



**PECE** Programa de  
Educação Continuada  
Escola Politécnica da USP



# **ERG-009 - FUNDAMENTOS DE TERMODINÂMICA E CICLOS DE POTÊNCIA**

## **Aula 3**

*Professor:*

*José R. Simões-Moreira, Ph.D.*

*e-mail: [jrsimoes@usp.br](mailto:jrsimoes@usp.br)*

*sem respostas*



**ESPECIALIZAÇÃO EM  
ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**



Tabela A.5 — Propriedades de vários gases perfeitos a 25 °C e 100 kPa\*

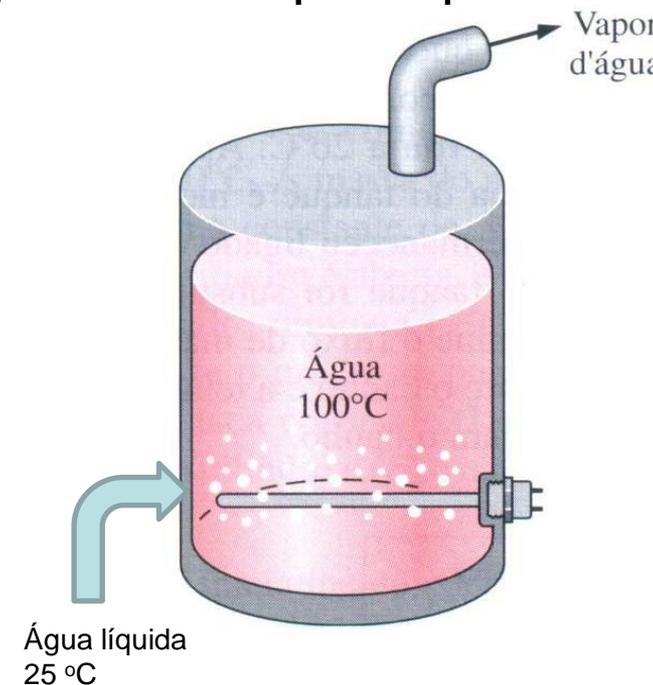
Gás	Fórmula química	Peso molecular	$R$ kJ/kg K	$c_{p0}$ kJ/kg K	$c_{v0}$ kJ/kg K	$k$
Acetileno	$C_2H_2$	26,038	0,3193	1,6986	1,3793	1,231
Ar		28,97	0,2870	1,0035	0,7165	1,400
Amônia	$NH_3$	17,031	0,48819	2,1300	1,6418	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,20813	0,5203	0,3122	1,667
<b>Butano</b>	<b><math>C_4H_{10}</math></b>	<b>58,124</b>	<b>0,14304</b>	<b>1,7164</b>	<b>1,5734</b>	<b>1,091</b>
Dióxido de Carbono	$CO_2$	44,01	0,18892	0,8418	0,6529	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,29683	1,0413	0,7445	1,400
Etano	$C_2H_6$	30,07	0,27650	1,7662	1,4897	1,186
Etanol	$C_2H_5OH$	46,069	0,18048	1,427	1,246	1,145
<b>Etileno</b>	<b><math>C_2H_4</math></b>	<b>28,054</b>	<b>0,29637</b>	<b>1,5482</b>	<b>1,2518</b>	<b>1,237</b>
Hélio	He	4,003	2,07703	5,1926	3,1156	1,667
Hidrogênio	$H_2$	2,016	4,12418	14,2091	10,0849	1,409
Metano	$CH_4$	16,04	0,51835	2,2537	1,7354	1,299
Metanol	$CH_3OH$	32,042	0,25948	1,4050	1,1455	1,227
<b>Neônio</b>	<b>Ne</b>	<b>20,183</b>	<b>0,41195</b>	<b>1,0299</b>	<b>0,6179</b>	<b>1,667</b>
Nitrogênio	$N_2$	28,013	0,29680	1,0416	0,7448	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	$N_2O$	44,013	0,18891	0,8793	0,6904	1,274
<i>n</i> -Octano	$C_8H_{18}$	114,23	0,07279	1,7113	1,6385	1,044
<b>Oxigênio</b>	<b><math>O_2</math></b>	<b>31,999</b>	<b>0,25983</b>	<b>0,9216</b>	<b>0,6618</b>	<b>1,393</b>
Propano	$C_3H_8$	44,097	0,18855	1,6794	1,4909	1,126
R-12	$CCl_2F_2$	120,914	0,06876	0,616	0,547	1,126
R-22	$CHClF_2$	86,469	0,09616	0,658	0,562	1,171
R-32	$CF_2H_2$	52,024	0,1598	0,822	0,662	1,242
<b>R-125</b>	<b><math>CHF_2CF_3</math></b>	<b>120,022</b>	<b>0,06927</b>	<b>0,791</b>	<b>0,721</b>	<b>1,097</b>
R-134a	$CF_3CH_2F$	102,03	0,08149	0,852	0,771	1,106
Vapor d'água	$H_2O$	18,015	0,46152	1,8723	1,4108	1,327
Dióxido de enxofre	$SO_2$	64,059	0,12979	0,6236	0,4938	1,263
Trióxido de enxofre	$SO_3$	80,058	0,10386	0,6346	0,5307	1,196

