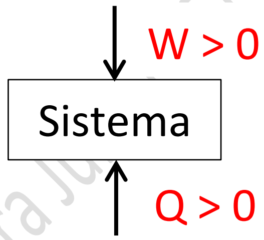
4.2 - Balanço Global de Energia

O princípio da conservação da energia estabelece que a energia total (E) de um sistema de massa constante pode ser alterada em função do calor (Q) e/ou do trabalho (W) transferido entre o sistema e o ambiente externo (vizinhanças). Podemos expressar:

$$\Delta E = \pm Q \pm W$$

A escolha dos sinais utilizados para Q e W depende da convenção adotada. Nossa convenção será:



Assim, se realizamos trabalho sobre o sistema, este trabalho será considerado positivo. Se o sistema realiza trabalho sobre as vizinhanças, este trabalho será negativo. Da mesma maneira, se o calor é introduzido no sistema, será considerado positivo, ou caso contrário será negativo.

A grandeza E representa a energia total contida no sistema:

$$E = E_C + E_P + U$$

E_C = energia cinética;
E_P = energia potencial gravitacional;
U = energia interna (térmica), proporcional à sua temperatura.

Assim, podemos escrever:

$$(E_C + E_P + U)_{final} - (E_C + E_P + U)_{inicial} = Q + W$$

Na equação acima, todas as parcelas têm dimensão de energia, que no SI a unidade é o Joule (J). 1 J = 1 N.m. Porém, as grandezas E_C, E_P e U dependem da massa do sistema (grandezas extensivas) e Q e W não dependem da massa do sistema (grandezas intensivas). Dividindo-se todos os termos da equação acima pela massa do sistema, as grandezas resultantes são chamadas de específicas com relação à massa, assim:

$$\left(\frac{1}{2}V^2 + gz + \hat{U}\right)_{final} - \left(\frac{1}{2}V^2 + gz + \hat{U}\right)_{inicial} = \hat{Q} + \hat{W}$$

Agora, os termos são expressos em energia por unidade de massa (N.m/kg ou J/kg).

Para determinarmos a taxa de acúmulo de energia total no sistema, temos:

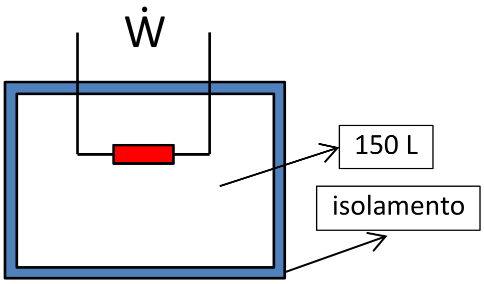
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}$$

Energia por tempo. No SI → J/s ou Watt (W)

$\dot{Q}$ = velocidade ou taxa de transferência de calor entre o sistema e as vizinhanças (potência térmica);

$\dot{W}$ = velocidade ou taxa de intercâmbio de trabalho através da fronteira do sistema (potência mecânica).

Ex. – Um sistema de aquecimento, isolado termicamente, possui uma resistência elétrica com potência de 5000 W. Para aquecimento de 150 L de água até a temperatura de 40 ^oC, qual o tempo necessário? A temperatura inicial da água é de 21 ^oC. Dados da água: ρ = 995 kg/m^3; C_P = 1,0 kcal/kg^oC.



$T_i = 21\ ^oC$ $T_f = 40\ ^oC$ $\rho = 995\ kg/m^3$	$\dot{W} = 5000\ W$ $\dot{Q} = 0$ (isolado) $C_P = 1{,}0\ kcal/kg^oC$.

A variação da energia da água:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} = \dot{W} \quad \rightarrow \quad \frac{dE}{dt} = \dot{W}$$

O termo E corresponde apenas à energia interna U, uma vez que E_C e E_P são nulas neste caso. Podemos escrever:

$$U = mC_PT \quad \rightarrow \quad \frac{d(mC_PT)}{dt} = \dot{W}$$

Assumindo que a massa do sistema é constante, assim como a capacidade calorífica da água, temos:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{W}}{mC_P}$$

Observe que esta equação representa a taxa de variação da temperatura.

