



Informações do documento

Documento nº: 01

Título: Resumo da teoria de refrigeração

Descrição: Conhecimento básico necessário para compreender e implementar um sistema de refrigeração.

Versão	Data	Autor	Descrição da alteração
1.0	14/03/08	Nuno Mesquita	Versão draft
1.1	15/07/09	Nuno Mesquita	Revisão

Conteúdos

1. Princípios térmicos	2
1.1. <i>Propriedades termodinâmicas</i>	2
1.2. <i>Conceitos básicos da termodinâmica</i>	2
1.2.1. Equilíbrio térmico, lei zero da termodinâmica, equilíbrio termodinâmico	2
1.2.2. Gás ideal, trabalho, 1ª Lei da termodinâmica e entalpia	3
1.2.3. Entropia e a 2ª Lei da termodinâmica.	5
1.2.4. Máquina térmica, máquina frigorífica e ciclo de Carnot.	6
2. Propriedades de refrigerantes, ciclo de refrigeração e sistema de refrigeração	8
2.1. <i>Diagrama de Mollier</i>	8
2.2. <i>Ciclo de refrigeração</i>	10
2.3. <i>Modelo energético simplificado de um sistema de refrigeração</i>	13



1. Princípios térmicos

1.1. Propriedades termodinâmicas

A ciência termodinâmica estabelece os conceitos que explicam os fenómenos físicos de transferência de energia térmica, identifica os elementos físicos, as propriedades e as respectivas leis que descrevem os fenómenos térmicos.

As principais grandezas e características a saber são:

A **temperatura** (T), é uma grandeza que indica o estado térmico da substância, que por sua vez caracteriza a capacidade que a substância tem para trocar energia com outra em que esteja em contacto.

A **pressão** (P), é uma força normal (perpendicular a uma superfície) exercida por um fluido por unidade de área, existe também a pressão absoluta quando a pressão da substância é medida juntamente com a pressão atmosférica.

A **densidade** (ρ), específica a massa que ocupa uma unidade de volume, **volume específico** v , é o que caracteriza o volume de uma unidade de massa da substância. A densidade e volume específico são recíprocos um relativamente ao outro.

O **calor específico** (c), é a quantidade de energia requerida para elevar a temperatura 1°C em cada grama de substância. Como a amplitude desta quantidade é influenciada pelo processo realizado, o método como o calor é adicionado ou retirado é também caracterizado pelo **calor específico a volume constante** (c_v) e **calor específico a pressão constante** (c_p).

A **entalpia** descreve a energia interna total de uma substância, que em determinados processos a sua variação será igual ao calor transferido nesse processo.

A **entropia** apesar de ser uma propriedade das mais fundamentais e amplamente utilizada na termodinâmica, em sistemas de refrigeração não tem grande relevo, mas está fundamentalmente associada a uma grandeza de desordem interna da substância.

Na grande maioria dos sistemas de aquecimento e refrigeração utilizam os **estados de fase** das substâncias no seu estado líquido ou gasoso para caracterizar o funcionamento dos sistemas

1.2. Conceitos básicos da termodinâmica

1.2.1. Equilíbrio térmico, lei zero da termodinâmica, equilíbrio termodinâmico

Empiricamente sabemos que dois corpos com a mesma massa, mas com temperaturas diferentes, T_1 e T_2 , quando entram em contacto, a temperatura dos corpos alteram-se, diminuindo no corpo mais quente e aumentando no corpo mais frio. O equilíbrio térmico é atingido quando a temperatura final dos corpos é uma temperatura intermédia entre duas temperaturas iniciais. Em termos matemáticos, estes resultados podem ser formular-se através da equação **Error! Reference source not found.**

$$\Delta T_{c1} = -\Delta T_{c2} \quad (1.1)$$

em que os índices c_1 e c_2 reaperentam os dois corpos distintos.



A **lei zero da termodinâmica** postula que dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si. Pode haver equilíbrio térmico sem haver equilíbrio termodinâmico, para haver **equilíbrio termodinâmico** tem que existir as seguintes condições:

- Equilíbrio mecânico (forças e movimento = 0)
- Equilíbrio químico
- Não haver troca de materiais

Quando são misturadas diferentes massas, a temperatura varia inversamente com as massas, ou seja, a menor massa varia mais de temperatura, de modo que os produtos $m\Delta T$ permanecem com a mesma quantidade.

$$m_{c1}\Delta T_{c1} = -m_{c2}\Delta T_{c2} \quad (1.2)$$

A energia térmica absorvida pelo corpo depende das características dos materiais que o compõe. Pode definir-se a energia em forma de calor necessária para variar a temperatura de um corpo através da equação (1.3)

$$Q = cm\Delta T \quad (1.3)$$

em que c é uma constante de proporcionalidade definida de calor específico.

Podemos então considerar que um corpo tem uma **capacidade calorífica** (C)

$$Q = C\Delta T \quad (1.4)$$

em que

$$C = cm$$

Como o calor específico varia com a temperatura para calcular Q é preciso ter em conta se $T_f - T_i$ é muito grande e se produz uma variação de calor específico significativo, então calcula-se

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} c(T) dT$$

Aproximando, sem perda considerável de generalidade, obtemos

$$Q = m\bar{c}(T_f - T_i)$$

onde \bar{c} é o calor específico médio entre as temperaturas T_i e T_f .

