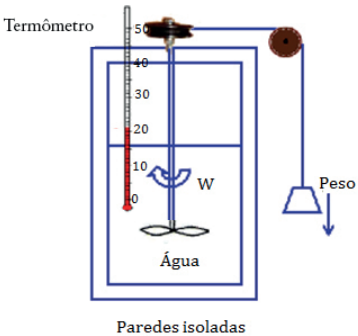
4 ANEXO

A4.1 1° PRINCÍPIO DA TERMODINÂMICA

Calor é uma forma de energia. É energia em trânsito.[1]

Experiência de J. P. Joule em 1840. James P. Joule (1818-1889)



Equivalente mecânico do calor.

O peso cai fazendo rodar a roldana fornecendo um trabalho W para a água, elevando sua temperatura.[2] Isto é, o trabalho W é convertido em calor Q. Portanto, trabalho e calor são mutuamente conversíveis.

---

1 Passa de um corpo a maior temperatura para um corpo a menor temperatura. Passa da água para o termômetro, fazendo subir sua temperatura.

2 Por atrito interno, agitação, das moléculas da água.

Resultado: $1kcal = 427kgfm$ [3]

$$Q = mc\Delta t \qquad Q \text{ em } kcal$$

$m =$ massa da água em kgm (quilograma massa)

$\Delta t =$ elevação de temperatura em ^{o}C $\quad c =$ calor específico em $kcal/(kgm^{\circ}C)$

Referência: D. Mooney, Mechanical Engineering Thermodynamics.
M. Zemansky, Heat and Thermodynamics.
V. M. Faires, Thermodynamics

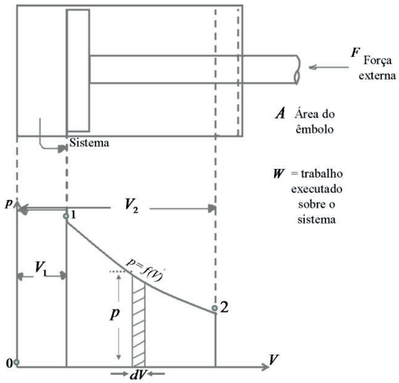
A4.2 TRABALHO EM UMA VARIAÇÃO DE VOLUME

Em um sistema fechado (sem escoamento):

$\delta W = (pA)de = p(Ade) = pdV$ Trabalho executado sobre o sistema fechado.

Usamos o símbolo δ para indicar "uma pequena quantidade de trabalho", mas não uma pequena variação da propriedade W, pois W não é uma propriedade.

Matematicamente falando, δW não é uma diferencial exata, pois a integral de δW :



$W = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 pdV$ (0) Depende do percurso executado entre os estados 1 e 2. Para um percurso diferente, o valor de W será outro.

Para ser diferencial exata, deveríamos ter: $\int_A^B Pdx + Qdy = \int_A^B dU = [U]_A^B = U_B - U_A$

---

[3] kgf – quilograma força.

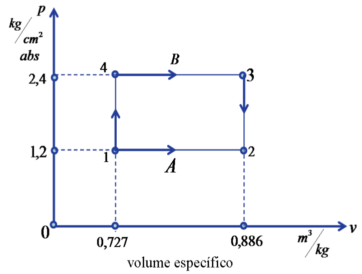
Isto é, o valor da integral, nesse caso, só depende dos estados inicial e final e não do percurso executado.[4]

A4.2.1 Diagrama indicador (0a)

Em outras palavras, quando a diferencial não é exata como δW, o valor da integral $W = \int_1^2 pdV$ (0a) depende do desenvolvimento da curva $p = f(V)$, pois o valor da integral W é medido pela área encerrada pela curva $p = f(V)$. Se a curva for com desenvolvimento diferente, a área sob a curva será outra.

Podemos obter experimentalmente o gráfico do trabalho resultante em um cilindro fornecendo força motriz por vapor, usando o "diagrama do indicador", como se vê na figura acima.

