

TERMODINÂMICA

CONCEITOS INICIAIS

1
FASCÍCULO

Premissa

A série de fascículos que ora se inicia tem por objetivo dar aos profissionais de refrigeração e ar condicionados um conjunto de conceitos teóricos básicos sobre os problemas de Termodinâmica e Transferência de Calor, aliados a discussões sobre as questões de ponta na

área, como por exemplo a substituição dos CFCs. Neste primeiro fascículo, serão explorados alguns conceitos sobre Termodinâmica, no sentido de formar uma base para os fascículos que virão a seguir. Trataremos de alguns aspectos relativos a formulação de modelos e leis

básicas associados a estes conceitos. Para uma maior aprofundamento dos temas aqui apresentados, os autores sugerem algumas leituras adicionais encontradas nas referências bibliográficas^{1,2,3}.

1. Introdução

Os conceitos de Termodinâmica foram desenvolvidos a partir da observação do mundo físico, no sentido de melhor descrever as interações e transformações da energia e, conseqüentemente, prever o seu comportamento. Esta tarefa mostrou-se extremamente complexa e de uso limitado para aplicações práticas. Sendo assim, foram propostos os chamados modelos, que tentam explicar estas situações complexas através de simplificações e/ou aproximações que permitem a obtenção de soluções próximas da realidade e com uma razoável precisão dentro de uma determinada faixa de aplicação.

Antes de entrarmos nos detalhes quanto à análise destes modelos devemos definir algumas propriedades que nos serão úteis nesta tarefa.

2. Algumas propriedades e conceitos importantes

2.1. Temperatura (T): a temperatura de uma substância indica um nível de estado térmico dessa substância e a sua possibilidade de trocar energia com uma outra substância. Uma substância a uma temperatura mais alta em contato com outra substância a uma temperatura mais baixa cede energia. Um aspecto importante sobre a temperatura é que sua avaliação é sempre feita por comparação. Portanto, quando estamos medindo a temperatura de uma substância, estamos na verdade deixando esta substância e o termômetro trocarem energia (calor) até que ambos estejam no mesmo nível de energia (ou seja, na mesma temperatura). Duas escalas de temperatura são comumente usadas: a Celsius (°C) e a Fahrenheit (°F). Os fatores de conversão de uma escala para outra são:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad \text{e} \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

Existe também a chamada escala absoluta de temperatura que no sistema internacional recebe o nome de Kelvin (K). O fator de conversão de uma para a outra é:

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15.$$

2.2. Pressão (p): esta propriedade é definida como a força normal que atua sobre uma superfície dividida pela área desta superfície. A pressão pode ser dita manométrica (também chamada relativa ou efetiva) quando seu valor é avaliado em relação à pressão atmosférica, ou absoluta quando avaliada a partir do vácuo absoluto. As unidades mais comuns para a pressão são atm, bar, psi, mmHg, mmH₂O e kPa. A pressão atmosférica normal ou padrão vale:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atmosfera padrão} &= 760 \text{ mmHg} \\ &= 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 101,325 \text{ kPa} \\ &= 1,01325 \text{ bar} \\ &= 14,969 \text{ lbf/in}^2 \\ &= 760 \text{ Torr} \\ &= 29,92 \text{ in Hg} \end{aligned}$$

2.3. Densidade (ρ) e volume específico (v): a densidade de um fluido é a massa do mesmo dividida pelo volume que ele ocupa. Às vezes a densidade é também conhecida por massa específica. Já o volume específico é o volume ocupado pelo fluido dividido pela sua massa. Como pode-se verificar, a densidade é o inverso do volume específico. A unidade mais comum para a densidade é kg/m^3 e, portanto, m^3/kg para o volume específico.

2.4. Calor específico (c): calor específico de uma substância é a energia necessária para elevar de 1°C a temperatura de 1 kg dessa substância. A avaliação dessa propriedade pode ser feita através de dois processos de transferência de calor: a volume constante ou a pressão constante. No nosso caso, o mais utilizado será o calor específico a pressão constante (c_p), por ser este o processo mais comum encontrado na área de refrigeração e ar condicionado. As unidades mais utilizadas para o calor específico são $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ (ou $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$) e $\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$.

2.5. Energia interna (u): é a forma de energia acumulada pela substância devido ao seu movimento ou agitação molecular e às forças de interação moleculares. A energia interna específica, u , é definida como a energia interna de uma substância por unidade de massa. As unidades da energia interna e da energia interna específica no sistema internacional são J e J/kg , respectivamente.

