



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Departamento da Engenharia Mecatrônica
Engenharia Mecatrônica

Compensações em malha aberta

Luiza Gomes de Castro e Sá

Thiago José da Silva

Victor Alves Moraes

Divinópolis

Dezembro/2021

Resumo

Para viabilizar processos, processar e conservar produtos ou efetuar climatização para conforto térmico, usa-se a refrigeração. Sendo assim, o presente trabalho visa realizar a análise prática de um sistema de refrigeração atuando como um refrigerador e bomba de calor. Em suma o sistema é composto por um evaporador, um compressor, um condensador e uma válvula de expansão. Com isso, busca-se descrever todos os processos realizados em um ciclo de refrigeração a compressão de vapor. Posteriormente, espera-se estabelecer conceitos importantes sobre sistema de refrigeração comparativos entre os ciclos ideais e reais, definir o balanço de energia e o título na entrada do evaporador. Além disso, almeja-se determinar as trocas de calores, vazões mássicas e coeficiente de performance. Para tanto, vários conceitos foram apresentados e recorridos durante o processo de montagem do relatório. Inicialmente, o sistema de refrigeração foi estudado de forma mais geral e as propriedades termodinâmicas foram explanadas a fim de embasar a análise do sistema de compressão a vapor. Ademais, o ciclo ideal de refrigeração foi exposto em fases, para, depois, ser comparado com o ciclo real. E, ainda, o conceito de balanço de energia foi explicado e definiu-se o balanço para cada componente do sistema de refrigeração. Como resultado, obteve-se a pressão, temperatura e entalpia nos 8 pontos do sistema analisado, além do coeficiente de performance deste. Assim, ficou evidente que o sistema de refrigeração em questão pode atuar tanto como bomba de calor quanto como refrigerador. Ao final, concluiu-se que o presente trabalho proporcionou a integração dos conhecimentos obtidos em aulas teóricas com análise do sistema de refrigeração. Sua elaboração direcionou o grupo para realização de pesquisas, estudo de conceitos, análises e resolução de equações. Portanto pode-se afirmar que os objetivos propostos pelo trabalho foram alcançados com êxito.

Palavras-chaves: Sistema de refrigeração; Refrigerador; Bomba de calor; Compressão a vapor; Termodinâmica.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
2	Preliminares	2
2.1	Sistemas de Refrigeração	2
2.2	Propriedades Termodinâmicas	2
2.3	Ciclo Ideal de refrigeração	3
2.4	Balanço de energia	4
2.5	Comparação entre o ciclo ideal e o ciclo real	5
2.6	Exercícios propostos	7
3	Sistema de Compressão a Vapor	14
3.1	Descrição	14
3.2	Resultados e Discussão	15
3.2.1	Evaporador	17
3.2.2	Compressor	17
3.2.3	Condensador	18
3.2.4	Válvula de expansão	19
3.2.5	COP - Coeficiente de Performance	19
4	Conclusão	21
	Referências	22

1 Introdução

Os processos de refrigeração tem por objetivo resfriar determinado ambiente de forma que seja controlado. Esse controle de temperatura de um determinado local tem várias finalidades como viabilizar processos, processar e conservar produtos como por exemplo as geladeiras fazem e também climatizar um determinado local para um conforto térmico, função delegada aos ar condicionados por exemplo.

A forma de resfriar um ambiente é retirando a energia térmica desse local. Isso pode ser feito por ciclos termodinâmicos, onde o calor é retirado do local a ser resfriado e enviado ao ambiente externo.

Entre os ciclos de refrigeração, os principais são o ciclo de refrigeração padrão por compressão, o ciclo de refrigeração por absorção e o ciclo de refrigeração por magnetismo. Esse relatório apresentará e demonstrará os pontos e cálculos necessário para descrever o ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

Na primeira Seção 1 será apresentados os objetivos desse relatório, na Seção 2 os conceitos preliminares necessários para descrever o ciclo. Na Seção 3 será descrito o ciclo além de apresentar os resultados dos cálculos e na Seção 4 as conclusões e considerações finais.

1.1 Objetivos

São objetivos desse experimento descrever todos os processos realizados em um ciclo de refrigeração a compressão de vapor. Posteriormente, por objetivos específicos, espera-se estabelecer conceitos importantes sobre os sistemas de refrigeração, comparativos entre os ciclos ideais e reais, definir o balanço de energia e o título na entrada do evaporador. Além de determinar as trocas de calores, vazões mássicas e coeficientes de performance.

2 Preliminares

2.1 Sistemas de Refrigeração

O nome dado ao processo de remoção do calor de um meio é refrigeração. Por meio desse processo é possível reduzir a temperatura de um sistema mantendo essa condição por meios mecânicos ou naturais. Os refrigeradores comuns utilizam o conceito do ciclo de compressão mecânica de vapor, tal conceito que baseia-se na mudança de estado físico do fluido refrigerante (líquido e gasoso), que a baixas pressões evaporam e a altas pressões se condensam.

O processo de refrigeração começa no compressor onde há a compressão do fluido refrigerante que vem do evaporador em estado gasoso. A saída desse processo é um fluido com pressão e temperatura aumentadas. Ao entrar no condensador, uma parte do calor é dissipada para o ambiente, reduzindo assim a temperatura e consequentemente passa do estado gasoso para líquido. Após isso, o fluido passa por um tubo capilar para diminuir a pressão e por fim, vai ao evaporador e absorve calor até retornar ao compressor e reiniciar o ciclo de refrigeração.

