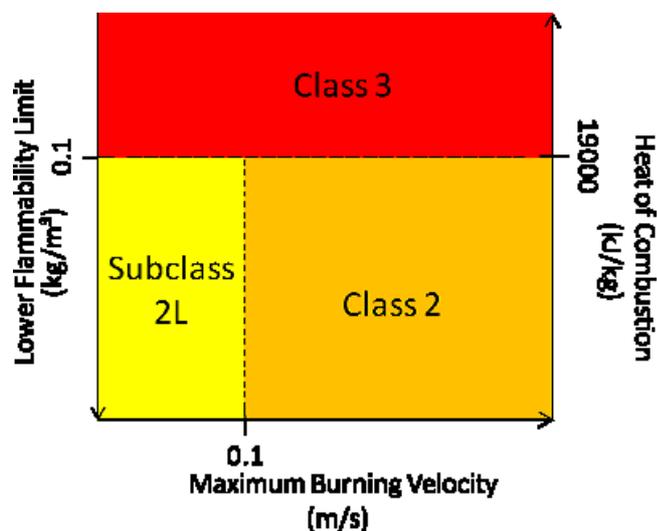


Figura 7.26. Sub-grupo L (A2L e B2L) a partir da consideração da velocidade da chama.

Outro parâmetro importante na consideração de aspectos de segurança de refrigerantes inflamáveis é a energia mínima da chama para que, atendendo as condições de limites inferiores e superiores de inflamabilidade, o refrigerante entre em ignição. Alguns dados relativos a esse

parâmetros são mostrados na Fig. 7.27, a energia mínima de ignição (MIE) é plotada contra a velocidade da chama.

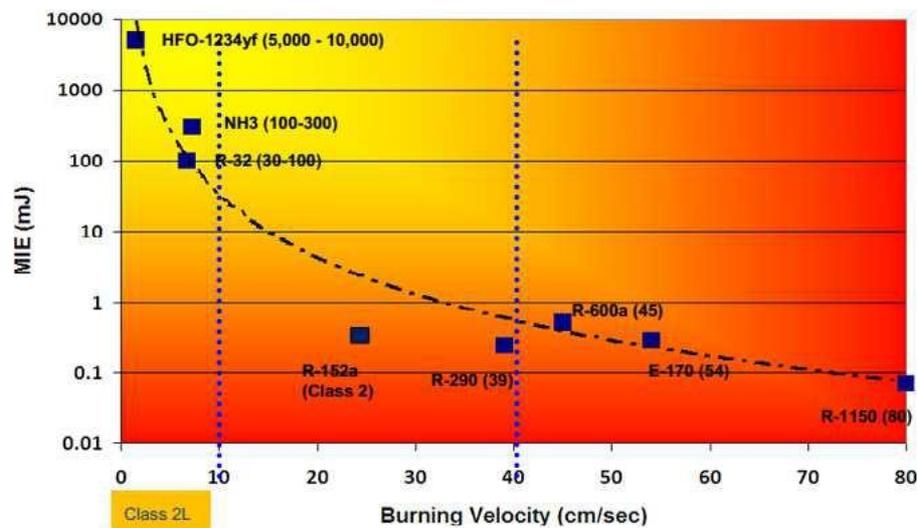


Figura 7.27. Correlação entre MIE e velocidade da chama.

Na Tab. 7.7 são apresentados dados gerais sobre diversos refrigerantes utilizados, como nome comercial, fórmula química, ODP e GWP, compatibilidade com óleo lubrificante e classe de segurança.

Independente dessa classificação sugere-se sempre que o manuseio dos refrigerantes seja realizado com todos os cuidados possíveis. Alguns refrigerantes, mesmo que considerados não tóxicos ou não inflamáveis, quanto submetidos a algumas situações especiais, podem entrar em ignição ou gerar compostos tóxicos.

Compatibilidades dos refrigerantes com os materiais

Dentro do circuito de refrigeração o refrigerante entra em contato com diversos materiais, tais como elastômeros, plásticos, metais, vernizes do enrolamento do motor de acionamento do compressor e com o óleo lubrificante. A compatibilidade com cada um desses elementos pode ser resumida a seguir:

- **Metais:** com algumas exceções, os refrigerantes halogenados podem ser usados com a maioria dos metais mais comuns, como aço, ferro fundido, latão, cobre, alumínio, etc. Sob determinadas condições, alguns metais podem catalisar reações, como hidrólise e a decomposição térmica dos refrigerantes. Não se recomenda o uso de magnésio, zinco e ligas de alumínio contendo mais que 2% de magnésio, em sistemas que operam com refrigerantes halogenados, mesmo com a presença de somente traços de água. Para o caso de instalações utilizando amônia (NH_3), não deve ser utilizado o cobre, latão e outras ligas de cobre.

- **Elastômeros:** o contato do refrigerante e óleo lubrificante pode alterar significativamente as propriedades físicas ou químicas de elastômeros como, por exemplo, a excessiva variação dimensional (aumento ou diminuição de volume). Alguns elastômeros a base de neoprene tendem a “inchar” na presença de HFCs. Como esses materiais são utilizados em vedações,

sugere-se buscar informações sobre compatibilidade junto ao fabricante do refrigerante a ser utilizado.

