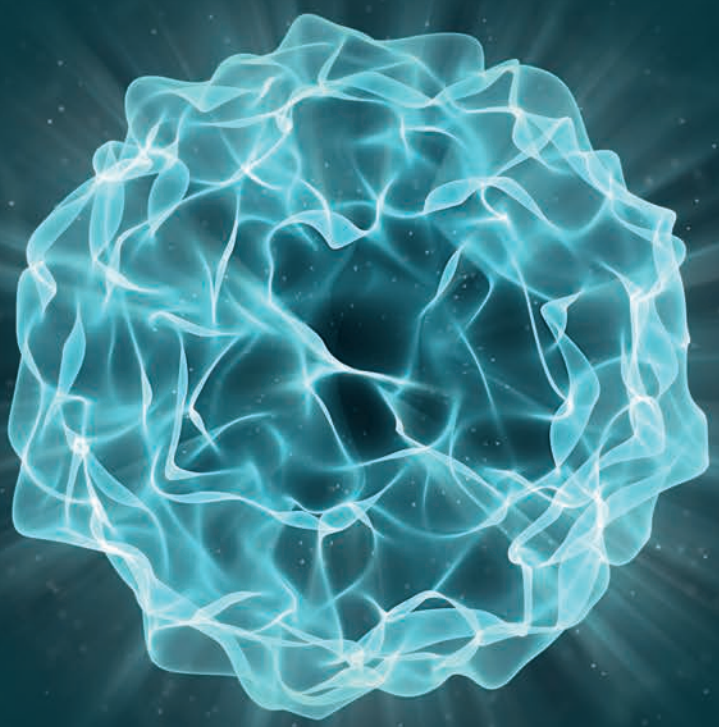
Engenharia

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS DE TERMODINÂMICA

Óscar Mota



LIDEL

Índice Geral

Sobre o Livro V
Nomenclatura VII

Capítulo 1
Conceitos Básicos 1

Capítulo 2
Energia Mecânica 9

Capítulo 3
Propriedades das Substâncias Puras 23
3.1 Ar 23
3.2 Água 25
3.3 Refrigerantes 34

Capítulo 4
Trabalho Trocado por Substâncias Puras 43
4.1 Ar 43
4.2 Água 45
4.3 Refrigerantes 46

Capítulo 5
Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada a Sistemas 57

Capítulo 6
Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada a Volumes de Controlo 79
6.1 Regime permanente 79
6.2 Regime transiente ou uniforme 97

Capítulo 7
Segunda Lei da Termodinâmica 107

Capítulo 8
Exergia 135

© Lidel – Edições Técnicas

Capítulo 9

Exercícios de Exame 165
9.1 Exercícios resolvidos 165
9.2 Exercícios propostos 272
Bibliografia 349
Glossário 350

© Lidel – Edições Técnicas

Sobre o Livro

Os estudantes que começam um curso de Engenharia revelam algum conhecimento teórico nas áreas da Física e da Química e têm nenhuma ou praticamente nenhuma prática laboratorial anterior. Quando chegam à universidade, esta também não irá proporcionar uma prática laboratorial essencial, pois, ao longo dos 34 anos de ensino, tive a oportunidade de estudar, consultar empresas, analisar orçamentos e elaborar propostas no âmbito do apetrechamento das disciplinas da licenciatura em equipamentos laboratoriais, e os responsáveis por este pelouro entenderam, pelas mais diversas razões, não apoiar esta vertente importante em qualquer escola de Engenharia. Este facto reforça a importância do livro.

Apresentam-se resumidamente os conceitos teóricos para depois os aplicar, através de uma análise mais minuciosa, na resolução de exercícios práticos.

Existe a preocupação de orientar o leitor pelo processo de cálculo e de o justificar: em cada exercício designam-se pela letra C seguida de um número os comentários em que se basearam as opções sugeridas ou que mostram opções alternativas, por exemplo, C4 representa o comentário número 4 de um dado exercício.

As propriedades termodinâmicas das substâncias puras são obtidas do livro *Tabelas de Termodinâmica*, Paulo Coelho, Lidel – Edições Técnicas. A utilização de outras tabelas tem de ser feita com cuidado porque os valores das propriedades obtidas experimentalmente poderão ser diferentes, e os valores das propriedades deduzíveis poderão ter estados de referência diferentes. Quaisquer tabelas permitem obter os mesmos valores no cálculo do trabalho e do calor trocados pelas substâncias puras.

O **Capítulo 1** aborda alguns conceitos fundamentais na área da Engenharia Mecânica: força, pressão, temperatura, volume, massa específica, volume específico, equação de estado de um gás perfeito.

A energia mecânica é tratada no **Capítulo 2**, referindo-se aos conceitos: sistema, energia mecânica, energia cinética, energia potencial, energia interna, evolução reversível, trabalho.

Os **Capítulos 3 e 4** mostram como se obtêm as propriedades das substâncias puras e como se determina o trabalho trocado durante as suas evoluções, no âmbito dos conceitos: propriedades termodinâmicas, substâncias puras, fases, mudança de fase, título, sistema, evolução reversível, trabalho.

Os **Capítulos 5 e 6** apresentam a aplicação da primeira lei da termodinâmica (plt), por exemplo, ao cálculo do calor trocado durante as evoluções das substâncias puras. Analisam-se os sistemas, de massa constante, e os volumes de controlo, que trocam massa com a vizinhança (em regime permanente e em regime transiente), no que diz respeito aos conceitos: sistema, volume de controlo, caudal mássico, caudal volumétrico, calor, potência calorífica, trabalho, potência sob a forma de trabalho, primeira lei da termodinâmica, regime permanente, regime transiente (uniforme).

© Lidel – Edições Técnicas

O **Capítulo 7** contém exercícios sobre a segunda lei da termodinâmica e a entropia, tratando os conceitos: ciclo de Carnot, máquina frigorífica, bomba de calor, eficiência, rendimento, segunda lei da termodinâmica, entropia.

