

**Enunciado de Yoda para a
1ª Lei da Termodinâmica:**

via work
or
via heat,
every
energy transfer,
happen can!

Prefácio



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Termodinâmica é uma disciplina que desperta bastante interesse por sua abrangência, caráter científico e conexão com temas atuais, como a questão energética e ecológica. Por outro lado, por trás de sua simplicidade matemática, esconde seu lado conceitual, repleto de nuances. Essa sua faceta faz com que aqueles que buscam aprendê-la tenham a falsa impressão de que a compreendem, o que fica evidente que não é o caso quando falham em sua aplicação. Este material foi desenvolvido com o objetivo de servir de apoio a você, aluno, na construção das competências demandadas por essa disciplina.

Os slides são o resultado de três anos de trabalho em que contribuíram professores e alunos para a sua evolução. A primeira versão surgiu em 2012 e desde então o material tem sido aprimorado através da inclusão de slides explicativos de tópicos mais sofisticados, de exercícios resolvidos de alto nível e de slides com dados reais de equipamentos e processos. Pretende-se que este material seja uma ferramenta de apoio para as disciplinas PME 3340 e PME 3301 da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, uma ponte para assuntos mais avançados e para a atuação profissional do futuro engenheiro. Com base nesta proposta, este material deve ser dinâmico, sendo sempre atualizado, com a inclusão de dados mais recentes ou melhorias do ponto de vista pedagógico e técnico. Assim sendo, sua contribuição é fundamental para a evolução desse material. Envie seus comentários e sugestões para mausferreira@usp.br.

Seguem algumas dicas de como utilizar o material e de como estudar para Termodinâmica:

Aproveite o tempo de aula: não tenha vergonha de perguntar.

A aula por si só não é suficiente para seu sucesso na disciplina.

Leia a teoria antes da aula e não deixe a matéria acumular.

Resolva exercícios de forma reflexiva e não mecânica. Explore outros cenários que não aqueles inicialmente propostos!

Maurício Silva Ferreira

São Paulo, 31 de outubro de 2015.



Capa:

<http://www.mchmultimedia.com/PhysicalChemistry-help/clientstories/may-the-energy-be-with-you-yodas-law-of-thermodynamics.html>

Várias figuras e exemplos utilizados nos slides foram retirados das referências a seguir. Em geral, as figuras são adaptadas e traduzidas para o português.

Van Wylen, Borgnakke, C., Sonntag, R.E., Fundamentos da Termodinâmica, 7a Ed., Edgard Blucher, 2009.

Moran, M.J.; Shapiro, H.N. Princípios de termodinâmica para engenharia. LTC, 6 ed., 2009.

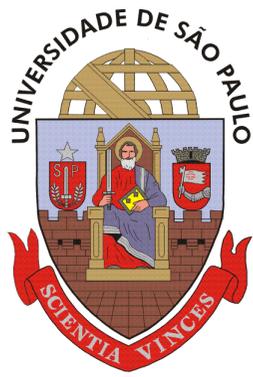
Çengel, Y. A.; Boles, M. A. Termodinâmica. McGraw-Hill, 5. ed., 2006.

Modell; Reid, Thermodynamics and its applications, 2a ed, Prentice Hall, 1984.

Klein, S.; Nellis, G. Thermodynamics, Cambridge University Press 2011.



1) Introdução.....	5
2) Conceitos Fundamentais.....	38
3) Substância Pura.....	67
4) Trabalho e Calor.....	102
5) Primeira Lei da Termodinâmica.....	138
6) Primeira Lei da Termodinâmica para Volume de Controle.....	181
7) Segunda Lei da Termodinâmica.....	222
8) Entropia.....	266
9) Segunda Lei da Termodinâmica para Volume de Controle.....	320
10) Ciclos Motores a Vapor.....	339
11) Ciclos Motores a Ar.....	397
12) Ciclos de Refrigeração.....	461



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

1) Introdução



Do grego **Termhe (calor)** + **Dynamis (potência)** = **Termodinâmica**

Termodinâmica = ciência da energia e da entropia.

Termodinâmica: objeto de estudo é a energia e suas transformações.



O que lhe agregará o curso?

- ◆ Aprendizado de uma disciplina fundamental de Engenharia;
- ◆ Aquisição de “cultura de Engenharia”, já que abordamos inúmeros problemas reais;
- ◆ Fornecimento de conhecimentos para entendimento de temas atuais, como a questão energética e o aquecimento global;
- ◆ Desenvolvimento de metodologia científica;
- ◆ Desenvolvimento do raciocínio abstrato.



Usinas hidrelétricas

Origem de nossa energia



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

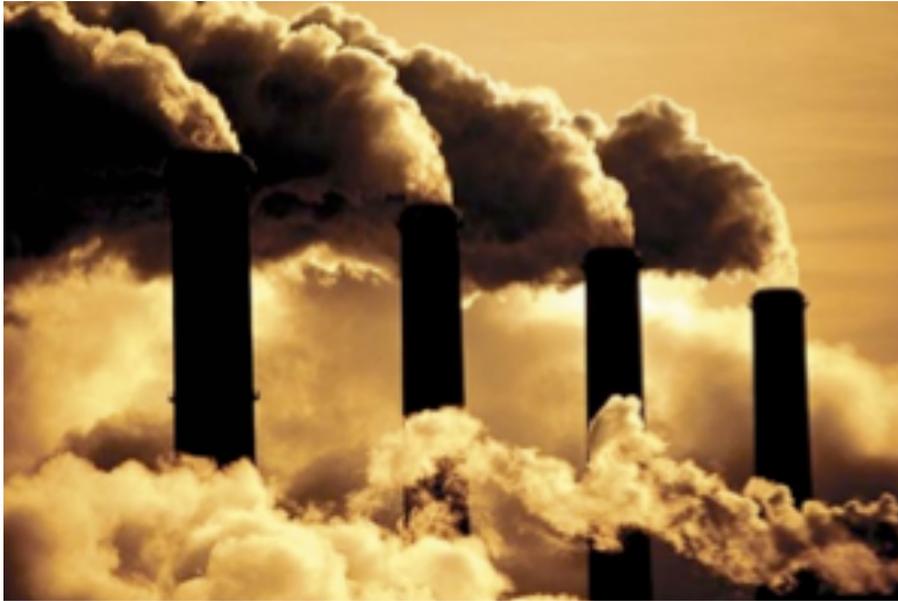


Usinas termoelétricas



Usinas nucleares

Qual o impacto?



Poluição



Aquecimento global?



Fazendas eólicas



Células fotovoltaicas



Plantas solares

Repartição interna de energia



RENOVÁVEIS ▶ 41,0%

**biomassa da
cana**
16,1%



hidráulica¹
12,5%



**lenha e
carvão vegetal**
8,3%



**lixívia e outras
renováveis**
4,2%



¹ Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica

NÃO RENOVÁVEIS ▶ 59,0%

**petróleo e
derivados**
39,3%



**gás
natural**
12,8%



**carvão
mineral**
5,6%

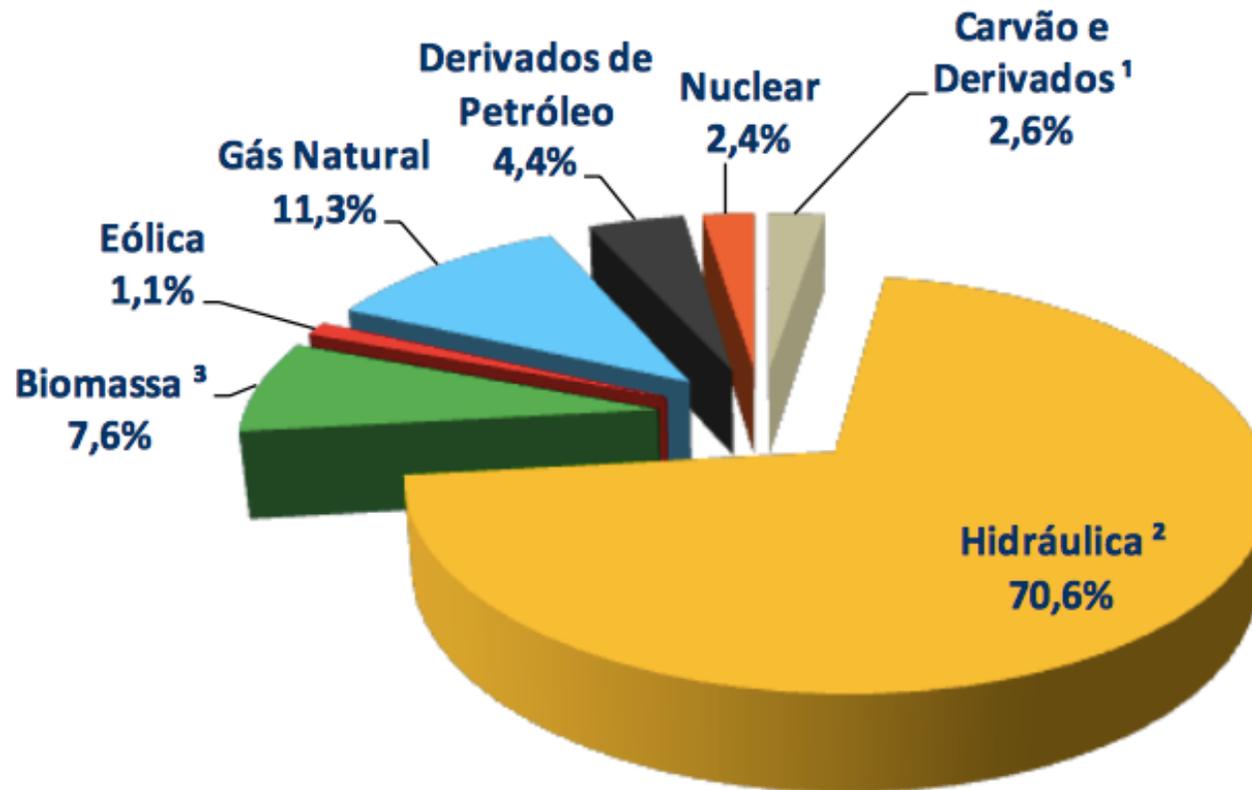


urânio
1,3%



Fonte: Ministério das Minas e Energia - Balanço energético (2014).

BRASIL (2013)



geração hidráulica² em 2013: 430,9 TWh

geração total² em 2013: 609,9 TWh

Fonte: Ministério das Minas e Energia - Balanço energético (2014).

Capacidade instalada em MW



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Fonte	2013	2012	Δ 13/12
Hidrelétrica	86.018	84.294	2,0%
Térmica ¹	36.528	32.778	11,4%
Nuclear	1.990	2.007	-0,8%
Eólica ²	2.207	1.894	16,5%
Capacidade disponível	126.743	120.973	4,8%

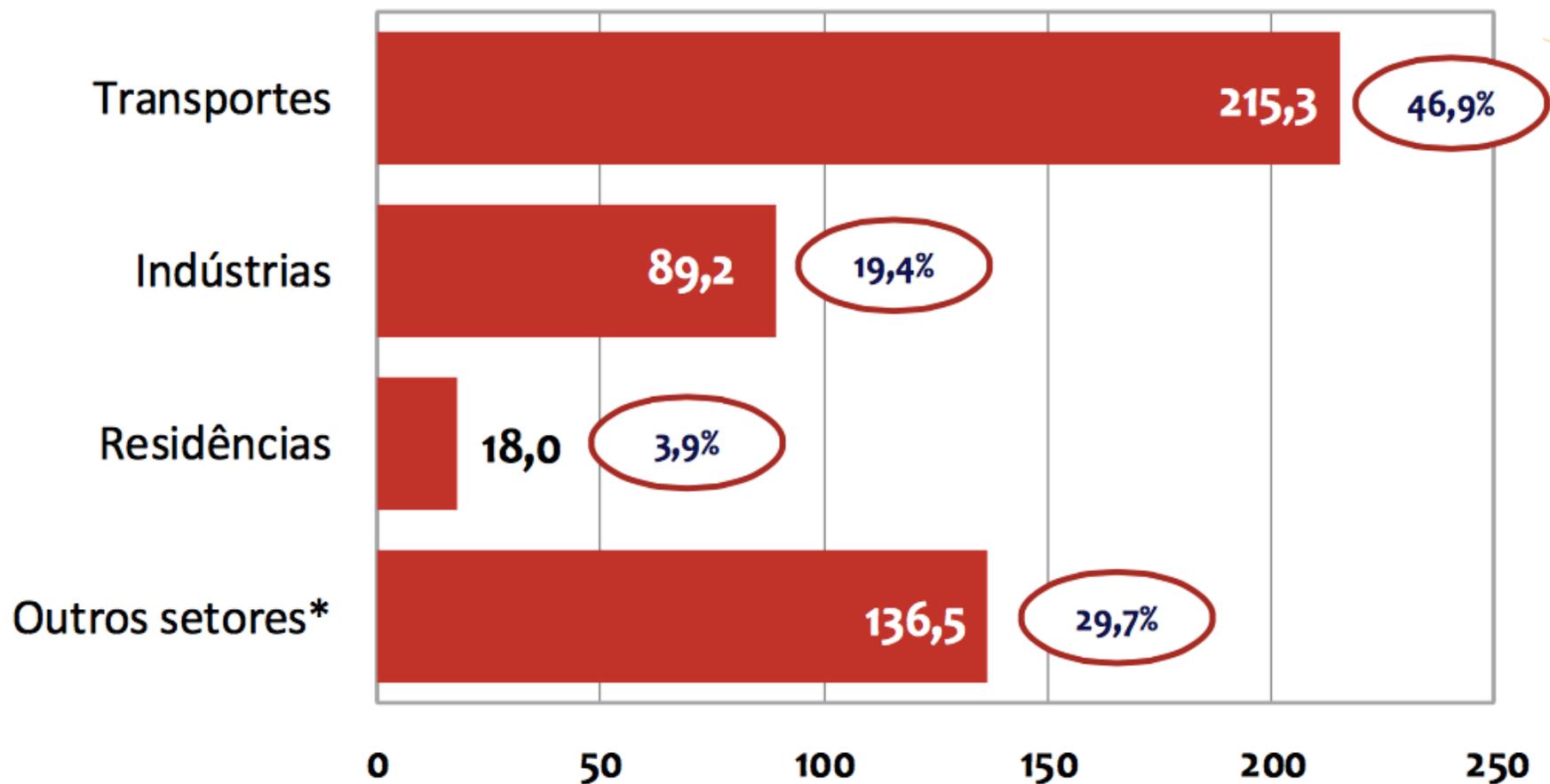
¹ Inclui biomassa, gás, petróleo e carvão mineral

² Inclui solar

Fonte: Ministério das Minas e Energia - Balanço energético (2014).



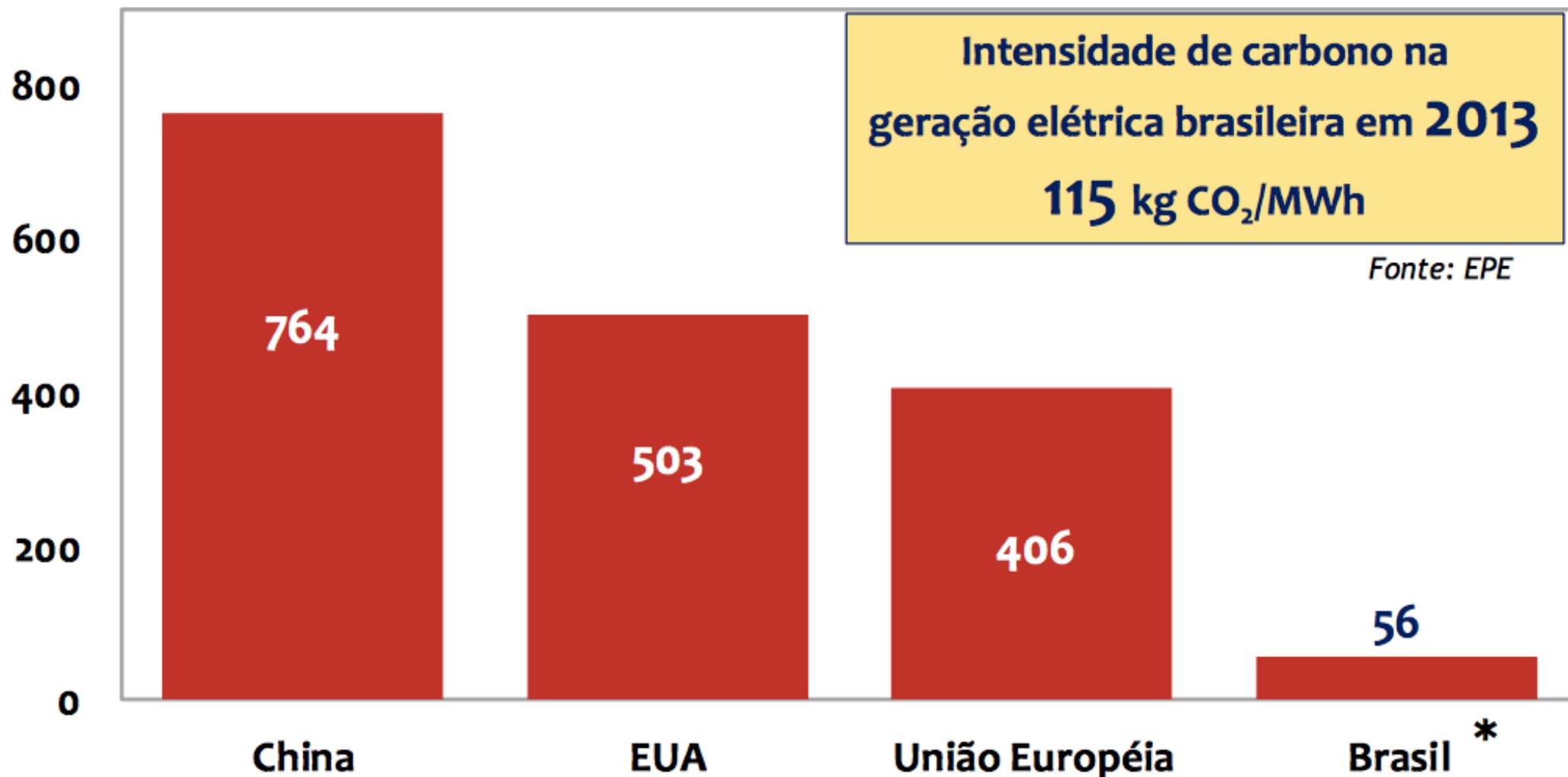
Emissões totais (2013), em Mt CO₂



* inclui os setores agropecuário, serviços, energético, elétrico e as emissões fugitivas

Fonte: Ministério das Minas e Energia - Balanço energético (2014).

Emissões de CO₂ por MWh gerado (2011)



Fonte: Ministério das Minas e Energia - Balanço energético (2014).



Somos constantes bombardeados com a idéia de utilização de fontes alternativas de energia.

A conta que devemos fazer é simples? Basta escolhermos uma fonte alternativa e viável economicamente que nossos problemas ecológicos estão resolvidos?

A Termodinâmica diz que não. Veja os exemplos a seguir...

Aproveitamento da energia solar: aquecedor solar



Água deixa o aquecedor de 50 a 70 °C

Para conversão em energia mecânica
teríamos um rendimento máximo de
apenas 13%!

Portanto esse equipamento é adequado apenas para o aquecimento de água líquida!

Aproveitamento da energia: concentrador solar



Fluido térmico deixa o aquecedor no
de 300 a 400°C!

Para conversão em energia mecânica
teríamos um rendimento máximo de
56%!

Portanto é mais adequado utilizar esse equipamento para
conversão em energia mecânica do que para apenas
aquecimento!

★ Tão importante quanto a geração é o uso da energia!



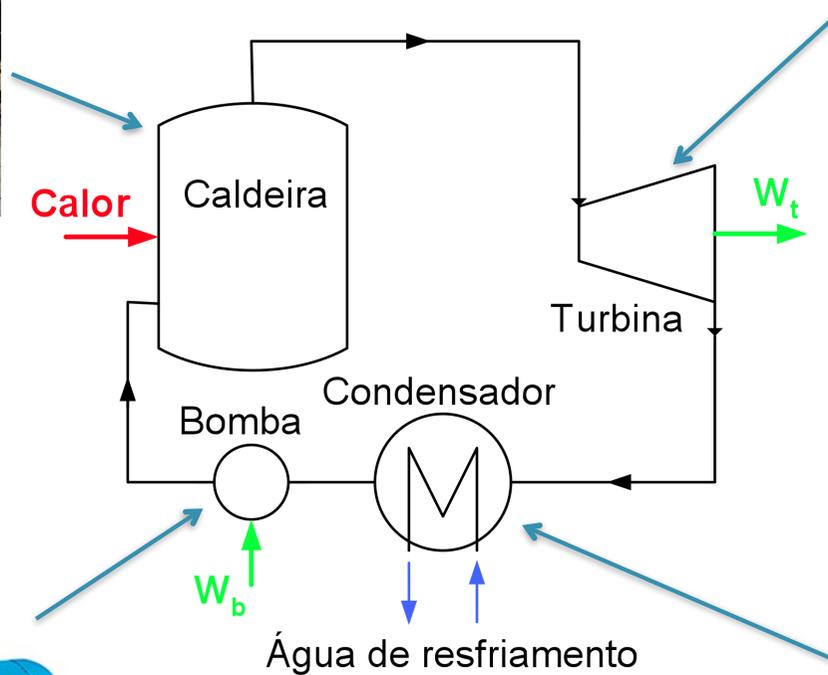
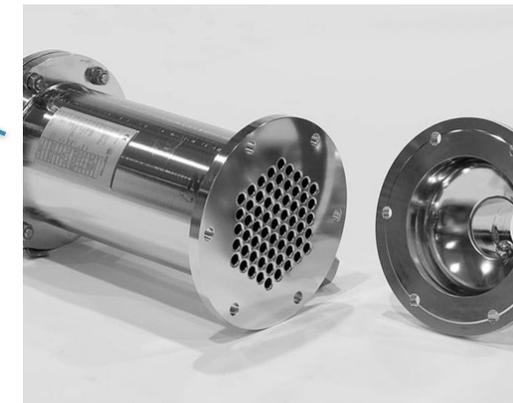
Vejamos como funcionam alguns sistemas de potência e refrigeração comuns. Trataremos desses sistemas com maiores detalhes ao longo de nosso curso.

