

2.2 FLUIDO REFRIGERANTE R-717

2.2.1 Propriedades

A ASHRAE, conforme a norma 34, classifica os fluidos refrigerantes inorgânicos, somando ao número 700, a massa molecular do composto, antecedendo o mesmo da letra R, de *refrigerant*. Para amônia, cuja fórmula molecular é NH_3 , o nitrogênio (N) possui massa molecular $M=14$ g/mol e o hidrogênio (H), massa molecular $M=1$ g/mol, de modo que: $700+14+3.1=R-717$ [2].

O R-717 anidro é o líquido obtido do gás amônia puro (99,95%), tecnicamente sem umidade e não é corrosivo, porém na presença de água, forma o hidróxido de amônia (NH_4OH), líquido nas CNTP, que possui as mesmas propriedades químicas da soda cáustica, atacando o cobre, zinco, prata e suas ligas, causando corrosão. É compatível com alumínio, aço carbono, aço inox e ferro-fundido. Em algumas ligas de aço pode haver trincas de corrosão por stress caso o R-717 seja totalmente anidro. A presença de 0,2% de água pode evitar esta corrosão. [6, 14].

Com os elastômeros que são utilizados como juntas de vedação e assentos de válvulas, o R-717 possui vários graus de compatibilidade. A tabela 2.1 apresenta a compatibilidade e limitações do R-717 com alguns elastômeros [3].

Tabela 2.1 – Compatibilidade do R-717 com elastômeros.

| Material | Compatibilidade |
|--------------------|---|
| Borracha Natural | Não recomendável |
| Neoprene | Aceitável. Faixa de temperaturas de operação : 233 K a 353 K |
| Borracha Nitrílica | Não recomendável |
| Etileno-Propileno | Aceitável. Faixa de temperaturas de operação : 233 K a 423 K |
| Poliuretano | Não recomendável |
| Borracha Butílica | Aceitável. Faixa de temperaturas de operação : 243 K a 423 K |
| Silicone | Não recomendável a baixas temperaturas |
| Teflon | Altamente compatível e recomendável para o assento das válvulas em toda faixa de operação do teflon |
| Viton | Não recomendável |

O R-717 é solúvel em álcool, éter e vários outros solventes orgânicos, apresentando uma solubilidade muito grande com a água, sendo esta capaz de absorver até 900 vezes o seu

volume em vapores do R-717 , porém o fluido refrigerante não é miscível com óleo lubrificante, mineral e sintético, com exceção aos poli alquilenos glicólicos, os quais, por sua vez, são bastante higroscópicos [3].

O R-717 é um dos mais eficientes fluidos refrigerantes, dentro de suas características de aplicação, possuindo uma grande capacidade de efeito frigorífico, visto seu elevado calor de vaporização, muito embora os vapores deste fluido possuam um grande volume específico [15].

Outra vantagem do R-717 em relação aos fluidos adotados atualmente, é seu grande apelo ecológico, visto que sua formulação química não provoca reações, quando liberada na atmosfera, que possam agredir o meio ambiente, sem contribuição direta para a destruição da camada de ozônio ou o aquecimento do globo terrestre (efeito estufa) [23].

A tabela 2.2 lista as principais propriedades físicas e termodinâmicas do fluido refrigerante R-717 [8].

Tabela 2.2 - Principais propriedades do R-717.

| Propriedade | | Valor | |
|---|------------------------|----------------------|----------------------|
| Massa molecular (g/mol) | | 17,03 | |
| Constante geral dos gases (J/kg.K) | | 49,8 | |
| Calor específico à pressão constante (J/kg.K) | | 7,978 | |
| Calor específico à volume constante (J/kg.K) | | 6,081 | |
| Coeficiente isentrópico | | 1,312 | |
| Pressão crítica (kPa) | | 11.297,2608 | |
| Temperatura crítica (K) | | 405,55 | |
| Viscosidade (Pa.s) | Temperatura (K) | Líquido | Vapor |
| | 253,15 | $2,36 \cdot 10^{-4}$ | $9,7 \cdot 10^{-6}$ |
| | 273,15 | $1,90 \cdot 10^{-4}$ | $10,4 \cdot 10^{-6}$ |
| | 293,15 | $1,52 \cdot 10^{-4}$ | $11,2 \cdot 10^{-6}$ |
| | 313,15 | $1,22 \cdot 10^{-4}$ | $12,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Condutibilidade (W/m.K) | 333,15 | $0,98 \cdot 10^{-4}$ | $12,9 \cdot 10^{-6}$ |
| | 253,15 | 0,585 | 0,0204 |
| | 273,15 | 0,540 | 0,0218 |
| | 293,15 | 0,493 | 0,0267 |
| | 313,15 | 0,447 | 0,0318 |
| | 333,15 | 0,400 | 0,0381 |