O **Capítulo 8** contém exercícios sobre exergia, fazendo-se referência aos conceitos: exergia, fator de Carnot, exergia calor, exergia trabalho, rendimento exergético, irreversibilidades.

O **Capítulo 9** contém diversos exercícios de exame que serviram na avaliação dos estudantes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Incluem-se neste capítulo exercícios resolvidos e exercícios propostos com a indicação dos resultados.

© Lidel – Edições Técnicas

Nomenclatura

Abreviaturas

A	área (m^2)
c	calor específico (J/(kgK))
c_v	calor específico a volume constante (J/(kgK))
$\overline{c}_v$	calor específico molar a volume constante (J/(kmolK))
c_p	calor específico a pressão constante (J/(kgK))
$\overline{c}_p$	calor específico molar a pressão constante (J/(kmolK))
D	diâmetro (m)
ε	energia mecânica específica (J/kg)
E	energia mecânica (J)
E_c	energia cinética (J)
E_p	energia potencial (J)
E_x	exergia (J)
$\dot{E}_x$	potência exergética (W)
$E_{x,w}$	exergia trabalho (J)
$E_{x,Q}$	exergia calor (J)
F	força (N)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
h	($= u + pv$), entalpia específica (J/kg)
H	($= U + pV$), entalpia (J)
h_f	entalpia específica de líquido saturado (J/kg)
h_g	entalpia específica de vapor saturado (J/kg)
i	irreversibilidade específica (J/kg)
I	irreversibilidade (J)
$\dot{I}$	produção de irreversibilidade (W)
j	coenergia específica (J/kg)
J	coenergia (J)
k	índice politrópico (-)
k	coentalpia específica (J/kg)
K	coentalpia (J)
l	distância (m)
m	massa (kg)

© Lidel – Edições Técnicas

Capítulo 5

Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada a Sistemas

Os exercícios resolvidos neste capítulo referem-se às noções já apresentadas e às noções seguintes:

- Calor;
- Primeira lei da termodinâmica (plt);
- Sistemas.

A plt é uma lei empírica que é sempre verificada na prática. A sua aplicação a um sistema, fronteira que contém uma massa constante, que evolui entre o estado 1 e o estado 2, é a seguinte:

$$Q_{1\to2} + W_{1\to2} = \Delta E = E_2 - E_1 \tag{5.1}$$

onde $Q_{1\to2}$ representa o calor trocado (calor que entra no sistema menos o calor que dele sai, ou seja, o calor líquido trocado):

- $W_{1\to2}$ representa o trabalho líquido trocado;
- $\Delta E = E_2 - E_1$ representa a variação de energia mecânica sofrida pelo sistema (no curso de Engenharia Mecânica esta é a energia de interesse, em que $E = U + E_c + E_p$. Noutras áreas do conhecimento, é necessário ter em conta outras energias: elétrica, química, eletromagnética, nuclear, etc.).

Como se referiu no Capítulo 2 (Energia Mecânica), a energia mecânica é a soma da energia interna, U (devida à atividade microscópica das partículas constituintes do sistema e que se manifesta macroscopicamente através da temperatura do sistema), da energia cinética, E_c (devida à velocidade do sistema), e da energia potencial, E_p (devida à cota a que se encontra o sistema). Uma vez definido o estado, a energia mecânica é de fácil determinação.

Em muitas aplicações $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$, pelo que a plt tem a expressão seguinte:

$$Q_{1\to2} + W_{1\to2} = \Delta U = U_2 - U_1 \tag{5.2}$$

O calor e o trabalho são energias em trânsito, pois atravessam a fronteira entre o sistema e a sua vizinhança. Como se referiu no Capítulo 4 – Trabalho Trocado por Substâncias Puras, o trabalho trocado por um sistema depende do percurso, pelo que não é uma propriedade termodinâmica. O calor também não é uma propriedade termodinâmica. A energia, por seu lado, só depende do estado termodinâmico do sistema (não depende do percurso), pelo que é uma propriedade termodinâmica.

Assim, a plt, também designada por lei da conservação da energia, iguala as trocas de calor e de trabalho, que não são propriedades termodinâmicas, à variação da energia mecânica, que é uma propriedade termodinâmica.

A plt verifica-se para qualquer processo do sistema. Pode ser reversível (ideal, ao longo de estados de equilíbrio) ou irreversível (real, em que o sistema evolui ao longo de estados de não equilíbrio).

Capítulo 6

Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada a Volumes de Controlo

Um volume de controlo (vc) é definido por uma fronteira (real ou imaginária) que limita um dado volume. Pode coincidir com uma dada máquina ou não: por exemplo, pode ser composto pela associação de diversas máquinas, ou pode ser uma fronteira que fisicamente não existe (por exemplo, "corta" uma máquina a meio), sendo, portanto, limitada pela imaginação do seu autor.

Ao contrário de um sistema, um vc admite trocas de massa com a sua vizinhança: pode haver diversos pontos do vc (correspondendo a cada ponto um dado estado termodinâmico) em que existem entradas de massa e outros em que existem saídas de massa.

O funcionamento de um vc pode dar-se em dois regimes distintos: regime permanente ou regime transiente ou uniforme.

6.1 Regime permanente

Neste regime as propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho nos diversos estados do vc (pontos da fronteira em que existem trocas de massa) permanecem inalteradas ao longo do tempo. Verifica-se também que a massa do vc não se altera ao longo do tempo, ou seja, toda a massa que entra volta a sair do vc a uma mesma taxa. Este regime é aplicável a máquinas que já se encontram em funcionamento contínuo, como, por exemplo, compressores cuja pressão de admissão é a pressão atmosférica (constante) e cuja pressão de descarga é 1000 kPa (por exemplo, também constante).