- **Plásticos e vernizes:** como regra geral, o efeito do refrigerante sobre plásticos diminui com a redução dos átomos de cloro na molécula ou, em outras palavras, com o aumento do número de átomos de flúor. Recomenda-se a realização de testes de compatibilidade antes do uso de plásticos com determinados refrigerantes. Em relação aos vernizes, utilizados no enrolamento (estatores) dos motores elétricos de compressores herméticos e semi-herméticos para dar rigidez e isolamento elétrico ao enrolamento, deve-se também realizar testes de compatibilidade, em função da grande variedade de compostos químicos utilizados na sua formulação.

Relação dos refrigerantes com óleos lubrificantes

Nos sistemas de refrigeração o refrigerante entra em contato com o óleo de lubrificação do compressor, o qual acaba sendo arrastado para as diferentes regiões do circuito. A interação entre óleo lubrificante com o refrigerante e da mistura de ambos com os diversos materiais do circuito pode afetar a integridade da instalação. Em geral, essa informação é disponibilizada pelos fabricantes de compressores.

Os óleos lubrificantes apresentam temperatura de ebulição e massa molar, na maioria das vezes, maiores do que as dos refrigerantes mais utilizados, afetando então a condição da mistura refrigerante-óleo, que apresentará temperaturas de ebulição e massa molar maior do que quando considerando apenas o refrigerante.

A presença de um óleo miscível no refrigerante aumenta sua temperatura crítica, a viscosidade do líquido, a tensão superficial, o calor específico e a condutividade térmica. Por outro lado, a presença do óleo diminui a pressão crítica e a massa específica da fase líquida do refrigerante. Em geral, pode ser esperada uma redução no coeficiente de transferência de calor e um aumento da perda de pressão, tanto no evaporador quanto no condensador quando óleo está presente. Diversos estudos foram realizados com o objetivo de quantificar esses efeitos mas ainda não são conclusivos o suficiente para criar uma regra geral.

As funções do óleo em um compressor, além da lubrificação das partes móveis, são o resfriamento e, em alguns casos, a vedação entre as regiões de alta e baixa pressão, como nos compressores parafuso. Dois tipos básicos são encontrados: os minerais com suas diversas composições e os sintéticos. Desses, destaca-se os álquil benzenos, os glicóis poli alcalinos, conhecidos como PAG e os ésteres poliólicos, conhecidos como POE. Os óleos minerais caracterizam-se por três composições básicas: naftênicos, parafínicos e aromáticos.

Em virtude de apresentarem moléculas aromáticas, os óleos álquil benzenos se caracterizam por uma boa solubilidade com o R-22 e o R-502. Podem utilizar-se misturas de óleos álquil benzenos com os minerais de base naftênica, chamados óleos semi-sintéticos, que são compatíveis com os refrigerantes HCFCs. Os refrigerantes HFCs, caracterizados por moléculas polares, não são compatíveis com os óleos minerais (não polares) e os álquil benzenos. Óleos sintéticos compatíveis com esses refrigerantes, POEs e PAGs, caracterizam-se por sua elevada higroscopicidade, o que prejudica o seu manuseio. Esses óleos tendem a concentrar significativas quantidades de água quando expostos ao ar podendo, com isso, causar problemas ao circuito como corrosão e formação de placas de cobre em locais inadequados. Os PAGs tendem a se oxidar e são sensíveis a contaminantes contendo cloro, como resíduos de R-12, por exemplo. Esses óleos são largamente utilizados em sistemas de ar condicionado automotivo. Na indústria frigorífica, os óleos POE têm sido muito utilizados para operação com os HFCs. São menos higroscópicos que os PAGs mas tem tendência à hidrólise além se serem incompatíveis com alguns elastômeros.

A miscibilidade (solubilidade) com o refrigerante é uma característica importante para garantir o adequado retorno do óleo ao cárter do compressor em circuitos que operam com refrigerantes halogenados. A amônia e o CO₂ apresentam reduzida solubilidade nos óleos minerais de forma que, em sistemas industriais, a coleta do óleo acumulado nas regiões baixas (fundo de separadores de líquido) deve ser prevista para o seu retorno ao compressor.

Tabela 7.7. Parâmetros característicos e classe de segurança de alguns refrigerantes.

