

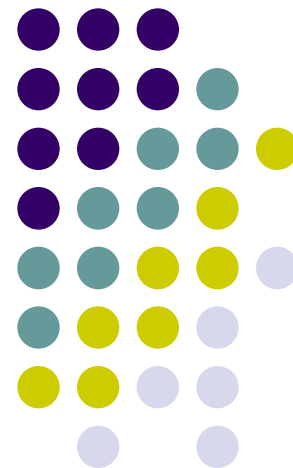


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA - EEL

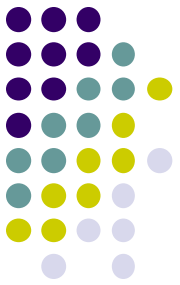
BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

BALANÇO DE ENERGIA

Professor : Geronimo



BALANÇO DE ENERGIA

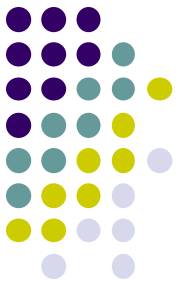


□ Objetivos desta Unidade

Ao concluir esta unidade, espera-se que o aluno adquira as seguintes habilidades:

- ✓ Listar e definir os **componentes da energia** total de um sistema de processo e as formas de transferência de energia;
- ✓ Calcular a **energia cinética** de um corpo de massa m , movendo-se com uma velocidade v ou a taxa de transporte de energia cinética por uma corrente movendo-se com vazão mássica $\dot{m}$ e velocidade v .
- ✓ Calcular a **energia potencial gravitacional** de um corpo de massa m na altura Z , ou a taxa de transporte de energia potencial gravitacional por uma corrente movendo-se com vazão mássica $\dot{m}$ e altura Z .
- ✓ Escrever a primeira **Lei da Termodinâmica** para um sistema de processo fechado e estabelecer as condições sob as quais cada um dos termos da equação pode ser desprezado.

INTRODUÇÃO



Toda transformação química ou física de um material ou de uma mistura de materiais envolve energia e alguns questionamentos são levantados:

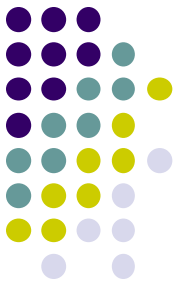
Quanto de potência é necessário para bombear $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ de água a partir de um tanque para certa unidade de processo?

Qual a quantidade de carvão deve ser queimado por dia para produzir calor suficiente para gerar vapor para movimentar as turbinas para produzir eletricidade para suprir uma cidade com 50.000 habitantes?

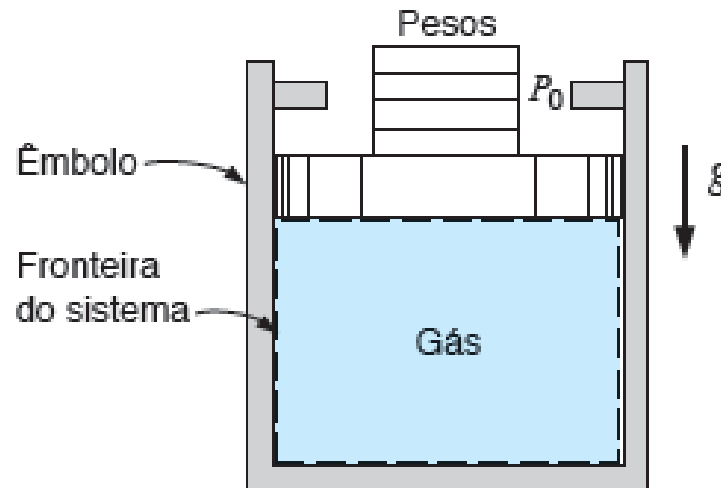
Problemas como esses, e tantos outros presentes na indústria química podem ser respondidos a partir da formulação e aplicação de balanços de energia.

Esses balanços são muito importantes na indústria, como no primeiro caso, em que a partir dele se encontra a potência a fim de se escolher o melhor equipamento a ser empregado no processo.

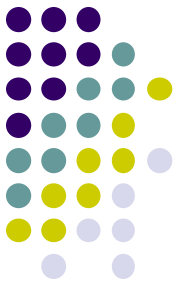
SISTEMA E VOLUME DE CONTROLE



Sistema: um sistema termodinâmico é definido como uma quantidade de matéria, com massa e identidades fixas, sobre a qual nossa atenção é dirigida. É delimitado fisicamente por superfícies geométricas arbitrárias reais ou imaginárias, que podem ser fixas ou móveis.

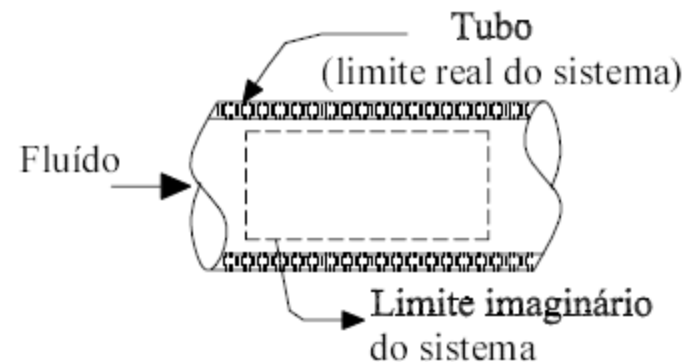
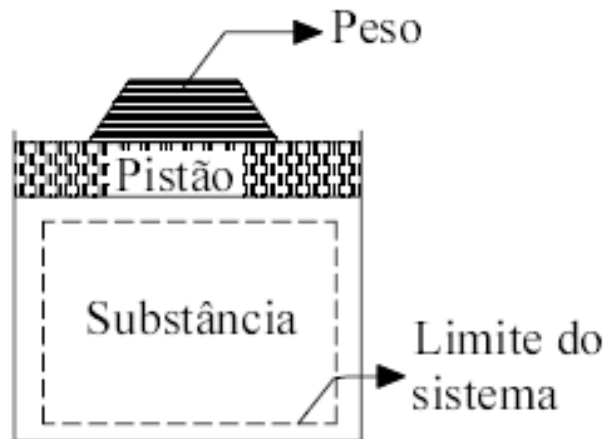


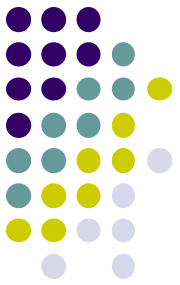
Exemplo de um sistema



❑ Sistema e Volume de Controle

A análise de equipamentos que apresentam escamento de massa para dentro e/ou para fora é um procedimento usual em engenharia. O procedimento seguido em tal análise consiste em especificar um volume de controle que envolve o equipamento a ser considerado. A superfície desse volume de controle é chamada de superfície de controle.

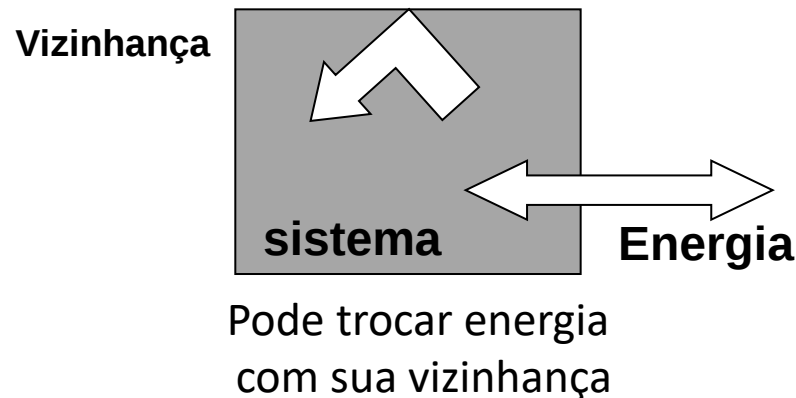


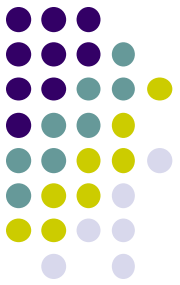


❑ Sistema e Volume de Controle

Sistema fechado: composto por uma quantidade de matéria com massa e identidade fixas; apenas calor e trabalho podem cruzar a fronteira do sistema.