Vamos aproveitar, também, e discutir alguns aspectos econômicos e de viabilidade técnica associados à conversão de energia!

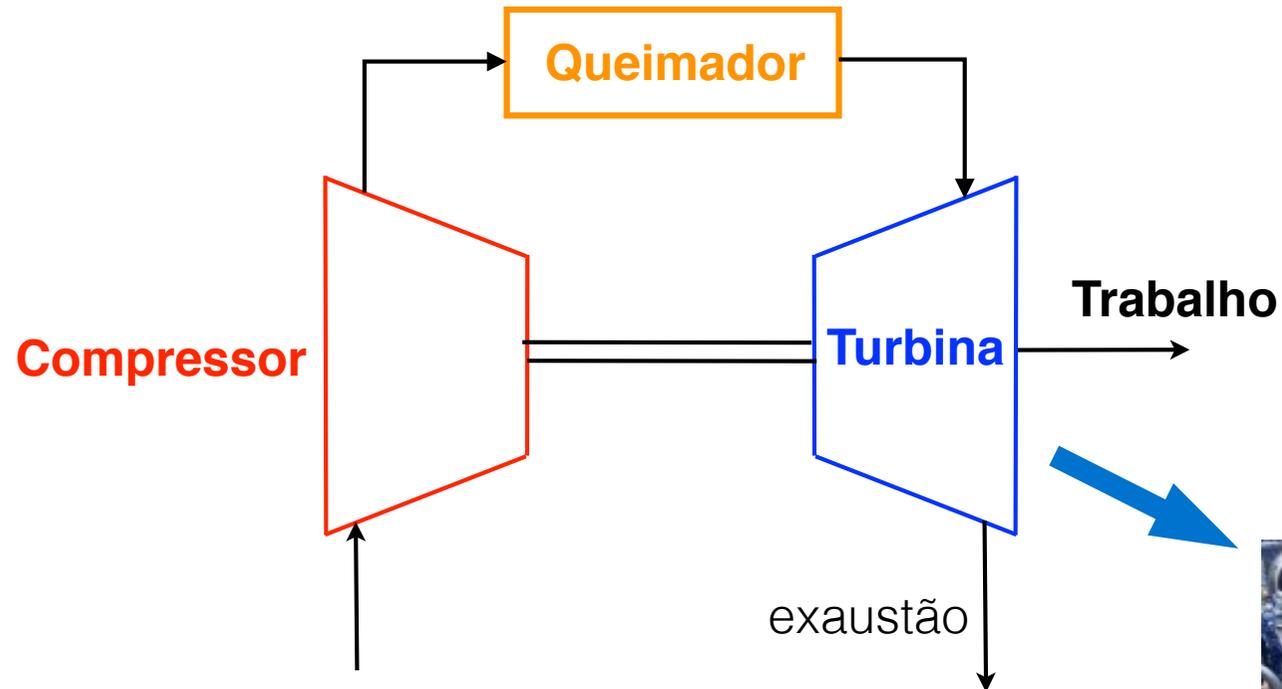
Ciclo de potência a vapor



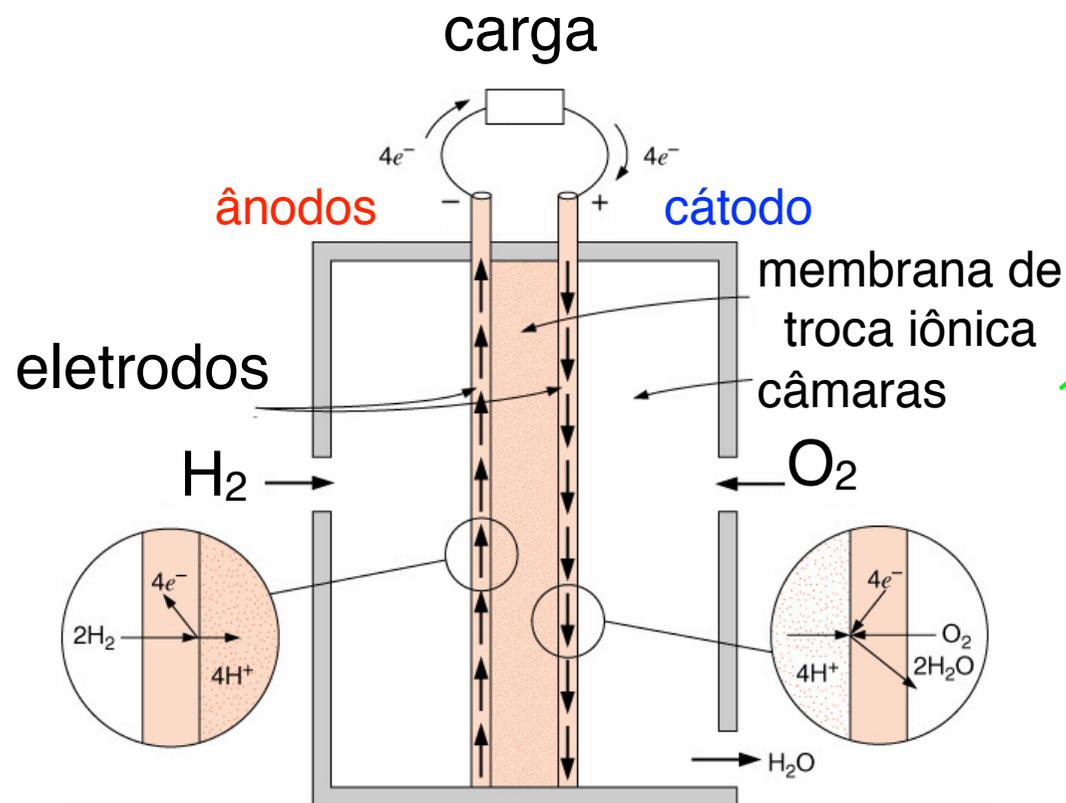
Fluido de trabalho: água



Ciclo de potência a gás



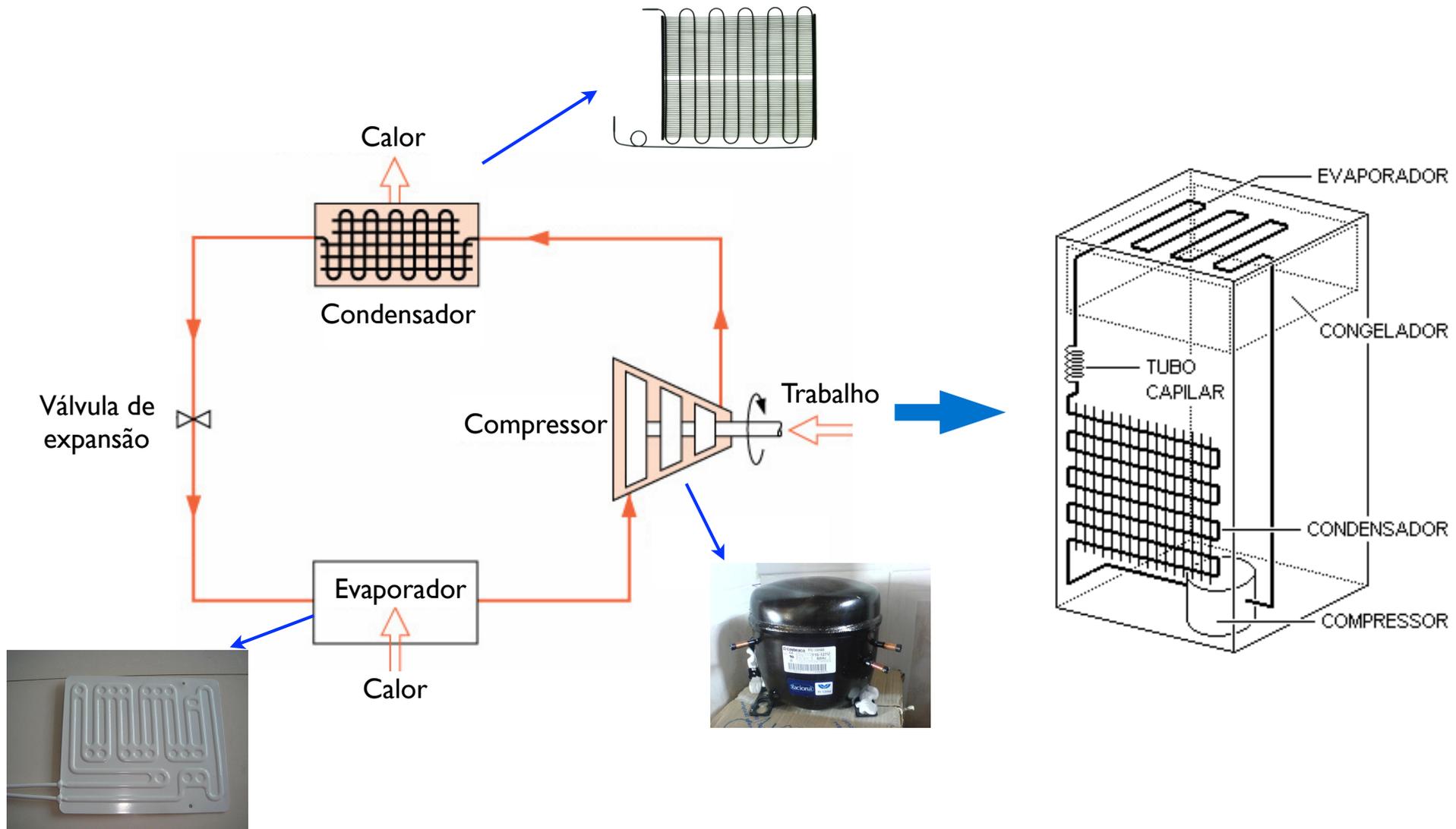
Célula a combustível



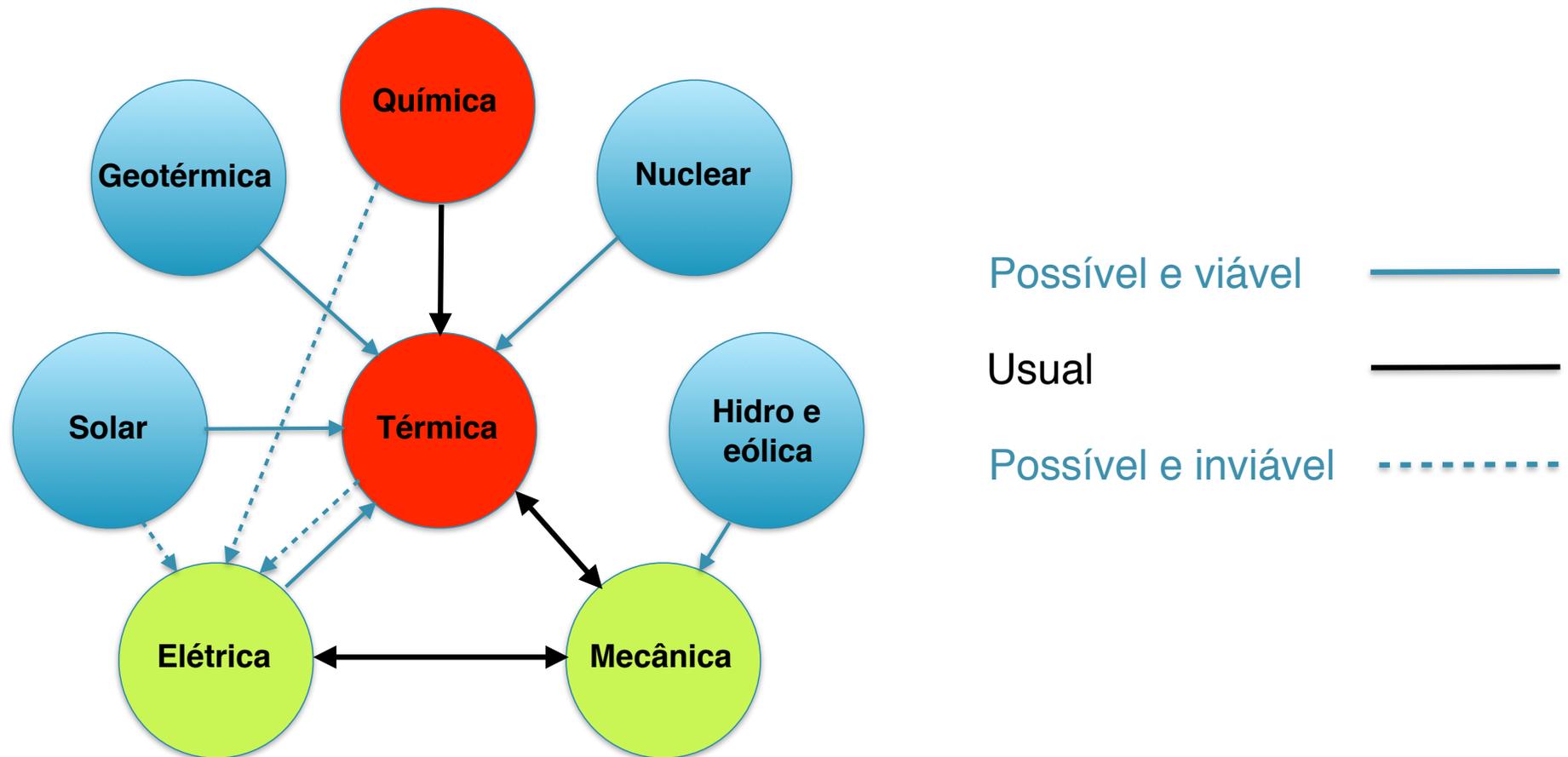
Ciclo de refrigeração



Fluido de trabalho: fluido refrigerante



Conversão de energia



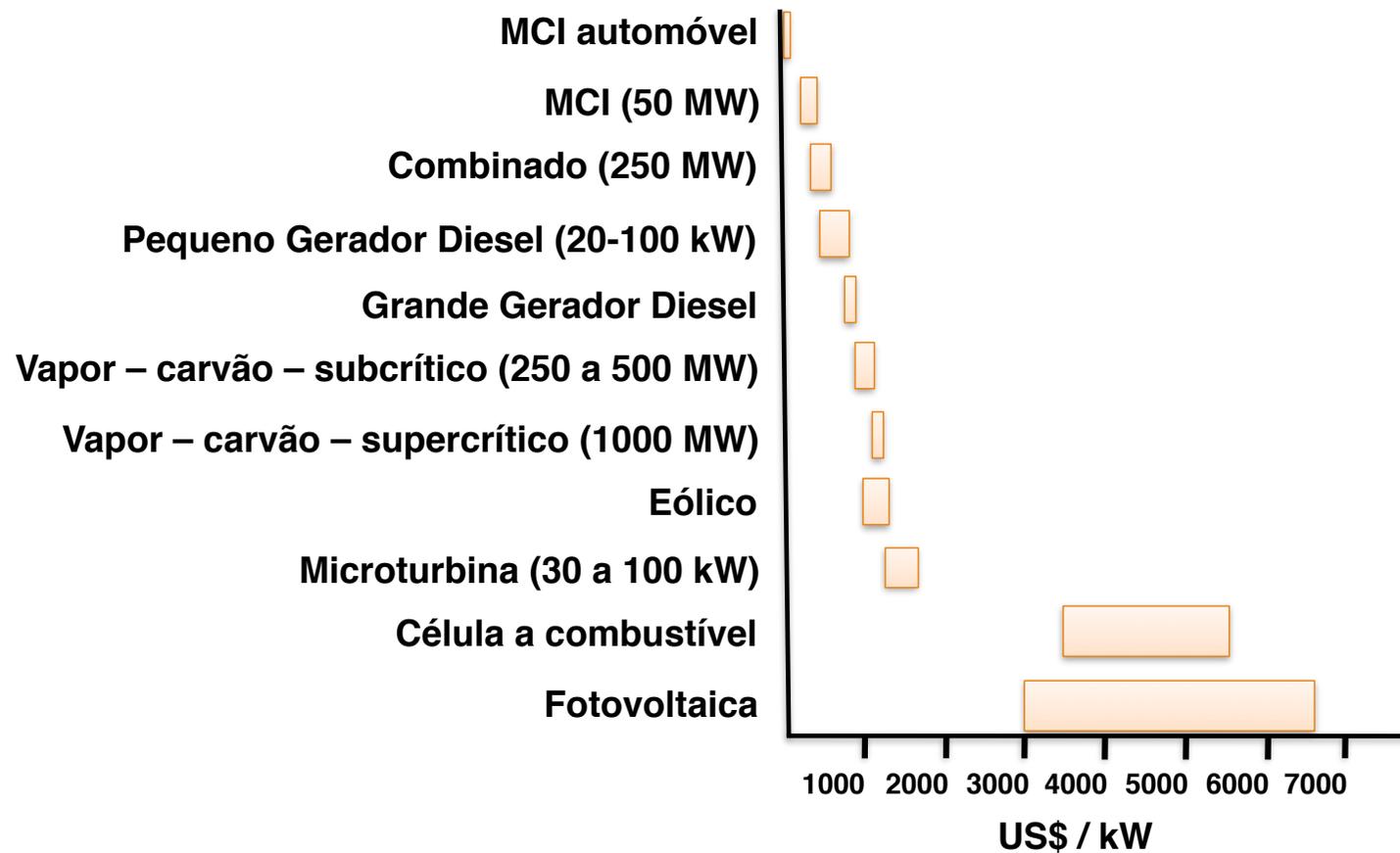
Adaptado de: Eastop, T. D., Croft, D. R., 1996, Energy Efficiency for Engineers and Technologists, Addison Wesley Longman Limited.

Sistemas de potência

Origem	Rendimento típico (%)	Faixa típica (%)
Fotovoltaica	10	5 a 10
Solar térmica	15	10 a 25
Turbina a gás	30	15 a 38
Otto	30	25 a 35
Nuclear	33	32 a 35
Turbina a vapor	33	25 a 39
Turbina eólica	40	30 a 50
Diesel	40	35 a 49
Célula a combustível	45	40 a 70
Combinado	50	45 a 60
Hidroelétrica	85	70 a 90



Sistemas de potência



* Valores aproximados



E se nenhum argumento o convenceu da importância da disciplina, lembre-se que:

Você precisa passar em Termodinâmica para se formar!



- ◆ A disciplina é matematicamente simples, porém extremamente conceitual;
- ◆ A disciplina exige “tempo de fermentação”, por isso estude a teoria com antecedência, de preferência antes da aula;
- ◆ Parte da dificuldade está na necessidade de se utilizar tabelas de propriedades, contribuindo, também, para a falta de tempo;
- ◆ Os exercícios resolvidos do livro-texto estão disponíveis, entretanto o aluno deve resolver os exercícios e depois conferir com a solução pronta.



Básica:

◆ Van Wylen, Borgnakke, C., Sonntag, R.E., **Fundamentos da Termodinâmica**, 7^a Ed., Edgard Blucher, 2009.

Complementar:

◆ Moran, M.J.; Shapiro, H.N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. LTC, 6 ed., 2009.

◆ Çengel, Y.A.; Boles, M.A. **Termodinâmica**. McGraw-Hill, 5. ed., 2006.



- ★ Três provas com consulta a apenas uma folha de formulário, de tamanho A4, preparada pelo aluno, a ser recolhida ao final, e a um extrato das Tabelas Termodinâmicas. É vedado o empréstimo de material;
- ★ Trabalhos compostos por exercícios a serem resolvidos em sala ou em casa pelo aluno, individualmente;
- ★ Substitutiva fechada. Substitui a prova faltante;
- ★ Média Final = $0,2 \times P1 + 0,2 \times P2 + 0,4 \times P3 + 0,2 \times Tr$

Cronograma de atividades



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

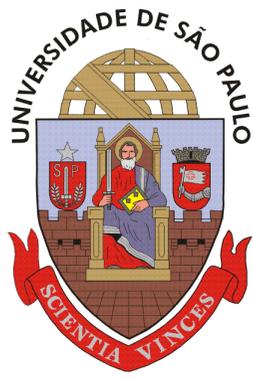
PME 2321 - Termodinâmica		
Carga horária: 4 créditos		I Semestre
PI	Conceitos fundamentais	Cap. 2
	Substância pura	Cap. 3
	Trabalho e Calor	Cap. 4
	Primeira Lei da Termodinâmica - Sistema	Cap. 5
	Primeira Lei da Termodinâmica - Volume de controle	Cap. 6
P2	Segunda Lei da Termodinâmica	Cap. 7
	Entropia	Cap. 8
	Segunda Lei da Termodinâmica - Volume de Controle	Cap. 9
P3	Ciclos Motores a Vapor	Cap. 11
	Ciclos de Refrigeração	Cap. 11 e 12
	Ciclos Motores a Ar	Cap. 12



- ◆ Aproveite o tempo de aula: não tenha vergonha de perguntar!
- ◆ A aula por si só não é suficiente para seu sucesso na disciplina!
- ◆ Leia a teoria com antecedência. Não deixe a matéria acumular!
- ◆ Resolva exercícios de forma reflexiva e não mecânica. Explore outros cenários que não aqueles inicialmente propostos!