\* ou na pressão de saturação se esta for menor do que 100 kPa



## Exemplo 1

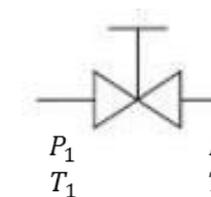
- Uma pequena caldeira produz vapor de água saturado a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  por meio de uma resistência elétrica de  $3\text{ kW}$  de potência. A água evaporada é reposta no estado líquido a  $25^{\circ}\text{C}$ , como indicado. Determine a taxa de evaporação da água, sabendo que a pressão é normal.





## Exemplo 2

- Refrigerante R134a no estado líquido saturado deixa uma unidade condensadora a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e passa por uma válvula, reduzindo sua pressão para  $415,8\text{ kPa}$ . Desprezando a variação de energia cinética que ocorre no processo, determine o título após a válvula.





### Exemplo 3

Instalações de potência geotérmicas captam fontes subterrâneas de água quente ou vapor d'água para a produção de eletricidade. Uma dessas instalações recebe água quente pressurizada a 10 bar e 160°C. Determine: (a) a taxa de calor por unidade de massa que pode ser recuperado se essa água for resfriada até 25°C; (b) Agora, suponha, que essa água sofra um processo de estrangulamento por meio de uma válvula até a pressão de 1 bar. Qual a fração de vapor de água saturado que pode ser obtido?



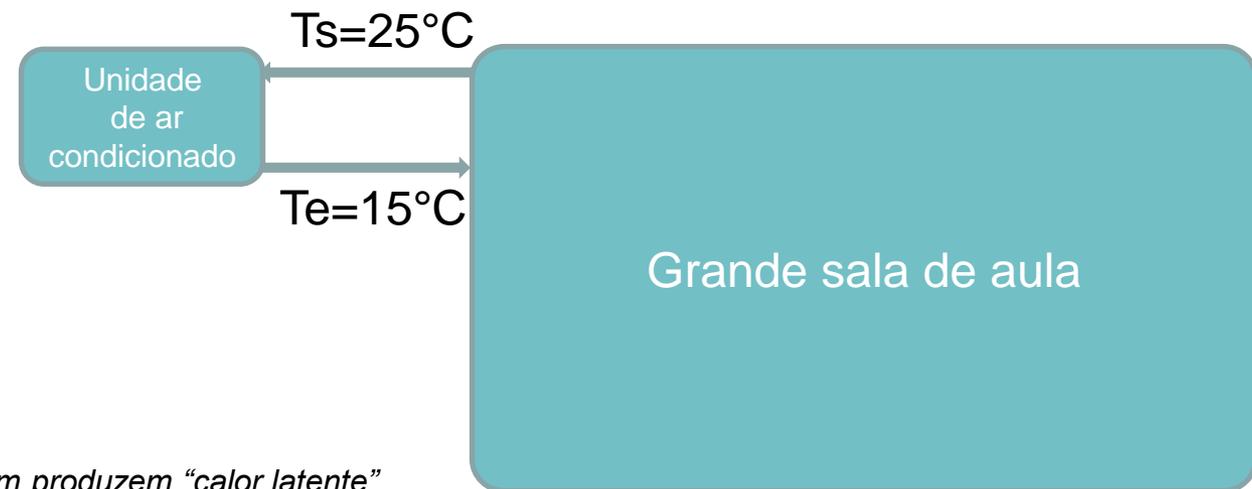
## Exemplo 4

Um gás ideal se expande em uma turbina adiabática (isolada termicamente) de 1200 K, 600 kPa até 700 K. Determine a vazão volumétrica na entrada da turbina, em  $\text{m}^3/\text{s}$ , necessária para a produção de uma potência de 200 kW no eixo da turbina. Os valores médios dos calores específicos desse gás no intervalo da temperatura do problema são  $C_p=1,13 \text{ kJ/kg.K}$  e  $C_v=0,83 \text{ kJ/kg.K}$ .  $R=0,30 \text{ kJ/kg.K}$