Sistema Fechado

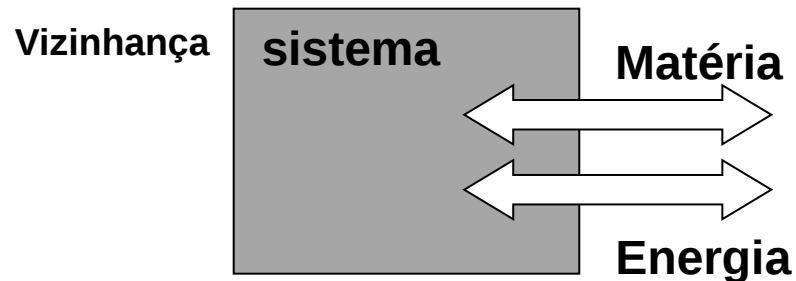




❑ Sistema e Volume de Controle

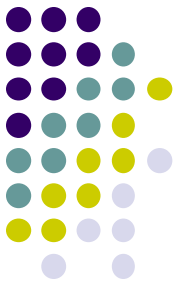
Sistema aberto (ou Volume de controle): massa, assim como calor e trabalho, podem atravessar a superfície de controle

Sistema Aberto



Pode trocar matéria e energia
com sua vizinhança

PROPRIEDADE



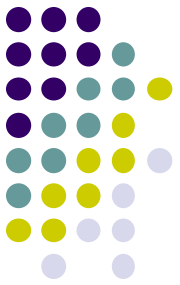
Propriedade é qualquer grandeza específica de um sistema que pode ser medida, tal como pressão, volume ou temperatura, ou pode ser calculada, como as energias cinética e potencial, e é independente do caminho.

Matematicamente:

$$\int_1^2 dy = y_2 - y_1 = \Delta y \quad (1)$$

- **Propriedade Intensiva:** independente da massa, ou seja, não varia com o tamanho do sistema.
ex.: pressão, temperatura, concentração, massa específica
- **Propriedade Extensiva:** é aquela cujo valor depende da massa do sistema.
ex.: massa, volume total, comprimento

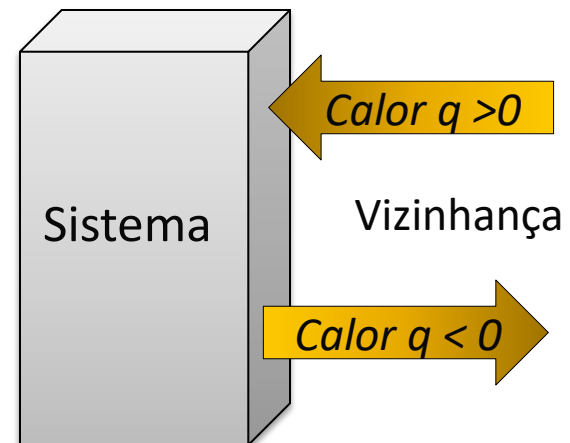
CALOR E TRABALHO

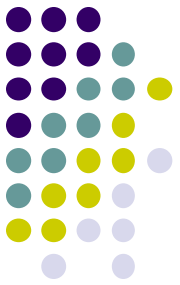


Como visto, no sistema fechado não ocorre transferência de massa através de seu limites mas pode ocorrer transferência de energia, que pode ser de duas formas: calor e trabalho.

1. **Calor** é definido como uma quantidade que escoa através da fronteira de um sistema durante uma mudança de estado em virtude de uma diferença de temperatura entre o sistema e suas vizinhanças e escoa de um ponto de temperatura mais alta a um ponto de temperatura mais baixa.

O calor é definido como positivo quando é transferido da vizinhança para o sistema ($q > 0$) e negativo quando contrário ($q < 0$).

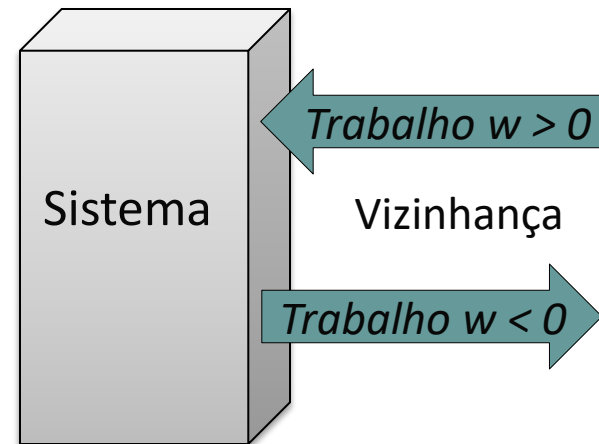




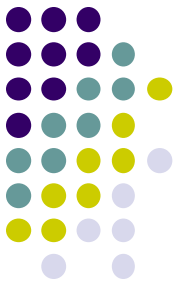
☐ Calor e trabalho

2. **Trabalho** é definido como qualquer quantidade que escoa através da fronteira de um sistema durante uma mudança de estado e é completamente conversível na elevação de uma massa nas vizinhanças.

O trabalho é definido como positivo quando é exercido pela vizinhança sobre o sistema ($W > 0$) e negativo quando contrário ($W < 0$).



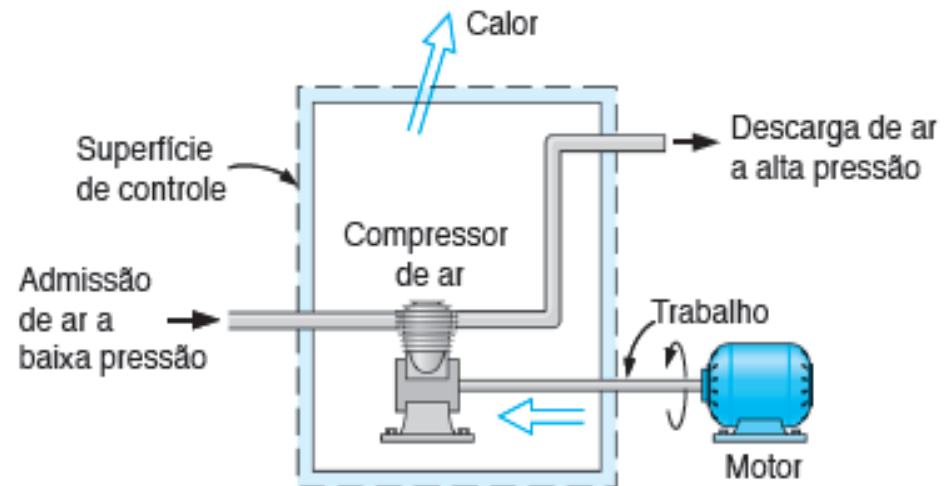
Nota: a convenção de **sinal oposto** é frequentemente usada. A escolha é arbitrária, desde que seja usada de forma consistente.



❑ Calor e trabalho

Calor e **trabalho** referem-se a formas de energia que está sendo transferida, mas não tem nenhum significado falar de calor ou trabalho possuído ou contido por um sistema.

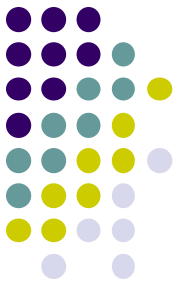
Exemplo de um sistema com volume de controle, onde há calor e trabalho



Alguns fatos importantes sobre calor e trabalho

Calor	Trabalho
Aparecem apenas na fronteira do sistema	
Aparecem apenas durante uma mudança de estado	
Se manifesta por um efeito nas vizinhanças	Se manifesta através de um efeito nas vizinhanças

TRABALHO E EXPANSÃO



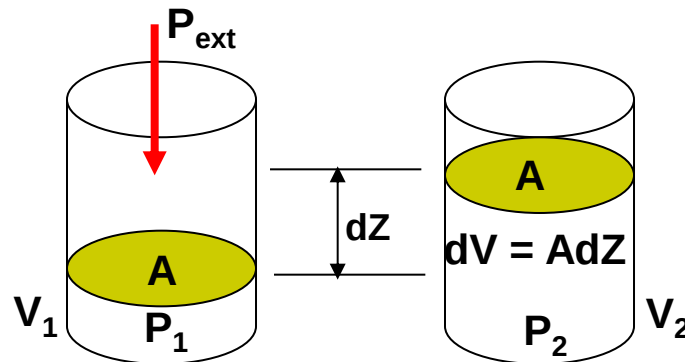
Para modificações infinitesimais, a energia do sistema variará de modo infinitesimal:

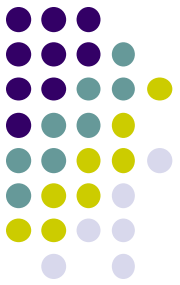
$$dU = dq + dw \quad (2)$$

Energia transferida
como calor

Trabalho

Para usar essa expressão, é preciso relacionar as variações de dq e dW a eventos que ocorrem na vizinhança.





☐ Trabalho de expansão

Considerando que:

$$W = - F_{ext} \cdot Z$$

$$dW = - F_{ext} \cdot dz$$

$$dW = - P_{ext} \cdot dV$$

Lembrete:

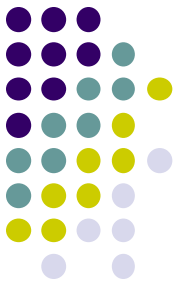
$$P = \frac{F}{A}, \quad F = P \cdot A$$

Integrando: $W = -P_{ext} \int_{V_1}^{V_2} dV$ Sendo: $P_{ext} = \text{constante}$

$$W = - P_{ext} (V_2 - V_1)$$

$$\therefore W = -P_{ext} \cdot \Delta V \quad (3)$$

EXPANSÃO ISOTÉRMICA REVERSÍVEL



Ao analisar a expansão isotérmica reversível de um gás perfeito, observa-se que a expansão é isotérmica graças ao contato térmico entre o sistema e suas vizinhanças.