Para encontrarmos o valor da temperatura em função do tempo:

$$\int_{T_i}^{T} dT = \frac{\dot{W}}{mC_P}\int_0^t dt \quad \rightarrow \quad \boxed{T - T_i = \frac{\dot{W}}{mC_P}t}$$

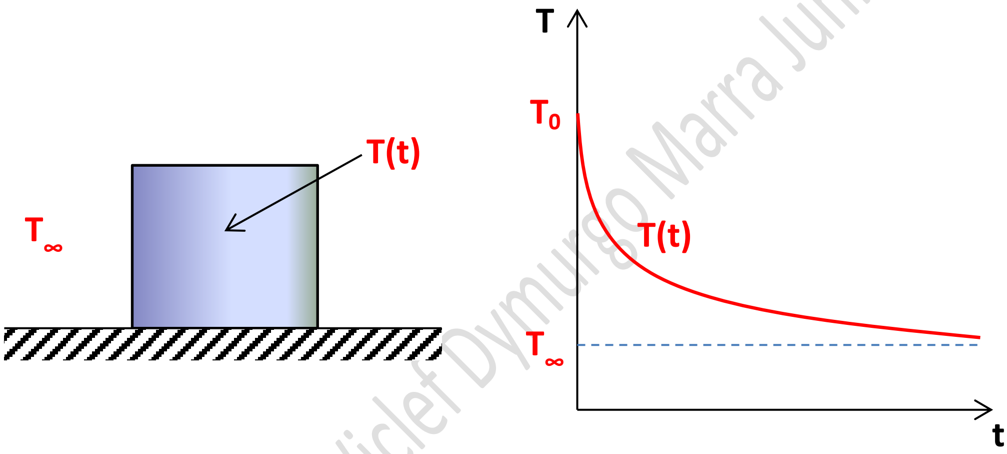
Para os dados do exemplo:

$$C_P = 1000\,\frac{cal}{kg^oC}\left(\frac{1\ J}{0{,}239\ cal}\right) = 4184\ J/kg^oC$$

A massa de água: $m = \rho \, Vol = 995 \times 0{,}150 = 149{,}25$ kg

Portanto: $t = 2373$ s $= 39{,}5$ min

Vamos analisar agora o resfriamento de pequeno bloco metálico com temperatura uniforme T_0, apoiado sobre uma superfície isolante. Em um determinado instante, o bloco é colocado em contato com um ambiente com temperatura T_∞. Considerando $T_0 > T_\infty$, a temperatura do sólido deve diminuir até se igualar à temperatura do ambiente.



O diâmetro do cilindro é D e sua altura é H. Podemos escrever:

$$\frac{dE}{dt} = -\dot{Q} \quad \rightarrow \quad \frac{dU}{dt} = -\dot{Q}$$

O termo E corresponde apenas à energia interna U, uma vez que E_C e E_P são nulas também neste caso.

O calor trocado com o ambiente pode ser estimado pela lei de resfriamento de Newton:

$$\dot{Q} = \bar{h} A \Delta T$$

$\bar{h}$ = coeficiente médio de transferência de calor por convecção ou coeficiente médio de película ($J/s^{o}Cm^{2}$);
A = área da superfície de contato entre o cilindro e o ambiente;
ΔT = diferença de temperatura entre a superfície do cilindro a o ambiente.

Assim:

$$\frac{d(mC_PT)}{dt} = -\bar{h}A(T-T_\infty)$$

Assumindo m, ρ e C_P como constantes, teremos:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\bar{h}A}{\rho C_P Vol}(T-T_\infty)$$

Para uma expressão da temperatura em função do tempo:

$$\int_{T_0}^{T} \frac{dT}{(T-T_\infty)} = \frac{-\bar{h}A}{\rho C_P Vol}\int_0^t dt$$

Lembrete:

$$\int \frac{dx}{(a+bx)} = \frac{1}{b}\ln(a+bx)$$

$$\ln(T-T_\infty)\Big|_{T_0}^{T} = \left(\frac{-\bar{h}A}{\rho C_P Vol}\right)t$$

O termo $\left(\frac{\rho C_P Vol}{\bar{h}A}\right)$ tem unidade de tempo e é chamado de "constante de tempo", τ. Assim:

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{(-t/\tau)}$$

A constante de tempo caracteriza a rapidez do processo, para um valor alto de τ o processo é lento. Para um valor baixo de τ o processo é rápido.