2.6. Entalpia (H): a entalpia, H , é a propriedade que combina as propriedades energia interna, pressão e volume. Esta propriedade aparece em associação com análises que envolvem volume de controle e fluxos mássicos. Analogamente à energia interna, pode-se definir a entalpia específica, h , ou seja, a entalpia por unidade de massa da substância. A relação entre entalpia específica e as outras propriedades é dada por:

$$h = u + Pv \quad (01)$$

2.7. Energia potencial (EP): é a energia relacionada à ação da gravidade sobre um objeto que se encontra numa determinada cota acima de um plano de referência (por exemplo a superfície da Terra). Assim, tem-se que:

$$EP = mgz \quad (02)$$

onde m é a massa do objeto, g é a aceleração da gravidade local ($\approx 9,8\text{ m/s}^2$) e z é a cota acima do plano de referência

2.9. Energia cinética (EC): é a energia relacionada com a velocidade de um objeto. Assim:

$$EC = (mV^2)/2 \quad (03)$$

onde m é a massa do objeto e V a velocidade do objeto.

2.10. Calor (Q): quantidade de energia transferida entre dois corpos ou duas substâncias em função de uma diferença de temperatura ou de concentração existente entre os mesmos. O fluxo de calor é representado por $\dot{Q}$, cuja unidade no sistema internacional é J/s ou W .

2.11. Trabalho (W): quantidade de energia necessária para o deslocamento x de um pistão devido a uma força F que atua sobre o mesmo. Outro exemplo de trabalho é a energia elétrica que é fornecida a um motor elétrico para o acionamento de um compressor ou ventilador. O fluxo de trabalho, ou potência, é representado por $\dot{W}$, cuja unidade no sistema internacional é J/s ou W .

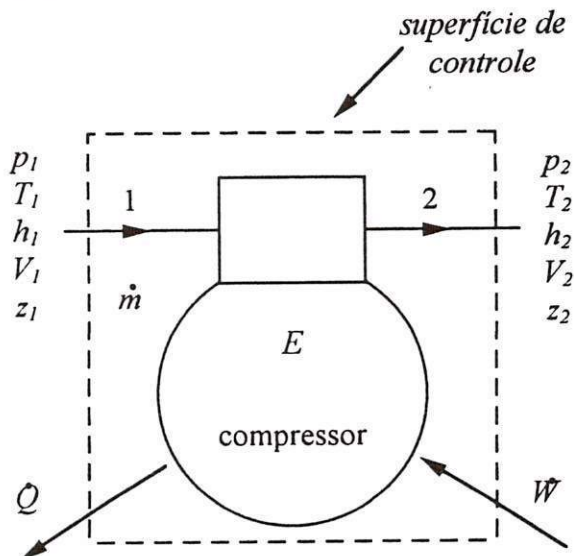
2.12. Sistema: este termo será usado para descrever a substância, objeto ou uma região do espaço no qual concentraremos nossa atenção. Quando não existir entrada ou saída de massa do interior de um sistema, diz-se que este é um sistema *fechado*. Por outro lado, quando existe entrada e/ou saída de massa, diz-se que o sistema é *aberto*. Outro tipo de nomenclatura é utilizar o termo *sistema* apenas para sistemas fechados, e utilizar o termo *volume de controle* para sistemas abertos.

2.13. Fronteiras do sistema: como os sistemas estão confinados em uma determinada região, a superfície que define esta área será denominada *fronteira do sistema*. As fronteiras podem ou não permitir a passagem de calor e/ou trabalho e/ou massa. Quando se usa o termo *volume de controle*, costuma-se utilizar a expressão *superfície de controle* em lugar de *fronteira*.

13. Equações e leis da Termodinâmica

Para definição das equações e leis da Termodinâmica que nos interessam neste fascículo, utilizaremos como caso típico um compressor, esquematizado na Fig. 1 a seguir.

Figura 1. Volume de Controle formado pelo compressor e sua superfície de controle.



O primeiro passo é definir o sistema no qual concentraremos nossa atenção. Neste caso ele será o compressor, e assim estabelecemos fronteiras ao redor do sistema para melhor defini-lo, representadas pelas linhas pontilhadas na Fig. 1. Como temos uma entrada e uma saída de massa do nosso sistema, ele é um sistema aberto (ou volume de controle).