A aplicação da primeira lei da termodinâmica (plt) a um volume de controlo (Figura 6.1) que funciona em regime permanente, é dada por:

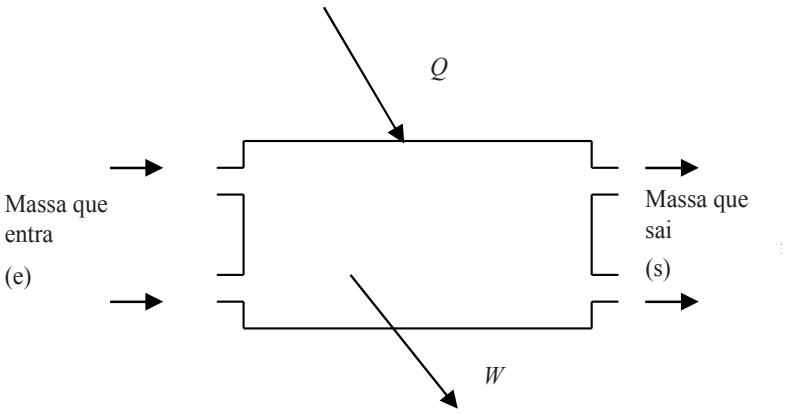


Figura 6.1 Representação de um volume de controlo em regime permanente.

pois $q_A = {}_1q_2$ e $q_B = {}_3q_4$

$\Delta S_{univ} > 0 \rightarrow$ o processo de transferência de calor através de uma diferença finita de temperaturas é irreversível.

Exercício 7.7 – Considere de novo o Exercício 4.1 (ver Capítulo 4 – Trabalho Trocado Por Substâncias Puras):

"A Figura 4.1 mostra um compressor alternativo, conjunto cilindro-êmbolo, D (diâmetro) = 100 mm, L (comprimento) = 120 mm, que comprime ar desde p_1 = 100 kPa, T_1 = 25 ºC, até à pressão p_2 = 700 kPa: durante a compressão as válvulas de admissão e de descarga estão ambas fechadas e o êmbolo desloca-se no sentido das válvulas, reduzindo o volume do ar e aumentando a sua pressão.

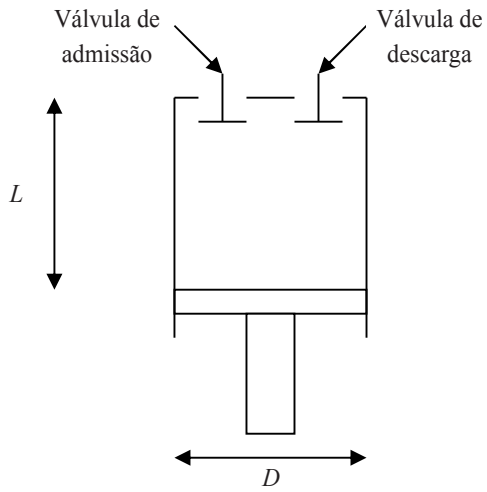


Figura 4.1 Conjunto cilindro-êmbolo de um compressor alternativo.

Considerando a evolução do ar politópica, pV^k = const., em que k = 1,2, determine:

a) A temperatura do ar em 2, T_2;

b) O curso do êmbolo, C (distância percorrida pelo êmbolo);

c) O trabalho recebido pelo ar."

Os resultados conhecidos estão na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 **Resultados conhecidos dos Exercícios 4.1**

m_{ar} = 0,0011 kg

Estado	p (kPa)	T (ºC)	$W_{1\rightarrow2}$ (kJ)
1	100	25	
2	700	139	0,180

Determine a variação de entropia do universo devido à compressão politrópica ($pV^{1,2}$ = const.).

© Lidel – Edições Técnicas

Resolução:

A variação de entropia do universo é dada pela Equação 7.15:

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = \Delta S_{sist} + \Sigma Q_i/T_{i,viz}$$

em que ΔS_{sist} se obtém com as Equações 7.13 e 3.3:

$$\Delta S_{sist} = m(s_2 - s_1) = m\,[c_{p,ar} \ln (T_2/T_1) - R_{ar} \ln (p_2/p_1)]$$

sendo $c_{p,ar} = 1{,}005$ kJ/(kgK) e $c_{v,ar} = 0{,}718$ kJ/(kgK).

A vizinhança é o ar ambiente nas condições do estado 1. É necessário calcular o calor trocado entre o ar no interior do compressor e o ar ambiente. Pela plt, Equação 5.2 aplicada ao ar interior, e a Equação 3.1, resulta:

$$_1Q_2 + {}_1W_2 = U_2 - U_1 = m\,c_{v,ar}\,(T_2 - T_1)$$
$$_1Q_2 + 0{,}180 = 0{,}0011 \times 0{,}718\,(139 - 25)$$
$$_1Q_2 = -0{,}090 \text{ kJ}$$

Este é o calor libertado pelo ar para o ambiente ($_1Q_2 < 0$). O calor recebido pelo ambiente é:

$$Q_{amb} = -{}_1Q_2 = 0{,}090 \text{ kJ}$$

De onde:

$$\Delta S_{viz} = Q_{amb}/T_{amb} = 0{,}00030 \text{ kJ/K}$$
$$\Delta S_{sist} = 0{,}0011\,[1{,}005 \ln ((139 + 273)/(25 + 273)) - 0{,}287 \ln (700/100)]$$
$$= -0{,}00026 \text{ kJ/K}$$

Assim:

$$\Delta S_{univ} = -0{,}00026 + 0{,}00030 = 0{,}00004 \text{ kJ/K} = 0{,}04 \text{ J/K}$$

$\Delta S_{univ} > 0$, pelo que o processo é irreversível.

Comentários:

C1 – ΔS_{univ} tem um baixo valor devido ao facto de a massa ser pequena.
Em termos específicos dá $\Delta S_{univ} = 36{,}4$ J/(kgK).

C2 – $\Delta S_{univ} > 0$, pelo que o processo é irreversível, devido à transferência de calor através de uma diferença finita de temperaturas.