BOM CURSO!



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

2) Conceitos Fundamentais



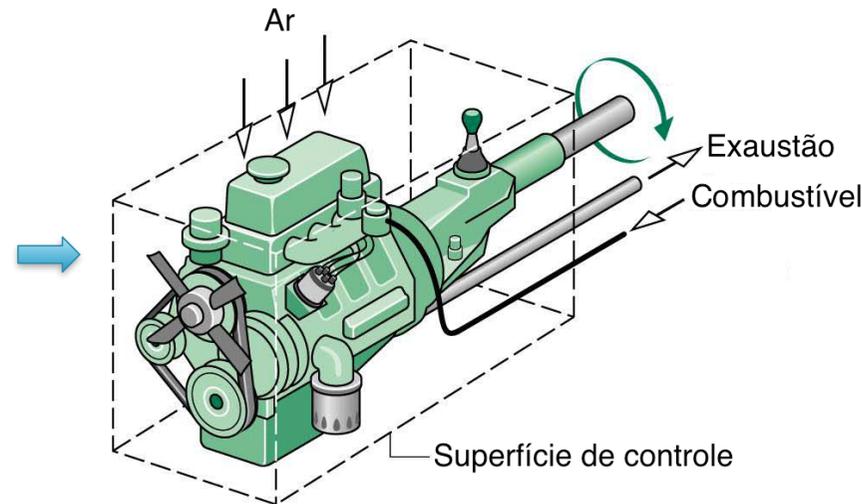
- ❖ **Sistema termodinâmico** – quantidade de matéria com massa e identidade fixas sobre a qual nossa atenção é dirigida.
- ❖ **Volume de controle** – região do espaço sobre a qual nossa atenção é dirigida.
- ❖ **Vizinhança** – tudo que é externo ao sistema ou volume de controle.
- ❖ **Fronteira** – superfície real ou imaginária que separa o sistema da vizinhança. A fronteira não tem espessura, volume ou massa.

Fronteira {
Fixa
Móvel

É importante reconhecer o tipo de sistema e indicá-lo no início da análise, pois as expressões dos princípios termodinâmicos são diferentes para sistemas e volumes de controle.

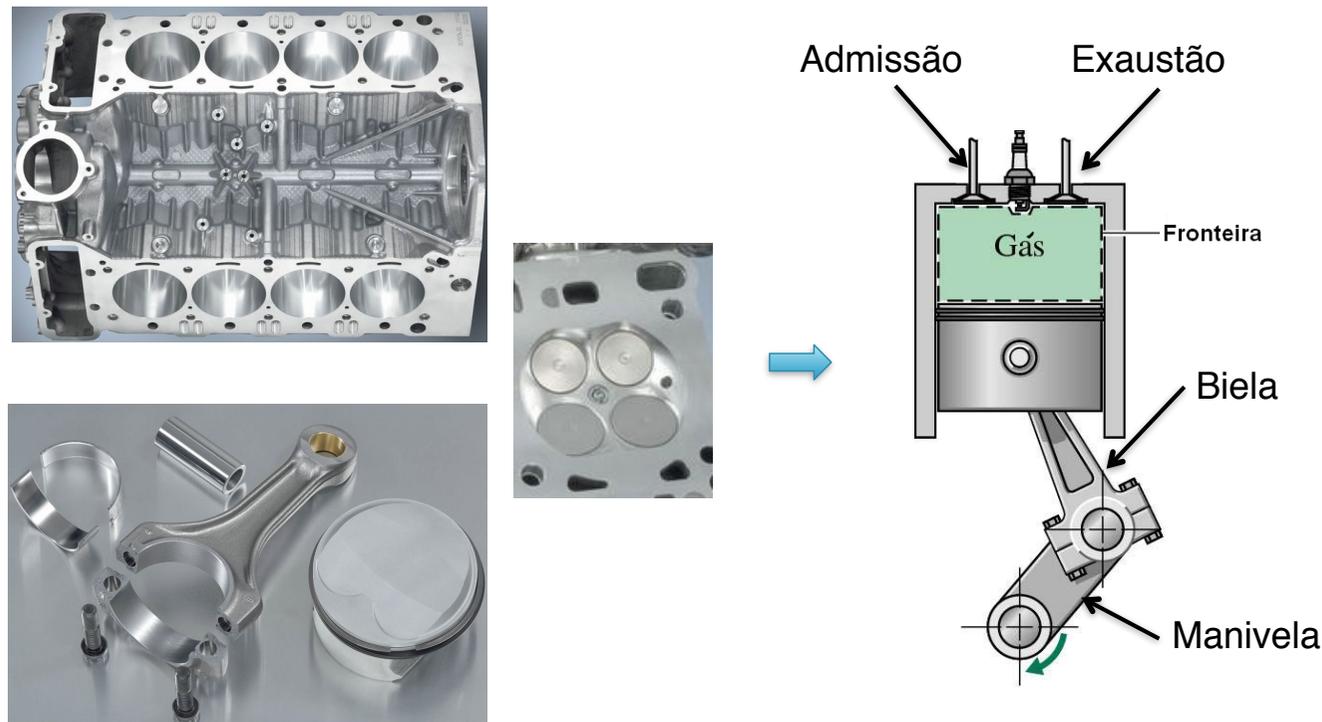
❖ **Identificação sistema / volume de controle, exemplos:**

(a) Motor de combustão interna;



Resp. - Volume de controle.

(b) Cilindro de MCI (motor de combustão de interna);

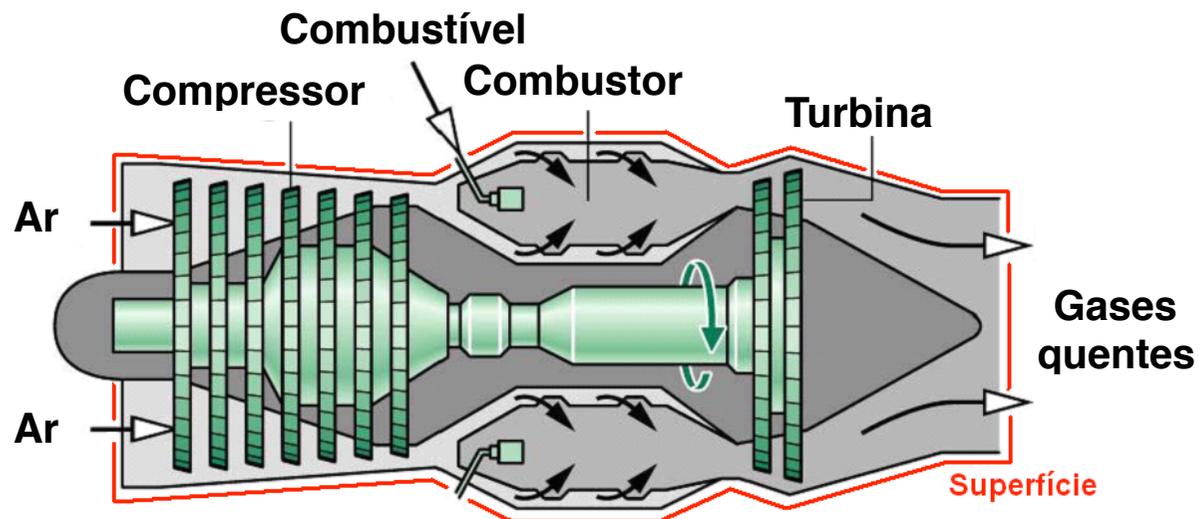


Resp. - Sistema (válvulas fechadas) ou VC com pelo menos uma válvula aberta.

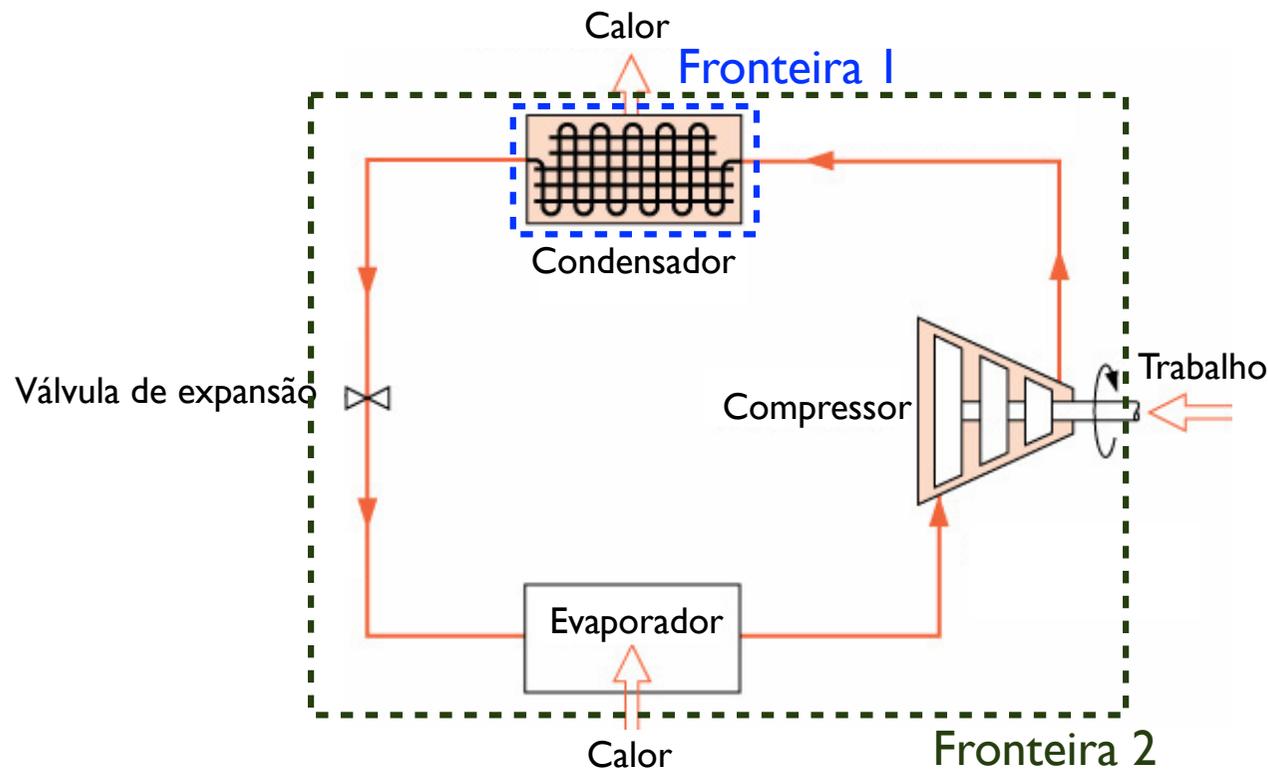
(c) Motor a jato;



Resp. - Volume de controle.



(d) Ciclo de refrigeração por compressor de vapor;



Resp. 1 - Volume de controle.

Resp. 2 - Sistema.



(e) Ciclo motor a vapor;



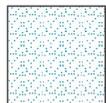
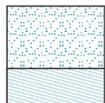
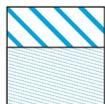
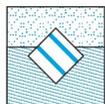
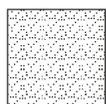
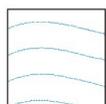
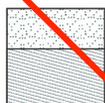
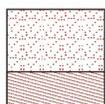
Devemos apenas observar o que acontece na fronteira!



❖ **Ponto de vista microscópico** – ocupa-se da estrutura da matéria (Termodinâmica Estatística).

❖ **Ponto de vista macroscópico** – ocupa-se com o comportamento geral ou global (Termodinâmica Clássica).

Fase: Quantidade de matéria totalmente homogênea em composição química e em estrutura física. Em uma fase todas as propriedades são uniformes.

	Homogênea (fase única)	Heterogênea (várias fases)
Componente único	 Vapor  Água  Gelo	 Vapor e água  Gelo e água  Vapor, água e gelo
Vários componentes	 Ar  Gases de combustão  Água do mar	 Ar e ar líquido  Vapor de combustível, ar e combustível líquido  Água e óleo

**Fora do
nosso escopo**



Substância pura: Composição química homogênea e invariável. Ela pode existir em mais de uma fase, porém sua composição química deve ser a mesma em cada fase.

Exemplos:

- ❖ Água;
- ❖ Fluidos refrigerantes (R12, R22, R134a, R410A, R404A);
- ❖ Gás Oxigênio;
- ❖ Gás Nitrogênio.

Contra-exemplo:

- ❖ Ar e "ar-líquido", duas fases com composição química diferente.



Cada fase pode existir a várias pressões e temperaturas (propriedades macroscópicas mensuráveis) ou, melhor, em vários estados.

Cada estado termodinâmico pode ser identificado ou descrito por certas propriedades macroscópicas como, por exemplo, pressão e temperatura.

As propriedades termodinâmicas podem ser divididas em duas classes, as intensivas e as extensivas.

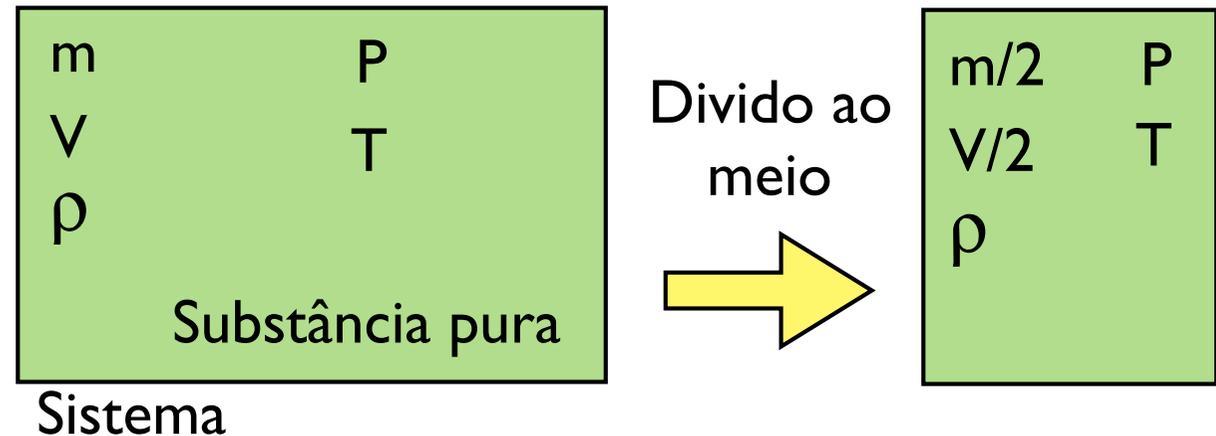
Propriedade intensiva: seu valor é independente da massa.

Propriedade extensivas: seu valor é dependente da massa.



Intensivas ou extensivas?

- massa (m);
- volume (V);
- massa específico (ρ);
- pressão (P);
- temperatura (T).



Intensivas:

Pressão;

Temperatura;

Massa específica;

Energia interna específica (u);

Entalpia específica (h);

Entropia específica (s).

Extensivas:

Massa (m);

Volume (V);

Energia interna (U);

Entalpia (H);

Entropia (S).

Freqüentemente nos referimos não apenas às propriedades de uma substância, mas também às propriedades de um sistema.

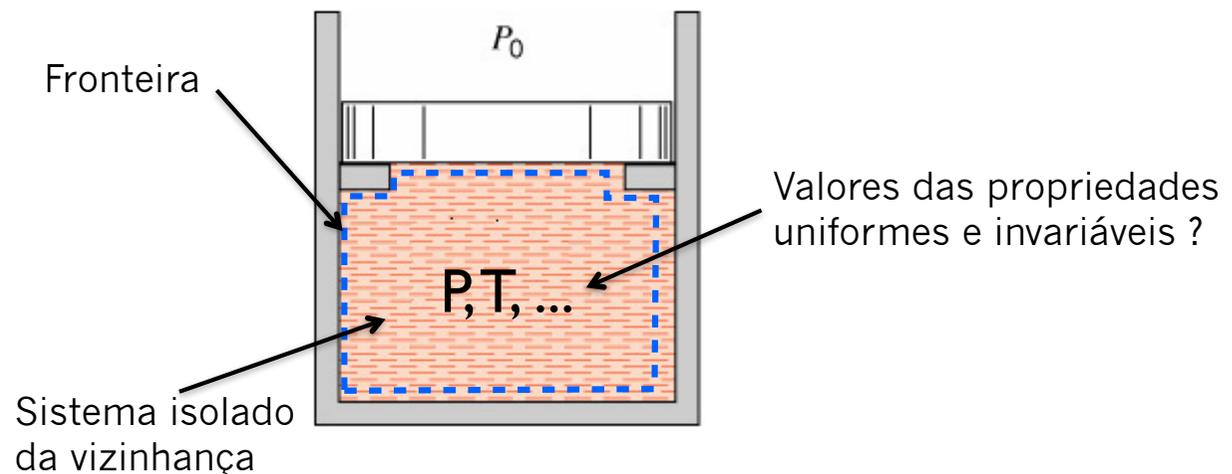


Isso implica que o valor da propriedade tem significância para todo o sistema.



O que por sua vez implica no conceito de equilíbrio.

Exemplo: **verificação do equilíbrio**





Quando o valor de pelo menos uma propriedade do sistema é alterado, ocorreu uma mudança de estado.



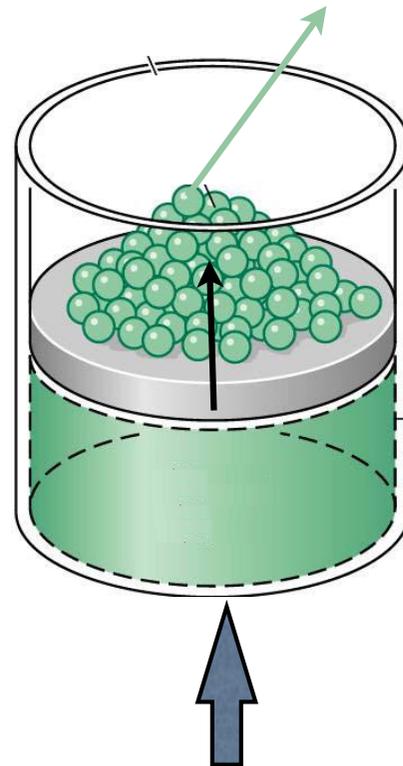
O caminho definido pela sucessão de estados que o sistema percorre é chamado de processo.



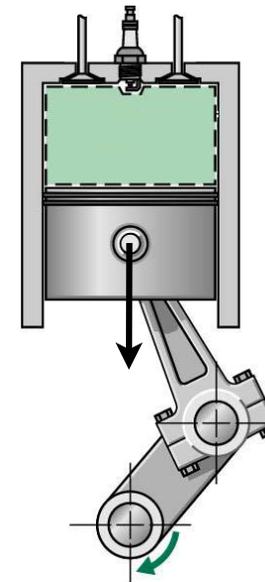
Um ciclo termodinâmico é uma seqüência de processos que se inicia e termina em um mesmo estado.

Processo de quase - equilíbrio: desvio do equilíbrio termodinâmico infinitesimal. Também chamado de quase-estático. Ausência de gradientes de temperatura, pressão e potencial químico.

Exemplo e
contra-exemplo:



?



Quase-equilíbrio



Processo isobárico - pressão constante.

Processo isotérmico - temperatura constante.

Processo isocórico - volume constante.

Processo isentálpico - entalpia constante.

Processo isentrópico - entropia constante.