2.2.2 Aplicação Industrial

Na comparação energética dos sistemas de refrigeração com R-717 para aplicações industriais, descartando-se aquelas especiais, que usam o calor rejeitado, oriundo dos mais diferentes tipos de processos, para rebaixamento de temperatura, os ciclos de refrigeração mecânica por compressão de vapor, são os energeticamente mais eficientes [11].

Geralmente, a carga térmica e o número de horas operacionais dos sistemas de refrigeração para aplicação industrial, especialmente no setor de processamento de alimentos, são bastante altas, exigindo fluidos refrigerantes com características de grande capacidade de absorção de calor pela massa de fluido circulante no sistema, na unidade de tempo, operando em baixíssimas temperaturas [11].

Considerando-se que nas instalações de refrigeração normalmente utilizadas na indústria, a quantidade de R-717 nos sistemas poderá chegar a mais de 100.000 kg, torna-se difícil calcular a quantidade de fluido refrigerante total existente nos sistemas [14].

Algumas das características termodinâmicas e físico-químicas dos fluidos refrigerantes são fatores determinantes para escolha de sua adequada aplicação aos mais diferentes tipos de instalações. Fatores como as pressões de trabalho, o efeito frigorífico teórico, a vazão em volume por unidade de capacidade de refrigeração, o coeficiente de performance e a temperatura de descarga, orientam esta avaliação [21].

A tabela 2.3 reúne as principais características termodinâmicas do fluido refrigerante R-717, operando em um ciclo de compressão de vapor padrão, ou seja, em sua configuração básica, com a temperatura de vaporização de 257,15 K e uma temperatura de condensação de 303,15 K [21].

Tabela 2.3 – Características termodinâmicas do R-717

| | |
|--|--------|
| Pressão de vaporização (kPa) | 236,5 |
| Pressão de condensação (kPa) | 1166,6 |
| Relação de compressão | 4,93 |
| Efeito frigorífico teórico (kJ/kg) | 1103,4 |
| Vazão de vapor na sucção por kW de refrigeração (10^{-3} m ³ /s) | 0,462 |
| Coeficiente de performance | 4,76 |
| Temperatura de descarga (K) | 372,15 |

Uma importante propriedade para os fluidos refrigerantes é de que as pressões do regime de trabalho devam ser baixas o suficiente a fim de permitirem vasos e tubulações de constituição estrutural leves. Para instalações operando com R-717, as pressões de alta, podem atingir níveis elevados, entre 980665 Pa e 1470998 Pa. Por outro lado, pressões inferiores a atmosférica, que possam ser geradas no lado de baixa, tem a desvantagem de arrastar ar úmido para o interior do sistema, na ocorrência de vazamentos [21].

Os problemas causados pela penetração de incondensáveis e água na instalação, para os sistemas que adotam R-717 como fluido refrigerante, operando em pressões inferiores a atmosférica, podem ser satisfatoriamente evitados com a instalação de purgadores, para eliminar qualquer infiltração de ar e regeneradores, para extração da água.

A temperatura de vaporização para o R-717, operando no limite da pressão atmosférica (anexo A) é de 239,75 K.

Embora a baixa relação de compressão seja desejável, não só pelo aumento do rendimento do ciclo, como também pela redução dos seus nocivos efeitos sobre o sistema, para instalações de refrigeração operando com R-717 em temperaturas de ebulição muito baixas, atinge-se altos valores para esta relação, onde a diminuição destes índices é alcançada às custas da compressão múltipla (seção 2.1.1).