C3 – Assumindo a compressão adiabática e que a evolução do ar é reversível, (i.e., $pV^{\gamma} = \text{const.}$, em que $\gamma = c_{p,ar}/c_{v,ar} = 1{,}4$), resultaria $\Delta S_{univ} = 0$.
Neste caso, como $Q = 0$, a temperatura $T_{2,i}$ seria superior a 139 ºC. Com a Equação 2.11 dá:

$$T_{2,i} = T_1\,(p_2/p_1)^{(\gamma-1)/\gamma} = 519{,}6 \text{ K} = 246{,}6 \text{ ºC}$$

C4 – Assuma a compressão isotérmica e reversível.
Como é internamente reversível, pode-se calcular o trabalho com as Equações 2.1 e 2.6:

$$_1W_2 = -mR_{ar}T_1 \ln (V_2/V_1) = -mR_{ar}T_1 \ln (p_1/p_2)$$
$$_1W_2 = -0{,}0011 \times 0{,}287 \times 298 \ln (100/700) = 0{,}183 \text{ kJ}$$

© Lidel – Edições Técnicas

b) $\Delta s_{univ} = \Delta s_{VC} + \Delta s_{viz}$

Como o processo é adiabático ($Q = 0$), $\Delta s_{viz} = -Q/T_{viz} = 0$.
Então, a produção de entropia é dada por:

$$\Delta \dot{S}_{univ} = \Delta \dot{S}_{VC} = \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2$$

Pretendendo-se a variação de entropia por kg de mistura, divide-se a equação anterior por $\dot{m}_3$:

$$\Delta s_{univ} = s_3 - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} s_1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} s_2 = s_3 - 0{,}5\, s_1 - 0{,}5\, s_2$$

pois $\dfrac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = 1{,}0$

Por consulta das tabelas obtém-se:

- Estado 1, $p_1 = 400$ kPa e $T_1 = 15$ ºC, pág. 11 (após interpolação), $s_1 = 0{,}2238$ kJ/(kgK);
- Estado 2, $p_2 = 400$ kPa e $T_2 = 55$ ºC, pág. 11 (após interpolação), $s_2 = 0{,}7656$ kJ/(kgK);
- Estado 3, $p_3 = 400$ kPa e $T_3 = 35$ ºC, pág. 11 (após interpolação), $s_3 = 0{,}5045$ kJ/(kgK).

Substituindo estes valores na equação anterior, resulta:

$$\Delta s_{univ} = 0{,}0098 \text{ kJ/(kgK)}$$

Comentário:

C1 – Os processos de mistura são irreversíveis: $\Delta S_{univ} > 0$. Neste caso, a água morna não se divide em água fria e água quente, espontaneamente, sem nenhuma interferência da vizinhança, voltando ao estado à entrada do misturador. Seria necessário que houvesse trocas de calor com a vizinhança, o que provocaria alterações na vizinhança.

Exercício 7.10 – Um permutador de calor adiabático água-ar funciona nas condições indicadas na Figura 7.7.

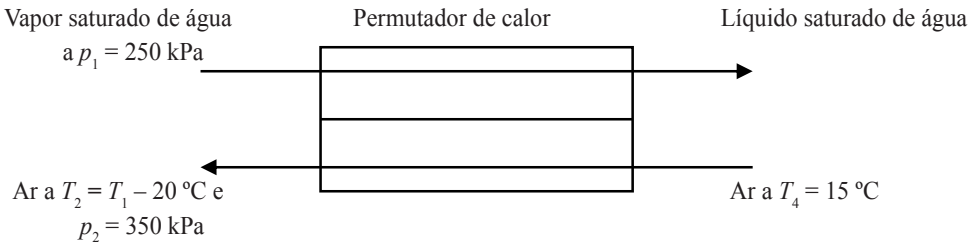


Figura 7.7 Permutador de calor água-ar.

© Lidel – Edições Técnicas

Determine:

a) A relação entre os caudais mássicos $\dot{m}_1/\dot{m}_2$;

b) O aumento de entropia do universo provocado pelo processo de transferência de calor no permutador, por kg de água.

Resolução:

a) Por aplicação da lcm e da plt aplicada ao vcrp permutador, dado que $Q = W = 0$, e desprezando as variações de energia cinética e potencial, obtém-se:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{h_2 - h_4}{h_1 - h_3}$$

Por consulta das tabelas da água, obtém-se:

- Estado 1, $p_1 = 250$ kPa e $x_1 = 100\%$, pág. 7 das tabelas de água, $h_1 = 2716{,}5$ kJ/kg;
- Estado 2, o ar é um gás perfeito, em que $p_2 = 350$ kPa e $T_2 = T_1 - 20$;
- Estado 3, $p_3 = p_1 = 250$ kPa e $x_3 = 0\%$, pág. 7 das tabelas de água, $h_3 = 535{,}35$ kJ/kg.

  T_1 obtém-se na pág. 7 das tabelas de água, $T_1 = 127{,}41$ ºC:
  $\rightarrow T_2 = T_1 - 20 = 107{,}41$ ºC

- Estado 4, o ar é um gás perfeito, em que $p_4 = p_2 = 350$ kPa e $T_4 = 15$ ºC.