Uma primeira lei básica que podemos avaliar é a de conservação de massa no volume de controle. Em termos gerais, temos que a massa que entra no sistema deve ser igual à massa que sai mais a massa que fica acumulada no interior deste sistema em um dado instante de tempo, ou seja:

$$m_{entra} = m_{sai} + m_{acumulada} \quad (04)$$

ou, expressando em termos de vazões mássicas $\dot{m}$ (quantidade de massa que atravessa as fronteiras do sistema por unidade de tempo) e utilizando a nomenclatura da Fig. 1 tem-se:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + m_{acumulada} / \Delta t \quad (05)$$

Normalmente, tem-se que o compressor opera numa condição tal que não existe acúmulo de massa em seu interior. Neste caso tem-se que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (06)$$

onde $\dot{m}$ é a vazão mássica na seção de entrada (ou saída) normalmente expressa em kg/s. A expressão anterior é válida desde que seja admitido que não há vazamentos no compressor. Nos equipamentos reais, isto nem sempre é verdade. À medida que o conhecimento desta realidade aumenta, mais complexidade pode ser introduzida nas equações, tornando-as cada vez mais realistas. Além disso, a Eq. (06) é válida para uma condição denominada por regime permanente, onde não ocorrem variações das vazões ao longo do tempo.

Uma segunda lei importante diz respeito à conservação de energia em um sistema, também conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica. Para cada seção (1 e 2) do nosso sistema podemos atribuir diversas propriedades, sendo as principais: pressão (p), temperatura (T), velocidade (V), entalpia (h) e cota (z). A Primeira Lei da Termodinâmica nos diz que o aumento líquido da energia armazenada em um dado volume de controle é igual a quantidade de energia líquida adicionada ao mesmo. Desta forma, podemos escrever que:

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{Q} - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad (07)$$

onde $\dot{m}$ é a vazão em kg/s, h é a entalpia em J/kg, V a velocidade em m/s, z a cota em m, g é a aceleração da gravidade em m/s², $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de energia na forma de calor (W), $\dot{W}$ é a taxa de realização de trabalho (W), E é a energia do sistema em J e t é o tempo em s.

Como a maioria dos processos que serão analisados estão em regime permanente, tem-se que $dE/dt = 0$, e portanto a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser escrita como:

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{Q} - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{W} = 0 \quad (08)$$

Para finalizar, vamos utilizar os conceitos aqui apresentados para analisar um compressor que trabalhe com R-22, e para o qual são realizadas medições de pressão e temperatura na entrada e na saída, bem como da vazão mássica e da energia elétrica fornecida. Os dados coletados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Medições realizadas

Pressão de saída [kPa]	1534
Temperatura de saída [°C]	40
Pressão de entrada [kPa]	498
Temperatura de entrada [°C]	0
Vazão mássica [kg/s]	0,04
Energia elétrica [W]	600

De posse dos valores medidos, avaliamos os valores das entalpias na entrada e na saída do compressor (ASHRAE, 1993), a saber:

Entalpia específica de saída:	415,87 kJ/kg
Entalpia específica de entrada:	404,87 kJ/kg

Rearranjando os termos da Eq. (07) temos:

$$\dot{m} \left[\underbrace{(h_2 - h_1)}_A + \underbrace{\left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right)}_B + \underbrace{g(z_2 - z_1)}_C \right] = \dot{Q} - \dot{W} \quad (09)$$

O termo B refere-se à variação de energia cinética e o termo C à variação da energia potencial. Estes dois termos podem ser desprezados por serem muito menores em relação ao termo referente à variação de entalpia (termo A). Desta forma, aplicando os valores encontrados na Tab. 1 temos que

$$0,04 * (415,87 - 404,87) * 1000 = \dot{Q} - (-600)$$

$$\dot{Q} = -160 \text{ W} (*)$$

(*) Obs.: Em Termodinâmica, deve-se convencionar os sinais do trabalho e do calor trocado pelo volume de controle quando aplicamos a Primeira Lei. No nosso caso, foi feita a seguinte convenção:

Calor entrando	sinal positivo
Calor saindo	sinal negativo
Trabalho fornecido	sinal negativo
Trabalho cedido	sinal positivo

Além disso, no cálculo o fator de 1000 multiplicando os valores de entalpia refere-se a correção de unidade pois 1 kJ equivale a 1000 J.

Este valor encontrado para o fluxo de calor resulta das perdas ocorridas no processo de compressão devido ao atrito entre as partes móveis do compressor e da troca de energia entre o compressor e o meio que o envolve.

Este exemplo serviu apenas para mostrar o uso das equações aqui apresentadas e que serão utilizadas posteriormente, não implicando em avaliação rigorosa de um compressor ou de qualquer outro equipamento.