A princípio, o efeito frigorífico teórico, seria suficiente para indicar a performance do fluido refrigerante adotado no ciclo, porém esta propriedade precisa ser considerada em combinação com o trabalho de compressão. Especificamente, no caso do R-717, que possui um efeito frigorífico teórico muito maior que os outros fluidos refrigerantes, necessita de um trabalho de compressão também alto. Seu coeficiente isentrópico ($k=1,312$) possui um maior valor em relação aos demais fluidos, porém, associando-se ambos fatores, o seu COP é da mesma ordem de magnitude que o de outros fluidos refrigerantes comparados [21].

Sobre o mesmo aspecto, conforme a figura 2.20, o superaquecimento 1-1', embora necessário para evitar a aspiração de vapor saturado pelo compressor, aumenta a área correspondente ao trabalho mecânico de compressão crescendo de 1-1'-2'-2, de tal forma que o COP depende do fluido refrigerante adotado, podendo tanto aumentar como diminuir (equação 2.20), de modo que, para os fluidos refrigerantes que apresentam uma curva de saturação do vapor próxima de uma isentrópica, a par do calor específico elevado, como no caso dos hidrocarbonetos halogenados, o superaquecimento é favorável, enquanto que, para fluidos orgânicos como o R-717, não é aconselhável (grande área 1-1'-2'-2'') [8].

de bombeamento do compressor, tornando possível, inclusive, o uso de compressores de menor porte [15, 21].

Uma outra consequência direta de altos valores para o superaquecimento e aumento da relação de compressão é a desvantajosa elevação da temperatura final da compressão, principalmente para o R-717, podendo provocar desde a diminuição da viscosidade do óleo, até sua decomposição [2, 8].

A alta temperatura de descarga pode ser um problema, principalmente em compressores recíprocos, a qual chega a ser um limitante nas condições de operação. A maioria dos compressores trabalha com temperaturas de até no máximo 423 K, acima da qual o sistema de resfriamento das tampas e do óleo (normalmente resfriado a água) se torna dificultoso, além disso, o arraste do lubrificante se torna excessivo [6].

O R-717 não é miscível com os óleos lubrificantes mais comumente empregados nos sistemas de refrigeração, como MO (Mineral Oil), AB (Alquil Benzeno) e POE, com exceção dos compostos sintéticos de maior polaridade, tipo os PAG [2, 8].

Para evitar que o óleo expelido junto com o fluido, no final da compressão, deposite-se no lado de baixa do sistema operando com R-717, é instalado um separador de óleo na linha de descarga do compressor, que continuamente coleta o lubrificante, promovendo seu retorno ao cárter [21].

Em condições de normais de operação, com temperaturas de descarga entre 373 K e 393 K, o calor disponível no dessuperaquecimento do R-717 é mais “rico”, com excelente aproveitamento para sistemas com recuperação de calor. No pré-aquecimento de água para caldeira por exemplo, na temperatura de 333 K, a capacidade de aquecimento é cerca de 15% a 25% maior do que para os halogenados [6].

Devido ser uma característica dos sistemas de refrigeração industrial a adoção de trocadores de calor inundados, com melhor aproveitamento da área de troca, onde o compressor aspira os vapores do separador de líquido localizado próximo, o problema do superaquecimento elevado é facilmente contornado [15].

O fluido refrigerante R-717 é particularmente favorecido, quando analisados os aspectos energéticos e econômicos das instalações de maior porte, como as industriais, devido as características de seu comportamento no sistema, cumprindo seu propósito de refrigeração, com vantagens em relação à outros fluidos refrigerantes, neste tipo de aplicação [11].

Um fator importante para comparação da performance do desempenho do sistema de refrigeração é o grau de exigência da energia específica para o trabalho de compressão do fluido refrigerante (figura 2.21), onde o R-717 apresenta um dos maiores valores [11].