## Exemplo 5

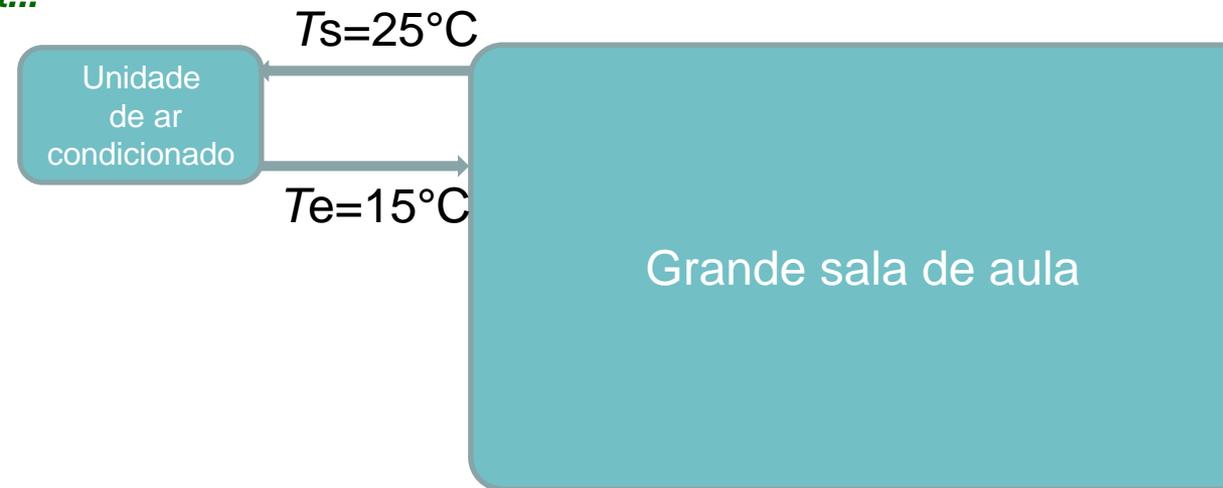
- Considere uma grande sala de aula em pleno Verão com 150 alunos, cada um dissipando 60 W de taxa de calor sensível (só aquecimento, sem evaporação da água\*). Todas as luzes, com 6,0 kW de potência nominal, são mantidas acesas. A sala não tem paredes externas, e, portanto, o ganho de calor através das paredes e do teto é desprezível. Ar condicionado está disponível a 15°C, e a temperatura do ar de retorno não deve exceder 25°C. Determine o fluxo de massa de ar, em kg/s, que precisa ser fornecido para a sala para manter constante a temperatura média da sala. Qual a vazão volumétrica de ar nas condições de insuflamento?



(\* ) Os seres humanos também produzem “calor latente” associado com a energia (entalpia) de evaporação da água



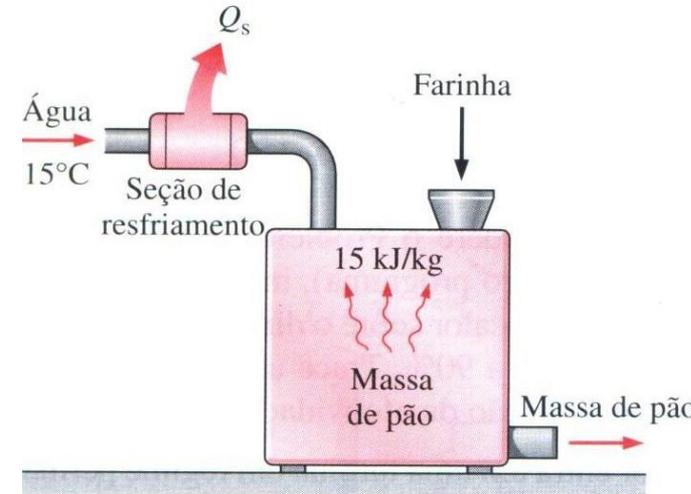
## Exemplo 5 – cont...