A4.3 ENERGIA INTERNA



Imaginemos dois processos:

---

[4] Esclarecendo melhor, se $U = f(x, y)$, a diferencial total: $dU = \frac{\partial U}{\partial x}dx + \frac{\partial U}{\partial y}dy = Pdx + Qdy$, nesse caso é denominada diferencial exata. Veja-se a ref. Maurer, v3,

Processo A: $1kgm$ de ar a pressão constante de $1{,}2\,{}^{kg}\!/_{cm^2}\ abs$ e $25^{o}C$, expande-se de $0{,}727\,{}^{m^3}\!/_{kg}$ até $0{,}886\,{}^{m^3}\!/_{kg}$. Sua temperatura sobe até $90^{o}C$ e a energia interna aumenta de $11{,}21\,{}^{kcal}\!/_{kg}$.

É o percurso entre os estados 1 e 2.

Processo B: O ar é aquecido a volume constante de 1 a 4, até que sua pressão suba a $2{,}4\,{}^{kg}\!/_{cm^2}\ abs$. A seguir se aquece de 4 a 3, expandindo de $0{,}727\,{}^{m^3}\!/_{kg}$ até atingir o volume específico igual ao estado 3, de $0{,}886\,{}^{m^3}\!/_{kg}$. Esfria-se a volume constante até chegar ao estado 2.

Usando a lei dos gases perfeitos: $pv = RT$ $\qquad R = 29{,}27\,{}^{m}\!/_{^{o}K}$ [5]

$$T_4 = \frac{2{,}4\times10^4\times0{,}886}{29{,}27} = 596^{o}K \ \ (\text{ou } t_4 = 323^{o}C)$$

$$\text{e } T_3 = \frac{2{,}4\times10^4\times0{,}727}{29{,}27} = 726^{o}K \ \ (\text{ou } t_3 = 453^{o}C)$$

Calor Q: $Q = c_V(t_4 - t_1) + c_p(t_3 - t_4) + c_V(t_2 - t_3)$, fornecido e retirado no processo B.

$c_V =$ calor específico a volume constante: $0{,}172\,{}^{kcal}\!/_{kg^{o}C}$

$c_p =$ calor específico a pressão constante: $0{,}241\,{}^{kcal}\!/_{kg^{o}C}$

$$Q = 0{,}172(323-25) + 0{,}241(453-323) + 0{,}172(90-453)$$

$$Q = 51{,}28 + 31{,}25 - 62{,}40 = 20{,}13\,{}^{kcal}\!/_{kg} \qquad (1)$$

Referência: Lee-Sears, Termodinâmica;
Herman Stoever, Termodinâmica;
David Mooney Mechanical Engineering Thermodynamics;
Willie A. Maurer, Cálculo Diferencial e Integral, v4 e 3.

Como os trabalhos efetuados nos processos a volume constante 1 – 4 e 3 – 2 são nulos, o trabalho líquido será o efetuado no processo de expansão a pressão constante: $W = p(v_3 - v_4) = 2{,}4\times10^4\times0{,}158 = 3814\,{}^{kgfm}\!/_{kgm}$

---

[5] Na verdade seria $29{,}27\,{}^{kgfm}\!/_{(kgm\,^{o}K)}$ Como no sistema MKS técnico, os valores em *kgf* e *kgm* são iguais, por isso podem ser cancelados, ver ao pé da pag. Na Secção 4.4.

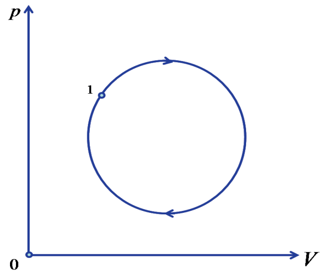
ou: $\frac{W}{J} = \frac{3814}{427} = 8{,}92 \,{}^{kcal}\!/_{kgm}$ (2)

Variação da energia interna do ar no processo B: Do calor fornecido ao Sistema como Q (eq. 1), uma parte se transforma em trabalho, fornecido pelo Sistema ao exterior, W/J (eq. 2), o restante resulta como energia interna ganho pelo Sistema. Energia interna: $\Delta U = Q - \frac{W}{J}$

$$(20{,}13 - 8{,}92) = 11{,}21 \,{}^{kcal}\!/_{kg} \qquad (\,kg \text{ entendemos } kgm\,)$$

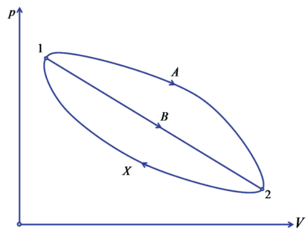
A mesma variação do processo A.