Unidades no Sistema Internacional

Grandeza	Unidade no SI	Símbolo	Plural
<i>Massa</i>	quilograma	kg	quilogramas
<i>Comprimento</i>	metro	m	metros
<i>Tempo</i>	segundo	s	segundos
<i>Força</i>	newton	N	newtons
<i>Energia</i>	joule	J	joules
<i>Pressão</i>	pascal	Pa	pascals
<i>Temperatura</i>	kelvin	K	kelvins
<i>Quantidade de matéria</i>	mol	mol	mols
<i>Potência</i>	watt	W	watts



Algumas propriedades importantes

Propriedades	Símbolo	Unidade
<i>Massa específica</i>	ρ	kg/m ³
<i>Volume específico</i>	v	m ³ /kg
<i>Energia interna específica</i>	u	kJ/kg
<i>Energia interna</i>	U	kJ
<i>Entalpia específica</i>	h	kJ/kg
<i>Entalpia</i>	H	kJ
<i>Entropia específica</i>	s	kJ/(kg.K)
<i>Entropia</i>	S	kJ/K

Massa e volume específico

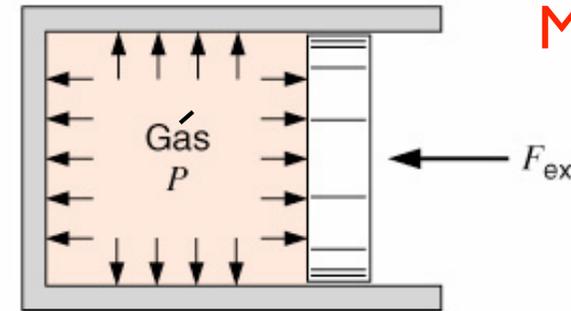
$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \nu = \frac{\text{volume}}{\text{massa}} \quad \rightarrow \quad \nu = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta V}{\delta m}$$



Pressão

$$P = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_n}{\delta A}$$

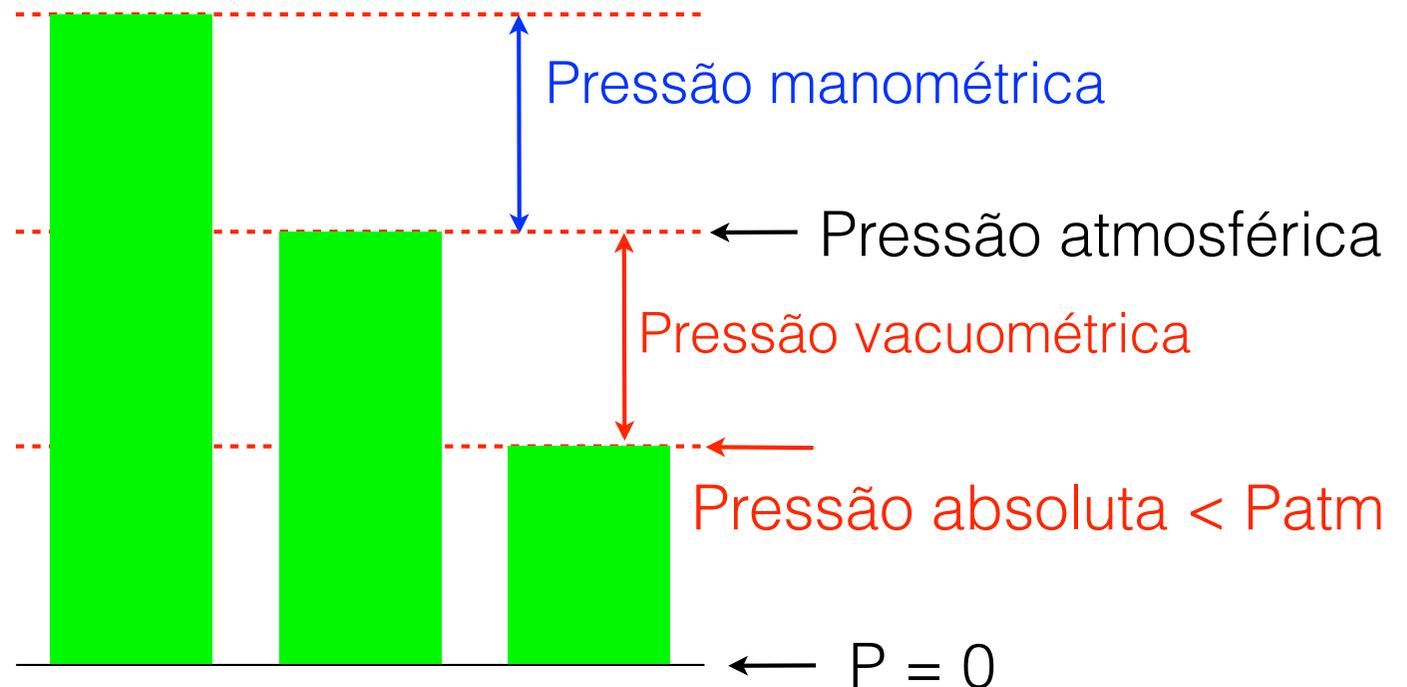
Considere a situação:



Mesma pressão
no equilíbrio

Pressão absoluta > P_{atm}

Em Termodinâmica
trabalhamos com



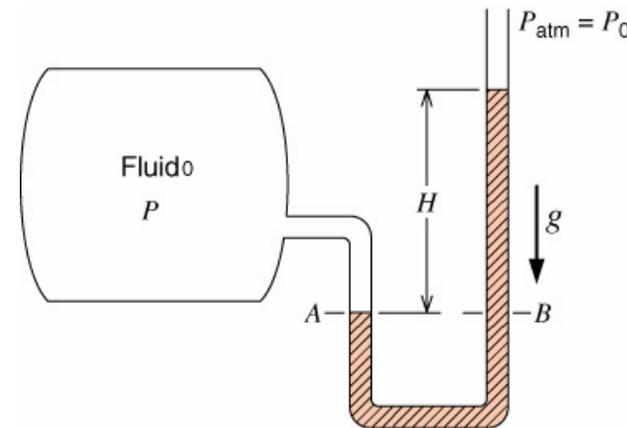
Medição da pressão atmosférica



Barômetro

$$P_{\text{atm}} \approx \rho \cdot g \cdot h$$

Medição da pressão

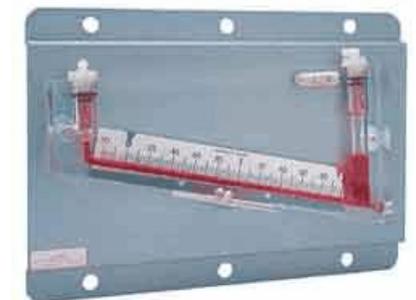


Manômetro de coluna

$$P - P_0 \approx \rho \cdot g \cdot H$$



Barômetros
Torricelli



Medição da pressão - outros instrumentos

Manômetro digital



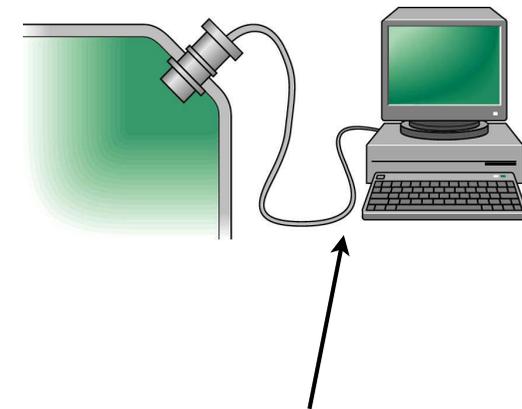
Incerteza 0,3%

Manômetro de Diferencial



Incerteza 0,3%
Tempo de reposta
500ms

Transdutor de pressão



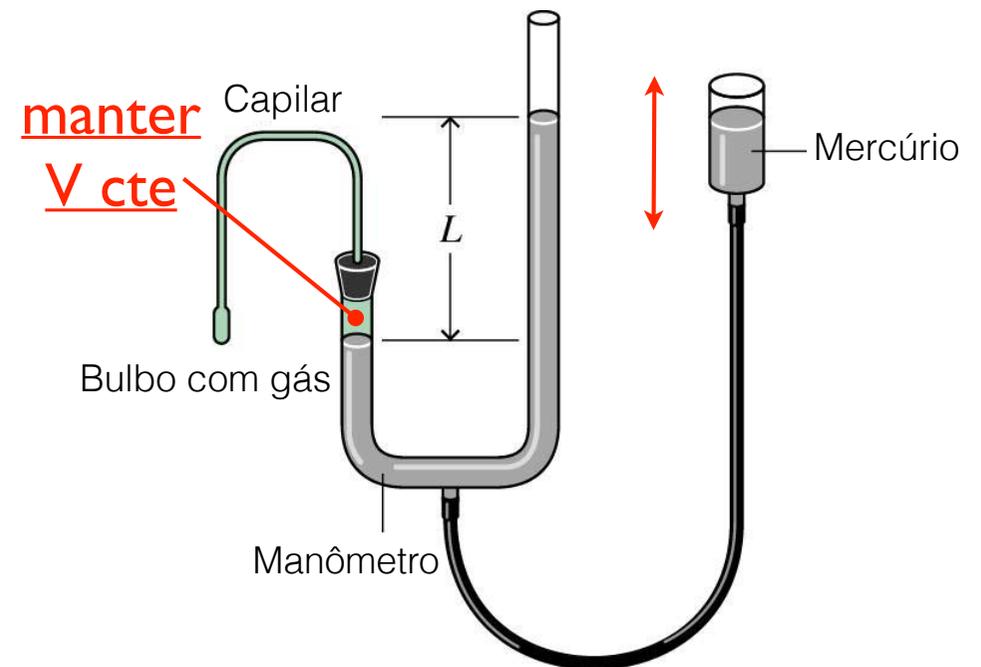
Aquisição de dados
automatizada

Medição de temperatura

Termômetro de Líquido em Vidro (TLV)



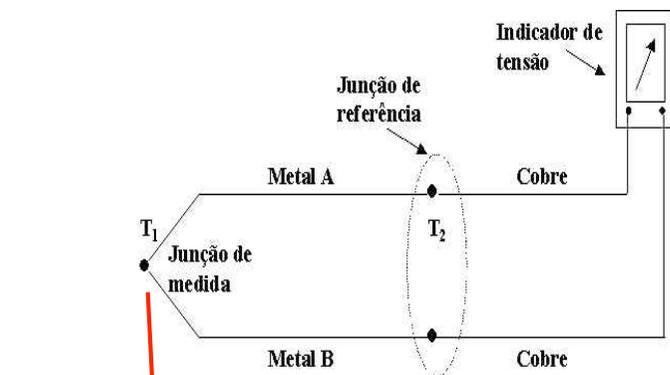
Termômetro de gás



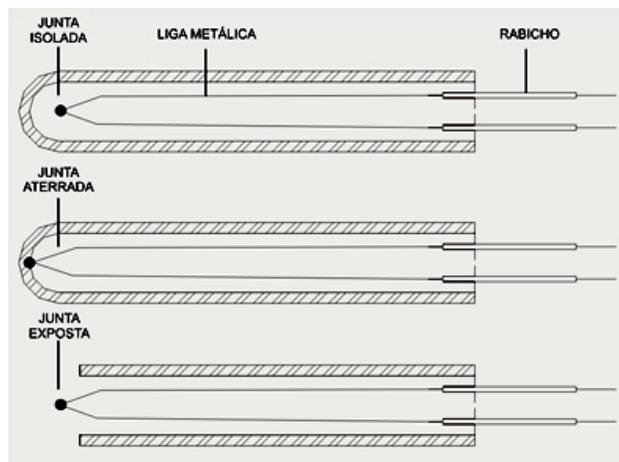
$$T = \beta \cdot P$$

Medição de temperatura

Termopar



Junta



Tipos

Tipo	Par		Gama de Temperatura (°C)
	-	+	
J	Cu+Ni	Fe	-185 a 870
K	Ni+Al	Cr+Ni	-185 a 1260
T	Cu+Ni	Cu	-185 a 400
S	Pt	Pt+10%Rh	0 a 1535
E	Cu+Ni	Ni+Cr	0 a 980
N	Ni+Si+Mg	Ni+Cr+Si	-270 a 1300
R	Pt	Pt+13%Rh	0 a 1590
B	Pt+6%Rh	Pt+30%Rh	38 a 1800
G	W+26%Re	W	16 a 2800

Medição de temperatura

Termômetro de resistência



Medição de temperatura

Termístores



Semi-condutores -
variação de resistência
com a temperatura

Termômetro de radiação



Exatidão 2 % ou 2 °C

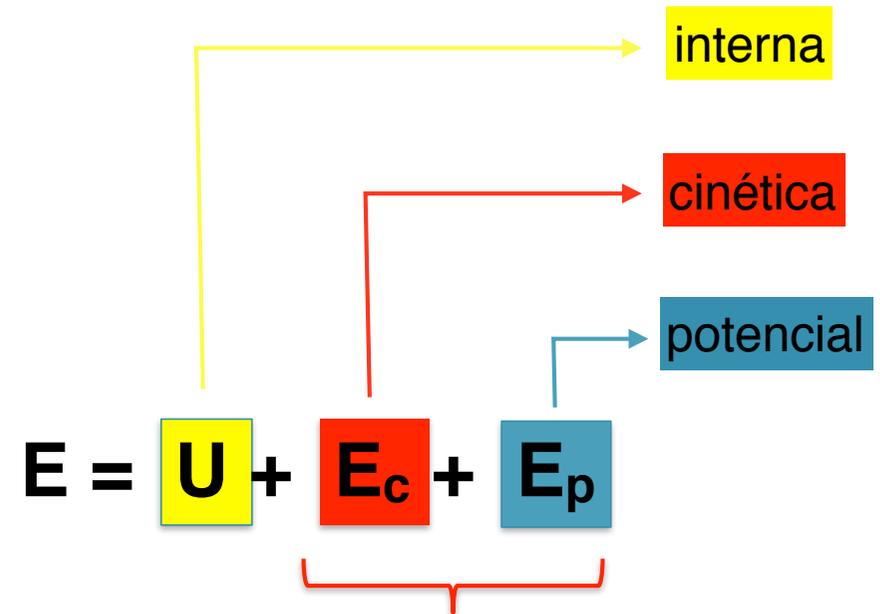
Termografia



Exatidão 2 % ou 2 °C

Energia

A energia total (E) de um sistema composto por uma substância compressível simples em um dado estado é:

$$E = U + E_c + E_p$$


Determinadas com base no referencial adotado

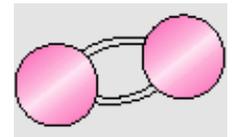
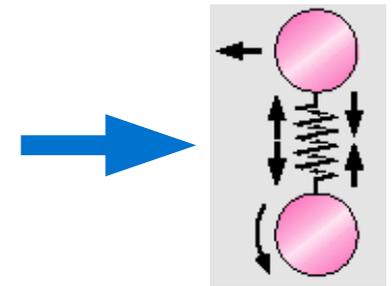
Energia interna

Ponto de vista molecular:

❖ **Energia cinética molecular** - Movimento das moléculas (parcela “sensível”*);

❖ **Energia potencial intermolecular** - Forças entre moléculas (parcela “latente”*);

❖ **Energia potencial intramolecular** - Estrutura molecular e atômica (parcela química e nuclear).

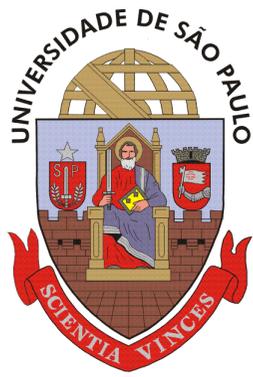


* Não utilizar os termos!



Todos os conceitos apresentados são fundamentais para o entendimento dos assuntos das demais aulas do curso.

Por isso, leia e estude atentamente este assunto usando o livro-texto!



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

3) Substância Pura

Diagramas de propriedades

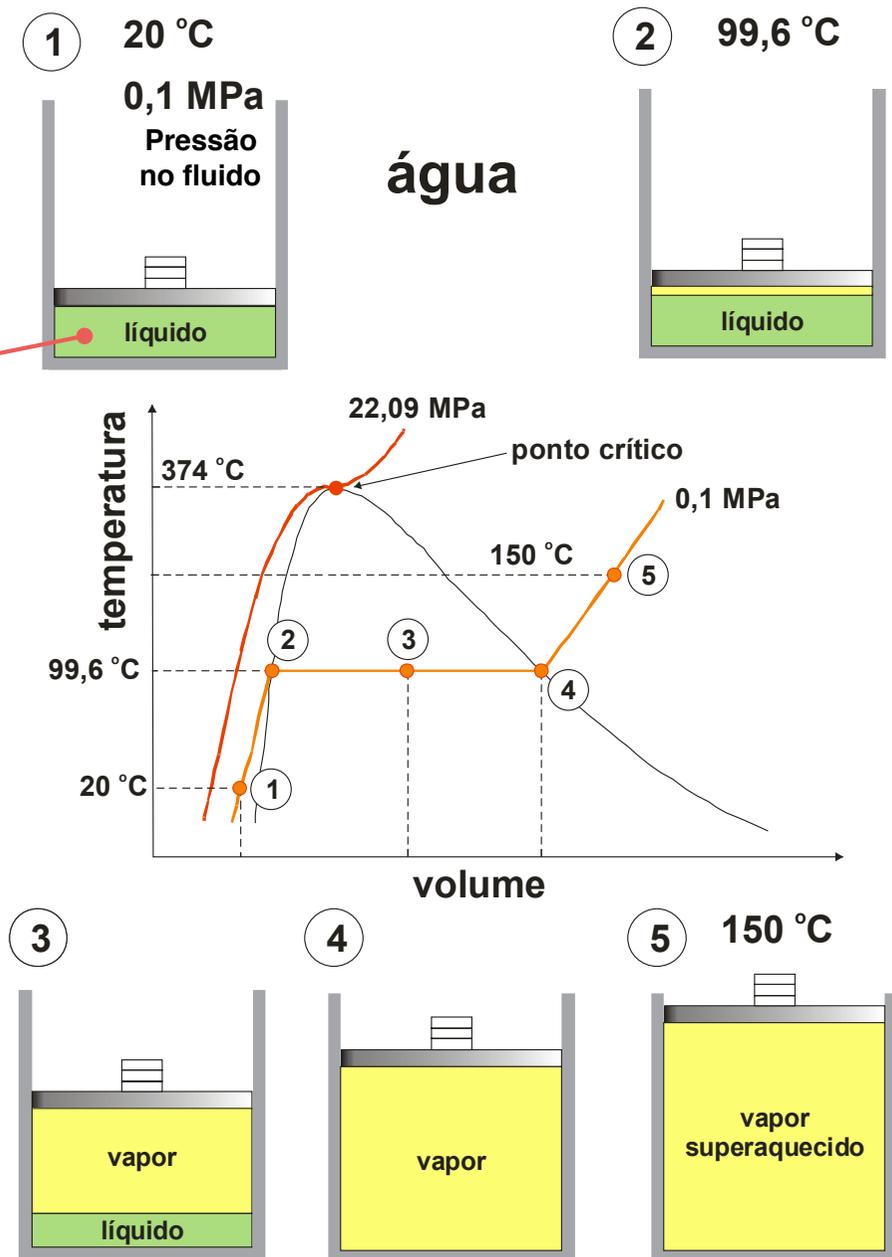


Vamos elaborar um experimento para relacionar temperatura e volume específico a pressão constante.

Vamos medir a massa (cte), o volume ocupado pelo fluido e a temperatura à medida que aquecemos lentamente o recipiente.

Sempre observando o que há dentro do recipiente, calculamos o volume específico e marcamos o ponto T, v no diagrama.

Podemos repetir o experimento com outras pressões. Então, podemos ligar todos os pontos do “tipo 2” e “4” para delimitar a região de mudança de fase.

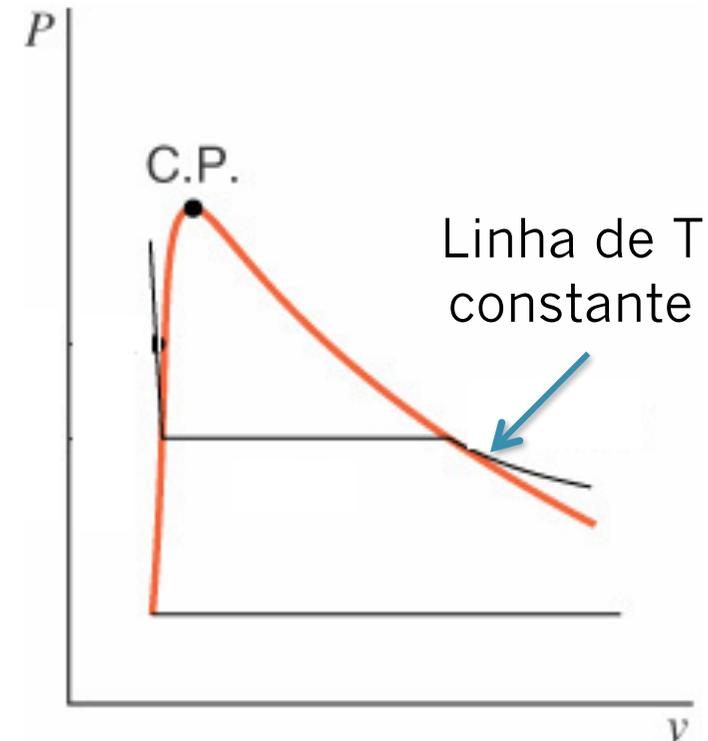


Diagramas de propriedades



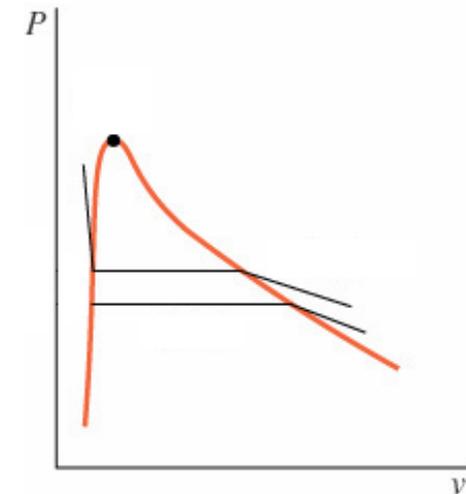
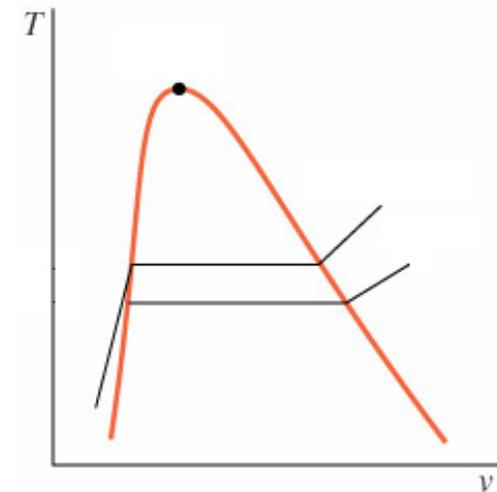
Podemos repetir o experimento só que mantendo a temperatura constante e variando a pressão. Marcamos agora o ponto P, v no diagrama.