Number – Names	Formula	ODP	GWP	Oil Compatibility ¹	Levy (\$/kg)	Other Weaknesses
CFCs						
R11 – trichlorofluoromethane	CCl ₃ F	1.0	4000	M	–	MP phase-out
R12 – dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	1.0	8500	M	–	MP phase-out
R502 – CFC blend	115 (51%), 22 (49%)	0.23	5590	M	–	MP phase-out
HCFCs						
R22 – chlorodifluoromethane	CHClF ₂	0.055	1700	M,AB	–	MP phase-out
R123 – dichlorotrifluoroethane	C ₂ HCl ₂ F ₃	0.02	93	M,AB,POE	–	MP phase-out
HFCs						
R32 – difluoromethane	CH ₂ F ₂	0.0	650	POE	15	A2L
R125 – pentafluoroethane	C ₂ HF ₅	0.0	2800		64	
R134a – tetrafluoroethane	C ₂ H ₂ F ₄	0.0	1300	POE,PAG	30	
R143a – trifluoroethane	C ₂ H ₃ F ₃	0.0	3800		87	A2L
R152a – difluoroethane	C ₂ H ₄ F ₂	0.0	140		3	A2L
R245ca	C ₂ H ₃ F ₅	0.0	560		13	
R404A – HP62, FX70	125 (44%), 134a (4%), 143a (52%)	0.0	3260	POE	75	
R407C – Klea-66, Suva-9000	32 (23%), 125 (25%), 134a (52%)	0.0	1530	POE	35	High glide
R410A – AZ-20	32 (50%), 125 (50%)	0.0	1730	POE	40	High P
R417A – Isceon MO59	125 (46.6%), 134a (50%), 600 (3.4%)	0.0	1960	M,AB,POE	45	Medium glide
R422D – Isceon MO29	125 (65.1%), 134a (31.5%), 600a (3.4%)	0.0	2620	M,POE	60	Medium glide
R507 – AZ-50	125 (50%), 143a (50%)	0.0	3300	POE	76	
HFOs						
R1234yf	C ₃ H ₂ F ₄	0.0	4	POE	0.1	A2L, high cost
R1234ze	C ₃ H ₂ F ₄	0.0	6	POE	0.1	High cost
Perfluorocarbons (PFs)						
R218 – perfluoropropane	C ₃ F ₈	0.0	7000		161	Long EAL
Natural Refrigerants (NRs)						
R170 – ethane	C ₂ H ₆	0.0	~5	M,AB,POE	–	A3
R290 – propane, Care 40	C ₃ H ₈	0.0	~5	M,AB,POE	–	A3
R600a – isobutane, Care 10	C ₄ H ₁₀	0.0	~5	M,AB,POE	–	A3
R717 – ammonia	NH ₃	0.0	<1	M	–	B2L, low P, no copper
R718 – water	H ₂ O	0.0	<1			0°C limit, very low P
R744 – carbon dioxide	CO ₂	0.0	1	M	–	Low critical temp., high P
R1270 – propylene	C ₃ H ₆	0.0			–	A3

Refrigerantes secundários

Em muitas aplicações de refrigeração, o calor é transferido para um líquido de resfriamento secundário, cuja característica básica é não mudar seu estado durante o processo de troca térmica. Esses líquidos são conhecidos como fluidos de transferência de calor, salmouras, glicóis ou refrigerantes secundários. Em geral, são utilizados quando se desejam instalações seguras desde o ponto de vista da toxicidade, fáceis de operar e sem grandes problemas de manutenção. As aplicações mais importantes se encontram na indústria de processamento de alimentos e indústria farmacêutica.

Seleção

Um refrigerante secundário precisa ser compatível com os outros materiais do sistema, nas temperaturas e pressões encontradas. Também deve ser compatível com o meio-ambiente, com os códigos de segurança aplicáveis e econômico para usar e substituir.

O fluido deveria ter um ponto de congelamento mínimo de 3 K e preferivelmente de 8 K abaixo da temperatura mínima na qual vai operar. Nas temperaturas mínimas de operação a viscosidade deverá ser o suficientemente baixa para permitir uma transferência de calor satisfatória e razoáveis perdas de carga. Uma instalação típica utilizando fluido secundário pode ser vista na Figura 7.28.

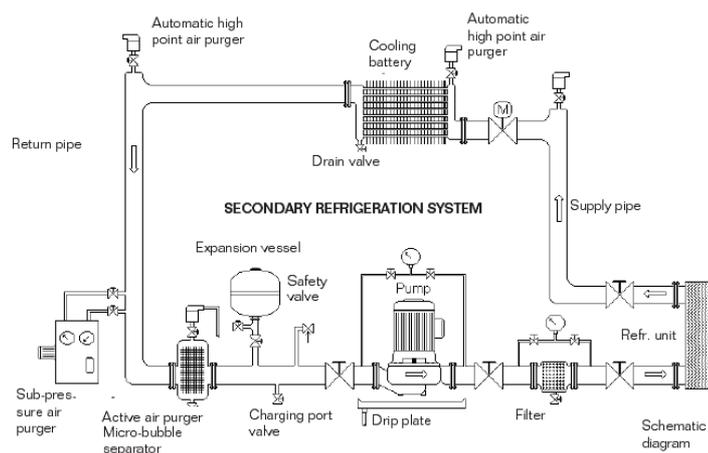


Figura 7.28. Detalhe de uma instalação de refrigeração com fluido secundário.

Nestes sistemas, a bomba do fluido secundário é geralmente colocada na linha de retorno do *chiller*. Assim, a vazão da bomba é baseada na massa específica do fluido na temperatura de retorno. A vazão em massa do refrigerante secundário, \dot{m} , para uma dada capacidade de refrigeração, \dot{Q}_E , é baseada na faixa de temperatura desejada e no coeficiente de transferência de calor a uma temperatura média de mistura, conforme a Eq. 7.12:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_E}{c_p \Delta T} \quad (7.12)$$

Tipos de Fluidos Secundários

Embora a água seja um agente de transporte térmico universalmente eficaz, traz como inconveniente o fato de congelar-se a 0 °C e vaporizar a 100 °C, o que limita seriamente sua

faixa útil de temperaturas. Vários tipos de salmouras, óleos, compostos orgânicos aromáticos e fluidos sintéticos tem sido utilizados como agentes secundários para o transporte de calor.