Assim, $h_2 - h_4 = c_{p,ar}(T_2 - T_4)$ em que $c_{p,ar} = 1{,}005$ kJ/(kgK)
$\rightarrow h_2 - h_4 = 92{,}872$ kJ/kg

Substituindo estes valores na equação anterior resulta:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = 0{,}043$$

b) $\Delta s_{univ} = \Delta s_{VC} + \Delta s_{viz}$
Como o processo é adiabático ($Q = 0$), $\Delta s_{viz} = -Q/T_{viz} = 0$
Então a produção de entropia é dada por:

$$\Delta \dot{S}_{univ} = \Delta \dot{S}_{VC} = \dot{m}_1(s_3 - s_1) + \dot{m}_2(s_2 - s_4)$$

Pretendendo-se a variação de entropia por kg de água, divide-se a equação anterior por $\dot{m}_1$:

$$\Delta s_{univ} = (s_3 - s_1) + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}(s_2 - s_4)$$

Por consulta das tabelas da água (pág. 7), $p_3 = p_1 = 250$ kPa, obtém-se:

$s_1 = 7{,}0525$ kJ/(kgK) e $s_3 = 1{,}6072$ kJ/(kgK)

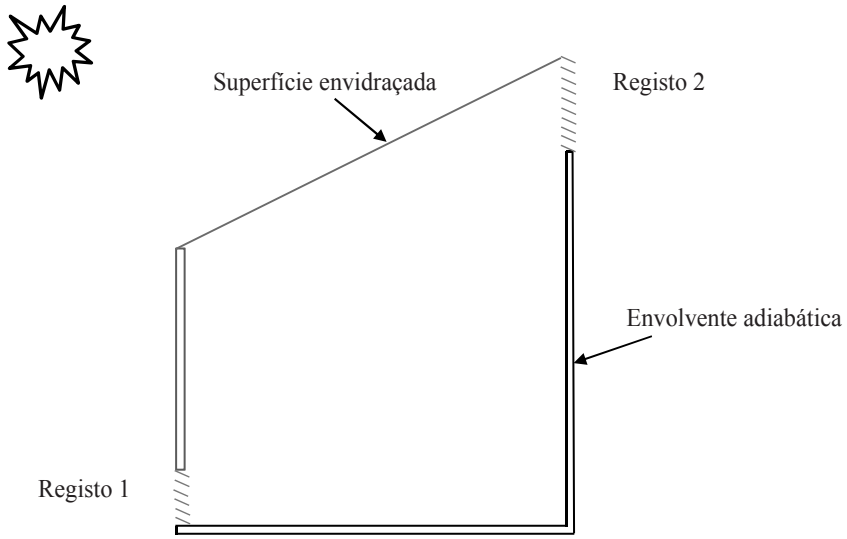
A variação de entropia $s_2 - s_4$ (gás perfeito) é obtida pela Equação 3.3:

$$s_2 - s_4 = c_{p,ar} \ln\left(\frac{T_2}{T_4}\right) - R_{ar} \ln\left(\frac{p_2}{p_4}\right) = c_{p,ar} \ln\left(\frac{T_2}{T_4}\right) \text{ pois } p_2 = p_4$$

© Lidel – Edições Técnicas

Exercício 9.7

A figura seguinte representa uma estufa aquecida por uma radiação solar igual a 300 W/m^2 que incide na superfície envidraçada. O controlo da temperatura do ar interior é feito pela abertura de dois registos: o ar exterior (p_{ext} = 100 kPa, T_{ext} = 28 ºC) entra pelo registo 1 (de área = 3 m^2) com uma velocidade de 0,25 m/s, aquece quando passa pela estufa e depois sai a 100 kPa e 35 ºC pelo registo 2 (de área = 20 m^2), mantendo-se, assim, a temperatura constante de 35 ºC do ar interior. Considere que a estufa tem uma capacidade de 545 m^3 de ar e que a sua envolvente é adiabática.



a) Qual é a velocidade do ar quando passa pelo registo 2?

b) Determine a área da superfície envidraçada.

Verificou-se uma avaria no controlo dos registos que provocou o fecho de ambos durante meia hora.

c) Defina o estado termodinâmico do ar interior no final desse período.

Devido à elevada temperatura observada, tapou-se a superfície envidraçada com uma cobertura adiabática e conseguiu-se abrir ligeiramente o registo 2, mantendo-se o registo 1 fechado. A temperatura desceu 7,3 ºC durante a saída de ar.

d) Determine a variação de entropia do ar que não saiu da estufa.

Resultados:

a) 4 cm/s

b) 20 m^2

c) 108 kPa, 60 ºC

d) -21 J/K

© Lidel – Edições Técnicas

© Lidel – Edições Técnicas

Resolução:

a)

Pedido

V_2?

Equações

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$\dot{m}_1 = \rho_1 \dot{V}_1$

$\rho_1 = \dfrac{\dot{m}_1}{\dot{V}_1} = \dfrac{p_1}{R_{ar} T_1}$

$p_1 = p_{ext}$

$T_1 = T_{ext}$

$\dot{V}_1 = A_1 V_1$

$\rho_2 = \dfrac{\dot{m}_2}{\dot{V}_2} = \dfrac{p_2}{R_{ar} T_2}$

$p_2 = p_1$

$\dot{m}_2 = \rho_2 \dot{V}_2$

$\dot{V}_2 = A_2 V_2$

Dados

$p_{ext} = 100$ kPa

$T_{ext} = 28$ °C

$A_1 = 3$ m^2

$V_1 = 0{,}25$ m/s

$T_2 = 35$ °C

$A_2 = 20$ m^2

Resultado

$V_2 = 0{,}04$ m/s

Cálculos

$R_{ar} = 0{,}287$ kJ/(kgK)

$\rho_1 = \dfrac{100}{0{,}287 \times (28 + 273)} = 1{,}16$ kg/m^3

$\dot{V}_1 = 3 \times 0{,}25 = 0{,}75$ m^3/s

$\dot{m}_1 = 1{,}16 \times 0{,}75 = 0{,}869$ kg/s

$\dot{m}_2 = 0{,}869$ kg/s

$\rho_2 = \dfrac{100}{0{,}287 \times (35 + 273)} = 1{,}13$ kg/m^3

$0{,}869 = 1{,}13\ \dot{V}_2$

$\dot{V}_2 = 0{,}769$ m^3/s

$0{,}769 = 20\ V_2$

$V_2 = 0{,}038$ m/s

b)

Pedido

$A_{sup,\,env}$?