4. Equação de Estado, Gás Perfeito

Existe uma relação entre as propriedades termodinâmicas de uma substância pura. Tal relação determina o estado da substância e pode ser obtida de forma experimental ou analítica. Encontramos esta relação na forma de tabelas, gráficos ou equações. Na forma de equação, esta relação é chamada de equação de estado. As equações de estado mais comuns são relações matemáticas que envolvem três propriedades: a pressão, a temperatura e o volume específico. São equações do tipo p - v - T e podem ser escritas de uma forma genérica como:

$$f(p, v, T) = 0 \quad (10)$$

Uma equação de estado pode ser apresentada de uma forma muito complexa, contendo dezenas de coeficientes e termos. Contudo, uma característica comum é que todas elas tendem para um mesmo limite para valores baixos de pressão e a substância é um gás ou vapor.

Este limite de baixa pressão é dado pela seguinte expressão elementar:

$$pv = RT \quad (11)$$

onde R é a constante particular do gás ou vapor em questão e se relaciona com a chamada constante universal dos gases perfeitos, por intermédio de

$$R = \mathfrak{R} / M \quad (12)$$

onde M é a massa molecular do gás.

Alguns valores de $\mathfrak{R}$ são:

$\mathfrak{R}$	=	8,314 kJ/kgmol.K
	=	1,987 kcal/kgmol.K
	=	847,7 kgf.m/kgmol.K

A Eq. (10) é a chamada lei dos gases ideais ou perfeitos. Todos os gases a baixa pressão se comportam como gás perfeito, incluindo os fluidos frigoríficos e o ar atmosférico. Deve-se tomar cuidado ao usar esta equação quando o fluido se encontra na região de mudança de fase (no condensador ou no evaporador), pois (1) a pressão pode não ser baixa o suficiente; (2) ela só é válida para a fase vapor do fluido. Para gases perfeitos a entalpia específica é diretamente proporcional à temperatura do gás, ou seja:

$$h = c_p T \quad (13)$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante. Para a validade desta expressão, admitiu-se que a entalpia a 0 °C vale zero. Outra grandeza que será muito útil na análise de ciclos é a relação entre os calores específicos, k , que é dada por:

$$k = c_p / c_v \quad (14)$$

onde c_v é o calor específico a volume constante. Pode-se escrever ainda que:

$$c_p - c_v = R, \text{ onde } R \text{ está definido na equação 12.}$$

Valores selecionados das propriedades termodinâmicas de alguns gases e vapores encontram-se na Tabela 2.

TABELA 2. Resumo de algumas propriedades de vários gases a pressão normal e temperatura de 300 K*.

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	c_p , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	c_v , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	k
Ar	—	28,97	0,28700	1,0035	0,7165	1,400
Butano	C_4H_{10}	58,124	0,14304	1,7164	1,5734	1,091
Propano	C_3H_8	44,097	0,18855	1,6794	1,4909	1,126
Vapor d'água	H_2O	18,015	0,46152	1,8723	1,4108	1,327
R-22	CHClF_2	86,48	0,09614	0,904	0,8079	1,119
R-134a	CH_2FCF_3	102,3	0,08149	1,031	0,9495	1,086
R-717 (amônia)	NH_3	17,03	0,4882	3,204	2,7158	1,179
R-11	CCl_3F	137,38	0,0605	0,614	0,5535	1,109
R-12	CCl_2F_2	120,93	0,0688	0,714	0,6452	1,107

* Extraído da Tabela A.8 da referência 1 e do Capítulo 17 da referência 2.

5. Referências bibliográficas

1. Van Wylen, G.J.; Sonntag, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. 3ª edição, Editora Edgard Blücher, 1993.
2. Stoecker, W.F.; Jones, J.W. *Refrigeração e Ar Condicionado*. Editora MacGraw-Hill, 1985.
3. ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1993.

revista do

FRIIO

MARY
EDITORA

ANO VI - Nº 89
OUTUBRO/1997
Refrigeração
Ar Condicionado
Ventilação
Aquecimento
Máquinas de Lavar

ESCOLA POLITEC
PUC

Coleção Refrigeração & Ar Condicionado

Fascículos
desenvolvidos pela
Escola Politécnica -
USP

COLECIONE!

**Evolução do
ar condicionado
central exige
cada vez mais
das grelhas e
difusores**

Serviço de Biblio
Biblioteca de Engenharia Mecânica, na

COMÉRCIO:
Mesmo com
El Niño,
inverno foi
o de sempre
no comércio

INDÚSTRIA:
Qualidade de
vida, prioridade
na McQuay

PÁGINA VIRADA:
FEBRAVA 97,
US\$ 150 milhões
em negócios