Isto é, em um ciclo, que seria ir do estado 1 e voltar ao estado 1, a variação da energia interna será nula pois se volta ao estado inicial. (2a)



Em geral, em um ciclo: $Q_{ciclo} = \frac{W_{ciclo}}{J}$

Pelo 1º Princípio, que é uma forma da conservação de energia, o calor fornecido deve ser igual ao trabalho executado.



Consideremos dois processos A e B entre os estados 1 e 2, e um terceiro processo X retornando do estado 2 ao estado 1. Teremos pelo 1º princípio, como já visto: $Q_a + Q_X = \frac{W_A + W_X}{J}$ e

$$Q_B + Q_X = \frac{W_B + W_X}{J} \qquad (2b)$$

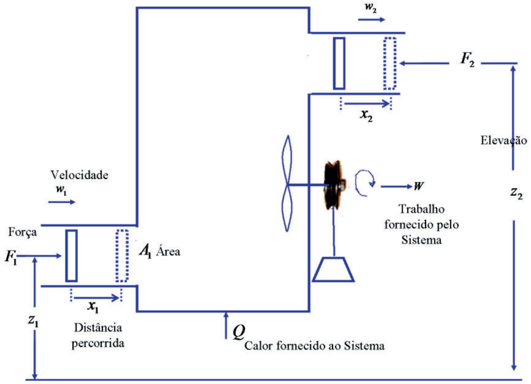
Subtraindo um do outro: $Q_A - \frac{W_A}{J} = Q_B - \frac{W_B}{J}$

Conclusão: A variação da energia interna em um sistema depende somente dos estados inicial e final e não do processo que une os estados. Isso é característica de uma "propriedade" do sistema ou, matematicamente, uma função de ponto, isto é, cada ponto tem um determinado valor. Então podemos dizer que a diferencial dU é exata.

Podemos escrever então para qualquer processo 1 – 2, o 1º Princípio será: $\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{12} - \frac{W_{12}}{J}$ (3)

Referência: Stoever

A4.4 EQUAÇÃO DA ENERGIA PARA ESCOAMENTO PERMANENTE (STEADY FLOW)



Trabalho efetuado pelo sistema quando a massa m flui pelo sistema:

$$W + F_2 x_2 - F_1 x_1$$

A_1 e A_2 Áreas dos êmbolos

$F_1 x_1 = p_1 A_1 x_1 = p_1 V_1$

$F_2 x_2 = p_2 A_2 x_2 = p_2 V_2$

Portanto, o trabalho será:

$W + p_2 V_2 - p_1 V_1$ V_1 e V_2 volumes ocupados pela massa m, ao entrar e ao sair.

Aumento da energia interna: $m(u_2 - u_1)$ u_1 e u_2 energias internas específicas (por unidade de massa) na entrada e na saída.

Variação da energia cinética: $\frac{1}{2}m(w_2^2 - w_1^2)$

Variação da energia potencial: $mg(z_2 - z_1)$

$g =$ aceleração local da gravidade

Obtemos para equação da energia:

$$Q - (W + p_2V_2 - p_1V_1) = m\left[(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}(w_2^2 - w_1^2) + g(z_2 - z_1)\right]$$

Dividindo por m e ordenando:

$$\left(u_1 + p_1v_1 + \frac{1}{2}w_1^2 + gz_1\right) - \left(u_2 + p_2v_2 + \frac{1}{2}w_2^2 + gz_2\right) - \omega + q = 0$$

Onde: Q calor fornecido ao sistema

W trabalho fornecido pelo sistema

v volume específico, ω trabalho específico, q calor específico, isto é, por unidade de massa.

À expressão: $h = u + pv$ chamamos entalpia. Como u, p e v são funções de estado do sistema, isto é, propriedades, a entalpia h também é uma propriedade e sua diferencial dh é uma diferencial exata..

Então, h_1 e h_2 são as entalpias na entrada e na saída.

Podemos escrever para o 1º Princípio, que é uma forma da equação da conservação da energia como:

$$\underbrace{\left(h_1 + \frac{1}{2}w_1^2 + gz_1\right) - \left(h_2 + \frac{1}{2}w_2^2 + gz_2\right)}_{\text{Energia } \Delta e} - \omega + q = 0$$

Trata-se de um balanço de energia: $\Delta e = \omega - q$

É outra forma do 1º Princípio, usada para regime de escoamento permanente (*steady flow)*.