Mas a expressão (1.3), só é válida enquanto a substância não muda de fase, porque nessa situação $Q > 0$ e $\Delta T = 0$.

O calor necessário para esta transição de fase depende da quantidade de massa envolvida, e o parâmetro que define essa escala é chamado de **calor latente**.

$$Q = Lm \quad (1.5)$$

Em refrigeração, L é denominado de **calor de fusão**, L_f , ou de **calor de evaporação**, L_v .

1.2.2. Gás ideal, trabalho, 1ª Lei da termodinâmica e entalpia

Habitualmente, utilizam-se o conceito de **gás ideal** para representar diversos conceitos da termodinâmica. Um gás ideal é um gás hipotético em que as condições de separação entre moléculas são muito maior do que as dimensões das mesmas, inexistência de interacção entre as moléculas (excepto durante colisões), bem como a ausência de choques elásticos entre moléculas e entre estas e as paredes do recipiente. Admite-se que as moléculas movem-se aleatoriamente, com a mesma probabilidade em qualquer direcção. As suas características macroscópicas, tal como, o volume, a pressão e a temperatura obedecem à equação de estado dos gases ideais



$$PV = nRT \quad (1.6)$$

em que **n** representa o número de moles da substância e **R** é a constante universal dos gases.

Sabe-se que um gás real tem um comportamento próximo de um gás ideal quanto menor for a pressão a que está sujeito e quanto mais afastado se encontrar da sua temperatura do seu ponto de liquefacção.

A equação de estado de um gás ideal pode ser obtida combinando as leis de **Boyle** e de **Charles**.

Lei de Boyle-“O volume de uma dada quantidade de gás, a temperatura constante, varia inversamente com a pressão.”[1]

$$V = \frac{const.}{P} \quad (1.7)$$

Lei de Charles-“A pressão constante, o volume de um gás é directamente proporcional à temperatura absoluta.” [1].

$$\frac{V(T)}{V(T_0)} = \frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (0.8)$$

A equação de estado do gás ideal só é aplicada num **processo reversível**, processo onde a equação é verificada em cada um dos pontos (que estão bem definidos) por onde passa o estado do sistema no processo. Para realizar processos reversíveis existem duas condições a verificar:

- o processo realiza-se muito lentamente
- o atrito é desprezável.

Num **processo irreversível** pode ter os mesmos pontos limites que o processo reversível, embora tenha alguns estados intermédios que não tenham valores bem definidos da pressão ou da temperatura, e a equação de estado não se verifique.

O trabalho é definido pela equação(1.9) e determina a energia transformada, o qual corresponde a energia transferida na variação de volume de um gás.

$$W = \int_{V_A}^{V_B} p(V, T) dV \quad (1.9)$$

Se não houver forças de atrito, todo o trabalho é realizado sobre a vizinhança, então é um processo reversível em que é possível encontrar uma expressão simples para o trabalho realizado em função das variáveis de estado gás (P, V).

O trabalho realizado num processo reversível é dado pela área sob a curva de um diagrama PV, o trabalho realizado dependerá do caminho e do seu sentido que é escolhido.

O sistema realiza trabalho sobre o exterior quando $dV > 0 \Rightarrow W > 0$.

O exterior realiza trabalho sobre o sistema quando $dV < 0 \Rightarrow W < 0$.

O **trabalho dissipativo** é principalmente caracterizado pelo facto de ser irreversível, ou seja, não é possível encontrar uma expressão para o trabalho dissipativo em função das variáveis de estado do sistema.

O **trabalho realizado numa transformação cíclica**, é o trabalho realizado pelo sistema num processo que tem um percurso em que o sistema retorna ao seu estado inicial, que corresponde à área limitada por uma curva fechada.



$W > 0$ nos sentido horário
 $W < 0$ sentido anti-horário

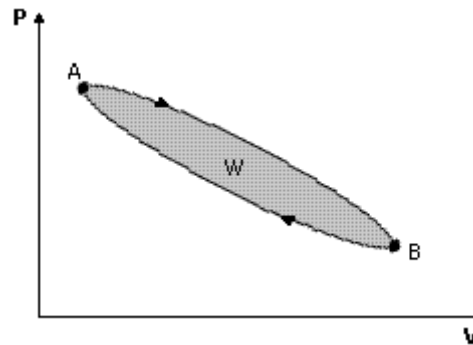


Figura 1.1 - Diagrama PV e ciclo de trabalho

A **1ª lei da termodinâmica** é relativo a conservação de energia e postula o seguinte, “ a variação da **energia interna** de um sistema termodinâmico fechado é igual à soma da energia térmica fornecida ao sistema e o trabalho realizado no sistema”, ou seja, a equação (1.10) representa uma mudança numa propriedade intrínseca do sistema, esta propriedade é chamada de **energia interna** e representada por U.

$$U_A - U_B = -W_{A \rightarrow B} + Q_{A \rightarrow B} \quad (1.10)$$

$$dU = dQ - dW \quad (1.11)$$

$$dU = CdT - PdV \quad (1.12)$$

Na **teoria cinética dos gases** verifica-se que a energia interna de um gás ideal é explicitada em função da sua temperatura.

$$U(T) = nC_v T + U_0 \quad (1.13)$$

A **entalpia** por vezes chamada de “conteúdo térmico” apesar de poder não correcto para todas as situações, é adequada em cerca de 99% das situações encontradas em refrigeração, a sua definição precisa é:

$$H = U + P_v \quad (1.14)$$

Esta propriedade é uma das consideradas mais fundamentais em sistemas de refrigeração, visto que, os sistemas de refrigeração tem elementos que realizam um processo isobárico reversível e uma das características da entalpia é que neste processo a variação de entalpia é igual à quantidade de calor que é transferida.