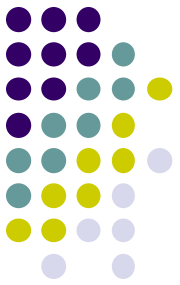
Como a equação de estado é $pV = nRT$, sabe-se que em cada etapa da expansão $p = nRT/V$, onde V é o volume do gás em cada etapa da expansão.

A temperatura T é constante numa expansão isotérmica, de modo que pode sair da integral, bem como n e R . Segue-se, então o trabalho de expansão isotérmica reversível de um gás perfeito do volume V_1 , até o volume V_2 , na temperatura T , é:

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (4)$$

FORMAS DE ENERGIA



A energia total de um sistema tem três componentes:

Energia cinética (E_c): é a energia devida ao movimento do sistema como um todo, em relação a um determinado sistema de referência.

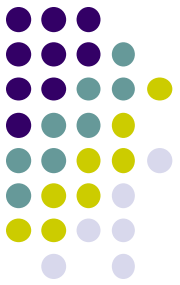
A energia cinética de um objeto de massa $m(kg)$ movendo-se com uma velocidade $v(m/s)$, em relação à superfície da terra, é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m.v^2 \quad (5)$$

Se um fluido entra em um sistema com uma vazão mássica $\dot{m}(kg/s)$ movendo-se com uma velocidade $v(m/s)$, em relação à superfície da terra, é dada por:

$\dot{E}_c$ pode ser entendida como a **taxa** na qual a energia cinética é transportada para o sistema pela corrente de fluido.

$$\dot{E}_c = \frac{1}{2} \dot{m}.v^2 \quad (6)$$



☐ Formas de energia

Energia potencial (E_p): é a energia devida à posição do sistema em um campo potencial, gravitacional ou magnético.

A energia potencial gravitacional de um objeto de massa $m(kg)$ é dada por:

$$E_p = m \cdot g \cdot z \quad (7)$$

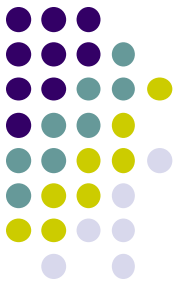
Se um fluido entra em um sistema com uma vazão mássica $\dot{m}(kg/s)$ e uma altura Z em relação ao plano de referência da energia potencial, então:

$\dot{E}_p$ pode ser imaginada como a **taxa** na qual a energia potencial gravitacional é transportada para o sistema pelo fluido

$$\dot{E}_p = \dot{m} \cdot g \cdot z \quad (8)$$

Normalmente estamos interessados na mudança da energia potencial quando um corpo ou um fluido se move de uma altura para outra, assim:

$$\Delta \dot{E}_p = \dot{E}_{p2} - \dot{E}_{p1} = \dot{m}g (z_2 - z_1) \quad (9)$$



❑ Formas de energia

Energia interna (U): é a energia devida ao movimento e interações entre átomos, moléculas e constituintes subatômicos em relação ao centro de massa do sistema. A energia interna não pode ser medida, apenas calculada a partir de outras variáveis que podem ser medidas macroscopicamente.

A energia interna é uma função do temperatura e do volume.

$U = f(T, V)$. Tomando a diferencial:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

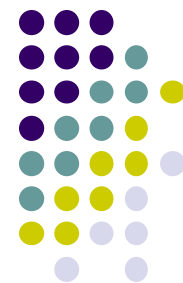
Cv: capacidade calorífica

Como $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$ e, na maioria dos casos, $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T$ é muito pequeno e pode ser desprezado, sendo nulo para gases ideais:

$$dU = C_V dT$$

$$U_2 - U_1 = \Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT \quad (10)$$

ENTALPIA



É a função de estado resultado da combinação de $U + pV$. Ou seja

$$H = U + pV \quad (11)$$

Para a entalpia específica, consideramos a entalpia uma função com diferencial exata.

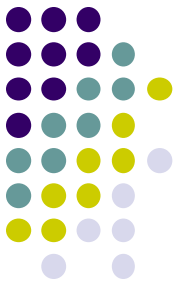
$$H = H(T, p), \text{ diferenciando-se: } dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp$$

Como: $\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = C_p$ e considerando-se que a pressões moderadas $\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T$ é:

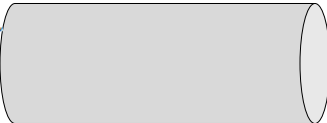
relativamente pequeno chega-se a:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (12)$$

EXEMPLOS



1. Água flui para dentro de uma unidade de processo através de uma tubulação de 2cm de diâmetro interno (DI), com uma vazão de 2,0 m³/h. Calcule a $\dot{E}_c$ para esta corrente em joules/segundo.

$\dot{V} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$  DI = 2cm

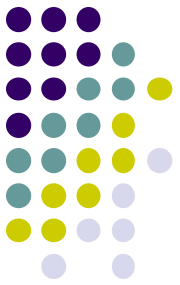
$$\dot{E}_c = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2$$

Inicialmente, vamos calcular a velocidade linear, que é a vazão volumétrica dividida pela área da seção transversal da tubulação. Assim, tem-se:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \text{ (m/s)}$$

$$A = \pi r^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$v = \frac{2,0 \text{ m}^3}{\text{h}} \left| \frac{1}{\pi(1)^2 \text{ cm}^2} \right| \left| \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1^2 \text{ m}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \rightarrow v = 1,77 \text{ m/s}$$



Tendo que:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

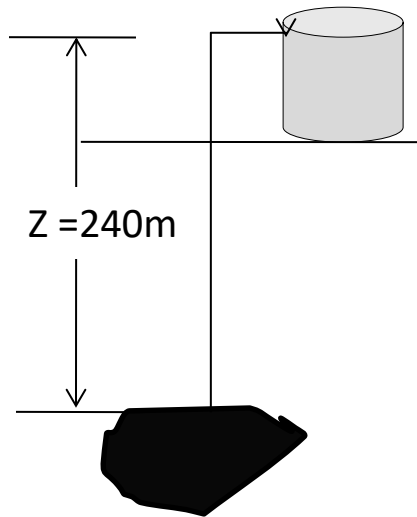
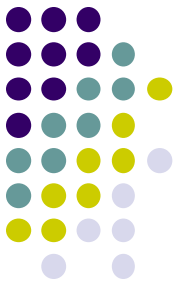
$$\dot{m} = \frac{2,0 \text{ m}^3}{h} \left| \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right| \frac{1h}{3600s} \quad \rightarrow \quad \dot{m} = 0,556 \text{ kg/s}$$

Substituindo os valores na equação de $\dot{E}_c$, *tem-se*:

$$\dot{E}_c = \frac{0,556 \text{ kg/s}}{2} \left| \frac{(1,77)^2 \text{ m}^2}{\text{s}^2} \right| \frac{1\text{N}}{1 \text{ kg.m/s}^2}$$

$$\dot{E}_c = 0,870 \text{ N.m/s} = 0,870 \text{ J/s}$$

2. Petróleo cru é bombeado com uma vazão de 15 kg/s de um poço a 220m de profundidade até um tanque de armazenamento situado a 20 m acima do nível do chão. Calcule a taxa de aumento da energia potencial.

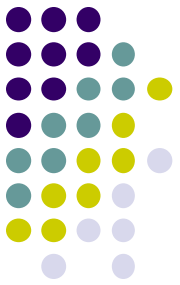


$$\Delta \dot{E}_p = \dot{E}_{p2} - \dot{E}_{p1} = \dot{m}g (z_2 - z_1)$$

$$\Delta \dot{E}_p = \frac{15 \text{ kg}}{\text{s}} \mid \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \mid \frac{[20 - (-220)] \text{ m}}{}$$

$$\Delta \dot{E}_p = = 35.316 \text{ N.m/s (J/s)}$$

$$\Delta \dot{E}_p = = 35,316 \text{ kN.m/s (J/s)} \rightarrow 35,3 \text{ kW}$$



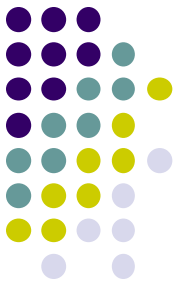
❑ Balanço de Energia em Sistemas Fechados

Desde que a energia não pode ser criada nem destruída, a equação geral de balanço define que:

$$\text{ACÚMULO (E)} = \text{ENTRADA (E)} - \text{SAÍDA (E)} \quad (13)$$

Ao deduzir o balanço de massa para **sistemas fechados**, onde não há passagem de matéria pela fronteira do sistema, o termo ACÚMULO é igual a zero, então: $\text{ENTRADA} = \text{SAÍDA}$

Entretanto, para o balanço de energia para **sistemas fechados**, pode ocorrer transferência de calor ou trabalho através da fronteira do sistema, então o termo ACÚMULO (E) é diferente de zero.