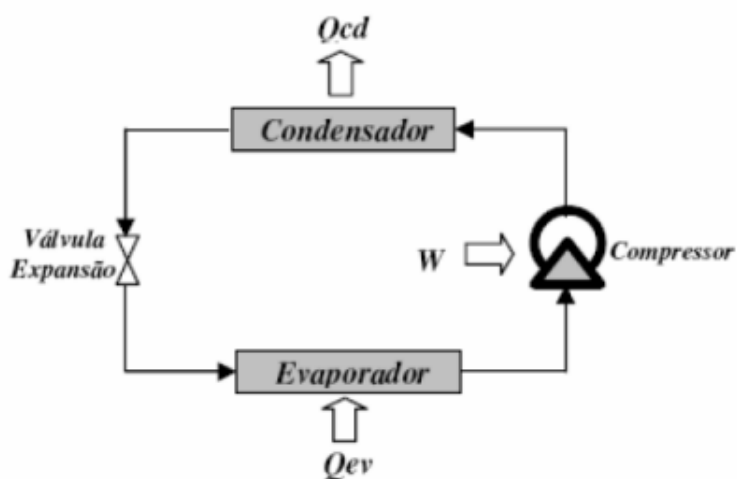


Figura 1 – Sistema de refrigeração

2.2 Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas são responsáveis de descrever o estado de uma substância de forma completa. As propriedades mais conhecidas e mais importantes são a temperatura(T),

a massa específica(ρ), pressão(P) e volume(V). Porém existem outras propriedades de bastante importância na análise nos processos de transferência de calor e no cálculo de trabalho e energia, elas são:

- Energia interna(μ): é a soma das energias cinética e potencial relacionadas ao movimento dos átomos e moléculas constituintes de um corpo. A energia interna também é diretamente proporcional à temperatura do corpo. Trata-se de uma grandeza escalar medida em Joules e determinada em função de variáveis como pressão, volume e temperatura. Quanto maior for a temperatura de um corpo, maior será a sua energia interna, portanto, maior será a sua capacidade de realizar algum trabalho.
- Entalpia(h): é a quantidade de energia presente em um determinado sistema e pode ser absorvida ou liberada. Pode ser separado em dois tipos de processo, o exotérmico e o endotérmico. Pode ser descrita por:

$$h = \mu + PV \quad (2.1)$$

- Entropia(s): é uma grandeza termodinâmica associada à irreversibilidade dos estados de um sistema físico. É bem comum associá-la a aleatoriedade de um sistema.

2.3 Ciclo Ideal de refrigeração

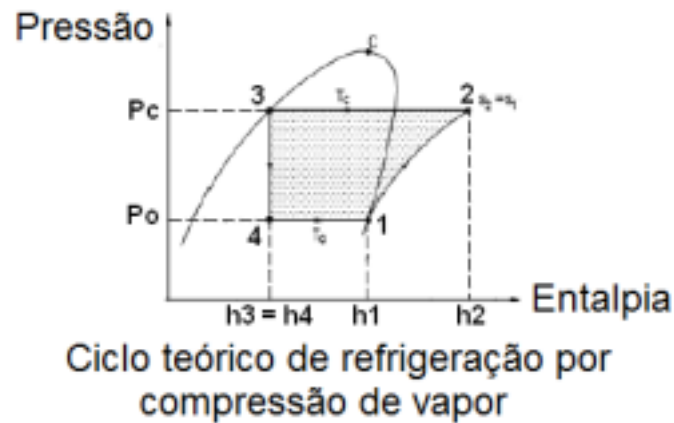


Figura 2 – Representação gráfica do ciclo ideal de refrigeração por compressão

A figura 2 representa o ciclo ideal de refrigeração por compressão a vapor. O processo é composto por 4 componentes: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. O ciclo ocorre em 4 fases, descritas abaixo:

- Processo 1 \rightarrow 2: Compressão isentrópica do fluido refrigerante - ocorre no compressor de pistão. O vapor é succionado pelo compressor, que aumenta sua pressão e temperatura.
- Processo 2 \rightarrow 3: Transferência de calor a pressão constante para o condensador. O refrigerante segue diretamente ao condensador, onde o calor retirado do ambiente a ser refrigerado é rejeitado para as vizinhanças, causando sua mudança de estado de vapor para líquido.
- Processo 3 \rightarrow 4: Expansão isentálpica - ocorre na válvula de expansão. O líquido passa pelo dispositivo de expansão, sendo submetido a uma queda de pressão brusca e então passa a ter dois estados: líquido e gasoso. A temperatura cai ao valor da temperatura de evaporação do refrigerante.
- Processo 4 \rightarrow 1: Transferência de calor a pressão constante para o evaporador. O refrigerante entra no evaporador e se vaporiza, absorvendo o calor do ambiente a ser refrigerado.

2.4 Balanço de energia

Energia é a capacidade de um sistema de realizar trabalho ou gerar calor, e ela pode ser transferida em um sistema aberto ou fechado. Tais transferências podem ocorrer por: calor (variação de temperatura) ou como trabalho (força), sendo que condução é o método de transferência do calor. Em sistemas fechados, o trabalho pode resultar no deslocamento do sistema em busca da estabilidade, causando uma alteração no volume interno. Nos sistemas abertos, o trabalho realiza-se sobre a vizinhança para fazer a massa sair – ou sobre o sistema, para fazer a massa entrar.