Salmouras

Consistem de soluções aquosas de cloreto de sódio ou cloreto de cálcio. Segundo o grau de concentração é possível trabalhar a diferentes temperaturas. As Tab. 7.8 e 7.9 listam as propriedades destas salmouras, utilizando substâncias puras. Para graus comerciais de pureza, utilizar as correções indicadas nestas tabelas.

Tabela 7.8. Propriedades de salmouras com cloreto de cálcio puro.

Pure CaCl ₂ , % by Mass	Specific Heat at 15°C, J/(kg·K)	Crystallization Starts, °C	Density at 16°C, kg/m ³		Density at Various Temperatures, kg/m ³			
			CaCl ₂	Brine	-20°C	-10°C	0°C	10°C
0	4184	0.0	0.0	999				
5	3866	-2.4	52.2	1044			1042	1041
6	3824	-2.9	63.0	1049			1051	1050
7	3757	-3.4	74.2	1059			1060	1059
8	3699	-4.1	85.5	1068			1070	1068
9	3636	-4.7	96.9	1078			1079	1077
10	3577	-5.4	108.6	1087			1088	1086
11	3523	-6.2	120.5	1095			1097	1095
12	3464	-7.1	132.5	1104			1107	1104
13	3414	-8.0	144.8	1113			1116	1114
14	3364	-9.2	157.1	1123			1126	1123
15	3318	-10.3	169.8	1132		1140	1136	1133
16	3259	-11.6	182.6	1141		1150	1145	1142
17	3209	-13.0	195.7	1152		1160	1155	1152
18	3163	-14.5	209.0	1161		1170	1165	1162
19	3121	-16.2	222.7	1171		1179	1175	1172
20	3084	-18.0	236.0	1180		1189	1185	1182
21	3050	-19.9	249.6	1189				
22	2996	-22.1	264.3	1201	1214	1210	1206	1202
23	2958	-24.4	278.7	1211				
24	2916	-26.8	293.5	1223	1235	1231	1227	1223
25	2882	-29.4	308.2	1232				
26	2853	-32.1	323.1	1242				
27	2816	-35.1	338.5	1253				
28	2782	-38.8	354.0	1264				
29	2753	-45.2	369.9	1275				
29.87	2741	-55.0	378.8	1289				
30	2732	-46.0	358.4	1294				
32	2678	-28.6	418.1	1316				
34	2636	-15.4	452.0	1339				

^aMass of Type 1 (77% min.) CaCl₂ = (mass of pure CaCl₂)(0.77). Mass of Type 2 (94% min.) CaCl₂ = (mass of pure CaCl₂)(0.94).

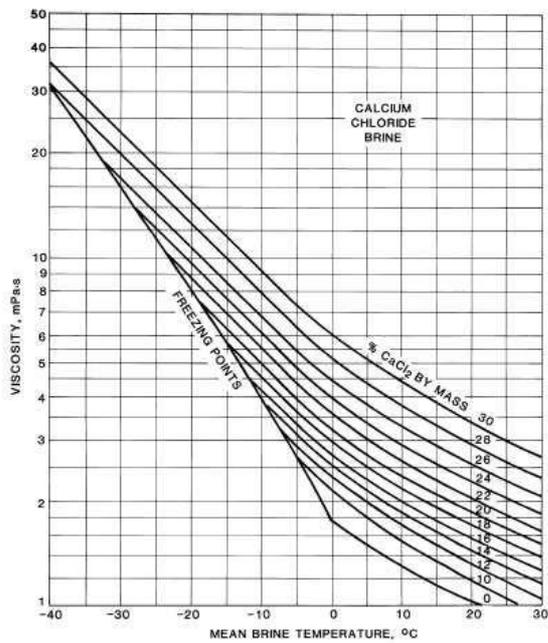
Tabela 7.9. Propriedades de salmouras com cloreto de sódio puro.

Pure NaCl, % by Mass	Specific Heat at 15°C, J/(kg·K)	Crystallization Starts, °C	Density at 16°C, kg/m ³		Density at Various Temperatures, kg/m ³			
			NaCl	Brine	-10°C	-0°C	10°C	20°C
0	4184	0.0	0.0	1000				
5	3925	-2.9	51.7	1035		1038.1	1036.5	1034.0
6	3879	-3.6	62.5	1043		1045.8	1043.9	1041.2
7	3836	-4.3	73.4	1049		1053.7	1051.4	1048.5
8	3795	-5.0	84.6	1057		1061.2	1058.9	1055.8
9	3753	-5.8	95.9	1065		1069.0	1066.4	1063.2
10	3715	-6.6	107.2	1072		1076.8	1074.0	1070.6
11	3678	-7.3	118.8	1080		1084.8	1081.6	1078.1
12	3640	-8.2	130.3	1086		1092.4	1089.6	1085.6
13	3607	-9.1	142.2	1094		1100.3	1097.0	1093.2
14	3573	-10.1	154.3	1102		1108.2	1104.7	1100.8
15	3544	-10.9	166.5	1110	1119.4	1116.2	1112.5	1108.5
16	3515	-11.9	178.9	1118	1127.6	1124.2	1120.4	1116.2
17	3485	-13.0	191.4	1126	1135.8	1132.2	1128.3	1124.0
18	3456	-14.1	204.1	1134	1144.1	1140.3	1136.2	1131.8
19	3427	-15.3	217.0	1142	1153.4	1148.5	1144.3	1139.7
20	3402	-16.5	230.0	1150	1160.7	1156.7	1154.1	1147.7
21	3376	-17.8	243.2	1158	1169.1	1165.0	1160.5	1155.8
22	3356	-19.1	256.6	1166	1177.6	1173.3	1168.7	1163.9
23	3330	-20.6	270.0	1174	1186.1	1181.7	1177.0	1172.0
24	3310	-15.7	283.7	1182	1194.7	1190.1	1185.3	1180.3
25	3289	-8.8	297.5	1190				
25.2		0.0						