Obtemos, então, diagrama com características similares ao $T-v$.

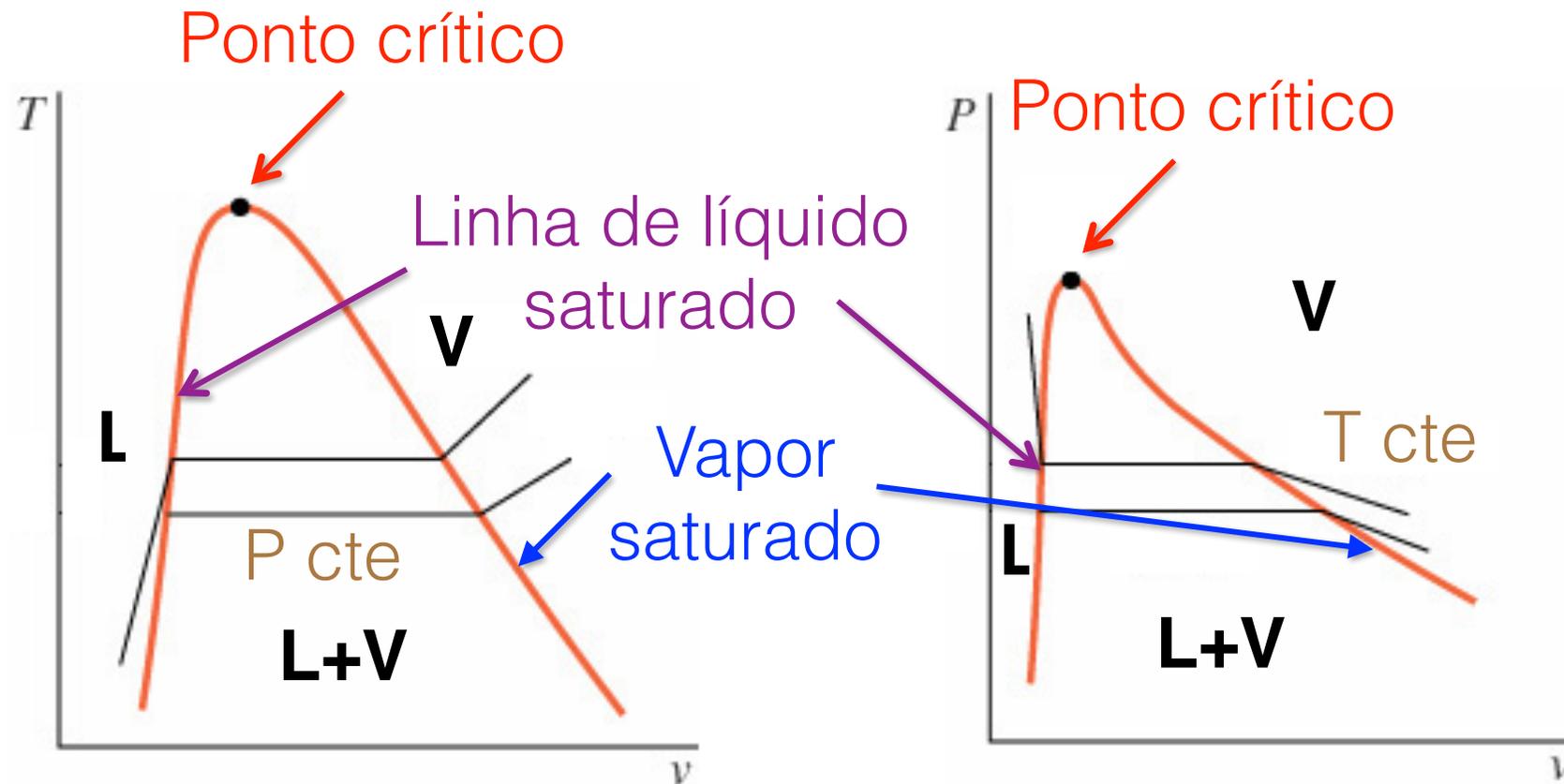




Observe nos dois diagramas as linhas de saturação, as isobáricas, as isotérmicas, o ponto crítico, as regiões de líquido comprimido, mistura líquido-vapor saturados e vapor superaquecido.



Diagramas de propriedades





Ponto crítico de algumas substâncias

	Temperatura /°C	Pressão / MPa	Volume / (m³/kg)
<i>Água</i>	374,14	22,09	0,003155
<i>Dióxido de carbono</i>	31,05	7,39	0,002143
<i>Oxigênio</i>	-118,35	5,08	0,002438
<i>Hidrogênio</i>	-239,85	1,30	0,032192

Diagramas de propriedades



Em um ponto triplo três fases coexistem em equilíbrio.

As substâncias puras apresentam vários pontos triplos, mas só um em que líquido, sólido e gás coexistem.

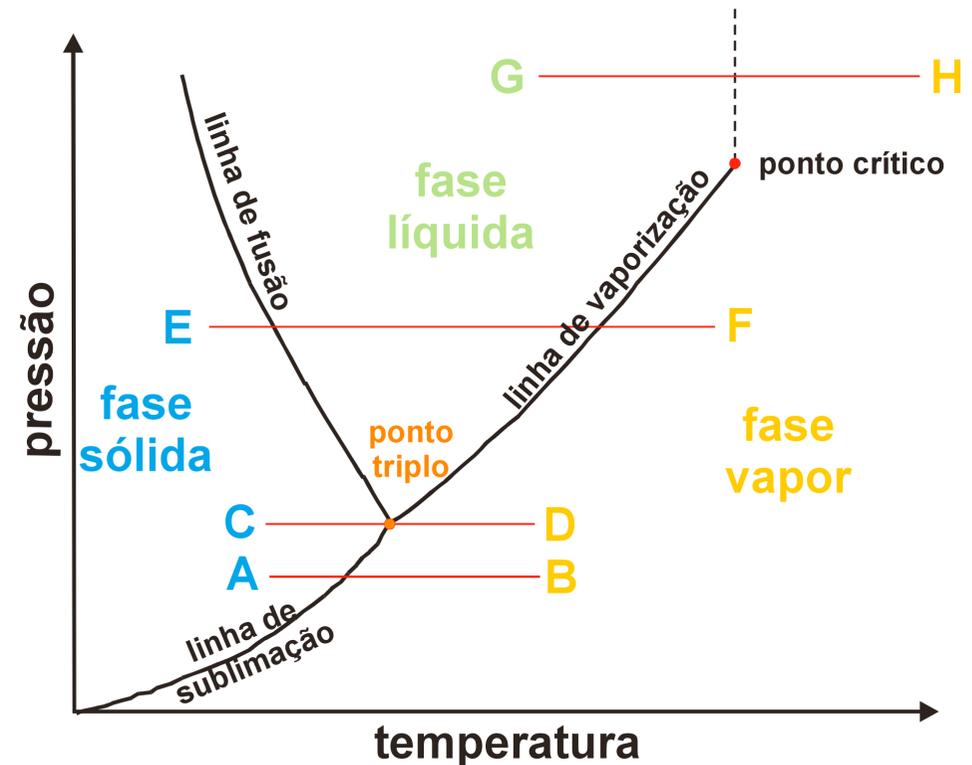
Processos:

A B mudança de sólido para gás;

C D mudança de sólido para gás, passando pelas três fases;

E F mudança de sólido para gás, passando pela fase líquida;

G H mudança de estado sem mudança de fase.

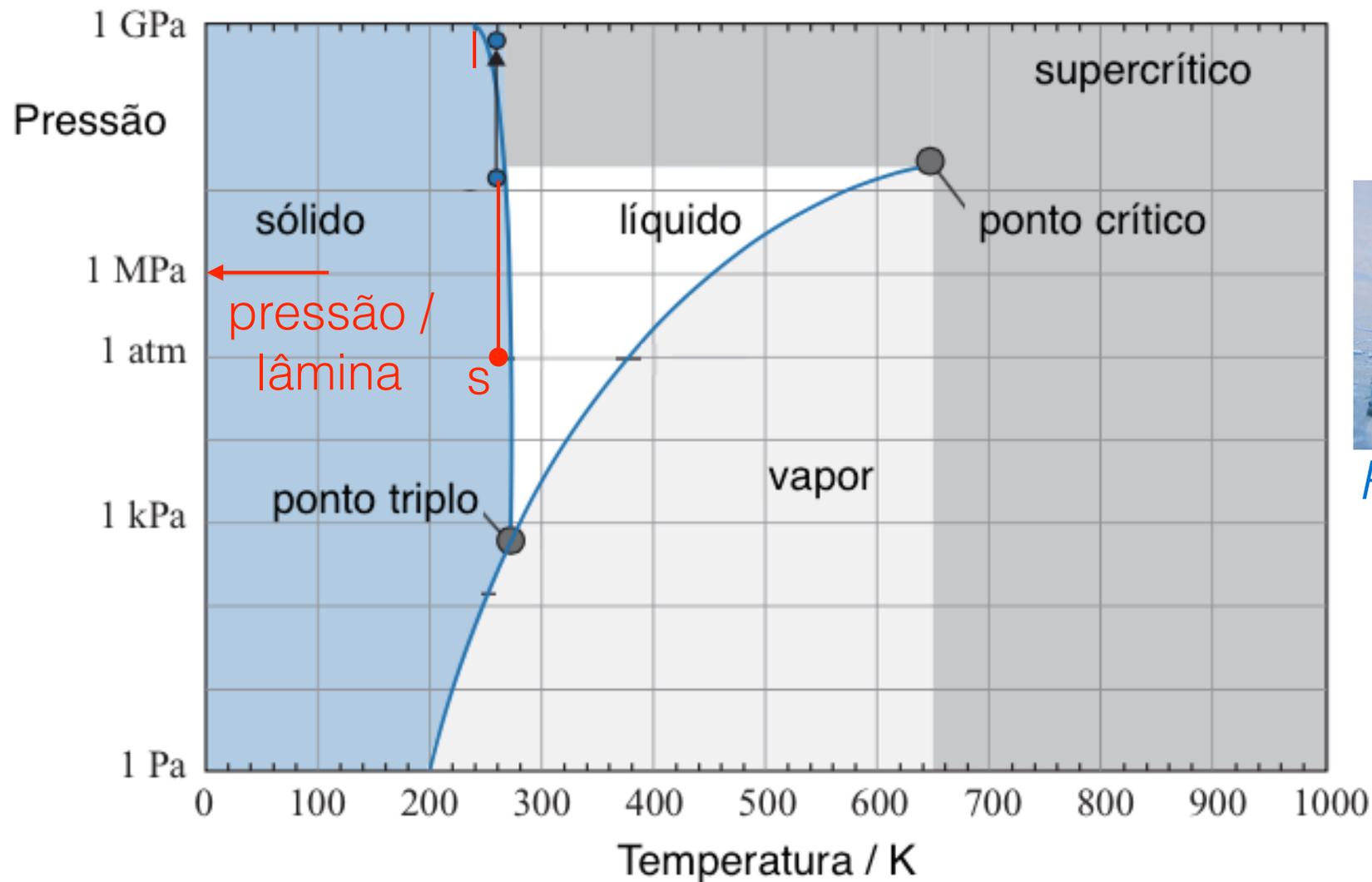




Ponto triplo de algumas substâncias

	Temperatura /°C	Pressão / kPa
Água	0,01	0,6113
Dióxido de carbono	-56,4	520,8
Oxigênio	-219	0,15
Hidrogênio	-259	7,194

Diagrama P – T



Processo s → l

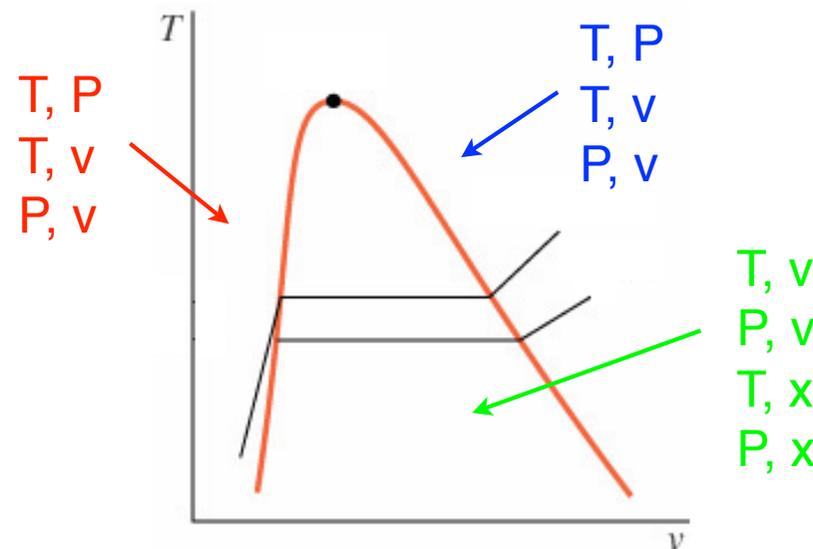
Como varia a temperatura de fusão da água em função da pressão?



Propriedades independentes

❖ Substância pura compressível simples: substância pura na ausência de movimento, ação da gravidade, efeitos de superfície, magnéticos ou elétricos.

Para definir o estado dessa substância precisamos conhecer duas propriedades intensivas independentes.





Cálculo de propriedades de uma mistura líquido-vapor saturados

***Título**: razão entre a massa de vapor e a massa total da mistura.

$$x = \frac{m_{vap}}{m_{liq} + m_{vap}} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad \begin{array}{l} x = 0 \Rightarrow \text{apenas líquido saturado} \\ x = 1 \Rightarrow \text{apenas vapor saturado} \end{array}$$

$$v = (1 - x)v_l + xv_v$$

ou

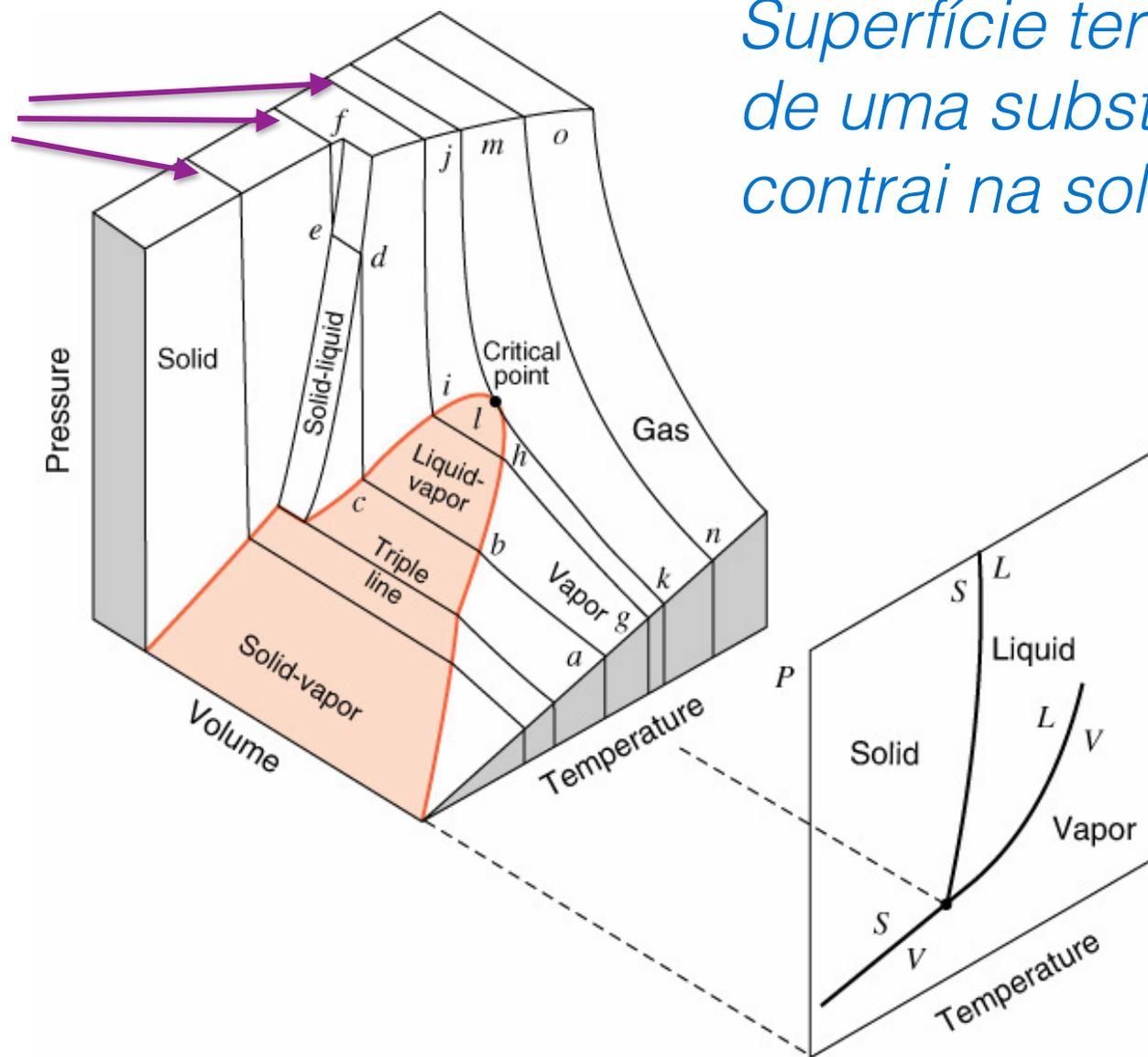
$$v = v_l + xv_{lv}$$

Sendo v_l o volume específico do líquido saturado, v_v o do vapor saturado e v_{lv} a diferença entre o primeiro e o segundo.