Num processo reversível (sem atrito) infinitesimal

$$dH = dU + dPV + PdV \quad (1.15)$$

sendo esse processo isobárico e considerando a definição de energia interna

$$dH = dU + PdV = dQ \quad (1.16)$$

Um processo que tenha a entalpia constante é chamado de processo **isentálpico**.

1.2.3. Entropia e a 2ª Lei da termodinâmica.

A **2ª lei da termodinâmica** estabelece o conceito de **entropia**, (S), como sendo uma função de estado e postula o seguinte: “a **entropia** total de qualquer sistema isolado termodinamicamente, tende a aumentar com o tempo até atingir um valor máximo”. o que indica duas importantes consequências:



-Enunciado de Clausius da 2ª lei da termodinâmica

“É impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente”, [1], ou seja, o calor não passa espontaneamente de um corpo de menor temperatura (frio) para um corpo de maior temperatura (quente).

-Enunciado de Kelvin da 2ª lei da termodinâmica

“É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além de remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho”, [1].

Quando uma pequena quantidade de calor é adicionada a uma substância à temperatura T , a entropia da substância muda por

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1.17)$$

Quando calor é removido, a entropia diminui

$$\Delta Q = T(S_1 - S_2) \quad (1.18)$$

Um processo que tenha a entropia constante é chamado de processo **isentrópico**, equivalente será dizer que, uma transformação adiabática reversível ($dQ = 0$) é uma transformação isentrópica.

1.2.4. Máquina térmica, máquina frigorífica e ciclo de Carnot.

Uma **máquina térmica** (motor) é um dispositivo pelo qual um sistema através de um ciclo de transformação num determinado sentido, absorve calor a partir de uma fonte cuja temperatura é alta, fornecendo uma parte da energia em forma de calor a um poço de temperatura inferior e a restante é fornecida ao exterior em forma de trabalho.

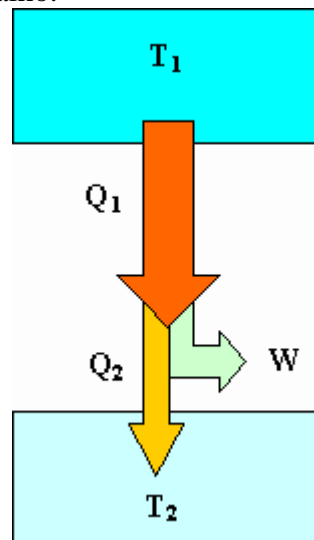


Figura 1.2 - Diagrama do funcionamento de uma máquina térmica [11].[11]

A Figura 1.2 ilustra as transferências de energia do funcionamento da máquina térmica.

O **rendimento** ou **eficiência do motor** é a razão entre o trabalho obtido e a energia libertada pela fonte com da temperatura mais alta.



$$\eta = \frac{W}{Q_1} < 1 \quad (1.19)$$

Numa **máquina frigorífica** o ciclo de transformação é realizado em sentido contrário ao de uma máquina térmica, tem como resultado a absorção de uma certa quantidade de calor a baixa temperatura, e a cedência de uma maior quantidade de calor à temperatura mais elevada, sendo necessário, para tal aplicar uma certa quantidade de trabalho sobre o sistema.

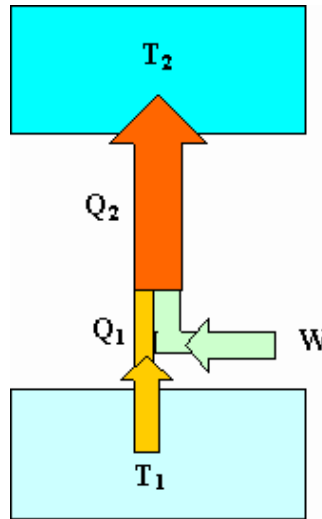


Figura 1.3 - Diagrama do funcionamento de uma máquina frigorífica [11]

A Figura 1.3 ilustra as transferências de energia do funcionamento da máquina frigorífica.

Para medir a eficiência calculamos um **coeficiente de performance** que é a razão entre o calor absorvido da fonte fria e o trabalho realizado sobre o refrigerante

$$COP = \frac{Q_1}{W} > 1 \quad (1.20)$$

Os trabalhos de Carnot permitiram estabelecer que um ciclo reversível com duas fontes é necessariamente formado por duas isotérmicas ligadas por duas adiabáticas, representado na Figura 1.4. Na literatura este ciclo é designado por o **ciclo de Carnot**.

A máquina térmica reversível que execute o ciclo de Carnot chama-se **máquina de Carnot**.

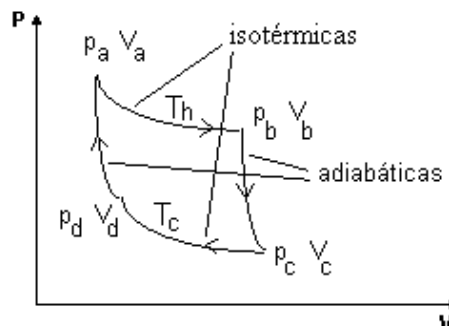


Figura 1.4 - Diagrama PV do ciclo de Carnot [11]



Teorema de Carnot- “Nenhuma máquina térmica que opere entre uma dada fonte quente e uma dada fonte fria pode ter rendimento superior ao de uma máquina de Carnot. Todas as máquinas de Carnot que operem entre essas duas fontes terão o mesmo rendimento”, [1].