❑ Balanço de Energia em Sistemas Fechados

No balanço de energia, o termo ACÚMULO (E) é dado pela diferença entre os valores final e inicial do sistema (neste caso, a energia do sistema). Assim, tem-se:

$$E_f - E_i = \Delta E_{lt} \quad (14)$$

Onde:

E_f : energia final do sistema

E_i : energia inicial do sistema

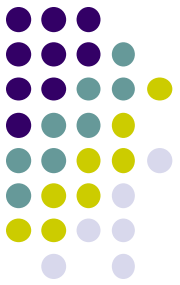
ΔE_{lt} : energia líquida transferida ao sistema (entrada – saída)

Agora:

Energia inicial do sistema: $E_i = U_i + Ec_i + Ep_i$

Energia final do sistema: $E_f = U_f + Ec_f + Ep_f$

Energia transferida: $Q + W$



❑ Balanço de Energia em Sistemas Fechados

Substituindo os valores na equação 14, tem-se:

$$(U_f - U_i) + (Ec_f - Ec_i) + (Ep_f - Ep_i) = Q + W \quad (15)$$

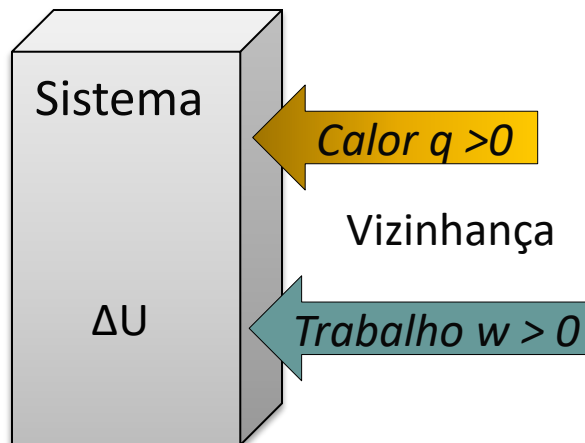
Onde:

U_f : energia interna final

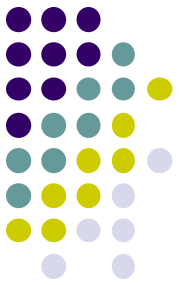
U_i : energia interna inicial

Q : calor transferido da vizinhança para o sistema (+)

W : trabalho exercido pela vizinhança sobre o sistema (+)



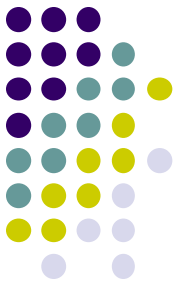
$$\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = \Delta E = Q + W \quad (16)$$



❑ Balanço de Energia em Sistemas Fechados

A equação 1.25 é a forma básica da **Primeira Lei da Termodinâmica** para um sistema fechado. Ao aplicar esta equação, alguns pontos importantes devem ser observados:

1. A energia interna (U) depende da composição química, do estado de agregação e da temperatura. É independente da pressão para gases ideais e praticamente independente da pressão para líquidos e sólidos. *(Se não há variação de temperatura, mudança de fase ou reação química em um sistema fechado, e se as variações de pressão são mínimas, então $\Delta U \approx 0$);*
2. Se um sistema não está acelerando, então $\Delta E_c = 0$;
3. Se sistema não está subindo ou descendo, então $\Delta E_p = 0$;
4. Se sistema e vizinhança estão à mesma temperatura ou sistema está isolado, então $Q = 0$;
5. O trabalho feito sobre ou pelo sistema fechado é acompanhado de um movimento de sua fronteira ou pela passagem de corrente elétrica ou radiação. *(Se não há partes moveis, corrente elétrica ou radiação através da fronteira, então $W = 0$).*



❑ EXEMPLOS

1. O fluido contido num tanque é movimentado por um agitador. O trabalho fornecido ao agitador é 5090KJ. O calor transferido do tanque é de 1500 KJ. Considerando o tanque e o fluido como sistema, determine a variação de energia do sistema nesse processo.

Solução:

Seja a equação 1.24:

$$(U_f - U_i) + (Ec_f - Ec_i) + (Ep_f - Ep_i) = Q + W$$

Reescrevendo esta equação, tem-se:

$$U_2 - U_1 + \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2} + m.g(Z_2 - Z_1) = {}_1Q_2 + {}_1W_2$$

Como não há variação de energia cinética e nem de energia potencial, essa equação fica reduzida a:

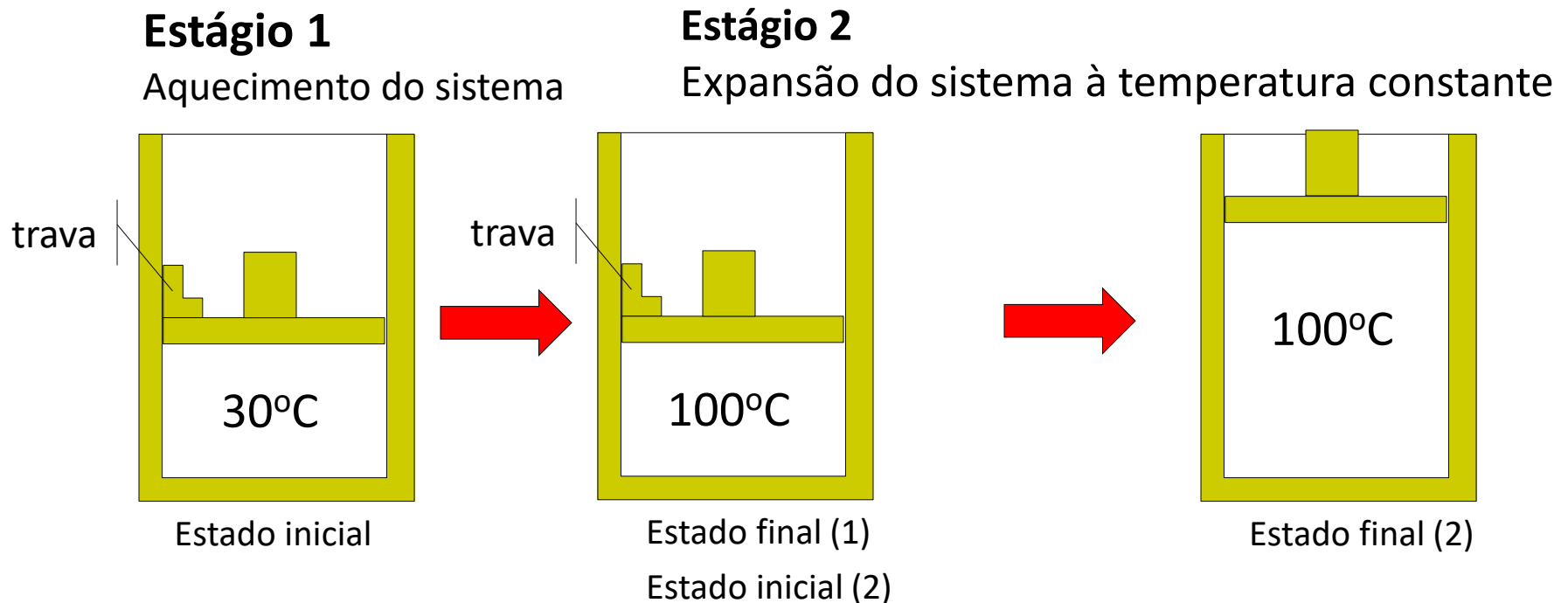
$$U_2 - U_1 = {}_1Q_2 + {}_1W_2$$

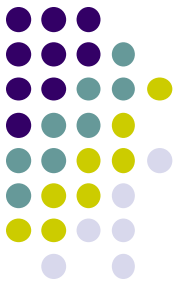
$$U_2 - U_1 = -1500 + 5090 = 3590 \text{ KJ}$$



2. Um gás está contido em um cilindro provido de um pistão. A temperatura inicial do gás é 30°C . O cilindro é colocado em um banho a 100°C , com o pistão fixo em uma determinada posição. Transfere-se calor na quantidade de 12 Kcal para o sistema até que este atinja o equilíbrio a 100°C , fazendo com que haja aumento da pressão. Então, o pistão é liberado e o gás exerce 18.000 J de trabalho sobre a vizinhança. Obtenha a energia interna total do processo, em J.