Equações

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

$\dot{Q} = \dot{q} A_{sup,env}$

$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$h_2 - h_1 = c_{p,ar}(T_2 - T_1)$

Dado

$\dot{q} = 300$ W/m^2

Resultado

$A_{sup,\,env} = 20$ m^2

Cálculos

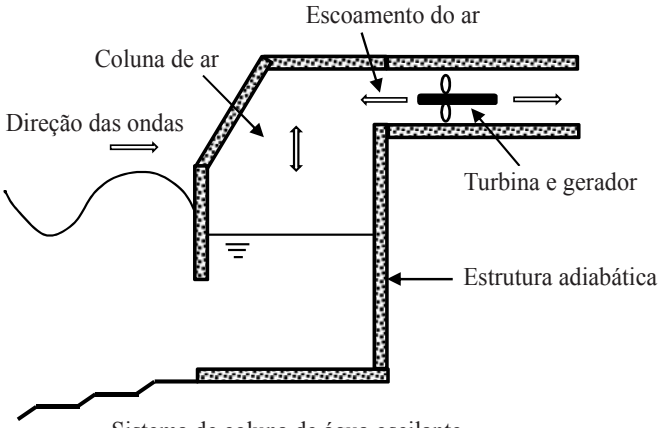
$c_{p,ar} = 1{,}005$ kJ/(kgK)

$0{,}3 \times A_{sup,env} = 0{,}869 \times 1{,}005(35 - 28)$

$A_{sup,env} = 20{,}4$ m^2

Exercício 9.19

A figura seguinte representa uma tecnologia designada "coluna de água oscilante", que é utilizada no aproveitamento da energia das ondas. A estrutura é adiabática e não há troca de calor entre a água e o ar. Considere a água do mar uma substância pura.



Sistema de coluna de água oscilante

O ar, no interior da estrutura, evolui segundo as transformações seguintes:

- 1→2: a onda bate na estrutura, e o nível de água sobe rapidamente, comprimindo o ar irreversivelmente, desde $p_1 = 60$ kPa, $T_1 = 40$ ºC, $V_1 = 50$ m^3 até $V_2 = 30$ m^3. Considere que o ar sai da estrutura à pressão e à temperatura médias, respetivamente, 150 kPa e 80 ºC, e passa pela turbina durante 5 segundos. No fim desse tempo, o ar da coluna fica a 110 kPa e 120 ºC;
- 2→1: não há onda a bater na estrutura e o nível de água desce rapidamente, até que $V_1 = 50$ m^3, o que provoca uma pressão média do ar interior de 80 kPa e a entrada de ar ambiente a 100 kPa e 25 ºC durante 5 segundos. No fim desse tempo, o ar interior fica a 60 kPa e 40 ºC.

Considere que a turbina tem a característica de manter a mesma direção de rotação, independentemente do sentido do escoamento do ar, e que a expansão do ar na turbina é politrópica, k = 1,3.

a) Qual é a potência trocada entre a água e o ar, no interior da estrutura, nas duas evoluções?
b) Tome as propriedades médias do ar interior e considere o escoamento contínuo na turbina. Qual é a potência trocada entre o ar e a turbina, nas duas evoluções?
c) Determine a variação de entropia do ar que não sai da estrutura na evolução 1→2.

Resultados:

a) 840 kW
b) 38 kW
c) 2 kJ/K

© Lidel – Edições Técnicas

© Lidel – Edições Técnicas

Resolução:

a) Volume de controlo: coluna de ar.

Pedidos

$_1\dot{W}_2$, $_2\dot{W}_1$?

Dados

$p(t) = p_1 = 60$ kPa
$T(t) = T_1 = 40$ ºC
$V(t) = V_1 = 50$ m^3

$p(t') = p_2 = 110$ kPa
$T(t') = T_2 = 120$ ºC
$V(t') = V_2 = 30$ m^3

$T_s = 80$ ºC

$\Delta t = 5$ s

$T_e = 25$ ºC

Equações

Evolução 1→2:

$$_1W_2 = m_s h_s + m(t')u(t') - m(t)u(t)$$

$$m(t) = \frac{p(t)V(t)}{R_{ar}T(t)} = \frac{p_1V_1}{R_{ar}T_1}$$

$$m(t') = \frac{p(t')V(t')}{R_{ar}T(t')} = \frac{p_2V_2}{R_{ar}T_2}$$

$m_s = m(t) - m(t')$

$u(t) = c_{v,ar}T(t)$ com $u = 0$ para $T = 0$ K
$u(t') = c_{v,ar}T(t')$
$h_s = c_{p,ar}T_s$ com $h = 0$ para $T = 0$ K

$$_1\dot{W}_2 = \frac{_1W_2}{\Delta t}$$

Evolução 2→1:

$$_2W_1 = -m_e h_e + m(t')u(t') - m(t)u(t)$$

em que $p(t) = p_2$, $T(t) = T_2$, $V(t) = V_2$
e $p(t') = p_1$, $T(t') = T_1$, $V(t') = V_1$
$m_e = m(t') - m(t)$
$h_e = c_{p,ar}T_e$ com $h = 0$ para $T = 0$ K

$$_2\dot{W}_1 = \frac{_2W_1}{\Delta t}$$

Cálculos

$R_{ar} = 0{,}287$ kJ/(kgK)
$c_{v,ar} = 0{,}718$ kJ/(kgK)
$c_{p,ar} = 1{,}005$ kJ/(kgK)

$$m(t) = \frac{60 \times 50}{0{,}287 \times (40 + 273)} = 33{,}4 \text{ kg}$$

$$m(t') = \frac{110 \times 30}{0{,}287 \times (120 + 273)} = 29{,}3 \text{ kg}$$

$m_s = 33{,}4 - 29{,}3 = 4{,}1$ kg
$u(t) = 0{,}718 \times (40 + 273) = 224{,}7$ kJ/kg
$u(t') = 0{,}718 \times (120 + 273) = 282{,}2$ kJ/kg
$h_s = 1{,}005 \times (80 + 273) = 354{,}8$ kJ/kg