Deste modo a eficiência de um motor, (η), e o coeficiente de performance, (COP), terão como valores máximos, η_{Carnot} e COP_{Carnot} , de uma máquina de Carnot.

$$\eta_{Carnot} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{(T_2 - T_1)(S_f - S_i)}{T_1(S_f - S_i)} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} < 1 \quad (1.21)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1(S_f - S_i)}{(T_2 - T_1)(S_f - S_i)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} > 1 \quad (1.22)$$

2. Propriedades de refrigerantes, ciclo de refrigeração e sistema de refrigeração

2.1. Diagrama de Mollier

A representação das propriedades termodinâmicas de uma substância é normalmente representada em tabelas ou diagramas onde as abcissas e ordenadas representam grandezas físicas, tais como, temperatura, entropia, pressão, volume ou entalpia.

O diagrama de Mollier, mais conhecido por diagrama PH, é um diagrama onde a abcissa é a entalpia e a ordenada é a pressão. Este diagrama é mais conhecido na área da refrigeração, visto que é uma ótima forma de representar o ciclo de refrigeração, permitindo visualizar as diferentes fases dos processos que ocorrem nos vários componentes do sistema.

Nas próximas figuras são ilustradas propriedades dos refrigerantes em diagramas PH.

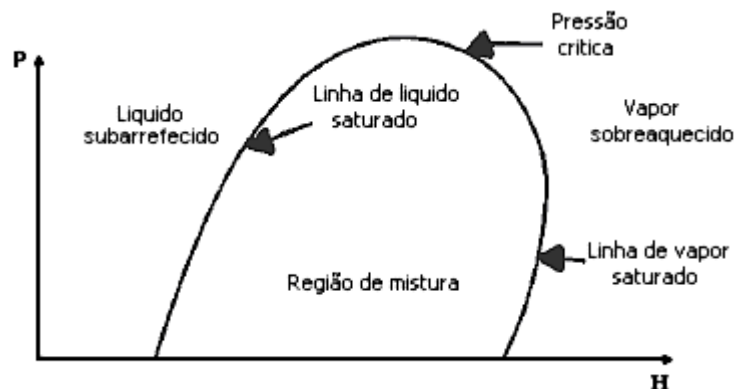


Figura 2.1 - Diagrama PH com a linha de saturação e regiões diferentes fases[2]



Com o diagrama PH da Figura 2.1 podemos observar os três estados (fases) do refrigerante, líquido subarrefecido, mistura de líquido saturado com vapor saturado e vapor sobreaquecido, que estão separados pela linha de saturação.

O comportamento da temperatura nos diferentes estados está exposto na Figura 2.2

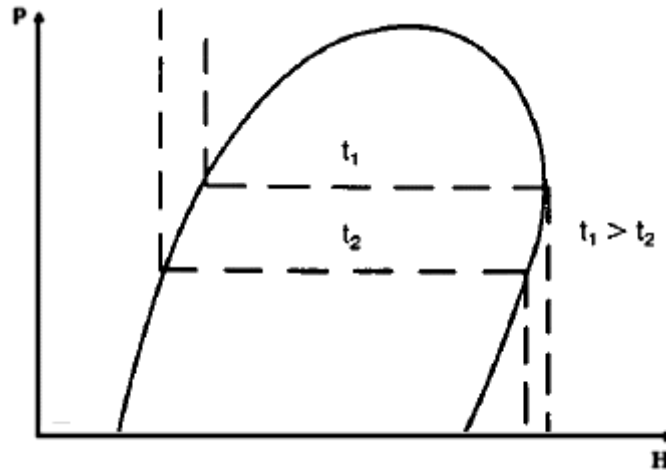


Figura 2.2 - Diagrama PH com linhas isotérmicas[2]

Observa-se na Figura 2.2 que na região de mistura a temperatura é uma linha horizontal. Deste modo, conhecendo a pressão neste estado sabe a sua temperatura. Na região de vapor sobreaquecido na realidade a linha de temperatura constante não decai imediatamente na vertical, primeiro decai ligeiramente para a direita e só depois desce na vertical. Na região de líquido subarrefecido a linha de temperatura constante é quase exactamente na vertical.

Temos ainda as linhas de volume específico constante as linhas representadas na Figura 2.3, em que começam na linha de vapor saturado e estendem-se ao longo da região de vapor sobreaquecido.

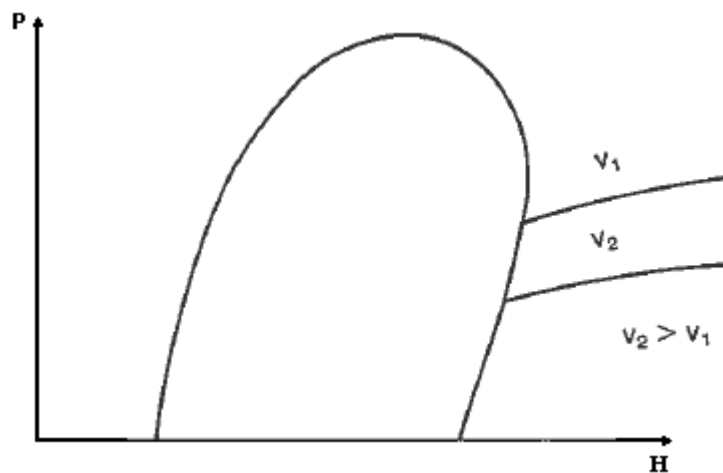


Figura 2.3 - Diagrama PH com linhas isocóricas[2]



À medida que as linhas se prolongam na região de vapor sobreaquecido a equação de estado de gás ideal exprime com mais exactidão o valor do volume específico.