Em processos químicos há duas formas de transferência de energia entre o sistema e suas vizinhanças. A primeira está relacionada com a forma de energia que o sistema apresenta (energias cinéticas, potencias e internas). A segunda forma envolve as energias transferidas do sistema para as vizinhanças, e vice-versa, enquanto dura o processo (JUNIOR; CRUZ, 2013).

O balanço de energia baseia-se na 1^a lei da Termodinâmica, tal lei compreende que a energia total transferida para um sistema é a variação de suas energias internas. Ou seja, a energia total do universo é constante, o que varia são suas energias internas.

$$\boxed{\text{Taxa de energia acumulada}} = \boxed{\text{Taxa de energia entrada}} - \boxed{\text{Taxa de energia saída}} + \boxed{\text{Taxa de energia gerada}} - \boxed{\text{Taxa de energia gasta pelo trabalho realizado}}$$

Figura 3 – Balanço de Energia

A partir da definição de balanço de energia, é possível, baseando na figura 2, definir o balanço para cada componente do sistema de refrigeração. Sendo assim:

1. Evaporador: Nesse sistema, serão desconsideradas as energias cinéticas (E_k) e a energia potencial (E_Φ), visto que a energia interna do sistema é bem superior as duas, sendo assim, a única taxa de energia do sistema será a taxa de energia interna. Sendo assim, o balanceamento pode ser descrito da seguinte forma:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.2)$$

sendo \dot{Q}_H é a capacidade frigorífica, \dot{m} é a vazão mássica, h_1 e h_4 são as entalpias dos pontos 1 e 4, respectivamente.

2. Compressor: Definindo o processo de compressão como isentrópico, ou seja, adiabático reversível, e desprezando as energia potenciais e cinéticas, descreve-se o balanço de energia da seguinte maneira:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

sendo \dot{W}_{comp} é quantidade de calor transferida para o meio de resfriamento, \dot{m} é a vazão mássica, h_1 e h_2 são as entalpias dos pontos 1 e 2, respectivamente.

3. Condensador: o condensador é responsável por transferir calor do fluido para o meio de resfriamento do condensador. Desse modo, seu balanço de energia pode ser escrito desta forma:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2.4)$$

sendo \dot{Q}_H é quantidade de calor transferida para o meio de resfriamento, \dot{m} é a vazão mássica, h_2 e h_3 são as entalpias dos pontos 2 e 3, respectivamente.

4. Válvula de expansão: é um processo adiabático e isentálpico, sendo assim o balanço de energia é descrito deste modo:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2.5)$$

sendo \dot{Q}_H é quantidade de calor transferida para o meio de resfriamento, \dot{m} é a vazão mássica, h_2 e h_3 são as entalpias dos pontos 2 e 3, respectivamente.

2.5 Comparação entre o ciclo ideal e o ciclo real

Para desenvolver o comparativo entre os ciclos de refrigeração por compressão reais e ideias primeiramente deve-se definir um fluido. Para a escolha desse fluido analisa-se a

produção do frio(Q_e) ou a produção do calor(Q_s). Normalmente o fluido escolhido é um hidrocarboneto halogenado como por exemplo o R22. Porém para transpor o ciclo de Carnot é necessário conhecer as propriedades e o diagrama $T \times S$ do fluido. Segue a imagem de um diagrama $T \times S$ de um fluido:

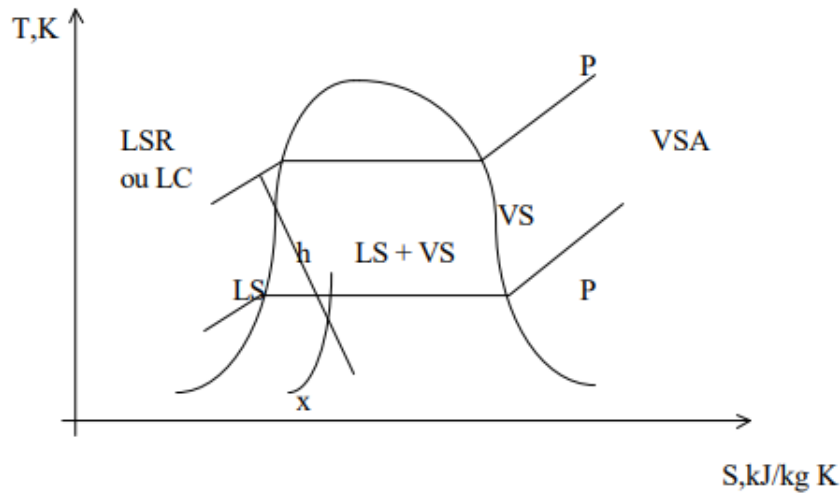


Figura 4 – Diagrama TS de um vapor

No ciclo de Carnot para o processo ideal os fluxos de calor ocorrem sem variação da temperatura do fluido. Isto só é possível com processos de calor latente, e para o refrigerante ser fluido nas duas extremidades do processo, deve ser evaporação ou condensação. Estes dois processos são isobáricos, se forem desconsideradas as perdas de carga devidas ao escoamento.

No ciclo real, estas trocas de fase exigem diferença de temperatura entre o fluido e o meio, frio ou quente, conforme a equação dos trocadores de calor:

$$Q = UA\Delta t \quad (2.6)$$

Este diferencial de temperatura não existe no ciclo de Carnot, pois a área dos trocadores teria que ser infinita, e torna o ciclo real irreversível. A obtenção das temperaturas baixa na absorção de calor e alta na dissipação de calor para um mesmo fluido é possível pela variação da pressão do fluido refrigerante. O processo de aumento de pressão ocorre num compressor.