Ex. O experimento descrito no texto anterior foi realizado com um cilindro de alumínio com D = 2,5 cm e H = 4,0 cm. Dados: T_∞=27,2 °C; T_0= 90,3 °C; C_P = 875 J/kg°C; ρ = 2770 kg/m³. Assumindo que $\bar{h}$ = 10 W/(m²)(°C), determine a temperatura do cilindro após 20 minutos.

$$V_{ol}=\frac{\pi D^2}{4}H \qquad \text{(volume do cilindro)}$$

$$A = \pi DH + \frac{\pi D^2}{4} \qquad \text{(área de troca)}$$

$$\tau=\left(\frac{\rho C_P Vol}{\bar{h}A}\right) \qquad \text{(constante de tempo)}$$

$$T = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$$

$$V_{ol}=\frac{\pi 0{,}0025^2}{4}0{,}04=1{,}96\text{x}10^{-5}\text{m}^3$$

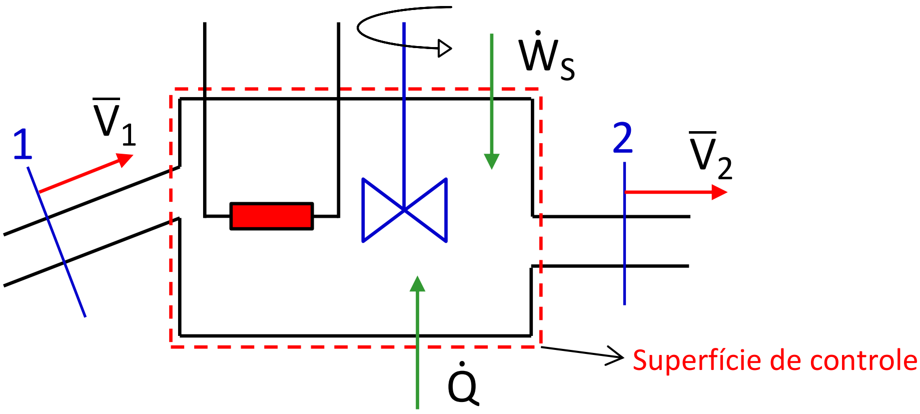
$$A = \pi(0{,}025)(0{,}04) + \frac{\pi 0{,}0025^2}{4}=3{,}63\text{x}10^{-3}\ \text{m}^2$$

$$\tau=\left(\frac{2770\text{x}875\text{x}1{,}96\text{x}10^{-5}}{10\text{x}3{,}63\text{x}10^{-3}}\right)= 1309 \text{ s}$$

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{(-t/\tau)}$$

$$T = 27{,}2 + (90{,}3 - 27{,}3)e^{(-1200/1309)} \rightarrow T = 52{,}4\ ^{o}\text{C}$$

Vamos analisar agora situações sujeitas à troca de massa com o ambiente. Observe o volume de controle abaixo:



O balanço global de energia no volume de controle:

$$\begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{introduzido}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{retirado}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{gerado}\\ \text{internamente}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{consumido}\\ \text{internamente}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{acumulado}\end{pmatrix}$$

Considerando que não há reações químicas:

$$\begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{introduzido}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{retirado}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{acumulado}\end{pmatrix}$$

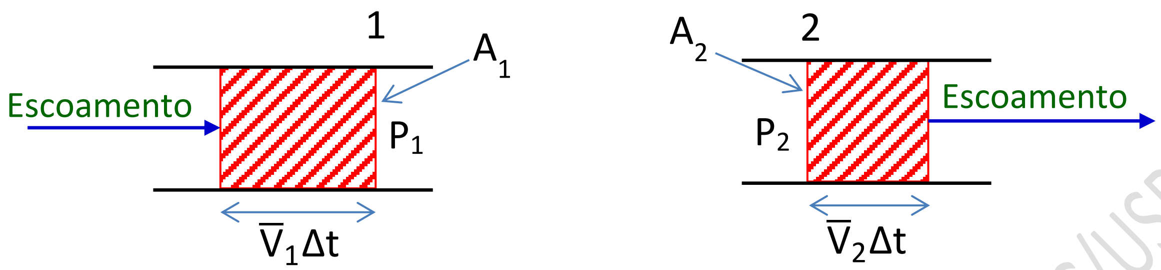
Se o regime é permanente:

$$\begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{introduzido}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Total}\\ \text{retirado}\end{pmatrix}$$

A massa que entre e/ou sai do volume de controle transporta uma quantidade de energia, dada pelo produto:

$$\hat{E}\dot{m} = \hat{E}\rho\overline{V}A$$

O termo do trabalho, W, do balanço global de energia pode ser dividido em duas parcelas. Uma delas, chamada de trabalho de eixo, $\dot{W}_S$, é relativa às contribuições dos agitadores mecânicos, aquecedores elétricos, etc. A outra parcela, chamada de trabalho de fluxo, $\dot{W}_f$, está relacionada ao movimento de entrada e saída de massa. Vamos analisar as seções de entrada e saída do volume de controle:



O volume de fluido que entra no volume de controle, durante um intervalo de tempo Δt, exerce uma força sobre o volume de controle igual a P_1A_1, com um deslocamento de $\overline{V}_1\Delta t$. Portanto, exercendo um trabalho sobre o volume de controle igual a $P_1A_1\overline{V}_1\Delta t$ (força x deslocamento). Na saída teremos $P_2A_2\overline{V}_2\Delta t$ subtraído do volume de controle. Dessa maneira, teremos que considerar essas parcelas energéticas em nosso balanço.