Por fim as linhas de entropia constante, que sobem para a direita na região de vapor sobreaquecido, ilustrado na Figura 2.4.

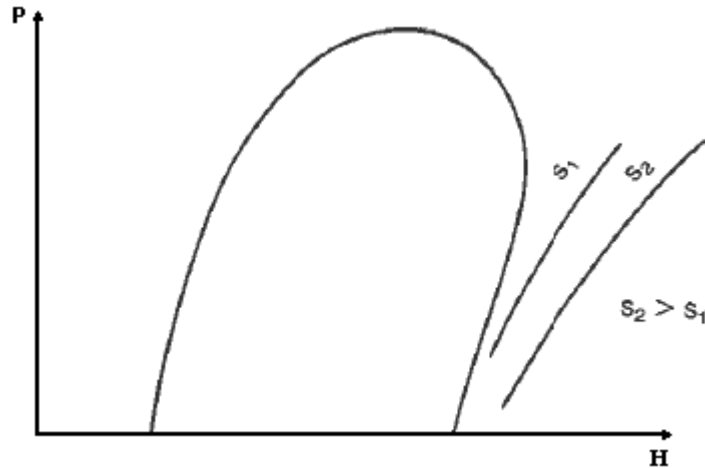


Figura 2.4 - Diagrama PH com linhas isentrópicas[2]

Estas linhas são utilizadas para demonstrar as alterações de estado durante o processo de compressão ideal. O trabalho actual desempenhado na compressão pode ser estimado a partir da divisão do trabalho ideal de compressão pela eficiência de compressão.

2.2. Ciclo de refrigeração

O **ciclo de refrigeração** de Carnot, é o ciclo de refrigeração em que a máquina frigorífica é o mais eficiente possível entre dois níveis de temperatura.

Os componentes da máquina frigorífica são, o compressor, um motor e dois permutadores de calor

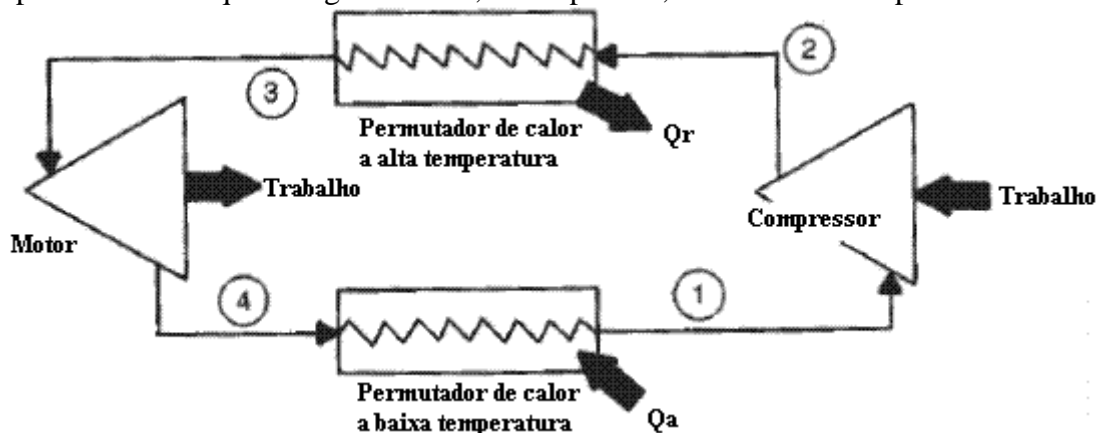


Figura 2.5 - Circuito de Carnot [2]



Em termos ideais o ciclo decorre na seguinte forma:

- 1-2. Compressão sem fricção nem transferência de calor
- 2-3. Rejeições de calor enquanto o refrigerante mantém uma temperatura constante
- 3-4. Expansão num motor sem fricção nem transferência de calor
- 4-1. Absorções de calor enquanto o refrigerante mantém uma temperatura constante

Porque os processos 1-2 e 3-4 são sem fricção, estes processos são termodinamicamente reversíveis, como não há transferência de calor, também são processos adiabáticos, e visto que são realizados a temperatura constante, são também processos isentrópicos.

O ciclo de refrigeração de Carnot que consiste em dois processos isentrópicos e dois isotérmicos está representado na Figura 2.6 onde se verifica a quantidade de calor transferida ao longo do ciclo.