Solução:





Estágio 1

Usando a equação 1.25, tem-se:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta E = Q + W$$

Desprezando as variações de E_p e de E_c e assumindo que o gás se comporta como gás ideal, tem-se para o estágio 1: $W = 0$; $Q > 0$ (o gás recebe calor da vizinhança), logo:

$$\Delta U_1 = Q_1 = 12 \text{ kcal} = 50,2 \text{ KJ}$$

Estágio 2

No estágio 2: $Q = 0$ (expansão isotérmica), U varia com T e $W < 0$ (gás realiza trabalho sobre a vizinhança), logo:

$$\Delta U_2 = -W = -18 \text{ kJ}$$

Então, a variação de energia interna do processo é dada por: $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$

$$\Delta U = 50,2 - 18 = 32,2 \text{ KJ}$$



3. Considere uma pedra de massa 10 kg e um tanque que contém 100 kg de água. Inicialmente, a pedra está 10,2 m acima da água e ambas estão à mesma temperatura (estado 1). Então, a pedra cai dentro da água. Admitindo que a aceleração da gravidade é igual a 9,81, determine ΔU , ΔE_c , ΔE_p , Q e W . para os seguintes estados finais:

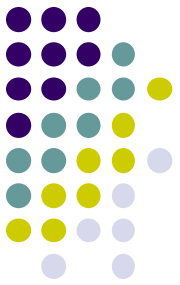
- a) A pedra imediatamente antes de penetrar na água (estado 2);
- b) A pedra acabou de entrar em repouso no tanque (estado 3);
- c) O calor foi transferido para o ambiente de modo que a pedra e a água apresentam temperaturas uniformes e iguais à temperatura inicial (estado 4).

Solução:

Usando a equação 1.25, tem-se:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta E = {}_1Q_2 + {}_1W_2$$

Os termos da equação devem ser identificados para cada mudança de estado, assim, tem-se:



a) A pedra está prestes a penetrar na água (2)

Admitindo que não tenha havido transferência de calor para a pedra ou dela, durante a sua queda, concluímos que durante essa mudança de estado:

$${}_1Q_2 = 0 \quad {}_1W_2 = 0 \quad \Delta U = 0$$

Assim, a equação 1.25 fica reduzida a:

$$0 + \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta E = 0 + 0$$

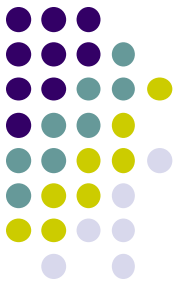
$$- \Delta E_c = \Delta E_p = m \cdot g \cdot (Z_2 - Z_1)$$

$$- \Delta E_c = \Delta E_p = 10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0 - 10,2) \text{ m}$$

$$- \Delta E_c = \Delta E_p = - 1000,62 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = - 1 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_c = 1 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_p = - 1 \text{ kJ}$$



b) Imediatamente após a pedra parar no tanque (3)

Admitindo que não tenha havido transferência de calor para a pedra ou dela, durante a sua queda, concluímos que durante essa mudança de estado:

$${}_2Q_3 = 0 \quad {}_2W_3 = 0 \quad \Delta E_p = 0$$

Assim, a equação 1.25 fica reduzida a:

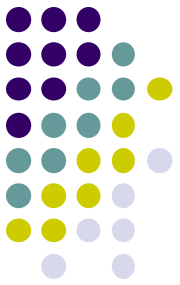
$$\Delta U + \Delta E_c = 0$$

$$\Delta U = -\Delta E_c = -1 \text{ kJ}$$

c) No estado final (4), não há energia cinética ou potencial, e a energia interna é a mesma do estado 3.

$$\Delta U + 0 + 0 = {}_3Q_4 + 0$$

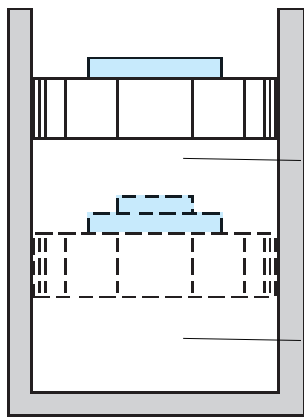
$$\Delta U = {}_3Q_4 = -1 \text{ kJ}$$



4. Suponha que certa quantidade de gás ideal a 300K e 200KPa esteja contido em um cilindro dotado de pistão sem atrito. O gás empurra lentamente o pistão, de forma que o volume se expanda de 0,1 a 0,2 m³. Calcule o trabalho realizado pelo gás sobre o pistão, admitindo duas possíveis trajetórias diferentes na evolução do estado inicial ao estado final:

- ✓ Trajetória A: a expansão ocorre a pressão constante (isobárica): $P = 200\text{KPa}$
- ✓ Trajetória B: a expansão ocorre a temperatura constante (isotérmica): $T = 300\text{K}$

Solução:

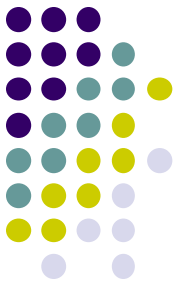


Tendo o volume e a pressão, calcula-se n:

$$n = \frac{P.V}{RT}$$

$n =$	$200 \times 10^3 \text{ Pa}$	$0,1 \text{ m}^3$	$1 \text{ Kmol} \cdot \text{K}$
		300 K	$8,314 \text{ KPa} \cdot \text{m}^3$

$$n = 0,00802 \text{ kmol}$$



Trajetória A: $p = 200 \text{ KPa}$ (cte):

$$W = -P_{ext} \int_{V_1}^{V_2} dV \qquad W = -p \cdot (V_2 - V_1)$$

$W =$	$\frac{200 \times 10^3 \text{ Pa}}{}$	$\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}}$	$\frac{0,1 \text{ m}^3}{}$	$\frac{1 \text{ J}}{\text{N} \cdot \text{m}}$
-------	---------------------------------------	---	----------------------------	---

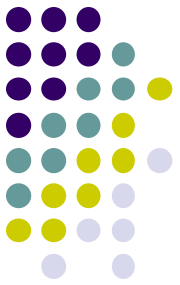
$W = \quad - 20 \text{ KJ}$

Trajetória B: $T = \text{cte}$, gás ideal. Logo:

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \qquad W = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$W =$	$\frac{0,00802 \text{ kmol}}{}$	$\frac{8,314 \text{ kJ}}{\text{Kmol} \cdot \text{k}}$	$\frac{300 \text{ k}}{}$	$\ln 2$
-------	---------------------------------	---	--------------------------	---------

$W = \quad - 13,86 \text{ KJ}$



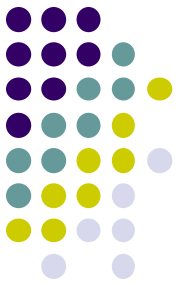
□ Balanço de energia em sistemas abertos

A expressão geral da primeira lei da termodinâmica (equação: $\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta E = Q + W$), quando aplicada a sistemas fechados, os quais, frequentemente, não sofrem variações das energias potencial ou cinética (em relação a um nível de referência).

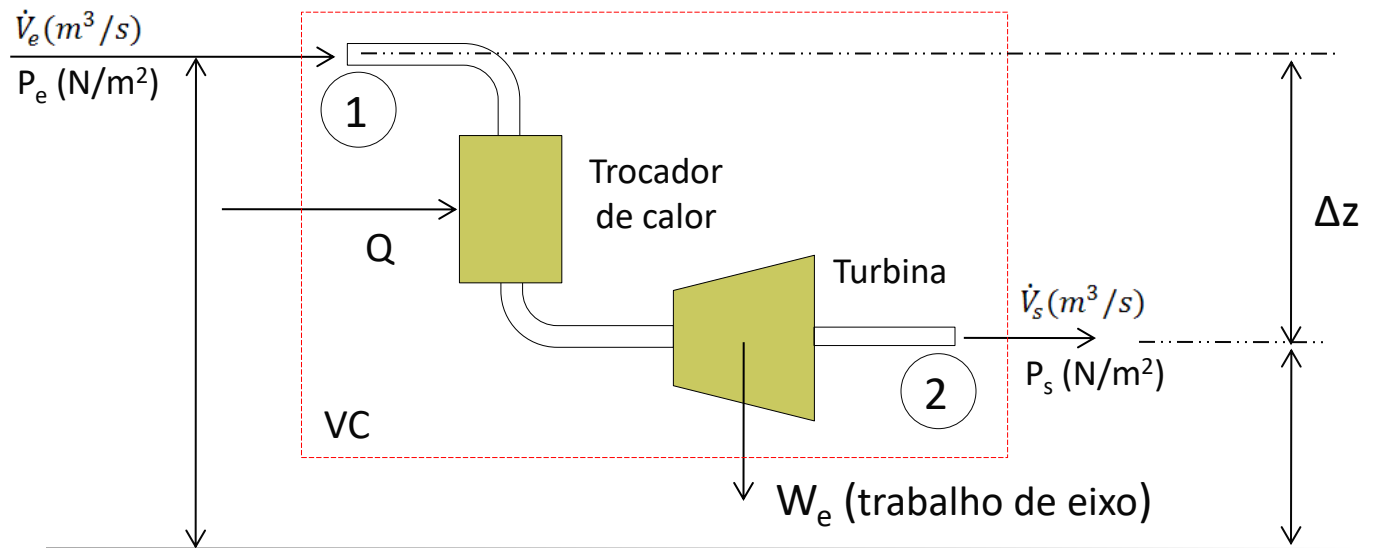
A equação 16 é a forma básica da primeira lei da termodinâmica para um sistema fechado (*processos estacionários, em que a massa no interior do sistema é constante*), onde só ocorrem modificações da energia interna do sistema.