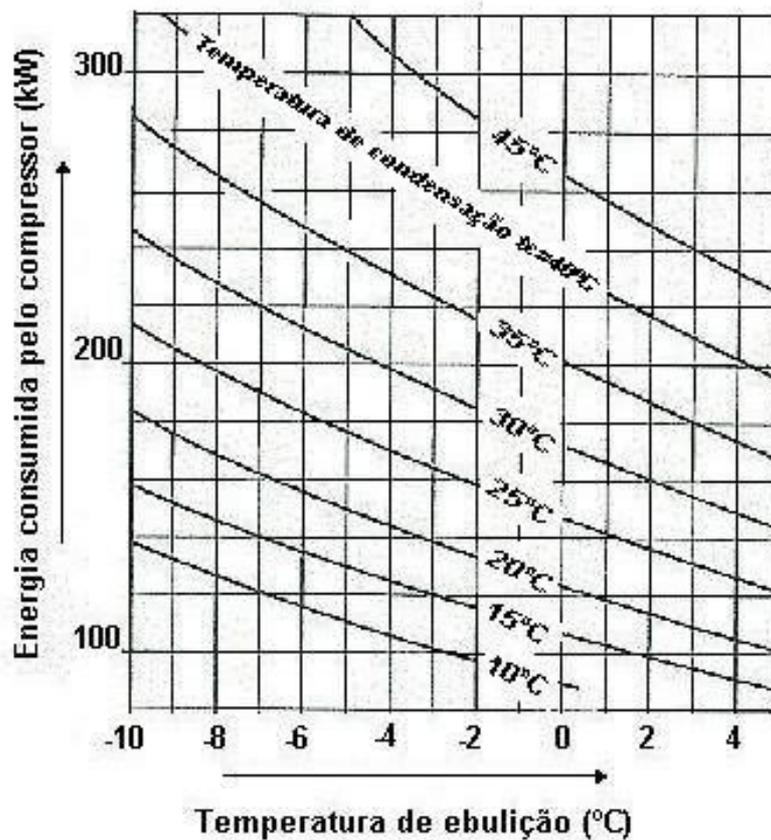


Figura 2.21 – Energia específica para compressão do R-717

As curvas da figura 2.21 representam claramente a enorme influência que as decrescentes temperaturas de ebulição exercem sobre o consumo de energia, como também as crescentes temperaturas de condensação. Desta feita, as mesmas devem ser evitadas, sob o aspecto da economia de energia [11].

Deve ser considerado, que a carga de fluido refrigerante em um sistema com R-717 fica entre 30% e 50% da carga de um sistema com halogenado, sendo que as tubulações para os sistemas de R-717 são de menor diâmetro, gerando menores perdas de carga ao longo dos dutos, o que significa melhor performance do ciclo e menor risco de *flash-gas* nas linhas de líquido. Destaca-se também, os melhores valores do coeficiente de película nos trocadores de calor, alcançados pelo R-717, conforme tabela 2.4 [6].

Tabela 2.4 – Coeficiente de película do R-717 para diferentes tipos de trocadores

| Tipo de fluxo | Coeficiente de película [W/m².K] |
|--------------------------------------|--|
| Condensação no casco | 7500-11000 |
| Condensação nos tubos | 4200-8500 |
| Condensação em placas | 15000-26000 |
| Evaporador inundado tubular | 2300-8000 |
| Evaporador seco tubular | 3100-5000 |
| Evaporador inundado de placas | 12000-22000 |

Uma desvantagem para sistemas operando com R-717 e compressores recíprocos, são as rotações máximas, mais altas, normalmente 1500 rotações por minuto contra 1200 rotações por minuto, para os halogenados [6].

Sistemas operando com compressores parafuso e *economizer* apresentam um COP superior para o R-717, em relação aos halogenados [6].

O R-717 atende à quase totalidade dos requisitos abordados no mérito da aplicação industrial, no que diz respeito ao rendimento do ciclo e construção, com ressalvas quanto a segurança, pela sua alta toxicidade e pela possibilidade de tornar-se explosivo, porém de grande disponibilidade e baixo custo. Apresentando ainda, a vantagem adicional de ser um fluido refrigerante ecologicamente correto, não agredindo a camada de ozônio ou agravando diretamente o efeito estufa.

Certamente, a destruição da camada de ozônio e o aquecimento do globo, aliados à questão energética, são os problemas mais influentes sobre o desenvolvimento tecnológico da refrigeração nas últimas décadas.