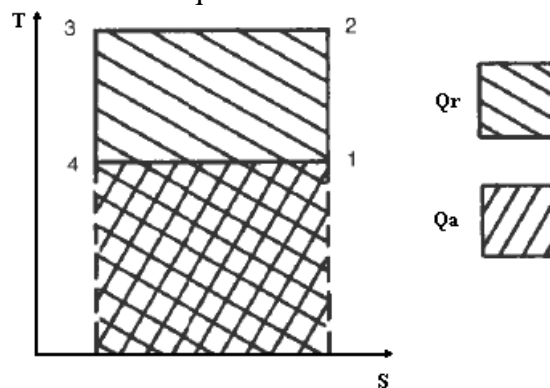


Figura 2.6 - Ciclo de Carnot em coordenadas temperatura-entropia, representação das transferências de calor[2]

A quantidade de calor rejeitado, (Q_r), é determinado pela equação (2.23).

$$Q_r = T_1(S_2 - S_3) \quad (2.23)$$

em que T_1 é a temperatura da fonte quente, S_2 e S_3 são os valores de entropia do refrigerante no início e no fim do processo de condensação.

A quantidade de calor absorvido, (Q_a), durante o processo de refrigeração é calculada pela equação (2.24)

$$Q_a = T_2(S_4 - S_1) \quad (2.24)$$

em que T_2 é a temperatura da fonte fria, S_4 e S_1 são os valores de entropia do refrigerante no início e no fim do processo de evaporação.

Como segundo a máquina frigorífica da Figura 1.3 numa máquina de Carnot temos

$$Q_2 = Q_1 + W \quad (2.25)$$

podemos visualizar na Figura 2.7 o trabalho realizado sobre o sistema.

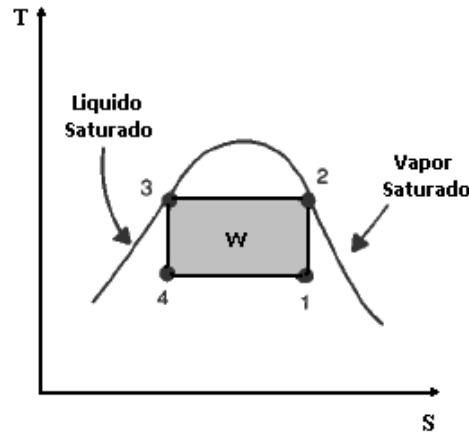


Figura 2.7 - Ciclo de Carnot em coordenadas temperatura-entropia, representação do trabalho realizado [2]

A título explicativo a Figura 2.8 representa o ciclo de Carnot no diagrama PH

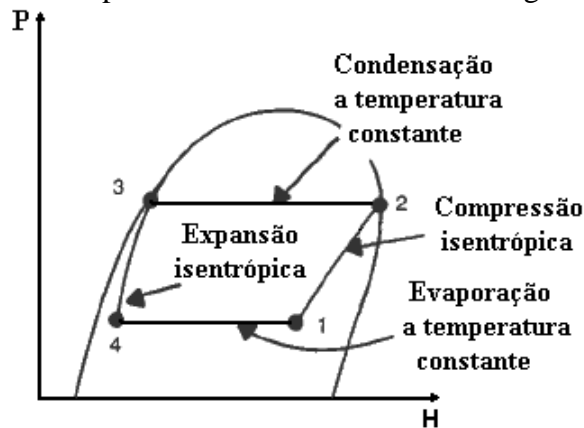


Figura 2.8 - Representação do ciclo de Carnot [2]

Pode observar-se que o ponto 1 e 4 estão numa região de mistura, ou seja, o fluído refrigerante no evaporador é uma mistura de vapor com líquido, visto que cada fase absorve uma quantidade diferente de calor no evaporador. É de tudo conveniente saber qual a parte correspondente a cada fase nos diversos pontos do circuito. Para tal, a determinação desses valores é obtida com base no exemplo do ponto 1 descrito na Figura 2.9.

$$\text{Fracção de vapor} = \gamma = \frac{m}{n} \quad (2.26)$$

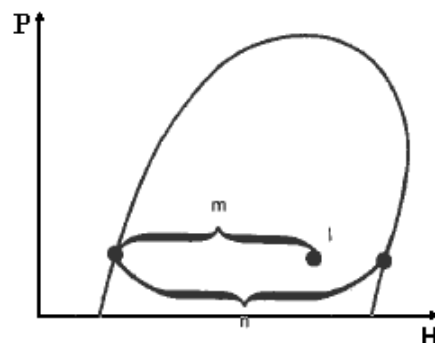


Figura 2.9 - Representação da fracção de vapor [2]



2.3. Modelo energético simplificado de um sistema de refrigeração

A equação de energia total de um fluido em escoamento estacionário relaciona os vários termos de energia entre dois pontos de um circuito (1 e 2) é dada por:

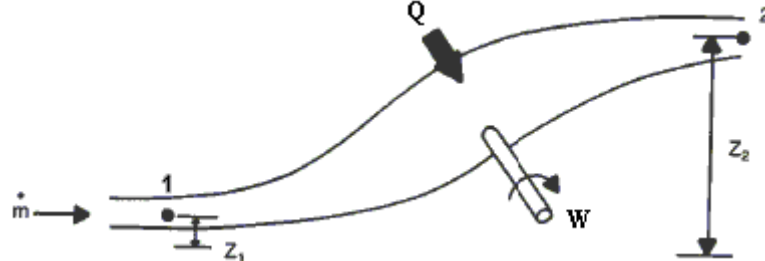


Figura 2.10 - Esquema demonstrativo das energias envolvidas numa parte do circuito [2].

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g \right) + Q = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g \right) + W \quad (2.27)$$

Em que \dot{m} é o caudal mássico que representa a quantidade de massa que atravessa uma secção transversal da conduta por unidade de tempo; v é a velocidade de escoamento do fluido; z é a elevação acima de um dado plano e g é a constante de aceleração gravitacional local.