$$_1W_2 = 4{,}1 \times 354{,}8 + 29{,}3 \times 282{,}2 - 33{,}4 \times 224{,}7$$
$$= 2218 \text{ kJ}$$

$$_1\dot{W}_2 = \frac{2218}{5} = 443 \text{ kW}$$

$m_e = 33{,}4 - 29{,}3 = 4{,}1$ kg
$h_e = 1{,}005 \times (25 + 273) = 299{,}5$ kJ/kg

$$_2W_1 = -4{,}1 \times 299{,}5 + 33{,}4 \times 224{,}7 - 29{,}3 \times 282{,}2$$
$$= -1991 \text{ kJ}$$

$$_2\dot{W}_1 = \frac{-1991}{5} = -398 \text{ kW}$$

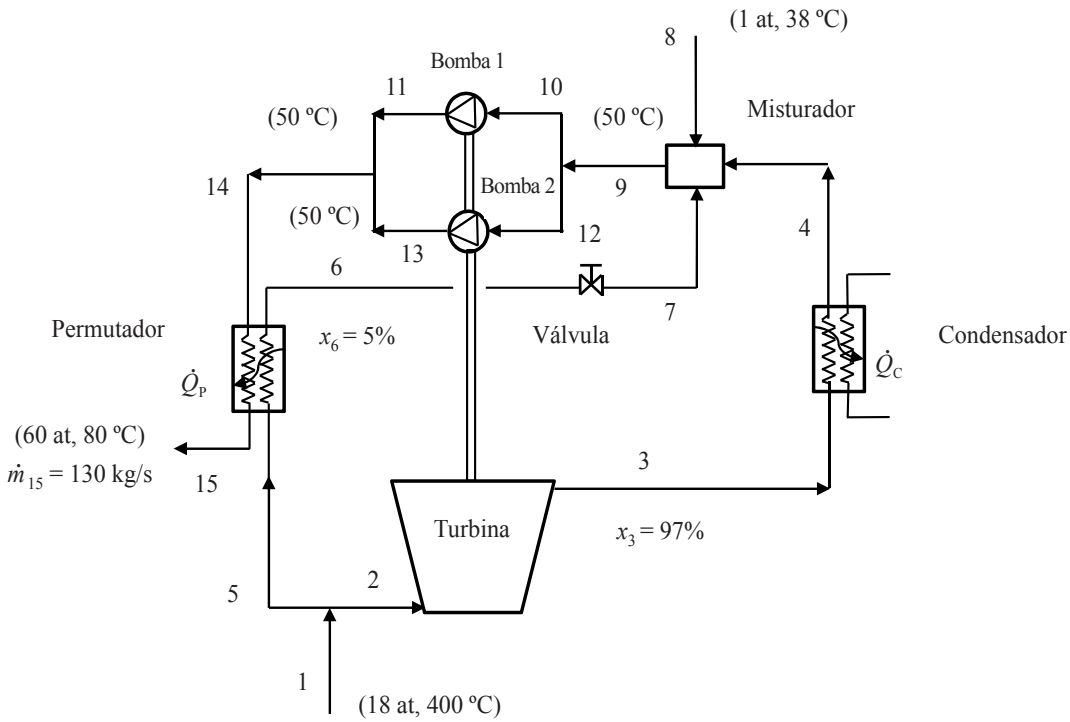
Resultados

$_1\dot{W}_2 = 443$ kW

$_2\dot{W}_1 = -398$ kW

Exercício 9.60

A figura seguinte mostra uma instalação de alimentação de água utilizada numa central térmica. A instalação opera com vapor de água nas condições do ponto 1.



Parte do vapor expande-se na turbina, que está ligada a duas bombas, e o restante é utilizado num permutador para aquecer a água a produzir, nas condições do ponto 15.

Conhecendo os dados indicados na figura acima, sabendo que ${}_{10}W_{11} = {}_{12}W_{13}$ e considerando todos os componentes da instalação como adiabáticos, determine:

a) A potência de acionamento de cada bomba;

b) O caudal mássico no ponto 5;

c) A potência calorífica trocada no condensador.

Resultados:

a) 330 kW

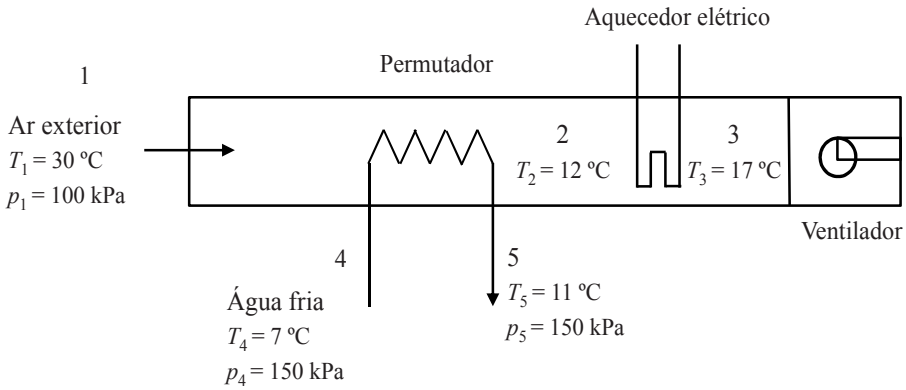
b) 7 kg/s

c) -1800 kW

© Lidel – Edições Técnicas

Exercício 9.89

Um caudal de 300 m^3/h de ar exterior a 30 °C e 100 kPa entra numa conduta de secção constante e retangular, onde é inicialmente arrefecido até aos 12 °C, através da troca de calor com água fria a 7 °C num permutador, após o que é aquecido até aos 17 °C por intermédio de um aquecedor elétrico de resistência, situada no interior da conduta, sendo, depois, insuflado numa zona de um edifício climatizado. Considere ainda que, ao longo desse trajeto, a pressão do ar permanece constante.



a) Sabendo que a velocidade do ar à entrada da conduta é de 7 m/s, calcule a área da sua secção transversal;

b) Calcule a velocidade do ar à saída do permutador, ponto 2, e à saída do aquecedor elétrico, ponto 3;

c) Sabendo que a temperatura da água à saída do permutador, ponto 5, é de 11 °C, calcule o caudal volumétrico de água que atravessa o permutador;

d) Calcule o valor da intensidade de corrente que passa na resistência elétrica, sabendo que esta está submetida a uma diferença de potencial de 110 V;

e) Calcule a taxa de geração de entropia deste sistema (1-3, 4-5).