## Exemplo 6

Calor de hidratação da massa de pão, que é de  $15 \text{ kJ/kg}$  de pão, eleva a sua temperatura até níveis indesejados, a menos que algum mecanismo de resfriamento seja utilizado. Um modo prático de absorver o calor de hidratação é usar água fria no processamento da massa. Se uma receita pede a mistura de  $2 \text{ kg}$  de farinha para cada  $1 \text{ kg}$  de água, e a temperatura da água da cidade é de  $15^\circ\text{C}$ , determine a temperatura até a qual a água da cidade deve ser resfriada antes da mistura para que ela absorva todo o calor da hidratação quando a temperatura da água subir para  $15^\circ\text{C}$ . Assuma os calores específicos da farinha e da água como  $1,76$  e  $4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ , respectivamente e que a massa de pão e a farinha estejam também a  $15^\circ\text{C}$ .



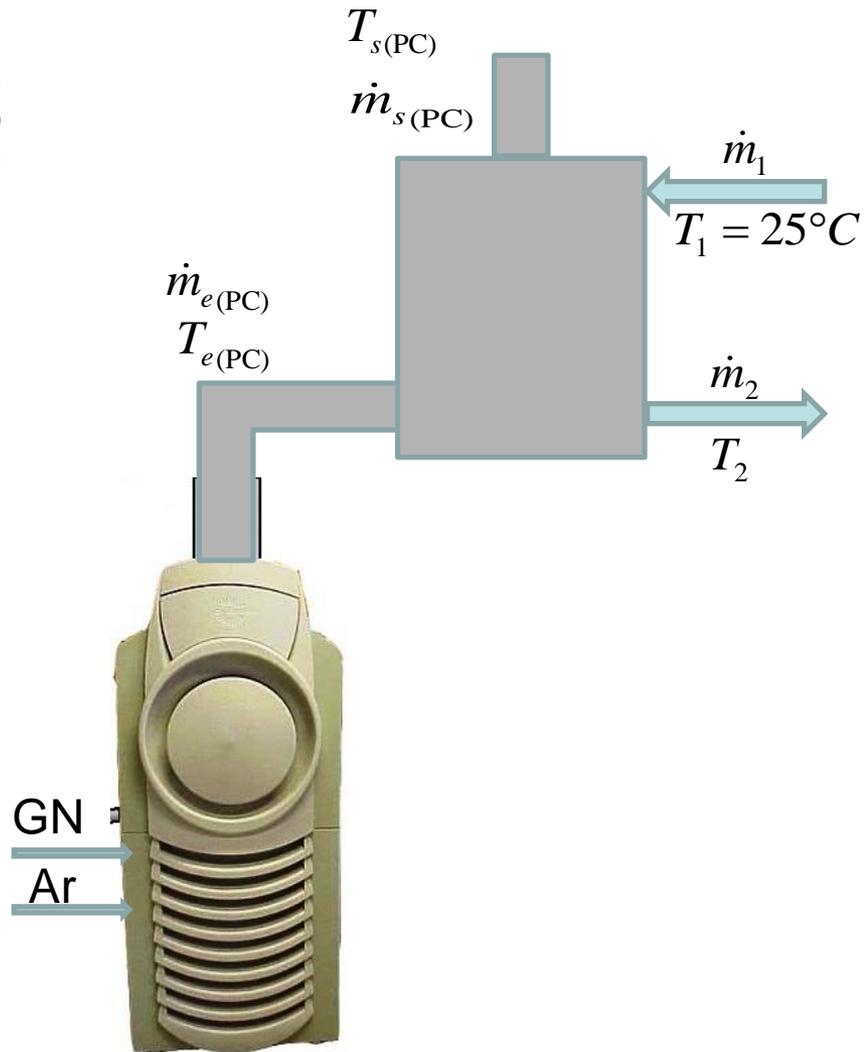


## Exemplo 7

Considere uma microturbina a gás natural, cujos dados operacionais consultados no catálogo do fabricante são: vazão mássica e temperatura de saída da turbina,  $0,31 \text{ kg/s}$  e  $275 \text{ °C}$ , respectivamente. Pede-se:

- A) a vazão de água quente que pode ser produzida se a água sair a  $T_2=80\text{°C}$  e os produtos de combustão saírem a  $T_{s(PC)}=50\text{°C}$
- B) a vazão de vapor produzido se o mesmo for vapor saturado a  $115\text{°C}$  e a temperatura de saída dos produtos de combustão  $T_{s(PC)}$ . Admita temperatura de pinça de  $10 \text{ °C}$ .
- C) a vazão de vapor produzido se o mesmo for vapor saturado a  $140\text{°C}$  e a temperatura de saída dos produtos de combustão  $T_{s(PC)}$ . Admita temperatura de pinça de  $10 \text{ °C}$ .
- D) a vazão de ar quente produzido

•Dados:  $C_{p \text{ ar}}=1,005 \text{ kJ/kg.K}$   
 $C_{p \text{ água}}= 4,18 \text{ kJ/kg.K}$





## Exemplo 8

Considere um motor de combustão interna (MCI), cujos dados operacionais consultados no catálogo do fabricante são: vazão e Temperatura de saída na saída da MCI, 0,026 kg/s e 500°C, respectivamente

$$C_{p, \text{ar}} = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$$

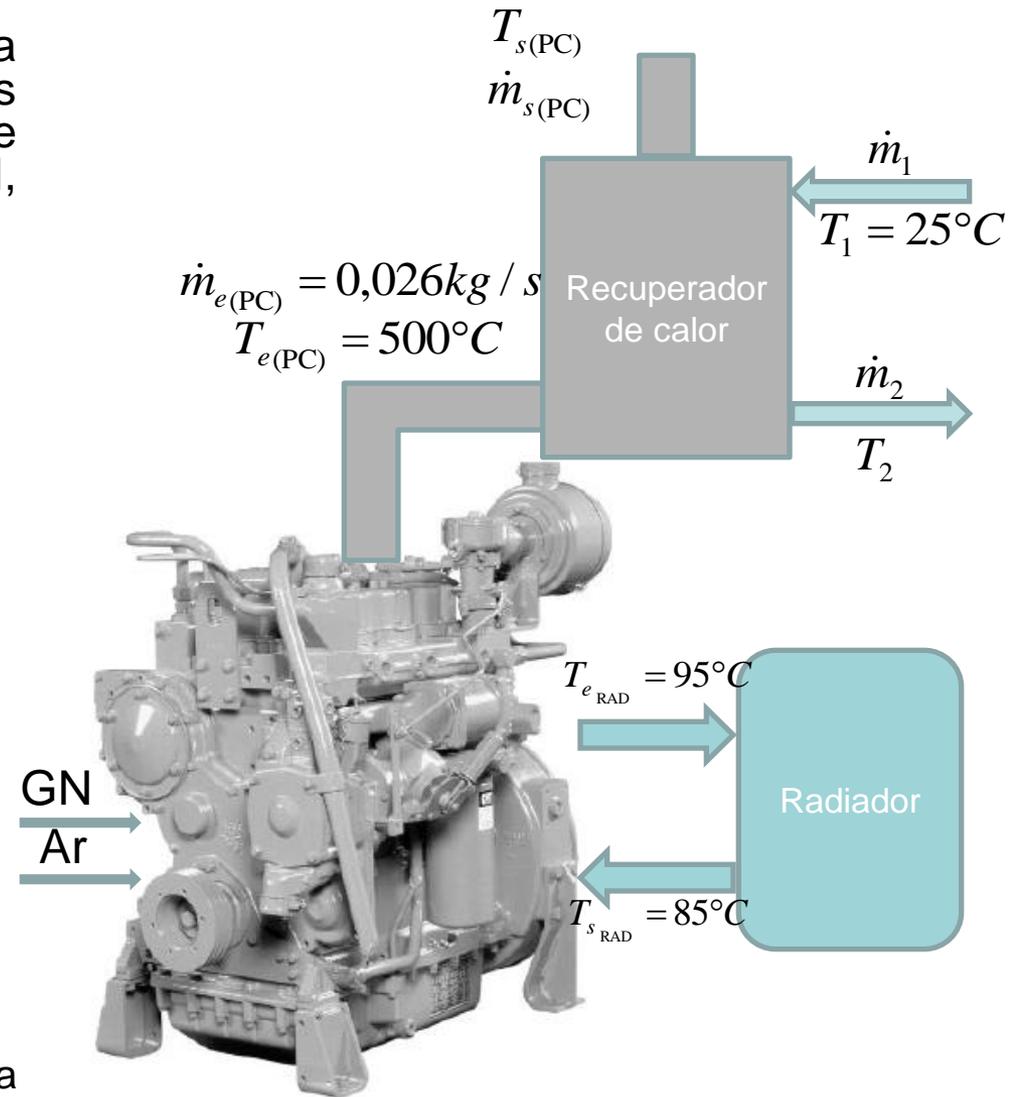
$$C_{p, \text{água}} = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$$