O trabalho de fluxo "líquido" será:

$$\dot{W}_f = P_1A_1\overline{V}_1 - P_2A_2\overline{V}_2$$

Se o regime é permanente:

$$\dot{Q}+\dot{W}_S+\dot{W}_f+\hat{E}_1\rho_1\overline{V}_1A_1-\hat{E}_2\rho_2\overline{V}_2A_2=0$$

$$\dot{Q} + \dot{W}_S + P_1A_1\overline{V}_1 - P_2A_2\overline{V}_2 + \hat{E}_1\rho_1\overline{V}_1A_1 - \hat{E}_2\rho_2\overline{V}_2A_2 = 0$$

A vazão mássica: $\dot{m}=\rho\overline{V}A \quad \rightarrow \quad \overline{V}A=\dfrac{\dot{m}}{\rho}$

$$\dot{Q} + \dot{W}_S + \frac{P_1}{\rho_1}\dot{m}_1 - \frac{P_2}{\rho_2}\dot{m}_2 + \hat{E}_1\dot{m}_1 - \hat{E}_2\dot{m}_2 = 0$$

$$\dot{Q} + \dot{W}_S + \left(\hat{E}_1 + \frac{P_1}{\rho_1}\right)\dot{m}_1 - \left(\hat{E}_2 + \frac{P_2}{\rho_2}\right)\dot{m}_2 = 0$$

$$\hat{E} = \hat{U} + \frac{1}{2}\overline{V}^2 + gz$$

$$\dot{Q} + \dot{W}_S + \left(\hat{U}_1 + \frac{1}{2}\overline{V}_1^2 + gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1}\right)\dot{m}_1 - \left(\hat{U}_2 + \frac{1}{2}\overline{V}_2^2 + gz_2 + \frac{P_2}{\rho_2}\right)\dot{m}_2 = 0$$

Se o regime é permanente: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$.

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_S}{\dot{m}} + \left(\hat{U}_1 + \frac{1}{2}\overline{V}_1^2 + gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1}\right) - \left(\hat{U}_2 + \frac{1}{2}\overline{V}_2^2 + gz_2 + \frac{P_2}{\rho_2}\right) = 0$$

Entalpia é uma grandeza física definida no âmbito da termodinâmica clássica:

$$\hat{H} = \hat{U} + \frac{P}{\rho}$$

Logo:

$$\hat{Q} + \hat{W}_S + \left(\hat{H}_1 + \frac{1}{2}\overline{V}_1^2 + gz_1\right) - \left(\hat{H}_2 + \frac{1}{2}\overline{V}_2^2 + gz_2\right) = 0$$

Podemos escrever:

$$\boxed{\Delta\hat{H} + \frac{\Delta\overline{V}^2}{2} + g\Delta z = \hat{Q} + \hat{W}_S}$$ Balanço Global de Energia

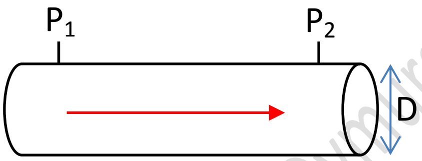
Os termos da equação acima tem unidade de energia/massa. No SI → [J/kg] = [m^2/s^2].

A grandeza "entalpia" será pouco utilizada nos cursos de fenômenos de transporte, seu uso é mais comum em cursos de termodinâmica. Veremos, a seguir, a forma mais usual da equação do balanço global de energia utilizada em nossos cursos.

Balanço de Energia Mecânica

Em muitos processos os fluxos de calor, as variações da energia interna e da entalpia são menos importantes que as variações da energia cinética e da energia potencial ou o trabalho de eixo, como nos casos de movimentação de fluidos em tubulações. Nestes casos, geralmente emprega-se o balanço de energia mecânica.