Do ponto de vista industrial, os processos mais importantes são os que envolvem o escoamento permanente de um fluido através de um ou mais equipamentos. Nestes processos, é preciso usar a expressão geral da primeira lei da termodinâmica.

Balanço de Energia

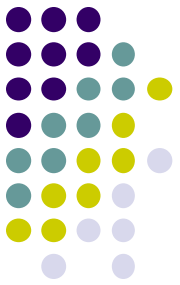


Inicialmente, considerando-se os processos físicos, sem reação química, em que a massa e energia atravessam a fronteira do sistema, como o apresentado no esquema abaixo, onde ...



Processo contínuo (sem reação química) e sistema aberto

$W_e \rightarrow$ é o trabalho transmitido pelo eixo através da superfície de controle



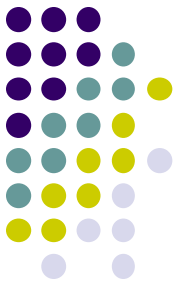
Além do trabalho de eixo, há o trabalho feito pela vizinhança sobre o sistema para introduzir o fluido no sistema e do sistema sobre a vizinhança para retirar o fluido do sistema.

Assim, o trabalho líquido por unidade de tempo ($\dot{W}$) realizado sobre um sistema aberto pelas vizinhanças pode ser escrito como:

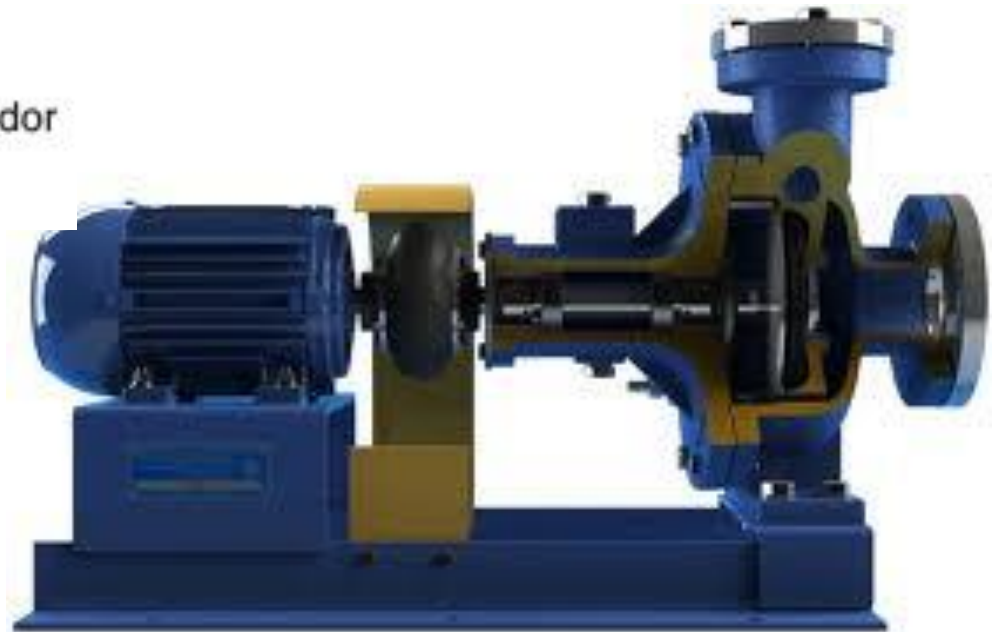
$$\dot{W} = \dot{W}_e + \dot{W}_f \quad (17)$$

Onde:

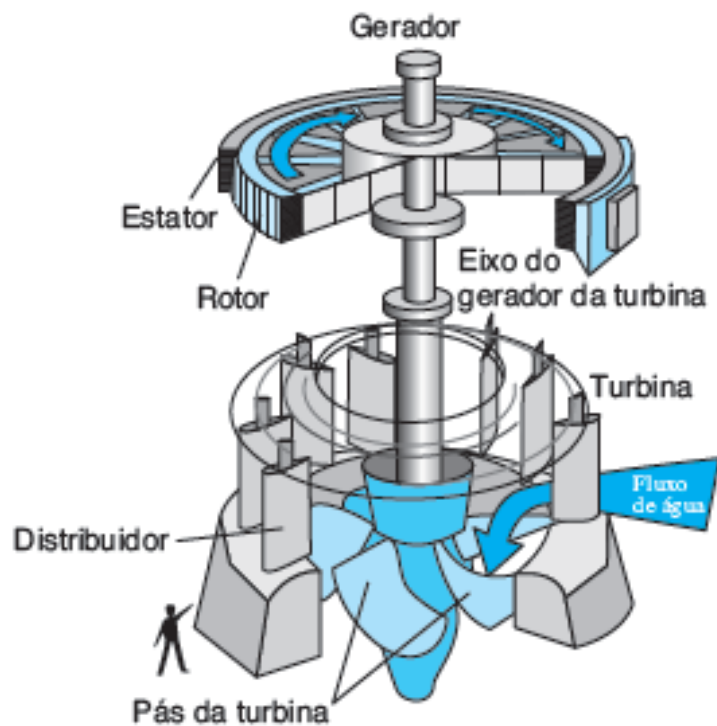
- $\dot{W}$: trabalho líquido realizado pela vizinhança sobre o sistema
- $\dot{W}_e$: trabalho de eixo ou trabalho realizado sobre ou pelo fluido por partes móveis dentro do sistema (ex.: **rotor** de uma bomba ou uma **turbina**)
- $\dot{W}_f$: é o trabalho de fluxo ou $P\dot{V}$. É o trabalho líquido devido ao fluxo de matéria pelo sistema ou o trabalho realizado sobre o fluido na entrada menos o trabalho realizado pelo fluido na saída do sistema



Bomba centrífuga



Balanço de Energia

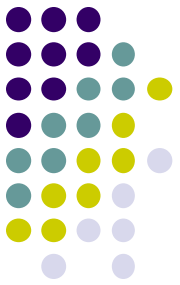


Turbina hidráulica

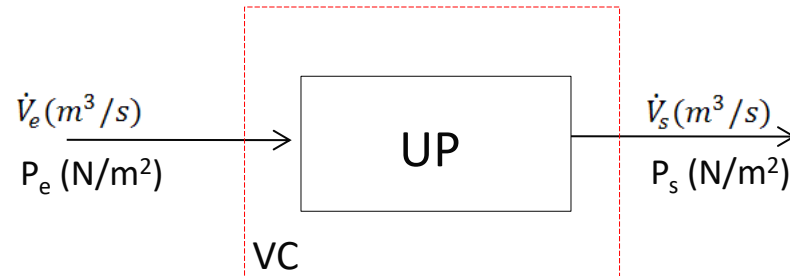
Pás da
turbina



Balanço de Energia



Voltando ao processo contínuo (sem reação química) e sistema aberto, conforme representado abaixo:



Como $\dot{W}_f$ é o trabalho de fluxo ou $P\dot{V}$, tem-se que:

✓ Fluido que entra na unidade de processo

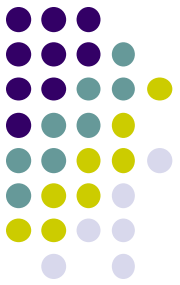
$$\dot{W}_e = P_e \left(\frac{N}{m^2} \right) \cdot \dot{V}_e \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$\dot{W}_e = \left[\frac{N \cdot m}{s} \equiv \frac{J}{s} \equiv W_{att} \right]$$

✓ Fluido que deixa a unidade de processo

$$\dot{W}_s = P_s \left(\frac{N}{m^2} \right) \cdot \dot{V}_s \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$\dot{W}_s = \left[\frac{N \cdot m}{s} \equiv \frac{J}{s} \equiv W_{att} \right]$$



Logo, o fluxo líquido de trabalho realizado sobre o sistema será:

$$\dot{W}_f = P_e \cdot \dot{V}_e - P_s \cdot \dot{V}_s \quad (18)$$

Se várias correntes entram e saem de uma unidade de processo, o trabalho de fluxo ($\dot{W}_f$) será então:

$$\dot{W}_f = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \dot{V}_i - \sum_{j=1}^n P_j \cdot \dot{V}_j \quad (19)$$

O balanço de energia para sistema aberto em regime permanente é dado pela expressão:

$$\text{ENTRA (E)} = \text{SAI (E)} \quad (20)$$

Isso porque não há acúmulo de energia, estado estacionário, e também não aparecem os termos de geração e consumo de energia, visto que a energia não pode ser criada e nem destruída.