As representações matemáticas para cada componente do sistema são obtidas com base na equação (2.27) após um conjunto de hipóteses simplificativas.

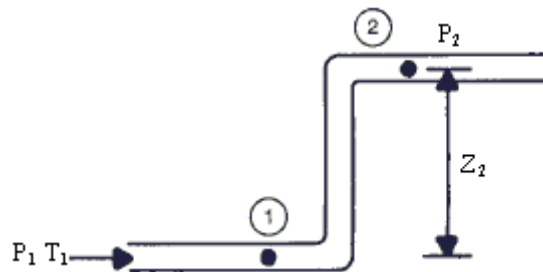


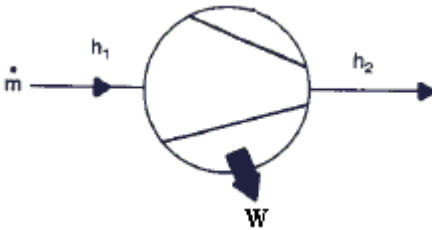
Figura 2.11 - Exemplo de uma conduta de gás [2].

O modelo da elevação de um gás através de uma conduta (ver Figura 2.11) é obtido através da hipótese de desprezar a diferença de velocidade do fluido. Como o volume nos dois pontos (1 e 2) é igual, $Q=0$ e $W=0$, obtêm-se

$$h_1 + z_1 g = h_2 + z_2 g \quad (2.28)$$

$$U_1 + P_1 V_1 + z_1 g = U_2 + P_2 V_2 + z_2 g \quad (2.29)$$

Para o compressor, é habitual desprezar a diferença da energia potencial entre a sua entrada e saída. Assim ao simplificar a expressão (2.27) obtêm a equação (2.30)



$$W = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.30)$$

Figura 2.12 - Representação do compressor [2]

em que h_1 e h_2 (ver Figura 2.12) são os valores de entalpia do refrigerante na entrada e saída do compressor.

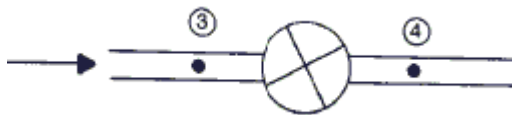
Nos permutadores de calor tal como está exemplificado na Figura 2.13, apesar da equação (2.31) ser semelhante à equação (2.30), a variação da entalpia é manifestada sobre a forma de quantidade de calor transferida.



$$Q = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.31)$$

Figura 2.13 - Representação do permutador de calor [2].

Na Figura 2.16 irá ser mostrado que as máquinas frigoríficas não utilizam motor para realizar trabalho no ambiente, mas sim, dispositivos de expansão. Simplificando a equação (2.27), aplicando as aproximações



$$Z_3 = Z_4 \quad (2.32)$$

$$V_3 \approx V_4 \quad (2.33)$$

$$W = 0 \quad (2.34)$$

$$Q = 0 \quad (2.35)$$

Figura 2.14 - Representação do dispositivo de expansão [2].
permite obter

$$h_3 = h_4 \quad (2.36)$$

Alterando o ciclo de forma a ser mais próximo da realidade, os processos da compressão e expansão são revistos, Figura 2.15 e Figura 2.16.

O processo de compressão verificada até agora é chamando de compressão líquida, existem problemas associados à compressão líquida. Em compressores alternados (deslocamento linear ou pistão), líquido nas paredes de cilindro diminuem a eficácia da lubrificação. Se permanecerem gotas do líquido refrigerante no final da compressão permaneceram por vaporizar, o líquido que é incompressível pode forçar a limitação do volume nocivo (ver na secção dos compressores) e danificar válvulas. Por este motivo e outros, o ciclo de refrigeração é modificado de forma que o compressor só trabalhe com vapor, é a chamada compressão seca.

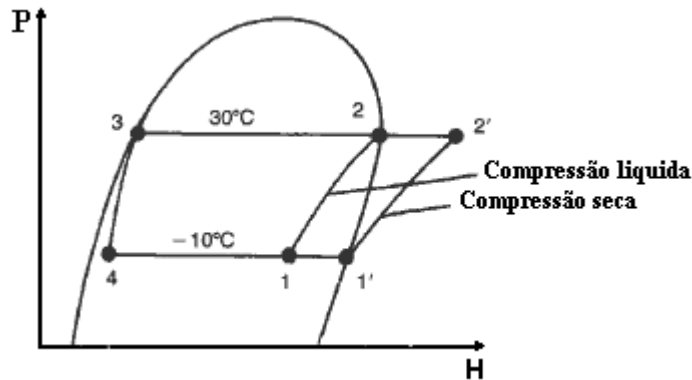


Figura 2.15 - Aproximação do funcionamento ideal do compressor à realidade [2].

Existem diversos motivos práticos para utilizar um dispositivo de expansão em troca de um motor para realizar a expansão, de forma a retirar energia ao refrigerante, tais como:

- a dificuldade em descobrir um motor que opere satisfatoriamente com a mistura de líquido e vapor que do processo 3-4 .
- controlar o motor, tendo em atenção que a variação do fluxo do refrigerante a ser admitido para o evaporador pode necessitar de um controlo preciso, para controlar o vapor saturado que sai do evaporador.
- transferir a energia do motor para o compressor.