Diagrama de propriedades

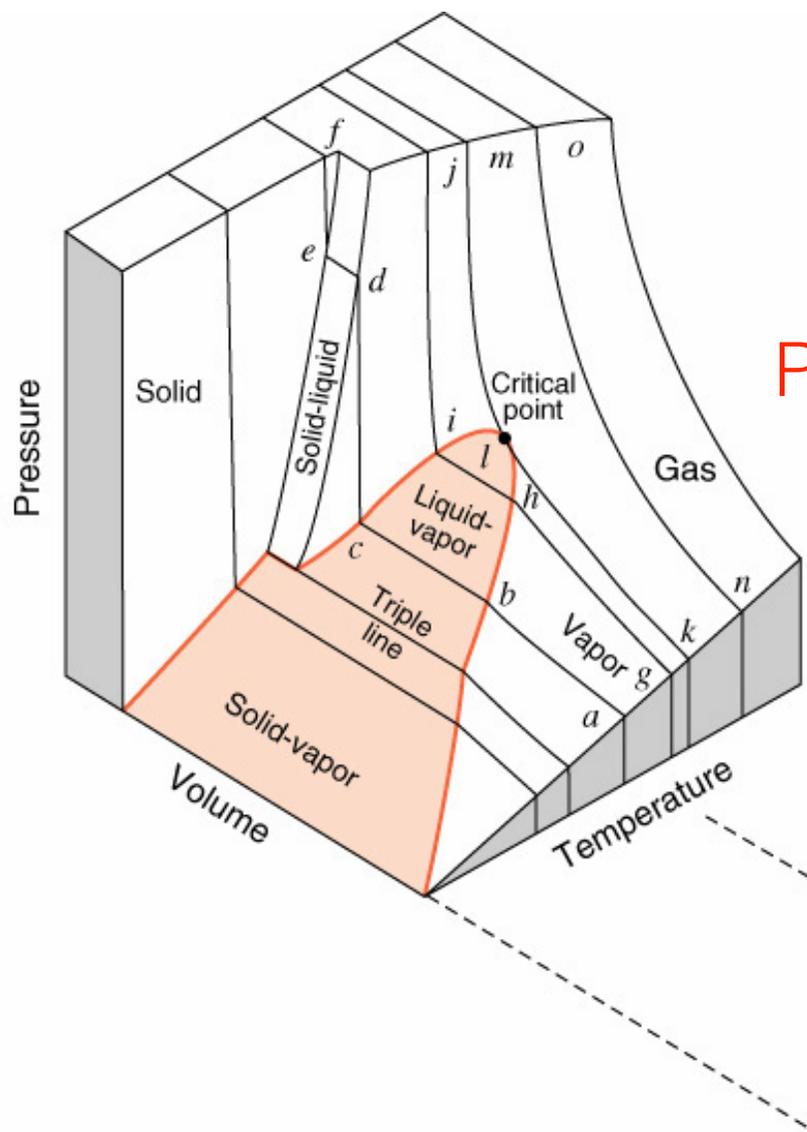


Processos à
 $T = \text{cte}$

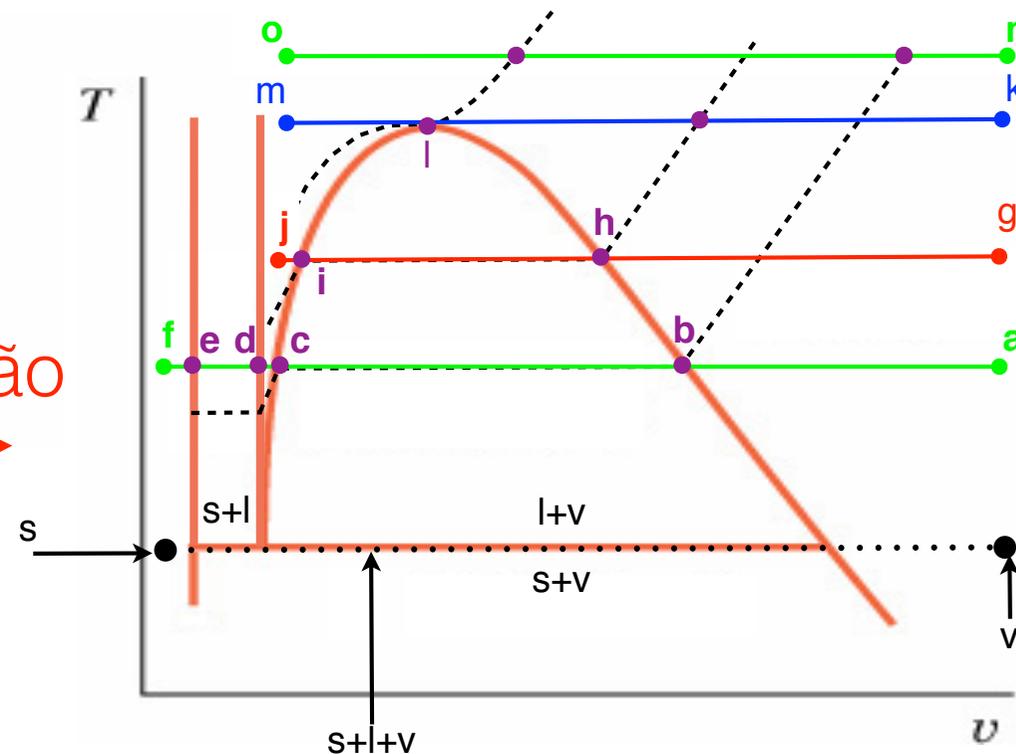


*Superfície termodinâmica
de uma substância que
contrai na solidificação*

Diagrama de propriedades



Projeção

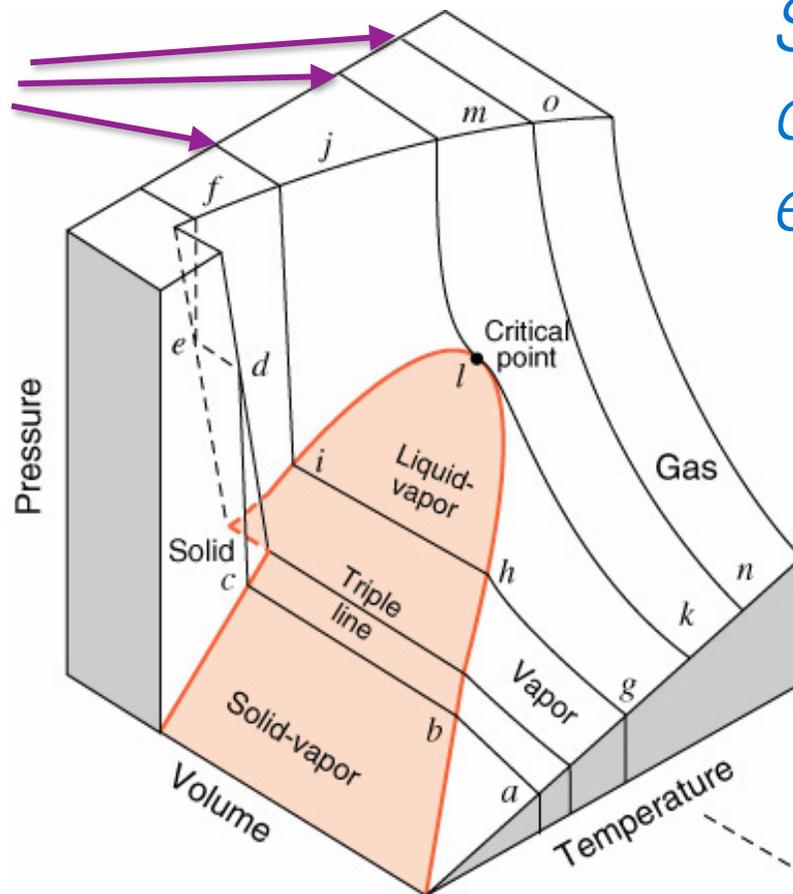


Como exercício repita a análise anterior em um diagrama P-v!

Diagrama de propriedades

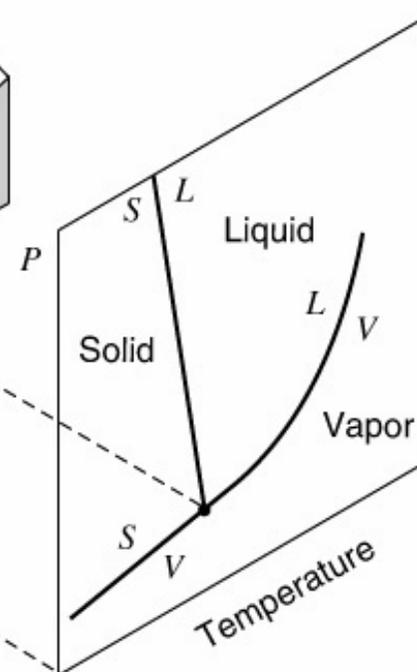


Processos à
 T cte

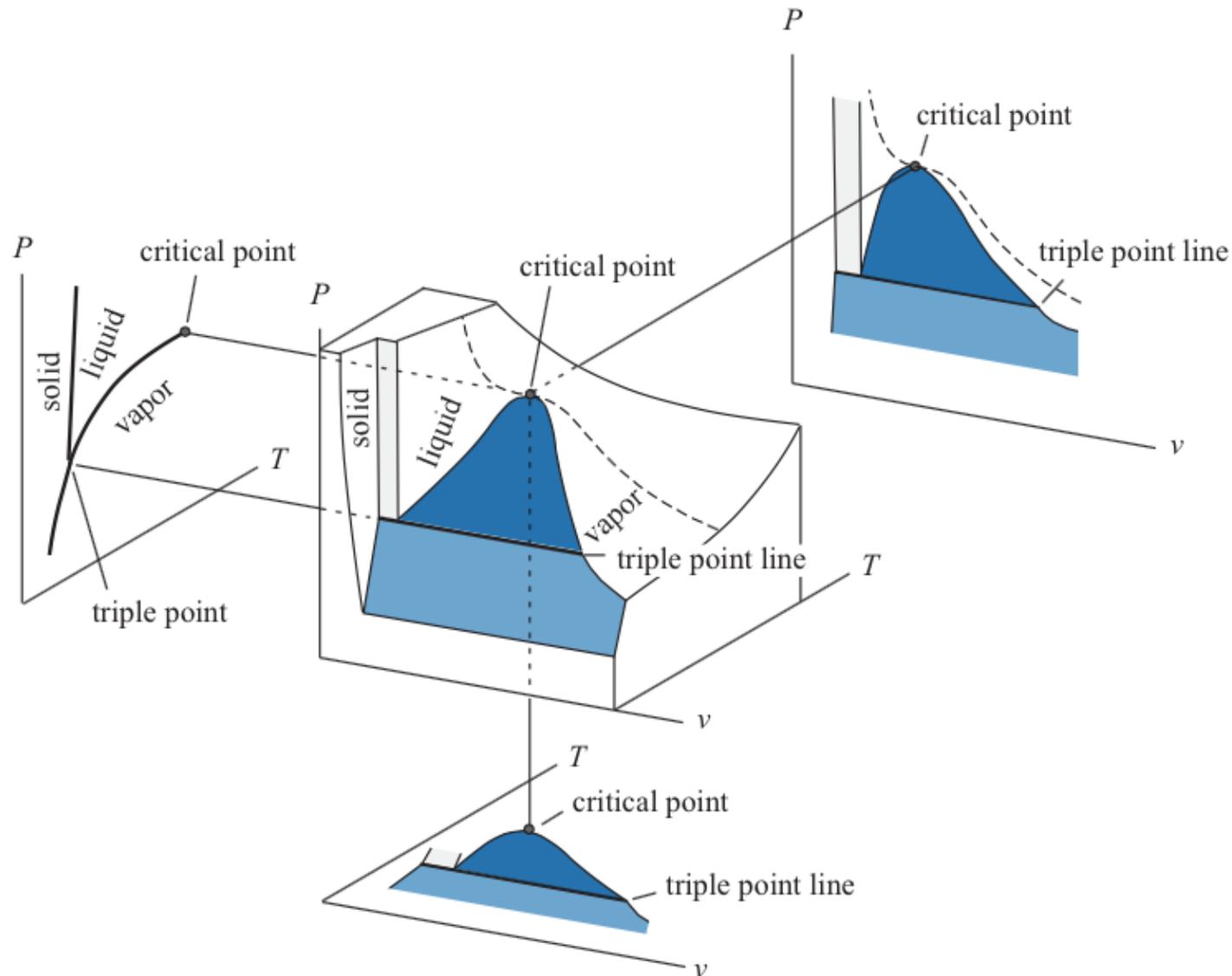


*Superfície termodinâmica
de uma substância que
expande na solidificação*

Como exercício repita a análise
anterior em diagramas T-v e P-v!



Vejam como ficam as projeções nos planos T - v , P - v e P - T :





Propriedades termodinâmicas da água: vapor superaquecido

T saturação a P



P e T são as variáveis independentes

T (°C)	P = 500 kPa (151,86 °C)				P = 600 kPa (158,85 °C)				P = 800 kPa (170,43 °C)			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,37489	2561,2	2748,7	6,8212	0,31567	2567,4	2756,8	6,7600	0,24043	2576,8	2769,1	6,6627
200	0,42492	2642,9	2855,4	7,0592	0,35202	2638,9	2850,1	6,9665	0,26080	2630,6	2839,2	6,8158
250	0,47436	2723,5	2960,7	7,2708	0,39383	2720,9	2957,2	7,1816	0,29314	2715,5	2950,0	7,0384
300	0,52256	2802,9	3064,2	7,4598	0,43437	2801,0	3061,6	7,3723	0,32411	2797,1	3056,4	7,2327
350	0,57012	2882,6	3167,6	7,6328	0,47424	2881,1	3165,7	7,5463	0,35439	2878,2	3161,7	7,4088
400	0,61728	2963,2	3271,8	7,7937	0,51372	2962,0	3270,2	7,7078	0,38426	2959,7	3267,1	7,5715
500	0,71093	3128,4	3483,8	8,0872	0,59199	3127,6	3482,7	8,0020	0,44331	3125,9	3480,6	7,8672
600	0,80406	3299,6	3701,7	8,3521	0,66974	3299,1	3700,9	8,2673	0,50184	3297,9	3699,4	8,1332
700	0,89691	3477,5	3926,0	8,5952	0,74720	3477,1	3925,4	8,5107	0,56007	3476,2	3924,3	8,3770
800	0,98959	3662,2	4157,0	8,8211	0,82450	3661,8	4156,5	8,7367	0,61813	3661,1	4155,7	8,6033
900	1,08217	3853,6	4394,7	9,0329	0,90169	3853,3	4394,4	8,9485	0,67610	3852,8	4393,6	8,8153
1000	1,17469	4051,8	4639,1	9,2328	0,97883	4051,5	4638,8	9,1484	0,73401	4051,0	4638,2	9,0153
1100	1,26718	4256,3	4889,9	9,4224	1,05594	4256,1	4889,6	9,3381	0,79188	4255,6	4889,1	9,2049
1200	1,35964	4466,8	5146,6	9,6028	1,13302	4466,5	5146,3	9,5185	0,84974	4466,1	5145,8	9,3854
1300	1,45210	4682,5	5408,6	9,7749	1,21009	4682,3	5408,3	9,6906	0,90758	4681,8	5407,9	9,5575

Tabelas de propriedades



Propriedades termodinâmicas da água: saturação

$f(T)$

P e T são
dependentes

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico m ³ / kg		Energia interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg		Entropia kJ / (kg.K)	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,3	0,00	2501,3	0,0000	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2382,2	20,98	2510,5	0,0761	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2389,2	41,99	2519,7	0,1510	8,9007
15	1,7051	0,001001	77,925	62,98	2396,0	62,98	2528,9	0,2245	8,7813
20	2,3385	0,001002	57,790	83,94	2402,9	83,94	2538,1	0,2966	8,6671
25	3,1691	0,001003	43,359	104,86	2409,8	104,87	2547,2	0,3673	8,5579
30	4,2461	0,001004	32,893	125,77	2416,6	125,77	2556,2	0,4369	8,4533
35	5,6280	0,001006	25,216	146,65	2423,4	146,66	2565,3	0,5052	8,3530
40	7,3837	0,001008	19,523	167,53	2430,1	167,54	2574,3	0,5724	8,2569
45	9,5934	0,001010	15,258	188,41	2436,8	188,42	2583,2	0,6386	8,1647
50	12,350	0,001012	12,032	209,30	2443,5	209,31	2592,1	0,7037	8,0762
55	15,758	0,001015	9,568	230,19	2450,1	230,20	2600,9	0,7679	7,9912
60	19,941	0,001017	7,671	251,09	2456,6	251,11	2609,6	0,8311	7,9095
65	25,033	0,001020	6,197	272,00	2463,1	272,03	2618,2	0,8934	7,8309
70	31,188	0,001023	5,042	292,93	2469,5	292,96	2626,8	0,9548	7,7552
75	38,578	0,001026	4,131	313,87	2475,9	313,91	2635,3	1,0154	7,6824
80	47,390	0,001029	3,407	334,84	2482,2	334,88	2643,7	1,0752	7,6121
85	57,834	0,001032	2,828	355,82	2488,4	355,88	2651,9	1,1342	7,5444
90	70,139	0,001036	2,361	376,82	2494,5	376,90	2660,1	1,1924	7,4790
95	84,554	0,001040	1,982	397,86	2500,6	397,94	2668,1	1,2500	7,4158
	MPa								
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,91	2506,5	419,02	2676,0	1,3068	7,3548
105	0,12082	0,001047	1,4194	440,00	2512,3	440,13	2683,8	1,3629	7,2958
110	0,14328	0,001052	1,2102	461,12	2518,1	461,27	2691,5	1,4184	7,2386
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,28	2523,7	482,46	2699,0	1,4733	7,1832
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,48	2529,2	503,69	2706,3	1,5275	7,1295
125	0,23210	0,001065	0,77059	524,72	2534,6	524,96	2713,5	1,5812	7,0774



Propriedades termodinâmicas da água: saturação

f(P)

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	0,00	2501,3	0	9,1562
1,0	6,98	0,001000	129,208	29,29	2385,0	29,29	2514,2	0,1059	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,980	54,70	2393,3	54,70	2525,3	0,1956	8,8278
2,0	17,50	0,001001	67,004	73,47	2399,5	73,47	2533,5	0,2607	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,254	88,47	2404,4	88,47	2540,0	0,3120	8,6431
3,0	24,08	0,001003	45,665	101,03	2408,5	101,03	2545,5	0,3545	8,5775
4,0	28,96	0,001004	34,800	121,44	2415,2	121,44	2554,4	0,4226	8,4746
5,0	32,88	0,001005	28,193	137,79	2420,5	137,79	2561,4	0,4763	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514
10,0	45,81	0,001010	14,674	191,79	2437,9	191,81	2584,6	0,6492	8,1501
15,0	53,97	0,001014	10,022	225,90	2448,7	225,91	2599,1	0,7548	8,0084
20,0	60,06	0,001017	7,649	251,35	2456,7	251,38	2609,7	0,8319	7,9085
25,0	64,97	0,001020	6,204	271,88	2463,1	271,90	2618,2	0,8930	7,8313
30,0	69,10	0,001022	5,229	289,18	2468,4	289,21	2625,3	0,9439	7,7686
40,0	75,87	0,001026	3,993	317,51	2477,0	317,55	2636,7	1,0258	7,6700
50,0	81,33	0,001030	3,240	340,42	2483,8	340,47	2645,9	1,0910	7,5939
75,0	91,77	0,001037	2,217	384,29	2496,7	384,36	2663,0	1,2129	7,4563
MPa									
0,100	99,62	0,001043	1,6940	417,33	2506,1	417,44	2675,5	1,3025	7,3593
0,125	105,99	0,001048	1,3749	444,16	2513,5	444,30	2685,3	1,3739	7,2843
0,150	111,37	0,001053	1,1593	466,92	2519,6	467,08	2693,5	1,4335	7,2232
0,175	116,06	0,001057	1,0036	486,78	2524,9	486,97	2700,5	1,4848	7,1717
0,200	120,23	0,001061	0,8857	504,47	2529,5	504,68	2706,6	1,5300	7,1271

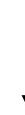
Tabelas de propriedades



Propriedades termodinâmicas da água: líquido comprimido

Baixa resolução

T saturação a P



T (°C)	P = 5,00 MPa (263,99 °C)				P = 10,00 MPa (311,06 °C)				P = 15,00 MPa (342,24 °C)			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,0012859	1147,78	1154,21	2,9201	0,0014524	1393,00	1407,53	3,3595	0,0016581	1585,58	1610,45	3,6847
0	0,0009977	0,03	5,02	0,0001	0,0009952	0,10	10,05	0,0003	0,0009928	0,15	15,04	0,0004
20	00009995	83,64	88,64	0,2955	0,0009972	83,35	93,32	0,2945	0,0009950	83,05	97,97	0,2934
40	0,0010056	166,93	171,95	0,5705	0,0010034	166,33	176,36	0,5685	0,0010013	165,73	180,75	0,5665
60	00010149	250,21	255,28	0,8284	0,0010127	249,34	259,47	0,8258	0,0010105	248,49	263,65	0,8231
80	00010268	333,69	338,83	1,0719	0,0010245	332,56	342,81	1,0687	0,0010222	331,46	346,79	1,0655
100	0,0010410	417,50	422,71	1,3030	0,0010385	416,09	426,48	1,2992	0,0010361	414,72	430,26	1,2954
120	0,0010576	501,79	507,07	1,5232	0,0010549	500,07	510,61	1,5188	0,0010522	498,39	514,17	1,5144
140	0,0010768	586,74	592,13	1,7342	0,0010737	584,67	595,40	1,7291	0,0010707	582,64	598,70	1,7241
160	0,0010988	672,61	678,10	1,9374	0,0010953	670,11	681,07	1,9316	0,0010918	667,69	684,07	1,9259
180	0,0011240	759,62	765,24	2,1341	0,0011199	756,63	767,83	2,1274	0,0011159	753,74	770,48	2,1209
200	0,0011530	848,08	853,85	2,3254	0,0011480	844,49	855,97	2,3178	0,0011433	841,04	858,18	2,3103
220	0,0011866	938,43	944,36	2,5128	0,0011805	934,07	945,88	2,5038	0,0011748	929,89	947,52	2,4952
240	0,0012264	1031,34	1037,47	2,6978	0,0012187	1025,94	1038,13	2,6872	0,0012114	1020,82	1038,99	2,6770
260	0,0012748	1127,92	1134,30	2,8829	0,0012645	1121,03	1133,68	2,8698	0,0012550	1114,59	1133,41	2,8575
280					0,0013216	1220,90	1234,11	3,0547	0,0013084	1212,47	1232,09	3,0392
300					0,0013972	1328,34	1342,31	3,2468	0,0013770	1316,58	1337,23	3,2259
320									0,0014724	1431,05	1453,13	3,4246
340									0,0016311	1567,42	1591,88	3,6545



*Equação de estado: expressão que relaciona pressão, temperatura e volume específico de uma substância.

Gás perfeito ou ideal

$$PV = n\bar{R}T$$

Constante universal dos gases:

$$\bar{R} = 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

n = Número de mols.

$$PV = mRT$$

Constante do gás:

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

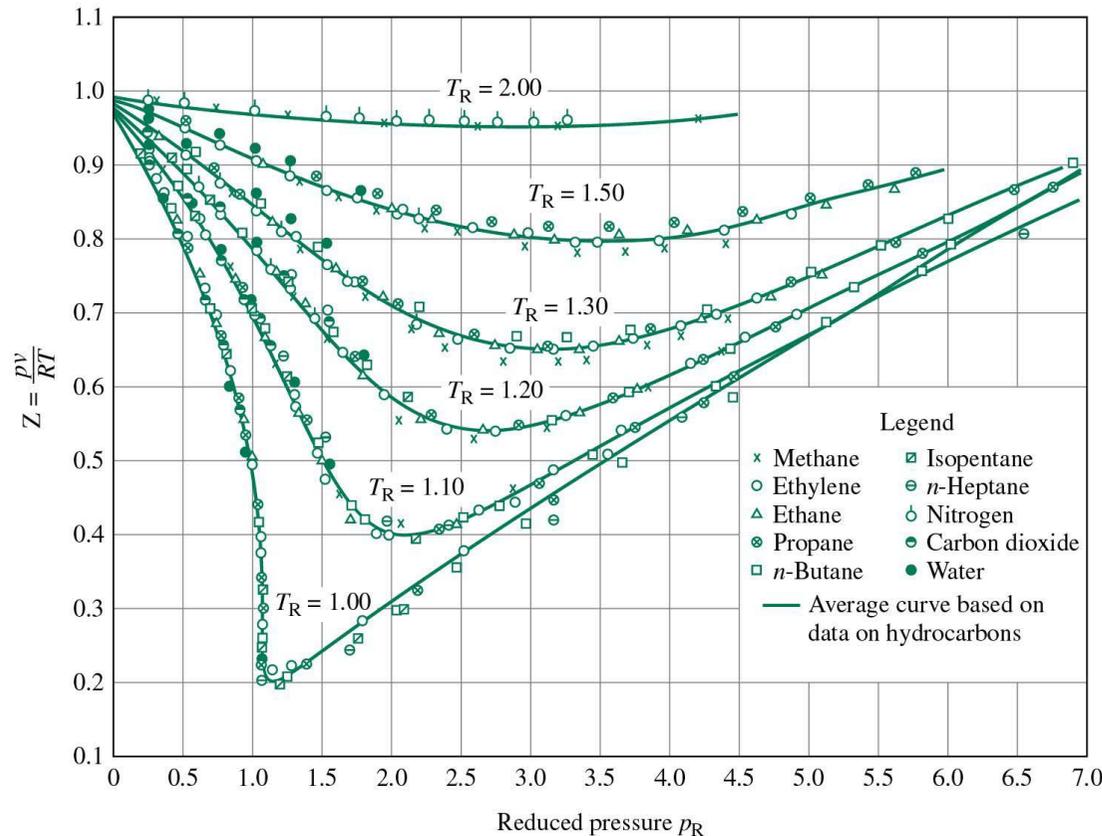
M = Massa molecular do gás

$$Pv = RT$$



Quando é válido o modelo de gás perfeito?