Considere um fluido incompressível (ρ=cte) escoando, em regime permanente, no interior de um conduto de diâmetro constante:



D = cte
$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$
$V_1 = V_2$

Podemos escrever a equação do balanço global de energia:

$$\frac{\Delta \bar{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta\hat{U} - \hat{Q} = \hat{W}_S$$

Neste caso:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta\hat{U} - \hat{Q} = 0$$

Na prática, observa-se que $P_1 > P_2$ e $T_1 < T_2$. A queda de pressão e o aumento da temperatura são causados pela resistência devido ao atrito. Esta energia é, para todos os fins práticos "perdida", chamada de "perda por atrito", que vamos representar por h_P.

$h_P = \Delta\hat{U} - \hat{Q}$ h_P é sempre positivo!

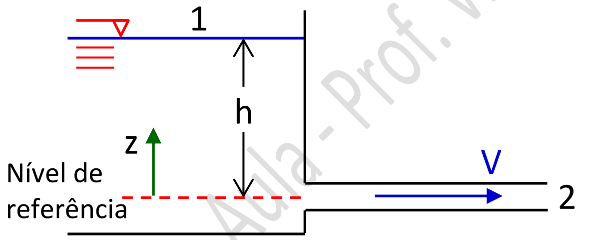
Assim, a equação da energia para o escoamento de um fluido incompressível no interior de uma tubulação, sem troca de calor, com perda de energia por cisalhamento fica:

$$\frac{\Delta\overline{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} + h_P = \hat{W}_S$$

Se não há trabalho de eixo ($\hat{W}_S$=0) ou perdas por atrito (h_P=0), temos:

$$\frac{\Delta\overline{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} = 0$$ Equação de Bernoulli

Ex. - Água contida em um grande reservatório (nível constante) escoa através de um conduto de saída. Assumindo escoamento permanente, não viscoso (sem perdas por atrito) e incompressível, determinar a velocidade e a vazão de saída.



Vamos aplicar a equação da energia entre os pontos 1 e 2:

$h_P = 0$

$\hat{W}_S = 0$

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = 0$$

$V_1 = 0$ (o nível do reservatório é constante, logo a velocidade da água é nula);

$P_2 = P_1$ = pressão ambiente;

$z_1 = h$

$z_2 = 0$ (posicionada no nível de referência adotado);

$$\frac{V_2^2}{2} + g(-h) = 0 \quad \rightarrow \quad V_2 = \sqrt{2gh}$$

O valor da velocidade encontrado expressa a velocidade máxima esperada, dependendo das perdas por atrito na tubulação de saída. A vazão é dada por:

$$\dot{V} = VA = \pi R^2 \sqrt{2gh}$$

Ex. – Considere o exemplo anterior com nível variável da água no reservatório. Neste caso, temos a equação:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(-h) = 0$$

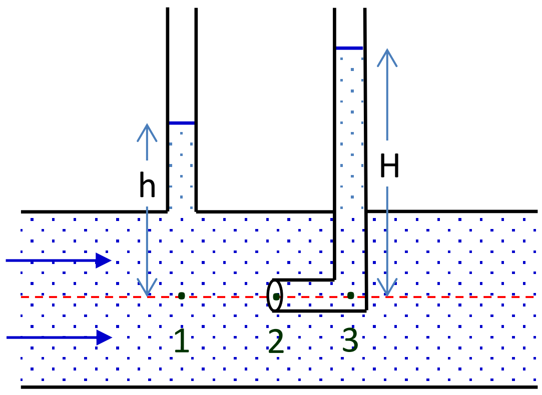
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \rightarrow V_1 = V_2(A_2/A_1) = V_2(D_2/D_1)^2$$

D_1 = diâmetro do reservatório;
D_2 = diâmetro do conduto.

$$\frac{V_2^2 - V_2^2(D_2/D_1)^4}{2} - gh = 0 \quad \rightarrow \quad V_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1-(D_2/D_1)^4}}$$

Se $D_1 >> D_2$, $(D_2/D_1)^4 \cong 0 \rightarrow V_2 = \sqrt{2gh}$

Ex. – A vazão em condutos pode ser estimada pelo dispositivo apresentado na figura a seguir. Para um fluido incompressível com viscosidade desprezível (escoamento invíscido), temos:



Vamos aplicar a equação da energia entre os pontos 1 e 2:

$$h_P = 0$$

$$\hat{W}_S = 0$$

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = 0$$

Temos que:

$z_1 = z_2 \rightarrow \Delta z = 0$

$V_2 = 0$ (ponto de estagnação)