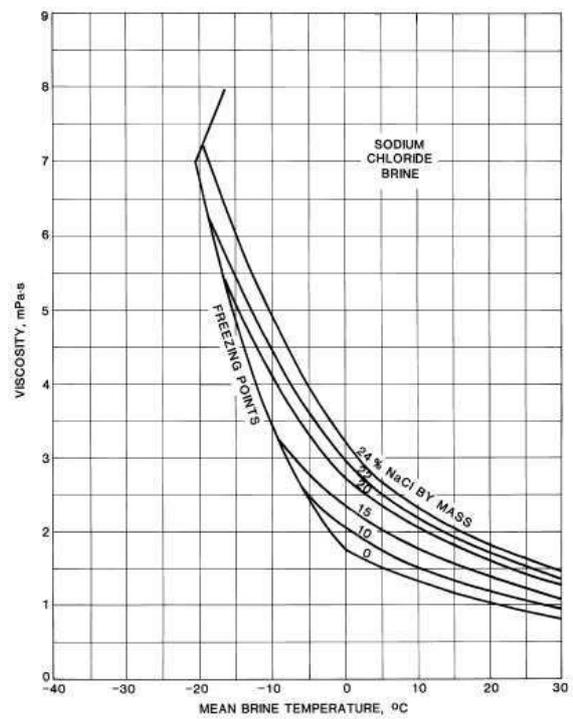
^aMass of commercial NaCl required = (mass of pure NaCl required)/(% purity).

^bMass of water per unit volume = Brine mass minus NaCl mass.

Nas Fig. 7.29 e 7.30 encontram-se os valores de viscosidade e condutividade térmica para salmouras de cloreto de cálcio e cloreto de sódio, respectivamente, de acordo com ASHRAE (2001).

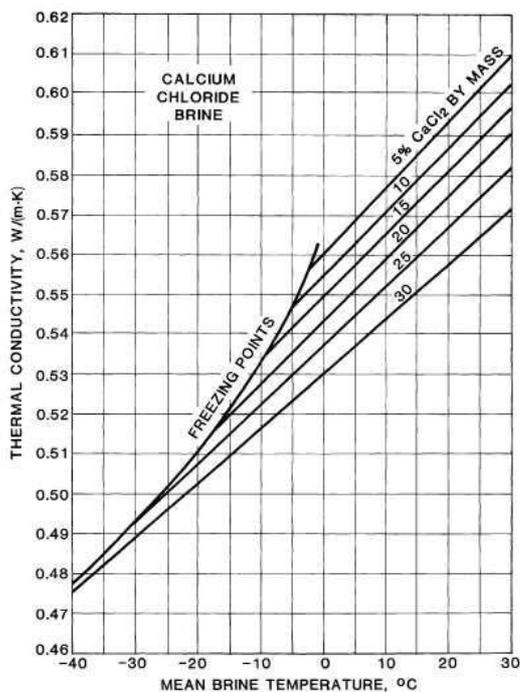


(a)

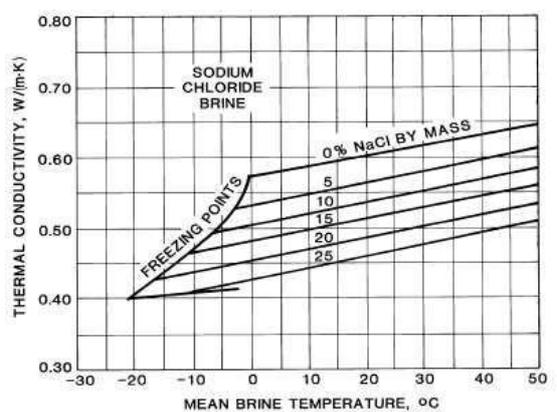


(b)

Figura 7.29. Viscosidade para salmouras a base de (a) cloreto de sódio e (b) cloreto de sódio.



(a)



(b)

Figura 7.30. Condutividade térmica para salmouras a base de (a) cloreto de sódio e (b) cloreto de sódio.

Na Fig. 7.31 encontram-se os valores de calor específico e massa específica para salmouras de cloreto de sódio, de acordo com ASHRAE (2001).