Em sistemas reais, os meios frio e quente normalmente não têm temperatura constante, mas variáveis, ou em aquecimento ou esfriamento, normalmente em contra-corrente nos trocadores de calor, conforme pode ser visto na figura a seguir. Isto traz diferenciais de temperatura variáveis ao longo dos trocadores de calor.

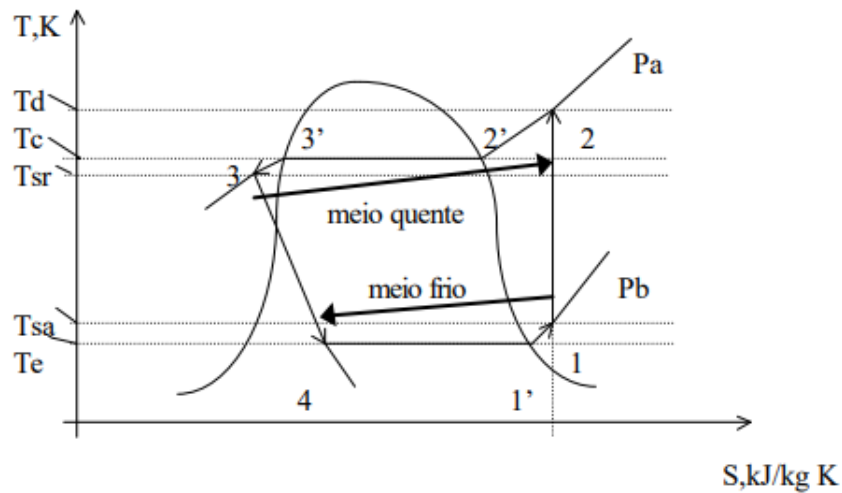


Figura 5 – Ciclo TS de refrigeração

2.6 Exercícios propostos

- Qual a diferença entre um refrigerador e uma bomba de calor?
 - O refrigerador e a bomba de calor possuem a mesma estrutura e componentes, o que diferencia é a finalidade de acordo com o coeficiente de performance (COP), enquanto uma bomba de calor deve inserir calor em um meio, o refrigerador deve removê-lo.
- Qual a diferença entre um refrigerador e um condicionador a ar?
 - A maior diferença entre um refrigerador e um ar condicionado é o consumo de potência, pois o refrigerador é projetado para diminuir a temperatura de uma substância e/ou de um pequeno espaço. Já o ar condicionado é projetado para resfriar grandes espaços.
- Bananas devem ser resfriadas de 24°C para 13°C a uma taxa de 215 kg/h por um determinado sistema de refrigeração. O consumo de potência no refrigerador é de 1,4 kW. Determine a taxa de resfriamento, em kJ/min, e o COP do refrigerador. O calor específico da banana acima do congelamento corresponde a 3,35 kJ/kg°C.
 - A taxa de resfriamento (\dot{Q}_{cold}) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{cold} = \dot{m}c\Delta T \quad (2.7)$$

em que \dot{m} é a taxa de resfriamento das bananas em relação à massa, c é o calor específico da banana e ΔT é a variação de temperatura.

Sabendo que o valor de \dot{m} é 3,582 kg/min e ΔT é 11°C. O valor da taxa de resfriamento é 132 kJ/min

O valor do coeficiente de performance (COP) do refrigerador pode ser calculado como sendo:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cold}}{W} \quad (2.8)$$

sendo W é a potência do refrigerador de 84 kJ/min

Conclui-se que o COP é 1,57.

4. Um refrigerador é usado para resfriar água de 23°C para 5°C de uma maneira contínua. O calor rejeitado no condensador é de 570 kJ/min, e a potência é 2,65 kW. Determine a taxa de resfriamento da água (em L/min) e o COP do refrigerador. O calor específico da água é 4,18 kJ/kg°C, e sua densidade é de 1kg/L

- A taxa de resfriamento da água ($\dot{m}_{\text{água}}$) em (L/min) é calculada como:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{\dot{Q}_{cold'agua}}{c\Delta T_{\text{água}}} \quad (2.9)$$

em que $\dot{Q}_{cold'agua}$ é a taxa de resfriamento da água.

O calor rejeitado pelo condensador de 570 kJ/min e ΔT é 18°C.

De acordo com os parâmetros citados e em relação a equação (2.9), a taxa de resfriamento da água é 5,46 L/min.

O COP, neste caso é calculado como:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cold'agua}}{W} \quad (2.10)$$

O valor do COP é 2,58.

6-56 Refrigerante-134a entra no condensador de uma bomba de calor residencial a 800 kPa e 35 °C a uma taxa de 0,018 kg/s e sai a 800 kPa como líquido saturado. Considerando que o compressor consome 1,2 kW de energia, determine (a) o COP da bomba de calor e (b) a taxa de remoção de calor do ar externo.