Para responder à pergunta precisamos definir o fator de compressibilidade (Z).



$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$p_R = \frac{P}{P_c} = \textit{pressão reduzida}$$

$$T_R = \frac{T}{T_c} = \textit{temperatura reduzida}$$

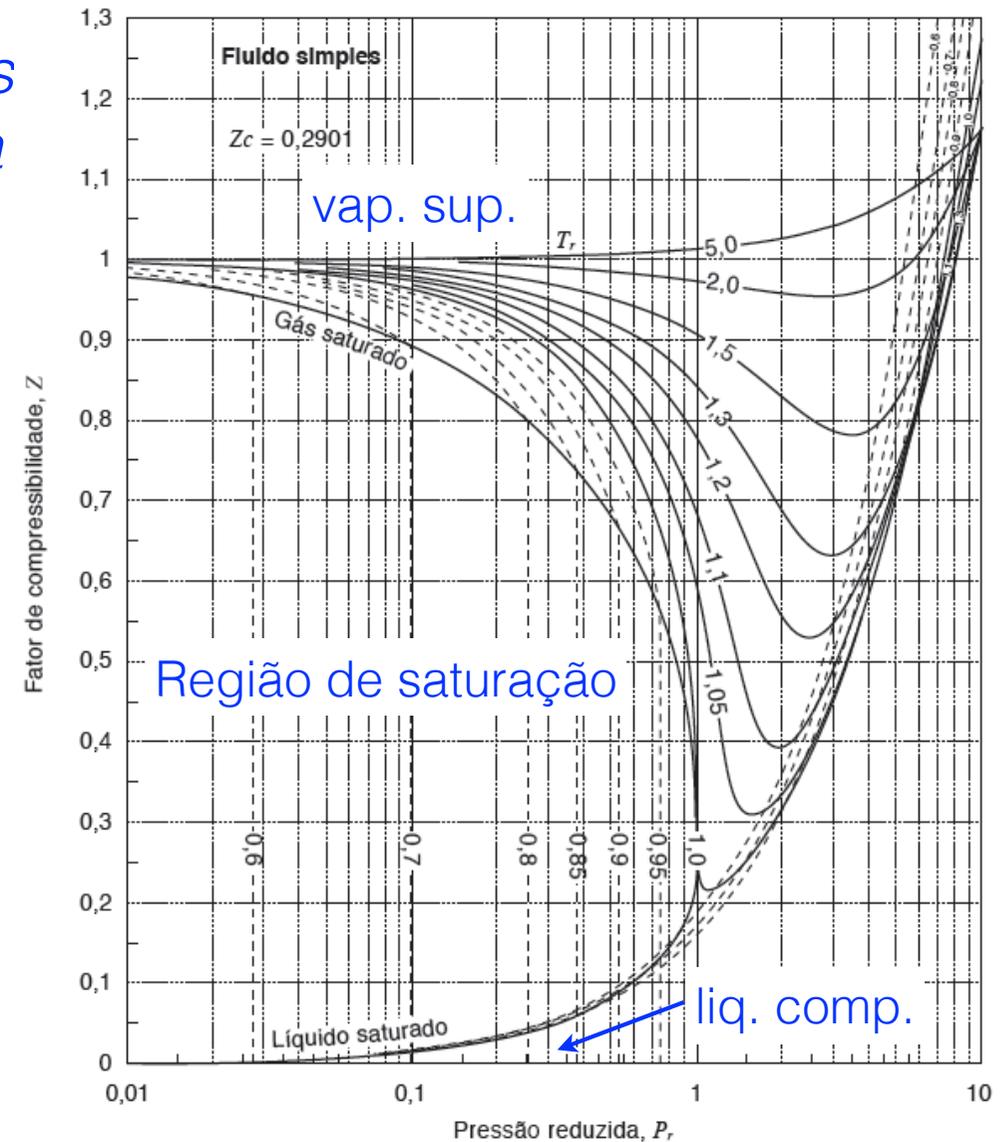
- ◆ A baixas pressões o gás se comporta como perfeito independente da temperatura;
- ◆ A altas temperaturas ($T_R \geq 2$) o gás se comporta como perfeito, a menos quando $P_R \gg 1$;
- ◆ O desvio do comportamento de gás perfeito é maior próximo do ponto crítico.

Diagrama de compressibilidade

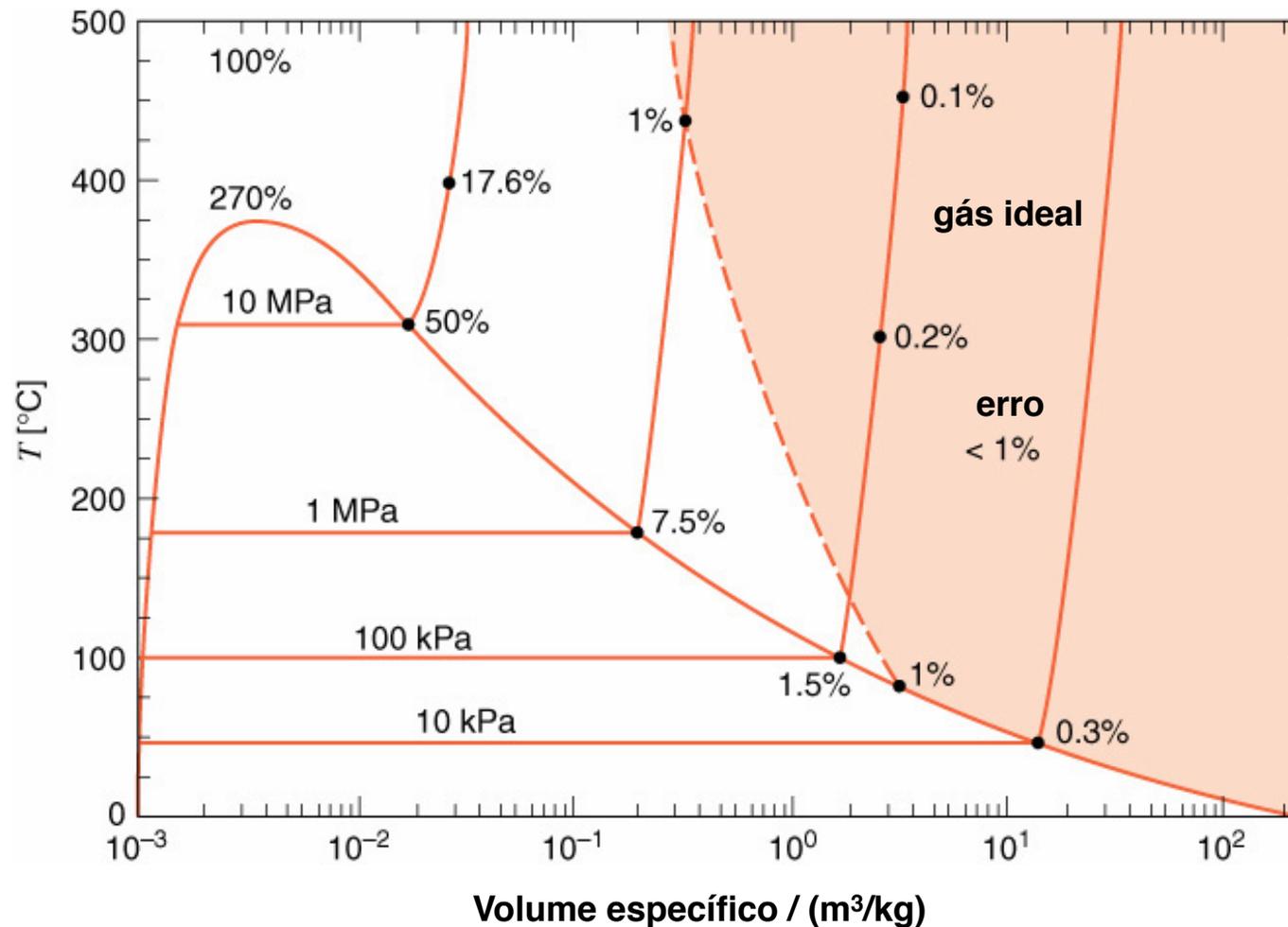


Caso não haja dados experimentais P - v - T para uma substância em uma dada região, podemos usar o Diagrama Generalizado de Compressibilidade!

Os resultados assim obtidos são aproximados e particularmente aplicáveis a substâncias com moléculas simples.



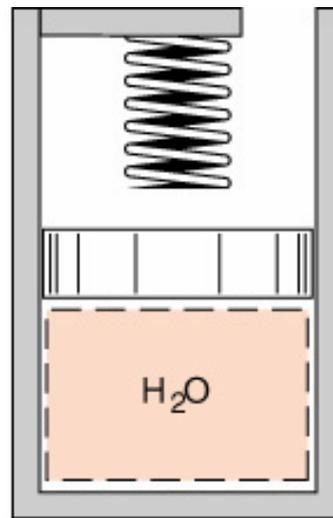
Validade do modelo de Gás Perfeito (Água)



Use sempre as tabelas de propriedades termodinâmicas da água!!!

3.119:

Inicialmente, o conjunto cilindro-pistão mostrado na figura contém 1 L de água a 105°C e com título igual a 85%. O conjunto é aquecido e o pistão se movimenta e encontra uma mola linear. O volume interno do conjunto é 1,5 L nesse instante. O aquecimento continua até que a pressão atinja 200 kPa. Sabendo que o diâmetro do pistão é 150 mm e que a constante de mola é 100 N/mm, calcule a temperatura da água no final do processo.





3.119: Solução

- O processo de expansão ocorre em duas etapas. 1ª) Expansão até tocar (sem exercer carga) a mola (estado 1 a 2). 2ª) Expansão comprimindo a mola até atingir a pressão final (estado 2 a 3).

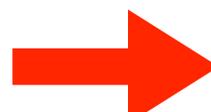
Hipóteses:

- 1.O sistema é a água contida no conjunto;
- 2.Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
- 3.O atrito entre o pistão e o cilindro pode ser desprezado.

3.119: Solução

◆ **Estado 1:** $T_1 = 105^\circ\text{C}$ e $x_1 = 0,85$

Portanto temos uma **mistura**. Devemos consultar a tabela de saturação:



T / °C	P / MPa	Volume específico /(m ³ /kg)	
		líquido	vapor
100	0,10135	0,001044	1,6729
105	0,12082	0,001047	1,4194
110	0,14328	0,001052	1,2102

$$P_1 = P_{\text{sat}} = 120,8 \text{ kPa}, v_l = 0,001047 \text{ e } v_v = 1,41936 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_1 = (1-0,85) \cdot 0,001047 + 0,85 \cdot 1,41936 = 1,20661 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m = V_1 / v_1 = 10^{-3} / 1,20661; m = 8,288 \times 10^{-4} \text{ kg}$$



3.119: Solução

◆ **Estado 2** : $V_2 = 1,5 \text{ L}$, $P_2 = P_1$

Podemos calcular o volume específico desse estado:

$$v_2 = 1,5 \times 10^{-3} / 8,288 \times 10^{-4} = 1,810 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com $P_2 = 120,8 \text{ kPa}$ e comparar o valor de v_2 com v_l e v_v . Como $v_2 > v_v = 1,41936 \text{ m}^3/\text{kg}$, temos **vapor superaquecido**.



3.119: Solução

◆ **Estado 3:** $P_3 = 200 \text{ kPa}$, $m = 8,288 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Como trata-se de uma mola linear

$$P_3 = P_1 + k \cdot x / A = P_1 + k \cdot \Delta V / A^2 = P_1 + k \cdot m \cdot (v_3 - v_2) / A^2 =$$

$$\rightarrow v_3 = v_2 + A^2 \cdot (P_3 - P_1) / (k \cdot m) =$$

$$v_3 = 1,810 + (\pi \cdot 0,15^2 / 4)^2 \cdot (200 - 120,8) / (100 \cdot 8,288 \times 10^{-4})$$

$$v_3 = 2,108 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 3 devemos consultar a tabela de saturação com $P_3 = 200 \text{ kPa}$ e comparar o valor de v_3 com v_l e v_v . Como $v_3 > v_v = 0,12736 \text{ m}^3/\text{kg}$, temos **vapor superaquecido**.



3.119: Solução

◆ **Estado 3:** $P_3 = 200 \text{ kPa}$, $v_3 = 2,108 \text{ m}^3/\text{kg}$

Tabela de vapor superaquecido a 200 kPa:

$T / ^\circ\text{C}$	$v / (\text{m}^3/\text{kg})$
600	2,01297
700	2,24426

Interpolando



Resp. $T_3 \approx 641 \text{ }^\circ\text{C}$



Extra 1:

Um tanque de 500 L contém 100 kg de nitrogênio a 150 K. Para o projeto do tanque a pressão deve ser estimada por três métodos diferentes. Qual dos três é o mais preciso?

- (a) Tabelas de nitrogênio (Tabela B.6);
- (b) Gás ideal;
- (c) Diagrama generalizado de compressibilidade (Figura D.1).



Extra 1: Solução

Hipóteses:

- 1.O sistema é o nitrogênio no tanque;
- 2.O estado do nitrogênio é de equilíbrio.



Extra 1: Solução

◆ **Tabelas de nitrogênio:** $T = 150 \text{ K}$ e $v = 500 \times 10^{-3} / 100 = 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$

Como $T > T_{cr} = 126,2 \text{ K}$ certamente estamos fora da região de saturação. Provavelmente temos vapor superaquecido.

Consultar a tabela de vapor superaquecido:

3000kPa		10.000kPa
T / °C	v / (m ³ /kg)	v / (m ³ /kg)
140	0,01038	0,002
150	0,01194	0,00246
160	0,0135	0,00291

Interpolando →

Com tabela mais detalhada (3 e 6MPa) chegamos em **5.710kPa.**

Interpolando → 8.120kPa



Extra 1: Solução

◆ **Gás ideal:** $T = 150 \text{ K}$ e $v = 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$R_{N_2} = 8,314 / 28 = 0,297 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$P = R_{N_2} T / v = 0,297 \cdot 150 / 0,005 = \mathbf{8.910 \text{ kPa}}$$

◆ **Diagrama de compressibilidade:** $T_c = 126,2 \text{ K}$ e $P_c = 3390 \text{ kPa}$.

$$T_R = 150 / 126,2 = 1,2 \quad P_R = P / P_c \quad P = Z \cdot R_{N_2} \cdot T / v \quad (\text{Eq. 1})$$

Problema iterativo.

1º “Chuto” P ;

2º Cálculo P_R ;

3º Determino Z pelo diagrama;

4º Verifico P pela Eq. 1;

5º Repito até convergência.

P / kPa	P_R	Z	eq. 1
6.000	1,8	0,6	5.350
5.350	1,6	0,62	5.52
5.524	1,63	0,63	5.610

Não temos como
refinar nosso resultado.
Resp. **5.610 kPa**.



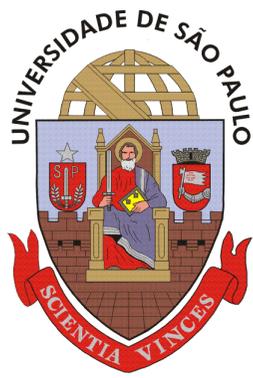
Extra 1: Observações

- ◆ Sempre que disponível devemos optar por utilizar tabelas de propriedades termodinâmicas;
- ◆ Nesse exemplo, infelizmente, a tabela disponível apresentava baixa resolução na região de trabalho. Como foi feita uma interpolação linear, não se obteve um resultado preciso;
- ◆ O diagrama de compressibilidade deve ser o último recurso. Note, ainda, que o diagrama não permite refinar o resultado.



Pratique! Faça mais exercícios!

**Resolva-os seguindo a metodologia proposta nos
exercícios resolvidos.**



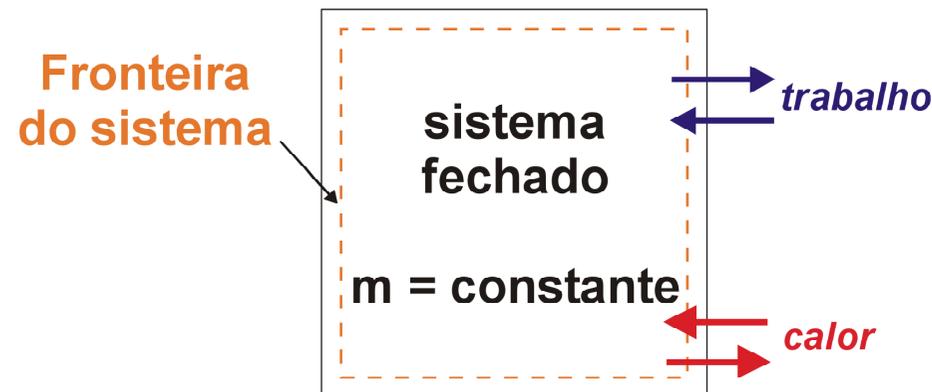
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

4) Trabalho e calor

❖ Energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado apenas através de duas formas distintas: *trabalho* ou *calor*. Ambas são interações energéticas entre um sistema e a sua vizinhança.

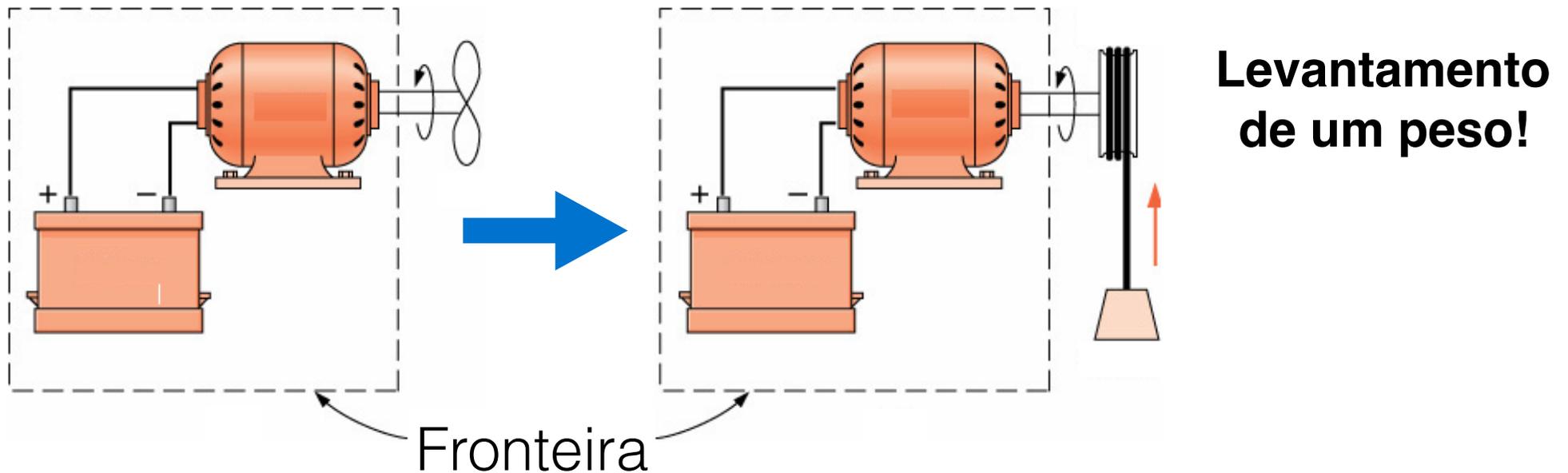


❖ **Calor** – interação energética entre o sistema e a vizinhança provocada por uma diferença de temperatura.

❖ **Trabalho** – interação energética entre o sistema e a vizinhança cujo único efeito sobre as vizinhanças é equivalente ao levantamento de um peso.

Interações de trabalho e calor?