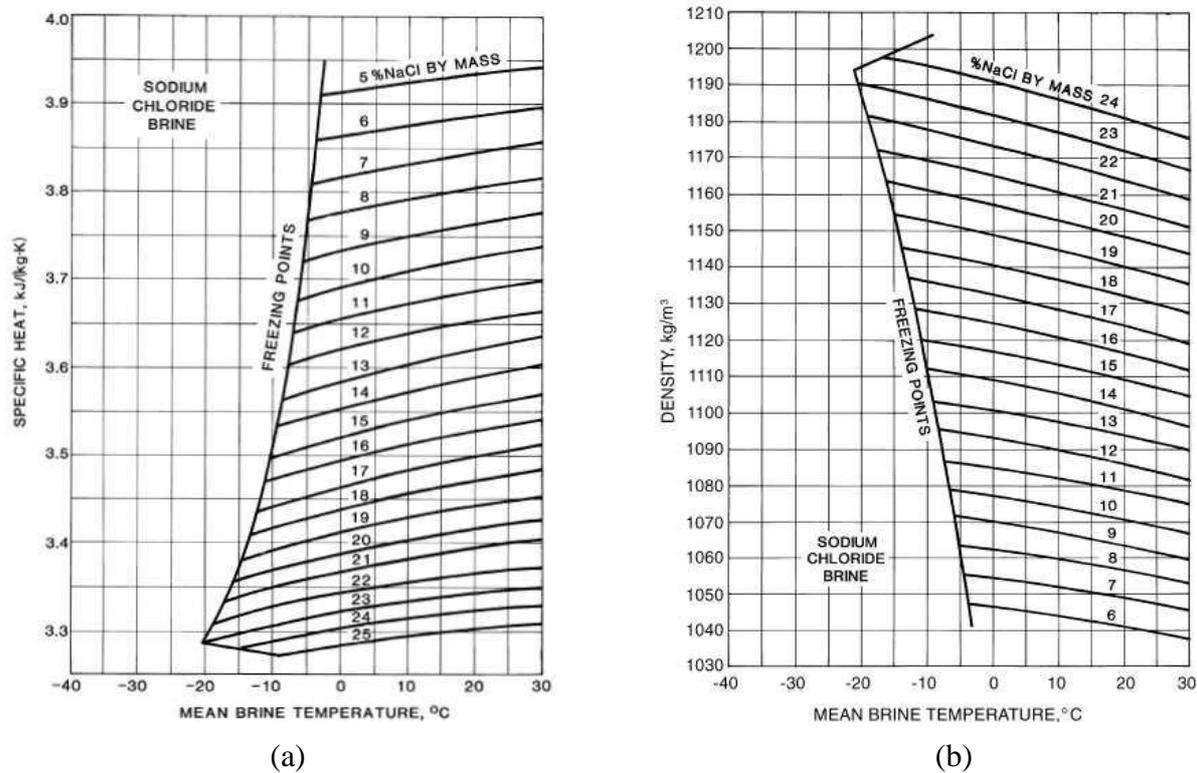


Figura 7.31. Propriedades de salmouras de cloreto de sódio: (a) calor específico e (b) massa específica.

Apesar de serem fluidos secundários baratos, apresentam importantes problemas de corrosão e formação de depósitos, principalmente quando se utilizam tubulações de aço galvanizado. Pode-se utilizar (desde que a legislação permita) tratamentos a base de cromatos como inibidores da corrosão.

Salmouras de cloreto de cálcio requerem um mínimo de 1800 mg/kg de cromato de sódio e pH entre 6,5 e 8,5. Salmouras de cloreto de sódio requerem um mínimo de 3600 mg/kg de cromato de sódio e um pH entre 6,5 e 8,5. Nitrato de sódio a 3000 mg/kg em salmouras a base de cálcio ou a 4000 mg/kg nas salmouras a base de sódio controlam o pH entre 7,0 e 8,5, fornecendo proteção adequada. Na impossibilidade de utilizarem-se cromatos ou nitratos, estes podem ser substituídos por inibidores orgânicos.

A água, como um eficiente solvente, contém, muitas vezes, partículas sólidas dissolvidas que podem depositar-se e eventualmente acumularem-se no sistema, restringindo o fluxo e atuando como um isolante para o transporte térmico.

Glicóis inibidos

Dois tipos de glicóis, inibidos para o controle da corrosão, são usados comercialmente: o etileno glicol, desenvolvido logo após a 2ª. Grande Guerra e o propileno glicol, com piores propriedades físicas, mas menos tóxico que o primeiro, sendo, portanto o preferido quando a aplicação envolver possível contato humano ou com alimentos.

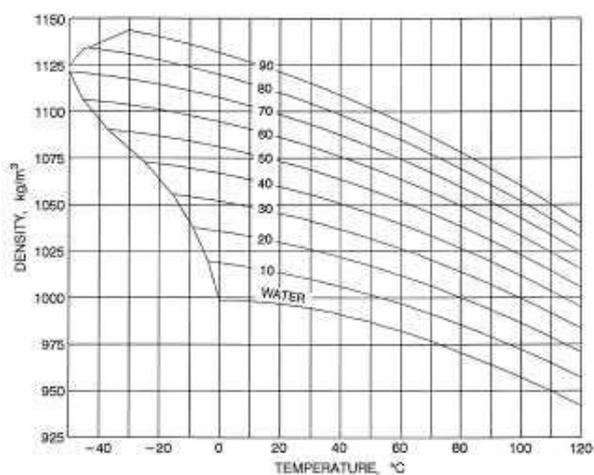
Seus atributos principais são: menor ponto de congelamento que a água, baixa volatilidade e, quando apropriadamente inibidos, apresentam baixos níveis de corrosão.