A) a vazão de água quente que pode ser produzida se a água sair a  $T_2 = 80^\circ\text{C}$  se os produtos de combustão saem a  $T_{s(\text{PC})} = 50^\circ\text{C}$

B) a vazão de vapor produzido se o mesmo for vapor saturado a  $115^\circ\text{C}$  e a temperatura de saída dos produtos de combustão  $T_{s(\text{PC})}$ . Admita temperatura de pinça de  $10^\circ\text{C}$ .

C) a vazão de vapor produzido se o mesmo for vapor saturado a  $140^\circ\text{C}$  e a temperatura de saída dos produtos de combustão  $T_{s(\text{PC})}$ . Admita temperatura de pinça de  $10^\circ\text{C}$ .

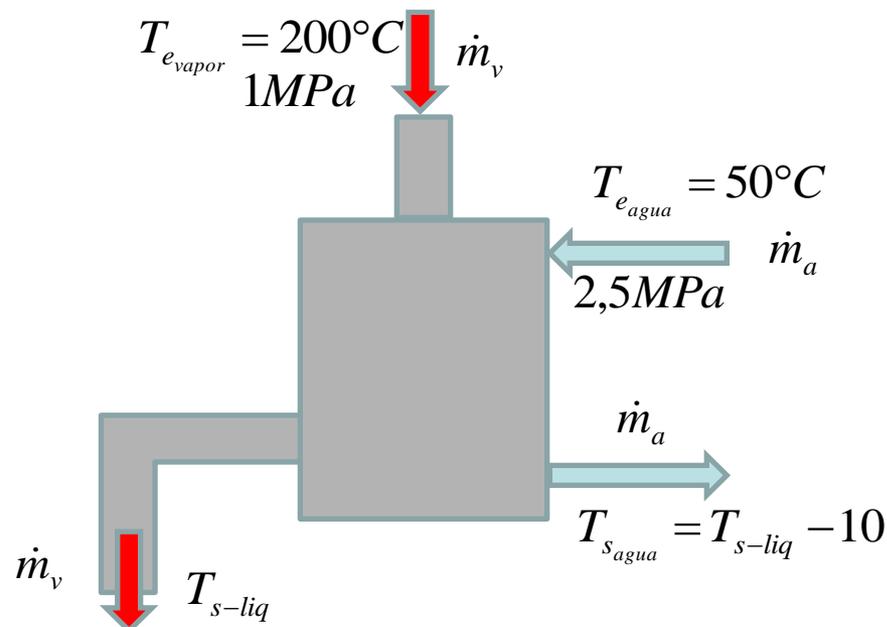
D) calcule a vazão de água do radiador, cuja a potência térmica dissipada é de 10 kW





## Exemplo 9

Nas grandes usinas de potência a vapor, a água de alimentação é freqüentemente aquecida em um aquecedor de água de alimentação usando vapor de água extraído de uma turbina em algum estágio. Vapor de água entra no aquecedor de água de alimentação a 1 MPa e 200°C e sai como líquido saturado à mesma pressão. A água de alimentação entra no aquecedor a 2,5 MPa e 50°C e sai a 10°C abaixo da temperatura de saída do vapor d'água. Determine a razão entre os fluxos de massa do vapor de extração e da água de alimentação.





## Exemplo 10

Um compressor de ar adiabático deve ser acionado por acoplamento direto com uma turbina a vapor adiabática que também está acionando um gerador. O vapor de água entra na turbina a 12,5 MPa e 500 °C à vazão de 25 kg/s e sai a 10 kPa e título de 0,92. O ar entra no compressor a 98 kPa e 295 K à uma vazão de 10 kg/s e sai a 1 MPa e 620 K. Determine a potência líquida fornecida ao gerador pela turbina.