A utilização da válvula de expansão provoca a modificação do ciclo de refrigeração, figura 2.20. A desvantagem é que o ponto 4' fica mais perto do ponto 1, significando que se perde capacidade de transferência de calor

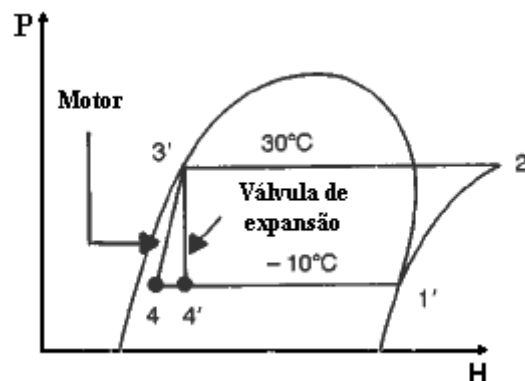


Figura 2.16 - Aproximação do funcionamento ideal do dispositivo de expansão à realidade [2].

Na Figura 2.17 está representado o funcionamento de um sistema de refrigeração e pode ser descrito da seguinte forma.

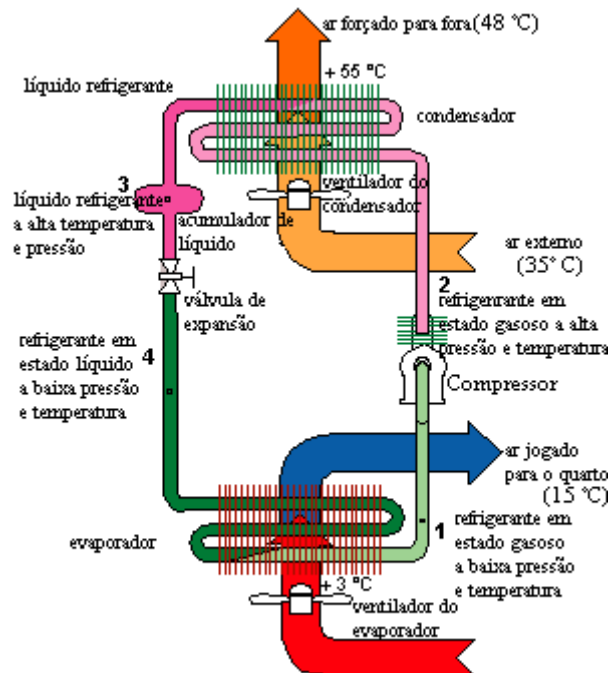


Figura 2.17 - Exemplo esquemático do funcionamento de um circuito de refrigeração [11].

O compressor durante o seu funcionamento cria uma diferença de pressões entre o evaporador e o condensador. Este retira fluido refrigerante (em estado gasoso) ao evaporador, resultando numa diminuição na pressão de sucção. Essa massa através do trabalho de compressão sofre uma variação na entalpia, equação (2.23), resultando também num aumento nas propriedades de temperatura e pressão.

O fluido refrigerante que está a uma temperatura superior à temperatura ambiente, ao passar pelo condensador transfere uma quantidade de calor para o ar que passa pelo condensador, essa quantidade é quantificada pela equação (2.31), e que deve corresponder ao calor latente da substância refrigerante, (1.5), de forma que o fluido refrigerante passe para o estado líquido.

O resultado da passagem do fluido refrigerante pelo condensador foi uma diminuição na sua entalpia. Mas é com este valor de entalpia, apesar com uma pressão e temperatura mais baixa, que o fluido refrigerante possui ao passar pela válvula de expansão ou tubo capilar. E desta forma consegue absorver o calor do ar que passa pelo evaporador, recuperando grande parte da sua entalpia passando do estado líquido para o estado gasoso.



Referências

- [1] H.M. Nussenzweig, “Curso de Física Básica, vol.II –Fluídos; Oscilações e Ondas; Calor”, Editora Edgard-Blucher, 1986.
- [2] Wilbert F. Stoecker, “*Industrial refrigeration handbook*”, New York : McGraw-Hill, 1998
- [3] Stoecker W.F., Jones, J. W.,”*Refrigeration and air conditioning*” 2ª edição, Auckland: McGraw-HillBook Company,1982.
- [4] ASHRAE ,”*HVAC Fundamentals Handbook*”, Amer Society of Heating 1997
- [5] Luís Júnior (2009, Março 10),“Introdução a máquinas Térmicas-Refrigeração” ISBN: 978-85-908775-0-9 [online], Disponível em: <http://www.martinelli.eng.br/ebooks.htm>
- [6] Rasmussen, B. P.”*Control-oriented modelling of transcritical vapor compression systems.*” Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana, 2002.
- [7] Santos, P. (1987). “Identificação de Sistemas Dinâmicos.” Tese de dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.
- [8] Rasmussen, B. P., ”*Dynamic modeling and advanced control of air contioning and refrigeration systems.*”, Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005
- [9] Aurélio Campilho, “Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição”. Porto: FEUP edições, 2000.
- [10] Bertulan,C.A.; “1ª lei da termodinâmica”- Projecto de ensino de física à distância. Disponível em <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/calor/calor.html>. Acesso em 22/02/2008.
- [11] Bertulan,C.A.; “A segunda lei da termodinâmica”-Projecto de ensino de física à distância. Disponível em http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/segunda_lei/segunda_lei.html. Acesso em 22/02/2008. .