Tanto o etileno glicol como o propileno glicol são líquidos incolores, praticamente inodoros e miscíveis com a água ou outros compostos orgânicos. A Tab. 7.10 apresenta algumas propriedades destas substâncias, quando puras.

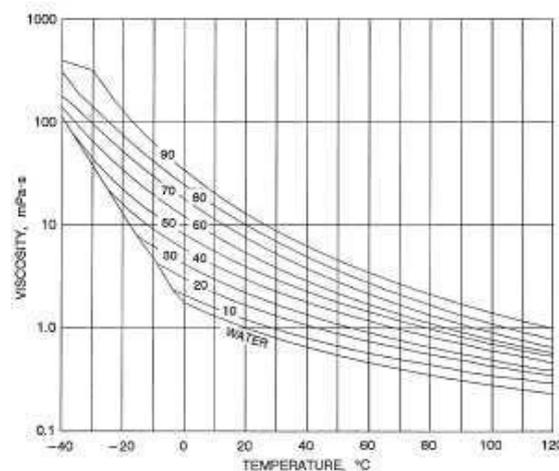
Tabela 7.10. Propriedades físicas do etileno e do propileno glicol.

Property	Ethylene Glycol	Propylene Glycol
Relative molecular mass	62.07	76.10
Density at 20°C, kg/m ³	1113	1036
Boiling point, °C		
at 101.3 kPa	198	187
at 6.67 kPa	123	116
at 1.33 kPa	89	85
Vapor pressure at 20°C, Pa	6.7	9.3
Freezing point, °C	-12.7	Sets to glass below -51°C
Viscosity, mPa·s		
at 0°C	57.4	243
at 20°C	20.9	60.5
at 40°C	9.5	18.0
Refractive index n_D at 20°C	1.4319	1.4329
Specific heat at 20°C, kJ/(kg·K)	2.347	2.481
Heat of fusion at -12.7°C, kJ/kg	187	—
Heat of vaporization at 101.3 kPa, kJ/kg	846	688
Heat of combustion at 20°C, MJ/kg	19.246	23.969

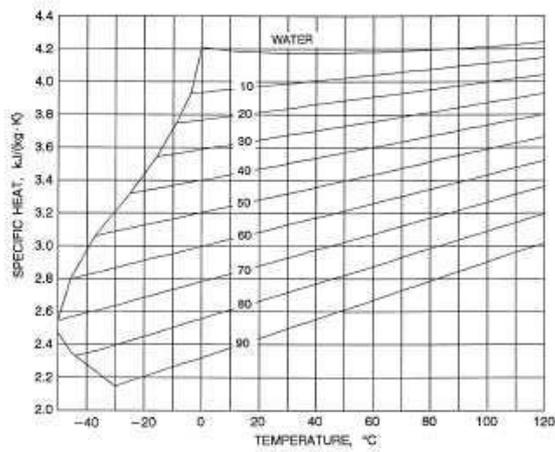
Nas Fig. 7.32 são encontradas algumas propriedades das soluções aquosas de etileno glicol em função da temperatura.



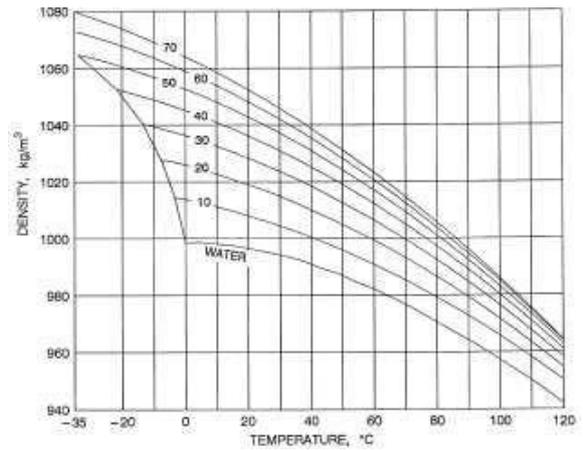
(a)



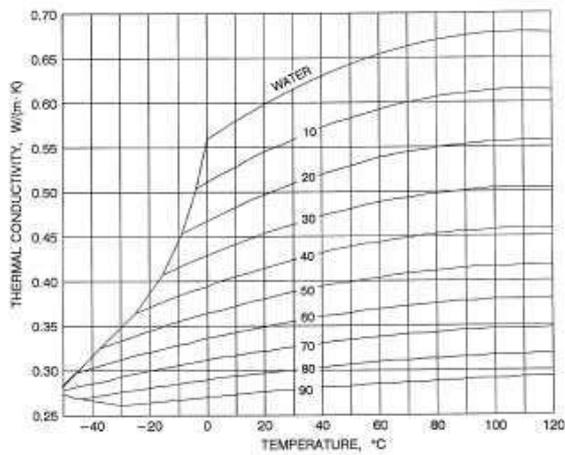
(b)



(c)



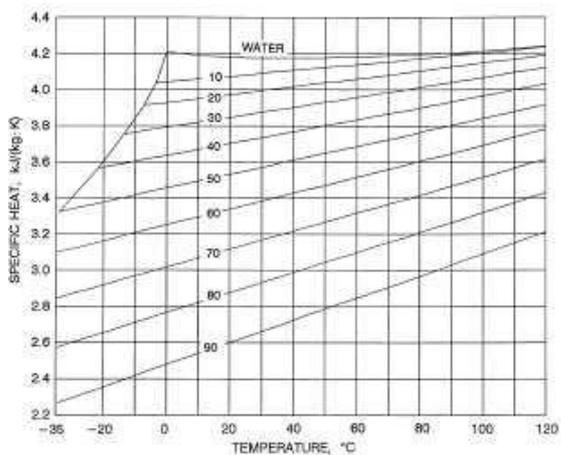
(d)