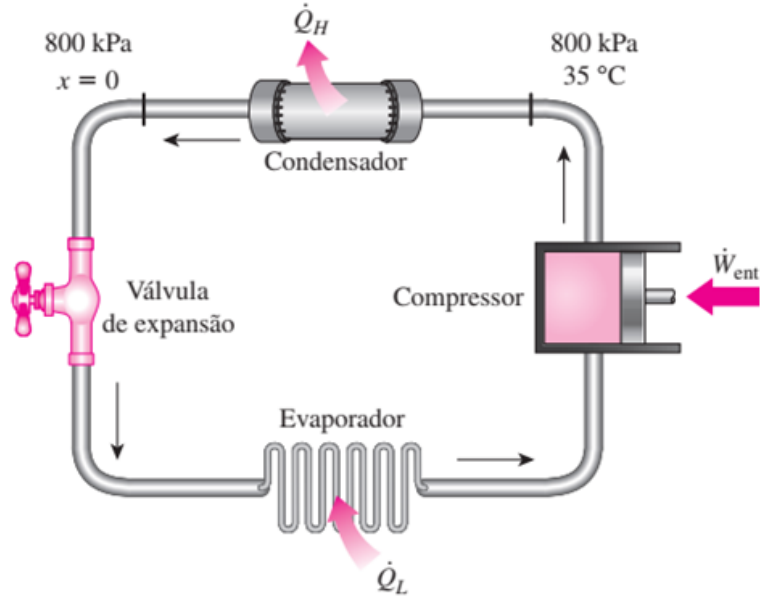


FIGURA P6-56

Figura 6 – figura do item 5

5. Ao considerar somente o condensador, tem-se a segunda lei da termodinâmica para volume de controle:

$$\dot{Q}_H - \dot{W} = \dot{m}[(h_3 - h_2) + \left[\frac{V_3^2 - V_2^2}{2} + g(z_3 - z_2) \right]] \quad (2.11)$$

Em que \dot{Q}_H é a taxa de calor inserida para o ar externo, \dot{m} é o fluxo de massa do refrigerante, \dot{W} é o fluxo de trabalho do condensador que é 0, h_3 e h_2 são as respectivas entalpias de saída e entrada determinadas por tabela, V_3 e V_2 são as velocidades de saída e entrada que se anulam e z_3 e z_2 são as alturas de saída e entrada que também se anulam.

Portanto, a equação 2.11 é adaptada para:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}[h_3 - h_2] \quad (2.12)$$

A taxa de trabalho do compressor (\dot{W}_{ent}) é determinado pela diferença entre as taxas de inserção e remoção de calor:

$$\dot{W}_{ent} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (2.13)$$

Sendo \dot{Q}_L a taxa de remoção de calor do ar externo.

A pressão de entrada do condensador é 800 kPa e a temperatura de 35°C, a temperatura de saturação do refrigerante 134a nesta pressão, por tabela, é de 31,31°C. Portanto, tem-se vapor superaquecido na entrada do condensador, com a entalpia, também tabelada de 271,24 kJ/kg.

A entalpia do refrigerante na saída do condensador, segundo as condições é de 95,48 kJ/kg.

Portanto, baseando-se na equação 2.12, conclui-se que a taxa de calor rejeitado para o ar externo (\dot{Q}_H) é (-)3,16 J/s

Com isso, é possível calcular o COP da bomba de calor deste sistema como sendo:

$$COP' = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{ent}} \quad (2.14)$$

Portanto o COP' é 2,63.

Também é possível calcular a taxa de remoção de calor do ar (\dot{Q}_L) externo, baseado na equação 2.13, que é 1,96 kW.

6. O refrigerante 134a entra nas serpentinas de um evaporador, localizadas na parte traseira do congelador de um refrigerador doméstico. O refrigerante está a 100 kPa com um título de 20% e sai a 100 kPa - 26°C. Considerando que o condensador consome 600 W de potência e o COP do refrigerador corresponde a 1,2, determine (a) o fluxo de massa do refrigerante e (b) a taxa de calor rejeitado para o ar da cozinha.

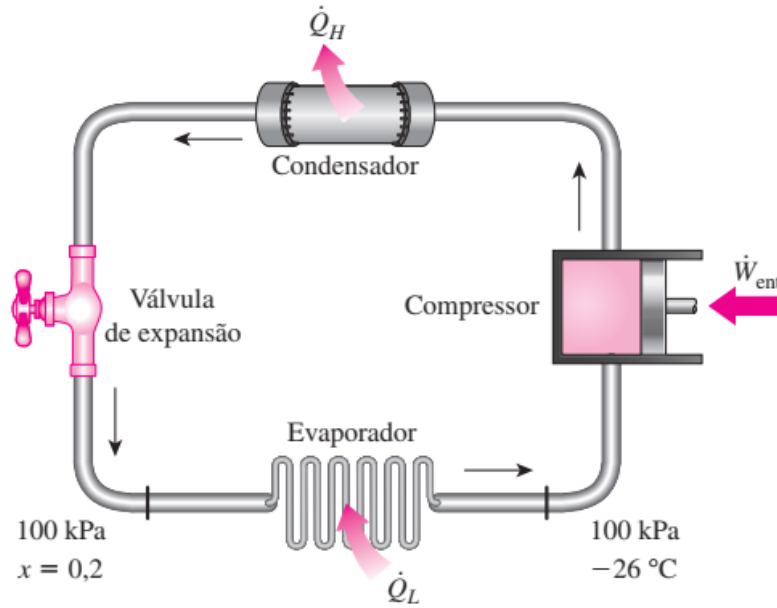


FIGURA P6-57

Figura 7 – figura do item 6

Ao analisar somente o evaporador, tem-se a segunda lei da termodinâmica para volume de controle:

$$\dot{Q}_L - \dot{W} = \dot{m}_{ref}[h_e - h_s] + \left(\frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (2.15)$$

Em que \dot{m}_{ref} é o fluxo de massa do refrigerante e h_e e h_s são as entalpias de entrada e saída.