Resultados:

a) 119 cm^2

b) V_2 = 6,5 m/s, V_3 = 6,6 m/s

c) 0,1 kg/s

d) 2,2 A

e) 2 W/K

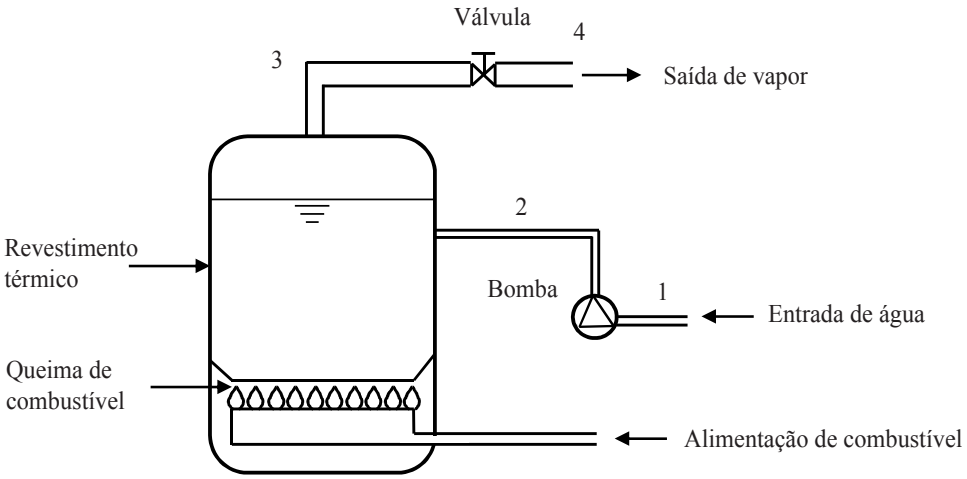
© Lidel – Edições Técnicas

Exercício 9.108

A figura seguinte mostra uma representação esquemática de uma caldeira de vapor de água.

Analise o que acontece a um sistema de massa constante, 5 kg, desde que entra até que sai da caldeira, conhecendo as propriedades dos estados seguintes:

- Estado 1: $p_1 = 100$ kPa, $T_1 = 15$ ºC;
- Estado 2: $p_2 = 2000$ kPa, $T_2 = 15$ ºC;
- Estado 3: $p_3 = 2000$ kPa, vapor saturado;
- Estado 4: $p_4 = 100$ kPa. Considere que o sistema expande hiperbolicamente na válvula.



Determine:

a) A diferença de volumes, $V_2 - V_1$;

b) O trabalho, ${}_2W_3$;

c) A temperatura, T_4;

d) O calor que é necessário trocar com o sistema no estado 4 para obter o estado 1, ${}_4Q_1$.

e) O trabalho, ${}_3W_4$.

Resultados:

a) 0

b) 49 kJ

c) 162 ºC

d) -14,7 MJ

e) -3 MJ

© Lidel – Edições Técnicas

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS DE TERMODINÂMICA

A obra ***Exercícios Resolvidos de Termodinâmica*** tem por objetivo facultar aos estudantes de engenharia o acesso à aplicação de conceitos de Termodinâmica na resolução de exercícios práticos. Os estudantes poderão frequentar diversos cursos de Mestrado Integrado como, por exemplo, Engenharia Mecânica, Engenharia e Gestão Industrial, Energia e Ambiente, Engenharia Química, entre outros. Os profissionais de engenharia também poderão recapitular a sua capacidade de cálculo, necessária às análises energéticas e exergéticas de projetos vários.

Apresentam-se resumidamente os conceitos teóricos para serem posteriormente aplicados na resolução de exercícios práticos, através de uma análise minuciosa. Existe a preocupação de orientar o leitor pelo processo de cálculo, justificando-o. Quando necessário, indicam-se meios alternativos de confirmar o processo seguido, e que podem ser utilizados para aferir o resultado. Incluem-se comentários pertinentes que se baseiam nas opções sugeridas ou que mostram opções alternativas.

Os temas abordados mais relevantes são:

- As propriedades termodinâmicas das substâncias puras;
- A transferência de energia (trabalho e calor);
- A primeira e a segunda lei da Termodinâmica;
- A análise energética e exergética de sistemas.

Para a obtenção das propriedades termodinâmicas de fluidos recorreu-se ao longo da obra, a título demonstrativo, à 4.ª edição da obra ***Tabelas de Termodinâmica*** da autoria de Paulo Coelho, publicada pela editora Lidel.

É comum encontrar na literatura exercícios de aplicação dispersos e limitados a temas específicos. Uma das mais-valias desta obra consiste em dar uma perspetiva geral, e mais realista, que abrange diferentes temas em cada exercício, conforme se mostra no capítulo "Exercícios de Exame", que contém exercícios resolvidos e exercícios propostos com soluções.

Para estudo e preparação para exame:

- Resumo de conceitos
- Exercícios resolvidos
- Exercícios de exame resolvidos
- Exercícios de exame propostos com soluções

Inclui glossário de termos correspondentes entre o português europeu e o português do Brasil.

LIDEL
ISBN 978-989-752-268-0
9 789897 522680
www.lidel.pt