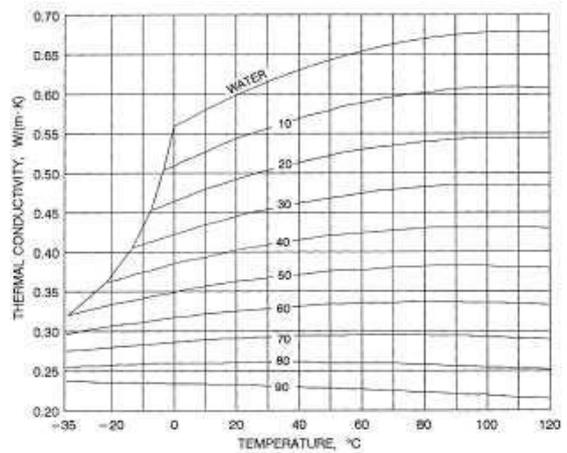
(e)

Figura 7.32. Propriedades das soluções aquosas de etileno glicol em função da temperatura (volume %).

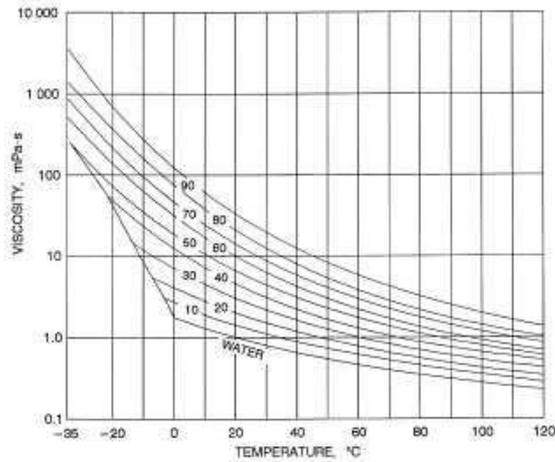
Nas Fig. 7.33 são encontradas algumas propriedades das soluções aquosas de propileno glicol em função da temperatura.



(a)



(b)

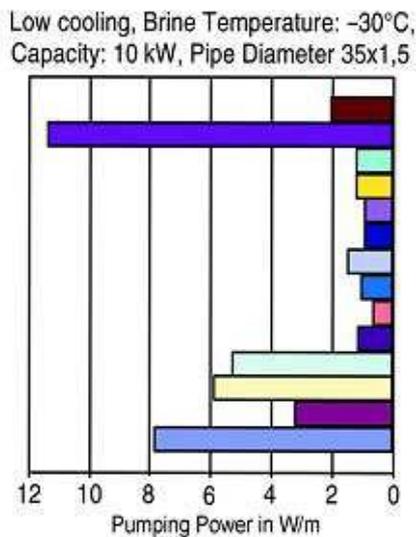


(c)

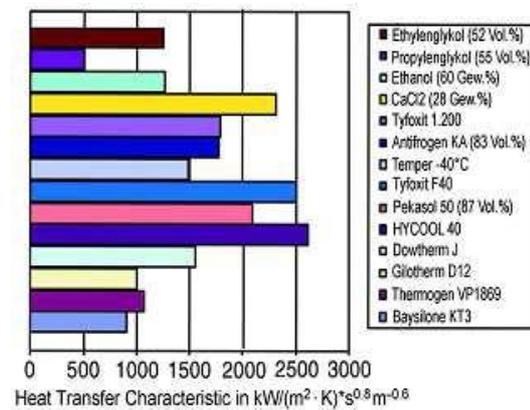
Figura 7.33. Propriedades das soluções aquosas de propileno glicol em função da temperatura (volume %).

Efeitos na potência de bombeamento e no coeficiente de transferência de calor

Na Fig. 7.34 são apresentados alguns dos refrigerantes secundários mais utilizados comercialmente e algumas informações sobre potência de bombeamento e de coeficientes de transferência de calor para cada um deles.



(a)



(b)

Figura 7.34. Potência de bombeamento e coeficientes de transferência de calor para alguns refrigerantes secundários utilizados comercialmente.

Inibição da corrosão

Quando puros, tanto o etileno glicol como o propileno glicol comerciais são menos corrosivos que a água. Em soluções aquosas, estes glicóis assumem a corrosividade da água com que foram preparados. Sem inibidores, os glicóis se oxidam formando ácidos e a quantidade depende da temperatura, grau de aeração e até da combinação dos metais da instalação onde estão operando.

Os inibidores de corrosão formam uma película superficial (geralmente os óxidos do próprio metal) que protege a maioria dos metais do ataque, incluindo nesta lista o aço, ferro fundido, cobre, latão e metais de solda. Uma exceção é o aço galvanizado, especialmente a temperaturas acima de 37 °C, pelo fato de que o zinco pode reagir com o inibidor, fazendo com que o material sólido se separe do fluido e também o alumínio, para temperaturas acima de 120 °C.