Como o trabalho sobre o evaporador é nulo e as velocidades e alturas de entrada e saída são iguais, estes termos se anulam, adaptando a equação 2.15 para:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{ref}[h_e - h_s] \quad (2.16)$$

Na entrada do evaporador, o refrigerante se encontra um estado líquido com título de 20% e pressão a 100kPa, com isso a entalpia de entrada é 60713 J/kg.

Na saída do evaporador, o refrigerante mantém a pressão, mas com a temperatura de 26°C, em um estado de vapor saturado, diante disso, a entalpia de saída é 277255 J/kg.

Com a equação 2.16, encontra-se uma relação da taxa de remoção de calor do ar externo (Q_L) com o fluxo de massa do refrigerante. Daí, tem-se:

$$\dot{Q}_L = 216542\dot{m}_{ref} \quad (2.17)$$

Utilizando a relação do coeficiente de performance (COP):

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{W} \quad (2.18)$$

Com os dados e com referência nas equações 2.17 e 3.29, tem-se que o fluxo de massa do refrigerante é 0,0033 kg/s e com isso, a taxa de remoção do calor externo é 714,59 J/s.

Com a relação entre o trabalho do condensador e os fluxos de calor:

$$\dot{W}_{cond} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (2.19)$$

Baseando da equação 2.19, o calor rejeitado para o ar da cozinha é 1314,59 J/s.

7. As necessidades de água potável de uma instalação com 20 funcionários devem ser atendidas por um bebedouro. O bebedouro refrigerado deve resfriar a água de 22°C para 8°C e fornecer água gelada a uma taxa de 0,4 litro por pessoa. O calor transferido para o reservatório da vizinhança a 25°C, a uma taxa de 45W. Considerando que o sistema de refrigeração tem um COP de 2,9, determine o tamanho, em W, do compressor adequado ao sistema de refrigeração desse bebedouro.

6-145 As necessidades de água potável de uma instalação com 20 funcionários devem ser atendidas por um bebedouro. O bebedouro refrigerado deve resfriar a água de 22 °C para 8 °C e fornecer água gelada a uma taxa de 0,4 litro por hora por pessoa. Calor é transferido para o reservatório da vizinhança a 25 °C, a uma taxa de 45 W. Considerando que o sistema de refrigeração tem um COP de 2,9, determine o tamanho, em W, do compressor adequado ao sistema de refrigeração desse bebedouro.

Figura 8 – Figura do item 7

A taxa de transferência de calor \dot{Q} do refrigerador é a soma da taxa de calor rejeitado (\dot{Q}_H) com a taxa de remoção de calor do ar externo \dot{Q}_L :

$$\dot{Q}_{cold-total} = \dot{Q}_{cold} + \dot{Q}_{transferido} \quad (2.20)$$

Em que o valor de $\dot{Q}_{transferido}$ é 45W

Baseado na equação 2.7, a taxa de resfriamento é 130W.

De acordo com 2.20, a taxa de refrigeração é 175W.

Com isso, e baseado em 2.8, o tamanho adequado para o compressor ao sistema de refrigeração deste bebedouro é 60,3 W.

3 Sistema de Compressão a Vapor

3.1 Descrição

O sistema a ser analisado, consiste em um sistema de refrigeração operando como refrigerador e bomba de calor. Seus principais componentes são um evaporador, um compressor, um condensador e uma válvula de expansão. A sua representação pode ser verificada na imagem abaixo:

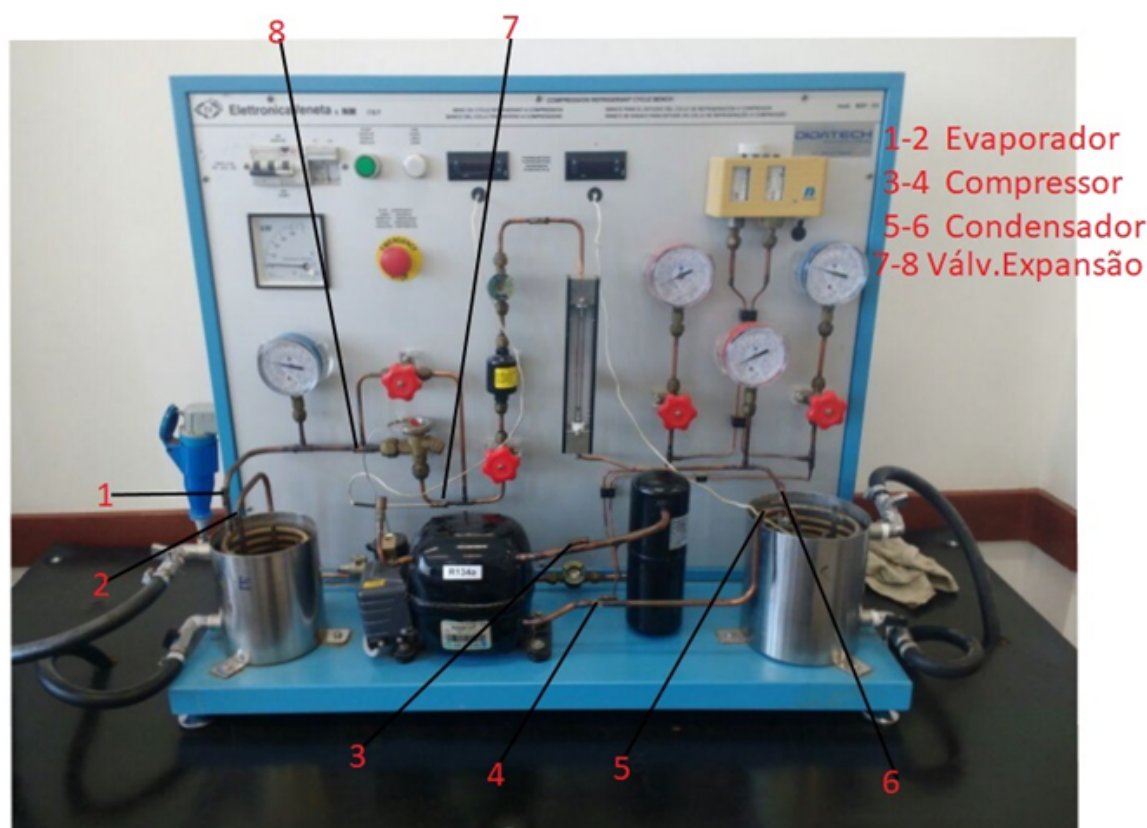


Figura 9 – Sistema de Refrigeração em análise

A legenda na imagem 9 simboliza as entradas e saídas do fluido refrigerante R-134a.

Ponto	$P(MPa)$	$T(^{\circ}C)$	$W_c(kW)$
1	0.19	0.2	0.24
2	0.16	20.4	0.24
3	0.18	25.4	0.24
4	0.8	60	0.24
5	0.8	61.5	0.24
6	0.8	35.1	0.24
7	0.83	34.7	0.24
8	0.19	0	0.24

Tabela 1 – Valores de medição para R-134

Local	Medida do Volume(L)	Tempo (s)
Evaporador	1	51
Condensador	1	108

Tabela 2 – Valores obtidos para água nos trocadores de calor

Local	Temperatura de entrada($^{\circ}C$)	Temperatura de saída($^{\circ}C$)
Evaporador	25.2	20.9
Condensador	25.2	30.2

Tabela 3 – Dados da água para processos de fluxo contínuo

A tabela 1 apresenta os valores de medição do fluido R-134a para o sistema da imagem 9. Na tabela 2 é dado os valores obtidos para a água nos trocadores de calor (evaporador e condensador), e na tabela 3 os dados da água para os processos de fluxo contínuo.

3.2 Resultados e Discussão

Partindo do sistema exposto na figura 9 calculou-se valores de vazão mássica \dot{m} dos componentes evaporador e condensador. Para tanto, utiliza-se a os dados da tabela 2, com os quais é possível determinar a vazão volumétrica, e consequentemente a vazão mássica.

A relação entre vazão mássica e vazão volumétrica é exposta na seguinte fórmula:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (3.1)$$

sendo \dot{m} a vazão mássica, ρ a densidade do líquido e \dot{V} a vazão volumétrica.

A vazão volumétrica pode ser obtida dividindo o volume pelo tempo:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) e (3.2), tem-se:

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{V}{t} \quad (3.3)$$

Considerando os dados da tabela 2, e $\rho_{\text{água}} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{evap}} &= 997 \cdot \frac{1}{51} \\ \dot{m}_{\text{evap}} &= 0.01955 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{cond}} &= 997 \cdot \frac{1}{108} \\ \dot{m}_{\text{cond}} &= 0.00923 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Para determinar os calores no evaporador e condensador, utiliza-se a fórmula de calor sensível:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (3.6)$$

em que \dot{Q} é o calor fornecido, \dot{m} é a vazão mássica, c_p é o calor específico a pressão constante, T_s é a temperatura de saída e T_e é a temperatura de entrada.

Considerando que $\dot{Q}_L = \dot{Q}_{\text{evap}}$, que o calor específico da água é $c_p = 4,18$, e utilizando o valor de vazão mássica encontrado na equação (3.4), é possível calcular o valor do calor fornecido do evaporador para o líquido através da equação (3.6):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_L &= 0.01955 \cdot 4.18 \cdot (20.9 - 25.2) \\ \dot{Q}_L &= -0.3514 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Considerando que $\dot{Q}_H = \dot{Q}_{\text{cond}}$, que o calor específico da água é $c_p = 4,18$, e utilizando o valor de vazão mássica encontrado na equação (3.5), é possível calcular o valor do calor fornecido do condensador para o líquido através da equação (3.6):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_H &= 0.00923 \cdot 4.18 \cdot (30.2 - 25.2) \\ \dot{Q}_H &= 0.1929 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Utilizou-se o Software CATT3, a fim de obter os dados solicitados para o fluido refrigerante R-134a, nos pontos 1 a 8 da figura 9. Sendo assim, será exposto somente o resultado final.

3.2.1 Evaporador

- Ponto 1: líquido + vapor

$$P_1 = \Delta P_1 + P_{atm} = 0.190 + 0.098 = 0.288 MPa \quad (3.9)$$

$$T_1 = 0.2^\circ C$$

$$x_1 = x_8 = 0.2474$$

A entalpia no ponto 1 é:

$$h_1 = 249,4 \frac{kJ}{kg} \quad (3.10)$$

- Ponto 2: vapor superaquecido

$$P_2 = \Delta P_2 + P_{atm} = 0.16 + 0.098 = 0.258 MPa \quad (3.11)$$

$$T_2 = 20.4^\circ C$$

A entalpia no ponto 2 é:

$$h_2 = 417,5 \frac{kJ}{kg} \quad (3.12)$$

- Balanço de energia: utilizando a equação (2.2) e manipulando-a a fim de determinar o vazão mássica do fluido R-134a no evaporador:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{\dot{Q}_L}{(h_2 - h_1)} \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{evap} = \frac{0.3514}{(417.5 - 249.4)}$$

$$\dot{m}_{evap} = 2.09 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

3.2.2 Compressor

- Ponto 3: vapor superaquecido

$$P_3 = \Delta P_3 + P_{atm} = 0.18 + 0.098 = 0.278 MPa \quad (3.14)$$

$$T_3 = 25.4^\circ C$$

A entalpia no ponto 3 é:

$$h_3 = 421.5 \frac{kJ}{kg} \quad (3.15)$$

- Ponto 4: vapor superaquecido

$$\begin{aligned} P_4 &= \Delta P_4 + P_{atm} = 0.8 + 0.098 = 0.898 MPa \\ T_4 &= 60^\circ C \end{aligned} \quad (3.16)$$