Em se tratando de fluxo de energia entre sistema e vizinhança, bem como considerando várias correntes que entram e saem do sistema, tem-se:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \underbrace{\sum_{j=1}^n \dot{E}_j}_{\text{sai}} - \underbrace{\sum_{i=1}^n \dot{E}_i}_{\text{entra}} \quad (21)$$

E sabendo que:

Energia que entra no sistema: $\dot{E}_i = \dot{U}_i + \dot{E}_{ci} + \dot{E}_{pi}$

Energia que sai do sistema: $\dot{E}_j = \dot{U}_j + \dot{E}_{cj} + \dot{E}_{pj}$

Tem-se:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{j=1}^n (\dot{U}_j + \dot{E}_{cj} + \dot{E}_{pj}) - \sum_{i=1}^n (\dot{U}_i + \dot{E}_{ci} + \dot{E}_{pi}) \quad (22)$$

Balanço de Energia



Vale lembrar que $\dot{U}$, $\dot{E}_c$ e $\dot{E}_p$ são propriedades extensivas, isto é, são proporcionais à massa do material. É interessante expressá-las com base nas *propriedades específicas ou intensivas*. Logo, tem-se:

$$\dot{U} = \dot{m} \left(\frac{Kg}{s} \right) \cdot \hat{U} \left(\frac{KJ}{Kg} \right) \quad (1.33) \quad \dot{U} = \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

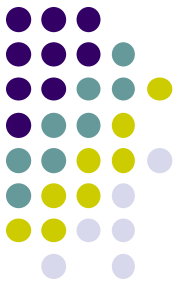
$$\dot{E}_p = \dot{m} \left(\frac{Kg}{s} \right) \cdot \hat{E}_p \left(\frac{KJ}{Kg} \right) \quad (1.34) \quad \dot{E}_p = \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

$$\dot{E}_c = \dot{m} \left(\frac{Kg}{s} \right) \cdot \hat{E}_c \left(\frac{KJ}{Kg} \right) \quad (1.35) \quad \dot{E}_c = \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

$$\dot{V} = \dot{m} \left(\frac{Kg}{s} \right) \cdot \hat{V} \left(\frac{m^3}{Kg} \right) \quad (1.36) \quad \dot{V} = \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Substituindo a equação 1.36 na equação 1.29, tem-se:

$$\dot{W}_f = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot P_i \cdot \hat{V}_i - \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot P_j \cdot \hat{V}_j \quad (23)$$



Substituindo as equações, tem-se:

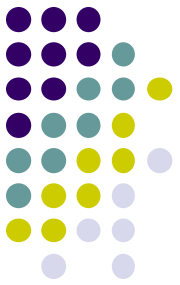
$$\dot{W} = \underbrace{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot P_i \cdot \hat{V}_i - \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot P_j \cdot \hat{V}_j}_{\dot{W}_f} + W_e \quad (24)$$

Substituindo as equações novamente as equações, tem-se:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot (\hat{U}_j + \hat{E}_{cj} + \hat{E}_{pj}) - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot (\hat{U}_i + \hat{E}_{ci} + \hat{E}_{pi}) \\ &= \dot{Q} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot P_i \cdot \hat{V}_i - \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot P_j \cdot \hat{V}_j + \dot{W}_e \end{aligned}$$

Reorganizando a equação, tem-se:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot (\hat{U}_j + P_j \cdot \hat{V}_j + \hat{E}_{cj} + \hat{E}_{pj}) \\ & - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot (\hat{U}_i + P_i \cdot \hat{V}_i + \hat{E}_{ci} + \hat{E}_{pi}) = \dot{Q} + \dot{W}_e \end{aligned} \quad (25)$$



Sendo:

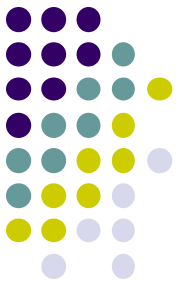
$$\hat{H} = \hat{U} + P.\hat{V} \quad (26)$$

A equação 26 é a entalpia específica do sistema, logo:

$$\underbrace{\sum_{j=1}^n \dot{m}_j . (\hat{H}_j + \hat{E}_{cj} + \hat{E}_{pj})}_{\text{sai}} - \underbrace{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i . (\hat{H}_i + \hat{E}_{ci} + \hat{E}_{pi})}_{\text{entra}} = \dot{Q} + \dot{W}_e \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n \dot{m}_j . \left(\hat{H}_j + \frac{v_j^2}{2} + g.z_j \right) - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i . \left(\hat{H}_i + \frac{v_i^2}{2} + g.z_i \right) = \dot{Q} + \dot{W}_e \quad (28)$$

As equações 27 e 28 são as formas gerais de balanço de energia para sistemas abertos no estado estacionário



Tendo-se apenas uma corrente entrando na UP e uma corrente saindo dela a equação 1.42 pode ser escrita como:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_s - \dot{E}_e = \dot{m} \cdot \left[(\hat{H}_s - \hat{H}_e) + \frac{v_s^2 - v_e^2}{2} + g \cdot (z_s - z_e) \right] = \dot{Q} + \dot{W}_e \quad (29)$$

Ou ainda:

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} + \dot{W}_e \quad (30)$$

Simplificações importantes

Se não há partes móveis no sistema:	$\dot{W}_e = 0$
Se o sistema é isolado termicamente ou o sistema e as vizinhanças estão à mesma temperatura:	$\dot{Q} = 0$
Se as velocidades lineares são as mesmas:	$\Delta \dot{E}_c = 0$
Se não há diferença de altura entre as correntes de entrada e saída	$\Delta \dot{E}_p = 0$

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v_l</i>	<i>v_v</i>	<i>u_l</i>	<i>u_{lv}</i>	<i>u_v</i>	<i>h_l</i>	<i>h_{lv}</i>	<i>h_v</i>	<i>s_l</i>	<i>s_{lv}</i>	<i>s_v</i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271

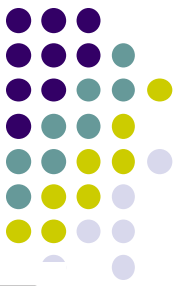


Tabela B.1.3

Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	$P = 10 \text{ kPa (45,81)}$				$P = 50 \text{ kPa (81,33)}$				$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$			
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	14,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182

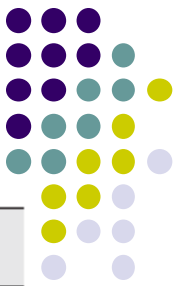


Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 1600 \text{ kPa (201,40)}$					$P = 1800 \text{ kPa (207,15)}$				$P = 2000 \text{ kPa (212,42)}$			
Sat.	0,12380	2595,95	2794,02	6,4217	0,11042	2598,38	2797,13	6,3793	0,09963	2600,26	2799,51	6,3408
250	0,14184	2692,26	2919,20	6,6732	0,12497	2686,02	2910,96	6,6066	0,11144	2679,58	2902,46	6,5452
300	0,15862	2781,03	3034,83	6,8844	0,14021	2776,83	3029,21	6,8226	0,12547	2772,56	3023,50	6,7663
350	0,17456	2866,05	3145,35	7,0693	0,15457	2862,95	3141,18	7,0099	0,13857	2859,81	3136,96	6,9562
400	0,19005	2950,09	3254,17	7,2373	0,16847	2947,66	3250,90	7,1793	0,15120	2945,21	3247,60	7,1270
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16353	3030,41	3357,48	7,2844
500	0,22029	3119,47	3471,93	7,5389	0,19550	3117,84	3469,75	7,4824	0,17568	3116,20	3467,55	7,4316
600	0,24998	3293,27	3693,23	7,8080	0,22199	3292,10	3691,69	7,7523	0,19960	3290,93	3690,14	7,7023
700	0,27937	3472,74	3919,73	8,0535	0,24818	3471,87	3918,59	7,9983	0,22323	3470,99	3917,45	7,9487
800	0,30859	3658,40	4152,15	8,2808	0,27420	3657,71	4151,27	8,2258	0,24668	3657,03	4150,40	8,1766
900	0,33772	3850,47	4390,82	8,4934	0,30012	3849,90	4390,11	8,4386	0,27004	3849,33	4389,40	8,3895
1000	0,36678	4048,96	4635,81	8,6938	0,32598	4048,45	4635,21	8,6390	0,29333	4047,94	4634,61	8,5900
1100	0,39581	4253,66	4886,95	8,8837	0,35180	4253,18	4886,42	8,8290	0,31659	4252,71	4885,89	8,7800
1200	0,42482	4464,18	5143,89	9,0642	0,37761	4463,71	5143,40	9,0096	0,33984	4463,25	5142,92	8,9606
1300	0,45382	4679,92	5406,02	9,2364	0,40340	4679,44	5405,56	9,1817	0,36306	4678,97	5405,10	9,1328