$P_2 = P_3$ (mesma altura, mesmo fluido)

$$\frac{-V_1^2}{2} + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = 0$$

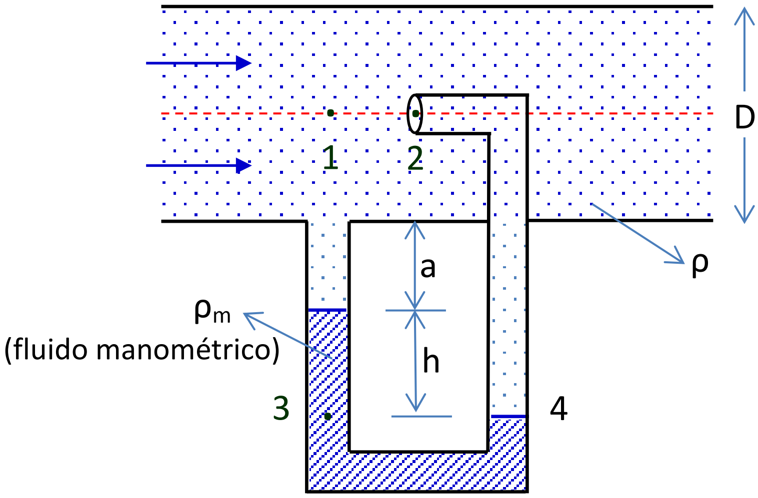
$$P_1 = \rho g h + P_{atm} \quad \text{e} \quad P_2 = \rho g H + P_{atm}$$

Portanto:

$$V_1 = \sqrt{2g(H-h)}$$

Através da diferença entre os meniscos podemos estimar a vazão do fluido no conduto. O dispositivo acima é bastante limitado, pois não pode ser usado para gases. Não pode ser usado para grandes pressões, pois h seria muito grande, e para pressões inferiores à atmosfera, pois a coluna não se formaria.

Ex. – Uma modificação no dispositivo anterior pode ser feita para uso em outras situações, o chamado tubo de Pitot. Veja a figura a seguir:



Vamos aplicar a equação da energia entre os pontos 1 e 2 ($h_P = 0$ e $\widehat{W}_S = 0$):

$$z_1 = z_2 \;\rightarrow\; \Delta z = 0$$

$$V_2 = 0 \text{ (ponto de estagnação)}$$

$$\frac{-V_1^2}{2} + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = 0$$

Temos que: $P_3 = P_4$ (mesma altura, mesmo fluido)

$$P_3 = \rho_m g h + \rho g(a + D/2) + P_1$$

$$P_4 = \rho g(h + a + D/2) + P_2$$

$$\rho_m g h + \rho g(a + D/2) + P_1 = \rho g(h + a + D/2) + P_2$$

$$P_2 - P_1 = gh(\rho_m - \rho)$$

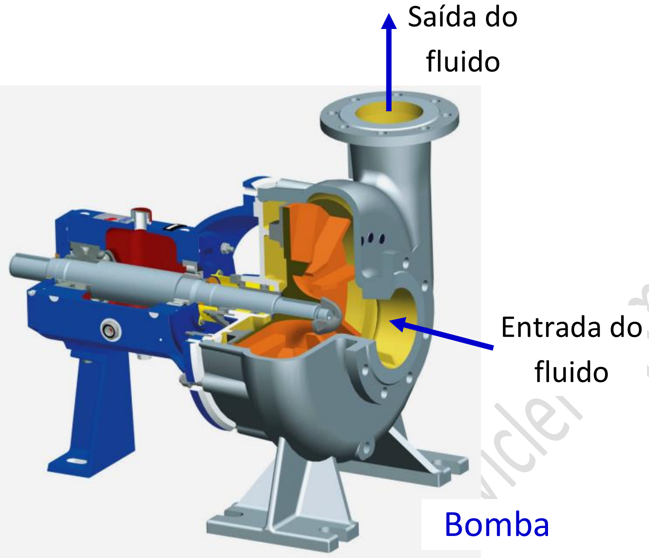
$$\frac{-V_1^2}{2} + \frac{gh(\rho_m - \rho)}{\rho} = 0 \quad \rightarrow \quad V_1 = \sqrt{\frac{2gh(\rho_m - \rho)}{\rho}}$$

Desta maneira, podemos medir a velocidade de um fluido no interior de um conduto, para gases e líquidos.