A entalpia no ponto 4 é:

$$h_4 = 443.4 \frac{kJ}{kg} \quad (3.17)$$

- Balanço de energia: utilizando a equação (2.3) a fim de determinar o trabalho do compressor:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{comp} &= m_{evap}(h_4 - h_3) \\ \dot{W}_{comp} &= 2.09 \cdot 10^{-3}(444.3 - 421.5) \\ \dot{W}_{comp} &= 0.0456 kW \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{comp} &= \dot{W}_{comp} - \dot{W}_e \\ \dot{Q}_{comp} &= 0.0456 - 0.24 \\ \dot{Q}_{comp} &= -0.1944 kW \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.2.3 Condensador

- Ponto 5: vapor superaquecido

$$\begin{aligned} P_5 &= \Delta P_5 + P_{atm} = 0.8 + 0.098 = 0.898 MPa \\ T_5 &= 61.5^\circ C \end{aligned} \quad (3.20)$$

A entalpia no ponto 5 é:

$$h_5 = 444.9 \frac{kJ}{kg} \quad (3.21)$$

- Ponto 6: líquido comprimido

$$\begin{aligned} P_6 &= \Delta P_6 + P_{atm} = 0.8 + 0.098 = 0.898 MPa \\ T_6 &= 35.1^\circ C \end{aligned} \quad (3.22)$$

A entalpia no ponto 6 é:

$$h_6 = 249.2 \frac{kJ}{kg} \quad (3.23)$$

- Balanço de energia: utilizando a equação (2.2) e manipulando-a a fim de determinar o vazão mássica do fluido R-134a no condensador:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{cond} &= \frac{\dot{Q}_H}{(h_5 - h_6)} \\ \dot{m}_{cond} &= \frac{0.1929}{(444,9 - 249,2)} \\ \dot{m}_{cond} &= 0.986 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.2.4 Válvula de expansão

- Ponto 7: líquido comprimido

$$\begin{aligned} P_7 &= \Delta P_7 + P_{atm} = 0.83 + 0.098 = 0.928 MPa \\ T_7 &= 34.7^\circ C \end{aligned} \quad (3.25)$$

A entalpia no ponto 7 é:

$$h_7 = 248,6 \frac{kJ}{kg} \quad (3.26)$$

- Ponto 8: líquido e vapor

$$\begin{aligned} P_8 &= \Delta P_8 + P_{atm} = 0.19 + 0.098 = 0.288 MPa \\ T_8 &= 0^\circ C \\ x_8 &\approx x_1 = 0.2474 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Na válvula de expansão, ocorre um processo isentálpico, sendo assim a entalpia no ponto 8 igual a entalpia no ponto 7 é:

$$h_8 = h_7 = 248,6 \frac{kJ}{kg} \quad (3.28)$$

3.2.5 COP - Coeficiente de Performance

Para determinar o coeficiente de Performance do refrigerado e da bomba de calor, utiliza-se as equações abaixo:

$$\beta = COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_C} \quad (3.29)$$

$$\beta' = COP_{BC} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_C} \quad (3.30)$$

em que β é o coeficiente de performance do refrigerador e β' é o coeficiente de performance da bomba de calor.

Substituindo os valores encontrados durante o desenvolvimento nas equações (3.29) e (3.30), tem-se que:

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_C} = \frac{0,3514}{0,24} = 1,46 \quad (3.31)$$

$$\beta' = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_C} = \frac{0,1929}{0,24} = 0,8 \quad (3.32)$$

4 Conclusão

Diante de todos os resultados apresentados, estes obtidos através de cálculos e análises sobre o sistema de refrigeração observamos que ele pode atuar tanto como bomba de calor quanto como refrigerador. Porém para isso é necessário primeiro que seja feito um comparativo de formato do ciclo de refrigeração por compressão em sua forma ideal com a atuação do ciclo no formato real.

Observamos que no ciclo real, há uma transferência de calor para o meio externo, além é claro, das diferenças nas pressões em cada etapa do ciclo devido as tubulações e processos. Por isso, houve a necessidade do cálculo das várias propriedades do fluído especificadamente em cada etapa do ciclo, quanto na entrada quanto na saída de cada processo para assim acompanhar o comportamento do mesmo, algo que se tratasse de um ciclo ideal não seria necessário.

Os valores encontrados para a vazão mássica no condensador e no evaporador foram diferentes, essas diferenças se dão aos erros de medidas dos valores das tabelas fornecidas. Foi analisado também o coeficiente de performance do sistema em suas duas aplicações, tanto como bomba de calor quanto com refrigerador, percebeu-se assim que o o coeficiente de performance do refrigerador é maior do que o coeficiente de performance da bomba de calor.

Referências

JUNIOR, A. B.; CRUZ, A. *Fundamentos de Balanços de Massa e Energia*. [S.l.]: Edufscar, 2013. Citado na página 4.