Tabela B.5.1
R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado $v_{f=l}$	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
-70	8,3	0,000675	1,97207	1,97274	119,46	218,74	338,20	119,47	235,15	354,62	0,6645	1,1575	1,8220
-65	11,7	0,000679	1,42915	1,42983	123,18	217,76	340,94	123,18	234,55	357,73	0,6825	1,1268	1,8094
-60	16,3	0,000684	1,05199	1,05268	127,52	216,19	343,71	127,53	233,33	360,86	0,7031	1,0947	1,7978
-55	22,2	0,000689	0,78609	0,78678	132,36	214,14	346,50	132,37	231,63	364,00	0,7256	1,0618	1,7874
-50	29,9	0,000695	0,59587	0,59657	137,60	211,71	349,31	137,62	229,54	367,16	0,7493	1,0286	1,7780
-45	39,6	0,000701	0,45783	0,45853	143,15	208,99	352,15	143,18	227,14	370,32	0,7740	0,9956	1,7695
-40	51,8	0,000708	0,35625	0,35696	148,95	206,05	355,00	148,98	224,50	373,48	0,7991	0,9629	1,7620
-35	66,8	0,000715	0,28051	0,28122	154,93	202,93	357,86	154,98	221,67	376,64	0,8245	0,9308	1,7553
-30	85,1	0,000722	0,22330	0,22402	161,06	199,67	360,73	161,12	218,68	379,80	0,8499	0,8994	1,7493
-26,3	101,3	0,000728	0,18947	0,19020	165,73	197,16	362,89	165,80	216,36	382,16	0,8690	0,8763	1,7453
-25	107,2	0,000730	0,17957	0,18030	167,30	196,31	363,61	167,38	215,57	382,95	0,8754	0,8687	1,7441
-20	133,7	0,000738	0,14576	0,14649	173,65	192,85	366,50	173,74	212,34	386,08	0,9007	0,8388	1,7395
-15	165,0	0,000746	0,11932	0,12007	180,07	189,32	369,39	180,19	209,00	389,20	0,9258	0,8096	1,7354
-10	201,7	0,000755	0,09845	0,09921	186,57	185,70	372,27	186,72	205,56	392,28	0,9507	0,7812	1,7319

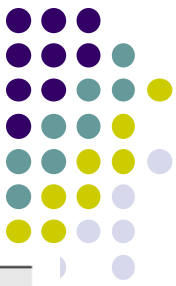


Tabela B.5.1
R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado $v_{f,l}$	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
-5	244,5	0,000764	0,08181	0,08257	193,14	182,01	375,15	193,32	202,02	395,34	0,9755	0,7534	1,7288
0	294,0	0,000773	0,06842	0,06919	199,77	178,24	378,01	200,00	198,36	398,36	1,0000	0,7262	1,7262
5	350,9	0,000783	0,05755	0,05833	206,48	174,38	380,85	206,75	194,57	401,32	1,0243	0,6995	1,7239
10	415,8	0,000794	0,04866	0,04945	213,25	170,42	383,67	213,58	190,65	404,23	1,0485	0,6733	1,7218
15	489,5	0,000805	0,04133	0,04213	220,10	166,35	386,45	220,49	186,58	407,07	1,0725	0,6475	1,7200
20	572,8	0,000817	0,03524	0,03606	227,03	162,16	389,19	227,49	182,35	409,84	1,0963	0,6220	1,7183
25	666,3	0,000829	0,03015	0,03098	234,04	157,83	391,87	234,59	177,92	412,51	1,1201	0,5967	1,7168
30	771,0	0,000843	0,02587	0,02671	241,14	153,34	394,48	241,79	173,29	415,08	1,1437	0,5716	1,7153
35	887,6	0,000857	0,02224	0,02310	248,34	148,68	397,02	249,10	168,42	417,52	1,1673	0,5465	1,7139
40	1017,0	0,000873	0,01915	0,02002	255,65	143,81	399,46	256,54	163,28	419,82	1,1909	0,5214	1,7123
45	1160,2	0,000890	0,01650	0,01739	263,08	138,71	401,79	264,11	157,85	421,96	1,2145	0,4962	1,7106
50	1318,1	0,000908	0,01422	0,01512	270,63	133,35	403,98	271,83	152,08	423,91	1,2381	0,4706	1,7088

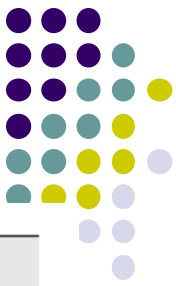


Tabela B.5.2
R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
50 kPa (−40,67 °C)					100 kPa (−26,54 °C)				150 kPa (−17,29 °C)			
Sat.	0,36889	354,61	373,06	1,7629	0,19257	362,73	381,98	1,7456	0,13139	368,06	387,77	1,7372
−20	0,40507	368,57	388,82	1,8279	0,19860	367,36	387,22	1,7665				
−10	0,42222	375,53	396,64	1,8582	0,20765	374,51	395,27	1,7978	0,13602	373,44	393,84	1,7606
0	0,43921	382,63	404,59	1,8878	0,21652	381,76	403,41	1,8281	0,14222	380,85	402,19	1,7917
10	0,45608	389,90	412,70	1,9170	0,22527	389,14	411,67	1,8578	0,14828	388,36	410,60	1,8220
20	0,47287	397,32	420,96	1,9456	0,23392	396,66	420,05	1,8869	0,15424	395,98	419,11	1,8515
30	0,48958	404,90	429,38	1,9739	0,24250	404,31	428,56	1,9155	0,16011	403,71	427,73	1,8804
40	0,50623	412,64	437,96	2,0017	0,25101	412,12	437,22	1,9436	0,16592	411,59	436,47	1,9088
50	0,52284	420,55	446,70	2,0292	0,25948	420,08	446,03	1,9712	0,17168	419,60	445,35	1,9367
60	0,53941	428,63	455,60	2,0563	0,26791	428,20	454,99	1,9985	0,17740	427,76	454,37	1,9642
70	0,55595	436,86	464,66	2,0831	0,27631	436,47	464,10	2,0255	0,18308	436,06	463,53	1,9913
80	0,57247	445,26	473,88	2,1096	0,28468	444,89	473,36	2,0521	0,18874	444,52	472,83	2,0180
90	0,58896	453,82	483,26	2,1358	0,29302	453,47	482,78	2,0784	0,19437	453,13	482,28	2,0444
100	0,60544	462,53	492,81	2,1617	0,30135	462,21	492,35	2,1044	0,19999	461,89	491,89	2,0705
110	0,62190	471,41	502,50	2,1874	0,30967	471,11	502,07	2,1301	0,20559	470,80	501,64	2,0963
120	0,63835	480,44	512,36	2,2128	0,31797	480,16	511,95	2,1555	0,21117	479,87	511,54	2,1218
130	0,65479	489,63	522,37	2,2379	0,32626	489,36	521,98	2,1807	0,21675	489,08	521,60	2,1471
140									0,22231	498,45	531,80	2,1720

**TABELA B.5.2** (continuação)

R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
1000 kPa (39,37°C)					1200 kPa (46,31°C)				1400 kPa (52,42°C)			
Sat.	0,02038	399,16	419,54	1,7125	0,01676	402,37	422,49	1,7102	0,01414	404,98	424,78	1,7077
40	0,02047	399,78	420,25	1,7148	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,02185	409,39	431,24	1,7494	0,01724	406,15	426,84	1,7237	-	-	-	-
60	0,02311	418,78	441,89	1,7818	0,01844	416,08	438,21	1,7584	0,01503	413,03	434,08	1,7360
70	0,02429	428,05	452,34	1,8127	0,01953	425,74	449,18	1,7908	0,01608	423,20	445,72	1,7704
80	0,02542	437,29	462,70	1,8425	0,02055	435,27	459,92	1,8217	0,01704	433,09	456,94	1,8026
90	0,02650	446,53	473,03	1,8713	0,02151	444,74	470,55	1,8514	0,01793	442,83	467,93	1,8333
100	0,02754	455,82	483,36	1,8994	0,02244	454,20	481,13	1,8801	0,01878	452,50	478,79	1,8628
110	0,02856	465,18	493,74	1,9268	0,02333	463,71	491,70	1,9081	0,01958	462,17	489,59	1,8914
120	0,02956	474,62	504,17	1,9537	0,02420	473,27	502,31	1,9354	0,02036	471,87	500,38	1,9192
130	0,03053	484,16	514,69	1,9801	0,02504	482,91	512,97	1,9621	0,02112	481,63	511,19	1,9463
140	0,03150	493,81	525,30	2,0061	0,02587	492,65	523,70	1,9884	0,02186	491,46	522,05	1,9730
150	0,03244	503,57	536,02	2,0318	0,02669	502,48	534,51	2,0143	0,02258	501,37	532,98	1,9991
160	0,03338	513,46	546,84	2,0570	0,02750	512,43	545,43	2,0398	0,02329	511,39	543,99	2,0248
170	0,03431	523,46	557,77	2,0820	0,02829	522,50	556,44	2,0649	0,02399	521,51	555,10	2,0502
180	0,03523	533,60	568,83	2,1067	0,02907	532,68	567,57	2,0898	0,02468	531,75	566,30	2,0752