Equação da Energia na Presença de uma Máquina

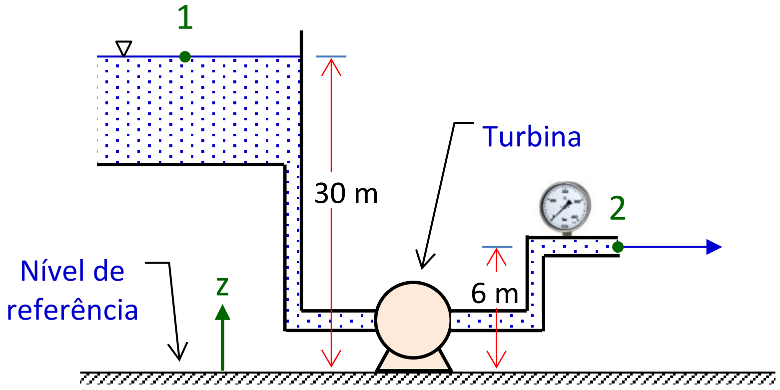
A máquina presente em um sistema é definida como qualquer dispositivo que quando introduzido no escoamento forneça ou retire energia do escoamento, na forma de trabalho. Para o estudo desse curso a máquina ou será uma bomba ou será uma turbina.

Se a máquina for uma bomba, ela fornece energia ao escoamento. Se a máquina for uma turbina, ela retira (ou recebe) energia do escoamento.



Bomba

Ex. - Água escoa de um grande reservatório, cujo nível é invariável, através de uma tubulação (ver figura), passando através de uma turbina, produzindo potência mecânica, $\dot{W}_S$. A pressão no interior da tubulação na seção 2 é dada por um manômetro e vale 10^5 N/m^2. A velocidade da água na seção 2 é de 9,0 m/s e o diâmetro da tubulação é de 15 cm. Supondo que não haja atrito no escoamento, nem variação da energia interna da agua ou troca de calor com o ambiente, determine a potência da turbina. Dados: ρ = 1.000 kg/m^3; g = 9,81 m/s^2.



Do enunciado:
$P_2 = 10^5$ N/m^2 (relativa)
$\overline{V}_2 = 9{,}0$ m/s
$D_2 = 15$ cm $= 0{,}15$ m
$h_P = 0$
$\hat{Q} = 0$
$\Delta\hat{U} = 0$

Vamos aplicar o balanço de energia mecânica entre os pontos 1 e 2:

$$\frac{\Delta\overline{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} = \hat{W}_S$$

$$\frac{\overline{V}_2^2 - \overline{V}_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = \hat{W}_S$$

$\overline{V}_1 = 0$ (nível constante no reservatório);
$P_1 = P_{atm}$ (superfície livre);
$z_1 = 30$ m (baseados no nível de referência);
$z_2 = 6$ m
$P_2 = 10^5 + P_{atm}$ (aboluta).

Assim:

$$\frac{9{,}0^2}{2} + 9{,}81(6 - 30) + \frac{(10^5)}{1000} = \hat{W}_S$$

$$\hat{W}_S = 40{,}5 - 235{,}44 + 100 = -94{,}94 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

O sinal negativo indica que o trabalho de eixo "sai" do sistema, ou seja, o fluido realiza trabalho sobre a turbina.

Determinação da potência, $\dot{W}_S$: $\dot{W}_S = \hat{W}_S\dot{m}$ e $\dot{m} = \rho\overline{V}A$

$$\dot{m} = 1000 \times 9{,}0\frac{\pi(0{,}15)^2}{4} = 159 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_S = 94{,}94 \times 159 = 15.095 \text{ kgm}^2/\text{s}^3 = 15{,}1 \text{ kW}$$

$$1 \text{ hp} = 745 \text{ watt} \rightarrow \dot{W}_S = 20{,}3 \text{ hp}$$

Observação: Se a máquina for uma turbina $\rightarrow \widehat{W}_S < 0$
Se a máquina for uma bomba $\rightarrow \widehat{W}_S > 0$

Ex. – Um chuveiro elétrico possui uma de potência de 5,5 kW. Estime a temperatura de saída da água para uma vazão de 12 L/min. A temperatura inicial da água é de 20 °C e a pressão relativa da água na entrada do chuveiro é de 2,0 mca (metro de coluna de água). Despreze a troca de calor com o ambiente. Dados da água: ρ = 995 kg/m^3; C_P = 1,0 kcal/kg°C.