Quanto ao aquecimento do globo, considerando-se que a radiação solar atinge a atmosfera através de ondas eletromagnéticas, estas são basicamente transformadas em calor na sua incidência sobre os diferentes corpos, passando a ser emanadas da superfície terrestre com comprimentos de onda infravermelho, juntamente com o calor gerado pela atividade humana. O CO₂, liberado para a atmosfera é opaco a estes comprimentos de onda, gerando um “escudo” que bloqueia a emissão da radiação para fora da mesma e reflete parte destas ondas, provocando o efeito de aumento da temperatura média terrestre.

Para possibilitar as comparações quantitativas relacionadas ao efeito potencial das diferentes substâncias sobre a depleção do ozônio e contribuição de aquecimento do globo terrestre, foram criados fatores de medição, o ODP (Ozone Depletion Potential), tomando

como padrão o R-11, com uma capacidade destrutiva do ozônio de 100% e o GWP (Global Warming Potential), cujo padrão é o dióxido de carbono (R-744), para um ciclo de vida de 100 anos dos halogenados. Para estes dois fatores, o R-717 apresenta índice zero.

O GWP não consiste no único indicador que reflete o impacto sobre o aquecimento global relacionado ao fluido refrigerante em um circuito frigorífico, existe um outro indicador, o TEWI (Total Environment Warming Impact), que incorpora o GWP. Um fator indireto que inclui a emissão de dióxido de carbono para produzir a energia necessária, consumida pelo sistema elétrico da instalação de refrigeração.

Os fatores de cálculo desenvolvido para elaboração do TEWI, consistem basicamente nos potenciais diretos e indiretos de aquecimento global, com uma identificação detalhada de cada um dos elementos que compõe estes fatores e sua participação proporcional.

Quanto ao potencial direto, em relação a perda de fluido para a atmosfera, são considerados o tipo de fluido adotado, seu fator GWP, taxa de vazamento do sistema e o tempo em que a instalação está em atividade. Associam-se a estes valores a massa de fluido e a reposição de fluido refrigerante para complementação da carga.

No que diz respeito ao potencial indireto, considera-se a emissão de dióxido de carbono por kwh de consumo de energia elétrica durante o tempo de atividade da instalação.

Esta metodologia de cálculo pode ser mais claramente analisada no organograma da figura 2.22.

| | | |
|--|--------------------------|--|
| $TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m [1 - \alpha_{\text{reposição}}]) + (n \times E_{\text{anual}} \times \beta)$ | | |
| ← Vazamento → | ← Reposição das perdas → | ← Consumo de energia → |
| ← Potencial direto de aquecimento global → | | ← Potencial indireto de aquecimento global → |
| GWP | = | Potencial de aquecimento global |
| L | = | Taxa de vazamento por ano [kg] |
| n | = | Tempo de operação do sistema [anos] |
| m | = | Carga de refrigerante [kg] |
| $\alpha_{\text{reposição}}$ | = | Fator de reciclagem |
| E_{anual} | = | Consumo de energia por ano [kWh] |
| β | = | Emissão de CO ₂ por kWh |

Figura 2.22 – Organograma dos fatores que compõe o TEWI

Valores do TEWI serão tão mais significativos, quanto maior for a dependência de energia elétrica gerada através de fontes termelétricas. Instalações que são abastecidas basicamente com energia gerada nestas condições ou por uma composição com hidroelétricas possuem uma quantidade de dióxido de carbono emitido por kWh produzido. Neste caso, considerando-se percentuais de vazamentos muito pequenos nas instalações, o mecanismo dominante para a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, está no processo de combustão para a geração de energia para o compressor, ganhando importância fluidos que permitam uma melhor performance do sistema.

Considerando os aspectos ambientais globais, o R-717 não destrói a camada de ozônio, além de ter um tempo de vida curto na atmosfera (máximo 15 dias), também não contribui para o efeito estufa. Ainda, devido às suas excelentes propriedades termodinâmicas, o R-717 requer menos energia primária para produzir uma certa capacidade de refrigeração (alto valor do COP) do que quase todos os outros fluidos refrigerantes, de forma que o efeito indireto do aquecimento global, devido à utilização da energia a partir das usinas de carvão (principalmente na região Sul do país) também é um dos mais baixos disponíveis.