$T_i = 20\ ^{o}C$ $T_f = ?$ $C_P = 1{,}0$ kcal/kg°C $\rho = 995$ kg/m^3	$\dot{W} = 5500$ W $\dot{Q} = 0$ $\dot{V} = 12$ L/min $P_{entrada} = 2{,}0$ mca (relativa) $P_{saída} = P_{atm}$

Vamos assumir: $V_1 = V_2$ e $z_1 = z_2$

A equação do balanço global de energia:

$$\frac{\Delta \bar{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta\widehat{U} = \widehat{W} + \widehat{Q}$$

Neste caso:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta\widehat{U} = \widehat{W} \rightarrow \begin{matrix}\dot{W} = \dot{m}\widehat{W} \\ \dot{U} = \dot{m}\widehat{U}\end{matrix} \rightarrow \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta\left(\frac{\dot{U}}{\dot{m}}\right) = \frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

Para C_P = cte e $\dot{U}=\dot{m}C_PT$, temos:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + C_P\Delta T = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} \quad \rightarrow \quad \Delta T = (T_f - T_i) = \frac{1}{C_P}\left(\frac{\dot{W}}{\dot{m}} - \frac{\Delta P}{\rho}\right)$$

$$\dot{V}=12\ \frac{L}{min}\left(\frac{1\ min}{60\ s}\right)\left(\frac{1\ m^3}{1000\ L}\right)=0{,}0002\ m^3/s$$

$$\dot{m}=\rho\dot{V} = 995 \times 0{,}0002 = 0{,}20\ kg/s$$

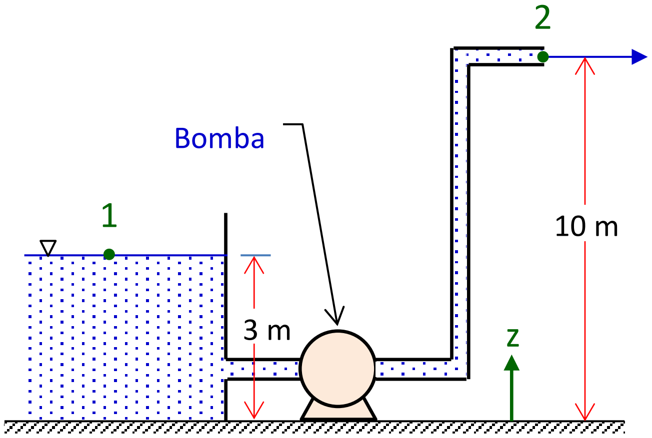
$$C_P = 1000\frac{cal}{kg°C}\left(\frac{1\ J}{0{,}239\ cal}\right) = 4184\ J/kg°C$$

$P_{entrada} = 2{,}0 + P_{atm}$ $\rightarrow$ $\Delta P = P_{saída} - P_{entrada} = 2{,}0\ mca\left(\frac{101325\ N/m^2}{10{,}33\ mca}\right)$

$P_{saída} = P_{atm}$ $\quad$ $\Delta P = 19618\ N/m^2$

$$(T_f - T_i) = \frac{1}{4184}\left(\frac{5500}{0{,}2} - \frac{19618}{995}\right) = 6{,}6\ °C \rightarrow T_f = 26{,}6\ °C$$

Ex. - Água é bombeada de um grande reservatório, cujo nível é invariável, até um ponto acima (livre para a atmosfera). A velocidade da água na seção 2 é de 4,0 m/s e o diâmetro da tubulação é de 5 cm. Supondo que não haja atrito no escoamento, nem variação da energia interna da agua ou troca de calor com o ambiente, determine a potência da bomba. Veja a figura a seguir. Dados: ρ = 995 kg/m^3; g = 9,81 m/s^2.



Do enunciado:
$P_1 = P_2 = Patm$
$\overline{V}_2 = 4,0$ m/s
$D_2 = 5$ cm $= 0,05$ m
$h_P = 0$
$\widehat{Q} = 0$
$\Delta\widehat{U} = 0$

Balanço de energia mecânica entre os pontos 1 e 2:

$$\frac{\Delta\overline{V}^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} = \widehat{W}_S$$

$$\frac{\overline{V}_2^2 - \overline{V}_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} = \widehat{W}_S$$

$\overline{V}_1 = 0$ (nível constante no reservatório);
$z_1 = 3$ m (baseado no nível de referência);
$z_2 = 10$ m

Assim:

$$\frac{4,0^2}{2} + 9,81(10 - 3) = \widehat{W}_S$$

$$\widehat{W}_S = 8,0 + 68,7 = 76,7 \ m^2/s^2$$

$\dot{W}_S = \widehat{W}_S \dot{m}$ e $\dot{m} = \rho\overline{V}A$

$$\dot{m} = 995 \times 4,0 \frac{\pi(0,05)^2}{4} = 7,8 \ kg/s$$

$$\dot{W}_S = 76,7 \times 7,8 = 598,3 \ kgm^2/s^3 \cong 600 \ W$$