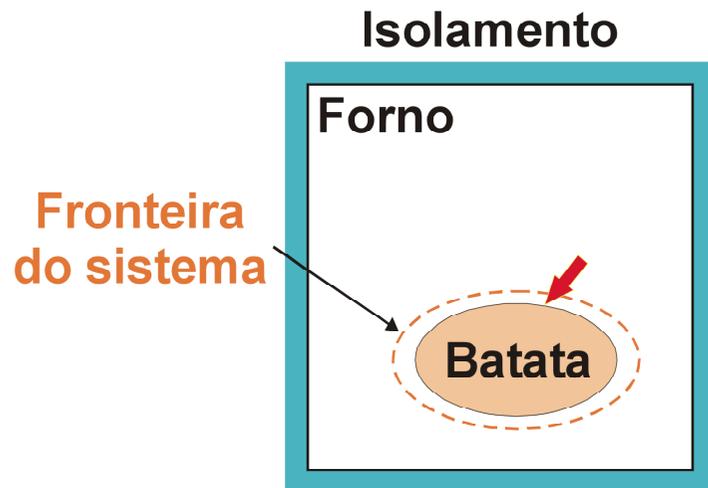
Exemplo 1:



Resp. Trabalho.

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 2:

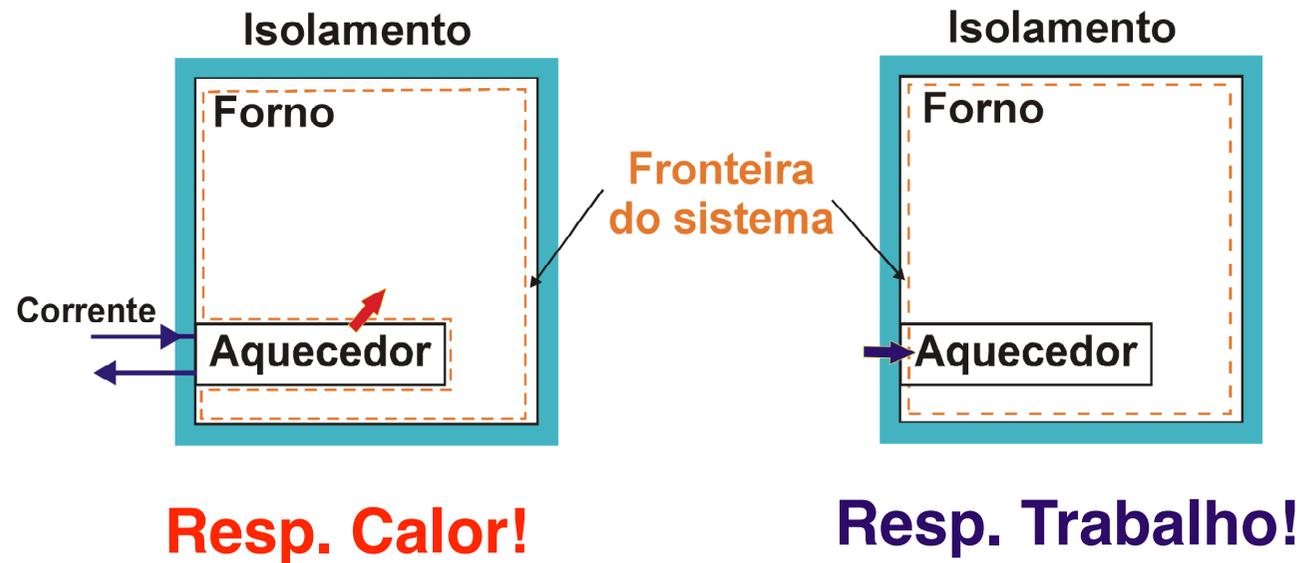


Diferença de temperatura entre os gases e a parede do forno e a batata!

Resp. Calor!

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 3 e 4:





1. Trabalho e calor são fenômenos de **fronteira**. Ambos são observados na fronteira do sistema e são responsáveis pela transferência de energia entre o sistema e sua vizinhança;

2. Trabalho e calor são fenômenos **transitórios**. Os sistemas não possuem trabalho ou calor, isto é, ambos não são propriedades termodinâmicas;

a. Ambos estão associados a um **processo** e não a um estado. Portanto não são propriedades termodinâmicas;

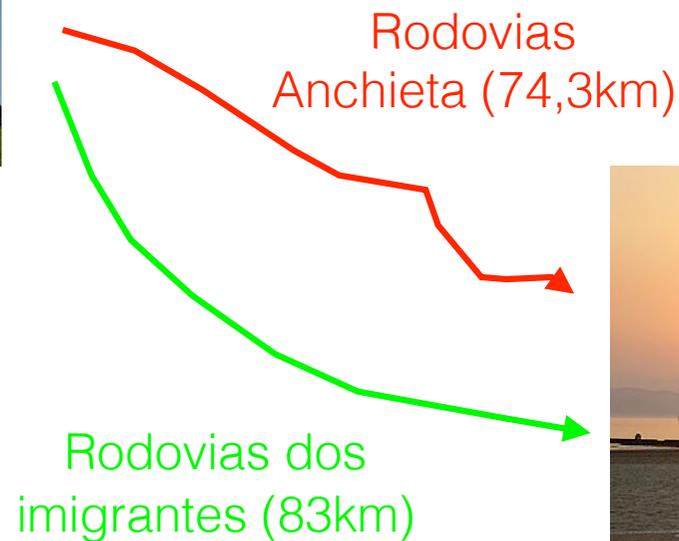
b. Ambos são funções de **caminho** e não de **ponto**.

Função de ponto versus Função de caminho



São Paulo
Altura = 767 m

distância e altura?



- **Altura é uma função de ponto!**
- **Distância é uma função de caminho!**



Santos
Altura = 0 m



Trabalho: W kJ

Calor: Q kJ

Diferenciais de funções de caminho: δW e δQ

Trabalho específico: $w=W/m$ kJ/kg

Calor por unidade de massa: $q=Q/m$ kJ/kg

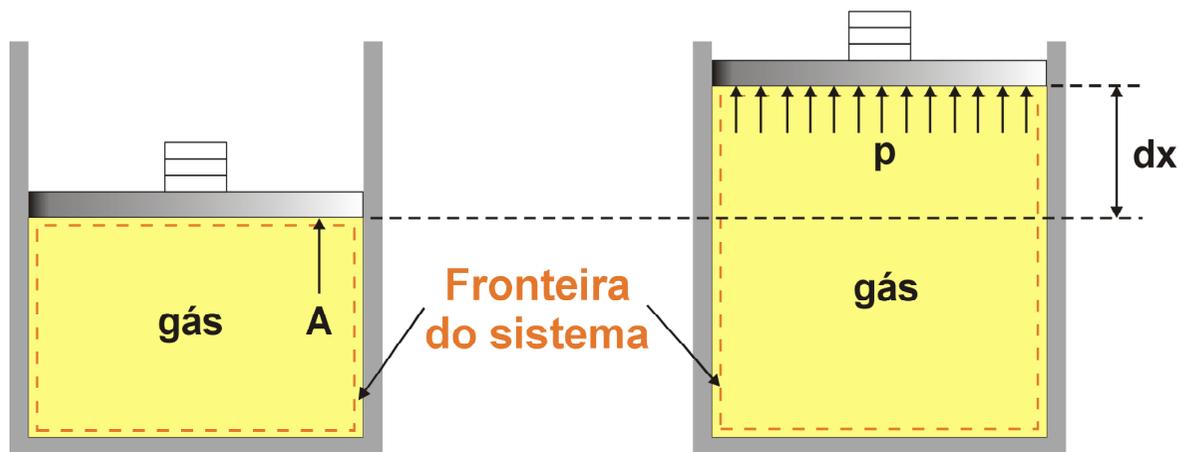
Potência: $\dot{W} = \delta W/dt$ kW

Taxa de transferência de calor: $\dot{Q} = \delta Q/dt$ kW

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Considere a figura:

Em Mecânica:



$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

Assim:

$$\delta W = PAdx \quad \longrightarrow \quad \delta W = PdV \quad \longrightarrow \quad W = \int_1^2 PdV$$

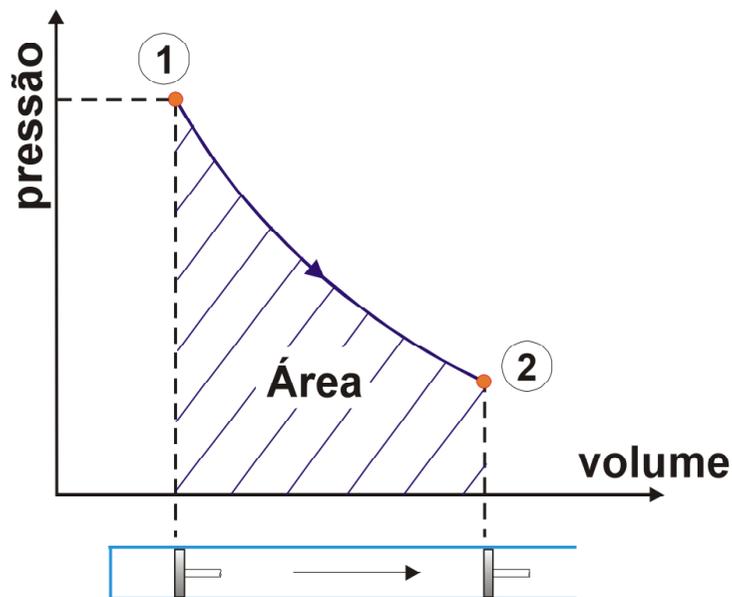
Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Deduzimos: $W = \int_1^2 P dV$ **considerando que a pressão na superfície inferior do pistão é uniforme**

Se o processo ocorrer lentamente, processo quase-estático, podemos dizer que um único valor de pressão é representativo do sistema!

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Note, ainda, que em um processo quase-estático, o módulo do trabalho é igual a área sob a curva em um diagrama P (sistema) - v:



Observe, também, que se fossemos de um 1 a 2 por outros caminhos a área sob a curva seria diferente e, conseqüentemente, o trabalho.

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Trabalho pode ser negativo ou positivo. Recorde-se que em Mecânica ele é definido como o produto escalar entre força e deslocamento.

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

★ $W > 0$ quando força e deslocamento têm o mesmo sentido, trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $W < 0$ quando força e deslocamento têm sentidos opostos, trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

Trabalho de fronteira móvel

Na determinação da integral: $W = \int_1^2 P dV$

Temos duas classes de problemas:

- ★ Relação P-V obtida experimentalmente ou dada na forma gráfica;
- ★ Relação P-V tal que possa ser ajustada por uma função analítica.

O processo politrópico é um exemplo do segundo tipo.

Processo politrópico

Obedece a relação: $P.V^n = \text{constante}$
 c/n entre ∞ e $-\infty$

Isto é: $P_1.V_1^n = P_2.V_2^n = \dots = \text{constante}$

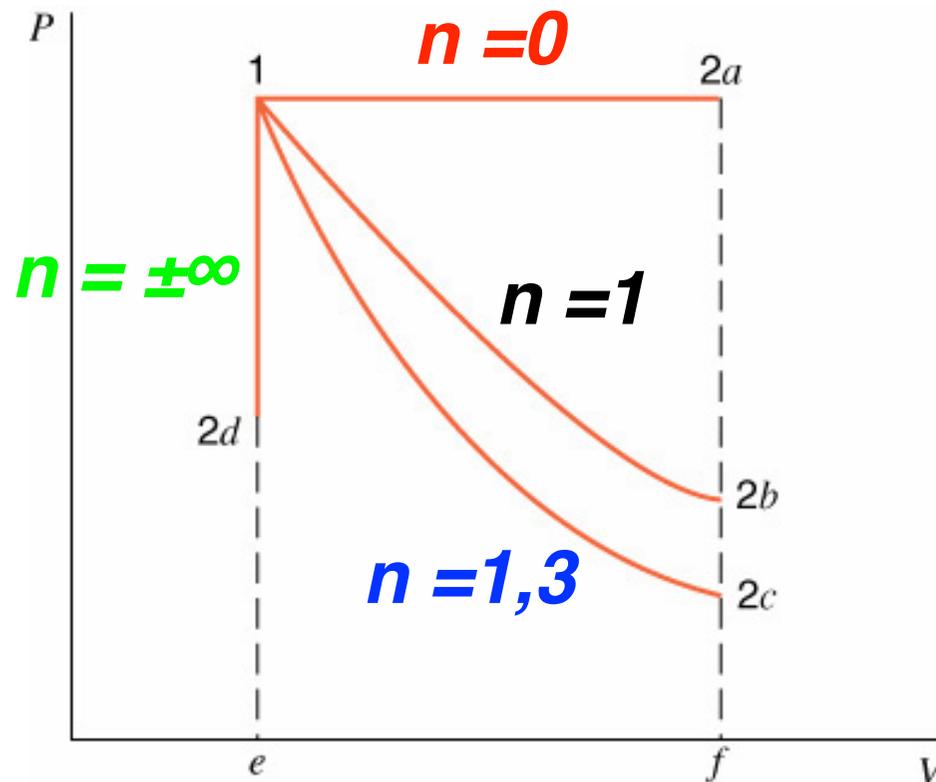
**Conhecida a relação
entre P e V podemos
realizar a integração:**

$$\int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad n \neq 1$$

ou

$$\int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad n=1$$

Processo politrópico: $P.V^n = \text{constante}$



$n = 0$: pressão constante

$n = 1,3$

$n = \pm\infty$: volume constante

$n = 1$: isotérmico (se válido o modelo de Gás perfeito),
 $PV = mRT$

Mecanismos de transferência de calor

Mecanismos

Condução – transferência em sólidos ou líquidos estacionários devido ao movimento aleatório de átomos, moléculas e/ou elétrons constituintes;

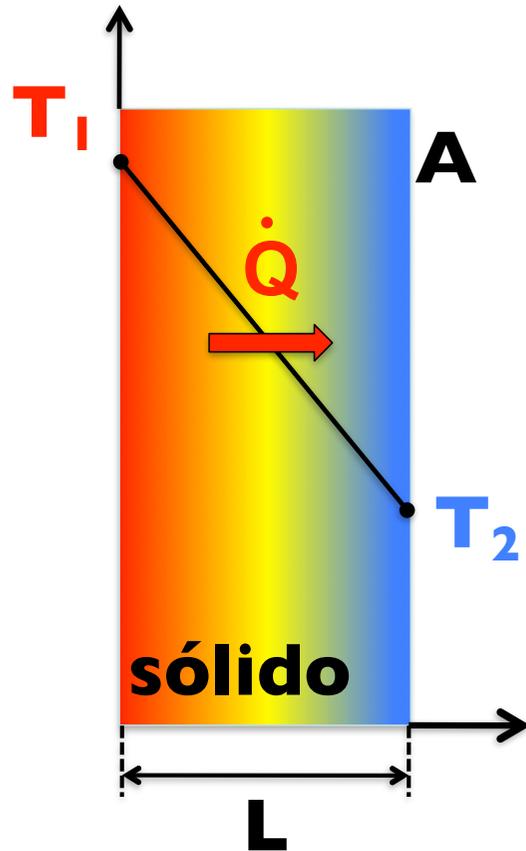
Convecção – transferência devido ao efeito combinado do movimento global e aleatório de um fluido sobre uma superfície;

Radiação – energia emitida pela matéria devido a mudanças na configuração de seus elétrons e transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons).

Mecanismos de transferência de calor



Condução



Joseph Fourier
(1768-1830)

Lei de Fourier:

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{L}$$

\dot{Q} - Taxa de transferência de calor W

k - Condutividade térmica $\frac{W}{m \cdot K}$

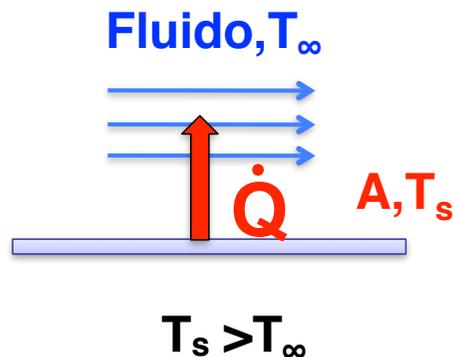
Condutividade térmica de alguns materiais a temperatura ambiente

Material	k, W/(m·K)
Cobre	401
Alumínio	240
Ferro	80,2
Aço (AISI 1010)	63,9
Aço inox (AISI 304)	14,9
Vidro	1,4
Tijolo, comum	0,72
Solo	0,52
Pele	0,50
Tijolo refratário (Si)	0,25
Ar	0,0263

Material	k, W/(m·K)
Fibra de vidro (placa)	0,058
Placa de fibra mineral	0,049
Fibra de vidro (manta)	0,038
Poliestireno, expandido	0,027
Uretana, espuma	0,026
Materiais em camadas, Folhas de alumínio, vácuo	0,0016

Fonte: Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.

Convecção



Isaac Newton
(1643-1727)

Lei de Newton do resfriamento:

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$$

h Coeficiente de transferência de calor por convecção $\frac{W}{m^2 \cdot K}$



Valores típicos de coeficientes de transferência de calor

Processo	h , W/(m ² K)
<i>Convecção natural</i>	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1.000
<i>Convecção forçada</i>	
Gases	10 – 300
Líquidos	100 – 2.000
<i>Convecção com mudança de fase</i>	
Ebulição e condensação	2.500 – 100.000

Radiação



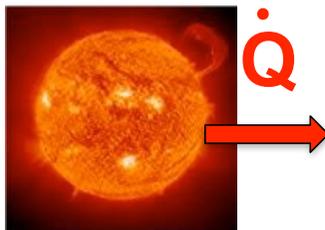
Joseph Stefan
(1835-1893)



Ludwig Boltzmann
(1844-1903)

Corpo negro

$$\dot{Q} = \sigma AT_s^4$$



σ Constante de Stefan-Boltzmann
 $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.



Convenções de sinal

★ $Q > 0$ quando o calor é “transferido” da vizinhança para o sistema;

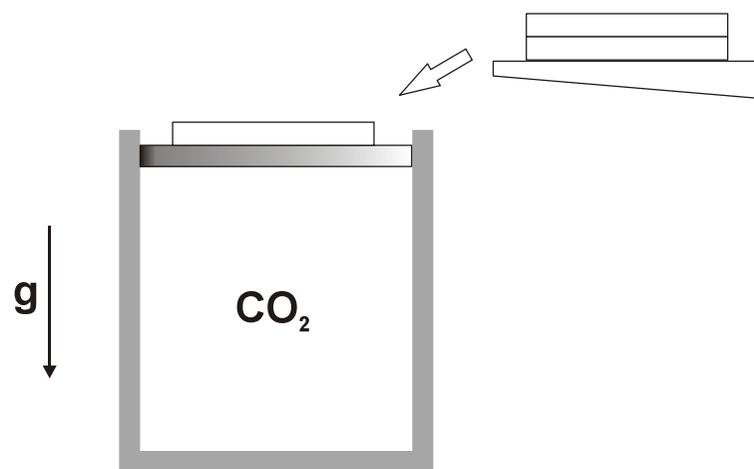
★ $Q < 0$ quando o calor é “transferido” do sistema para a vizinhança;

★ $W > 0$ trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $W < 0$ trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

4.51:

O conjunto cilindro-êmbolo contém, inicialmente, $0,2 \text{ m}^3$ de dióxido de carbono a 300 kPa e $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Os pesos são então adicionados a uma velocidade tal que o gás é comprimido segundo a relação $p \cdot V^{1,2} = \text{constante}$. Admitindo que a temperatura final seja igual a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ determine o trabalho realizado neste processo.





4.51: Solução

Hipóteses:

- 1.O sistema é o CO_2 contido no conjunto;
- 2.O processo de 1 para 2 é de quase-equilíbrio;
- 3.Os estado 1 e 2 são estados de equilíbrio;
- 4.O gás se comporta como perfeito nos estados 1 e 2.

4.51: Solução

◆ Trabalho realizado $W = \int_1^2 P dV$

$$\int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}$$

considerando gás perfeito, $P_2 V_2 - P_1 V_1 = m \cdot R_{CO_2} \cdot (T_2 - T_1)$

Temos as duas temperaturas mas precisamos calcular a **massa**. Esta pode ser obtida a partir da equação dos gases perfeito e o estado 1.

$$m = P_1 V_1 / R_{CO_2} T_1 = 300 \cdot 0,2 / 0,189 \cdot 373 = 0,851 \text{ kg} \quad m = 0,851 \text{ kg}$$



4.51: Solução

◆ Trabalho realizado

considerando gás perfeito, $W_{1-2} = mR_{CO_2}(T_2 - T_1) / (1 - n)$

$$W_{1-2} = 0,851 \cdot 0,189 \cdot (200 - 100) / (1 - 1,2)$$

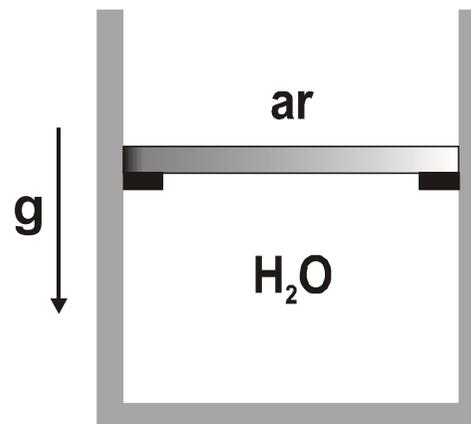
$$W_{1-2} = -80,4 \text{ kJ}$$

◆ Comentário

O sinal negativo indica que a vizinhança realizou trabalho sobre o sistema.

Extra 1:

Considere o conjunto cilindro-êmbolo mostrado na figura. A massa do êmbolo é de 101 kg e sua área de 0,01 m². O conjunto contém 1 kg de água ocupando um volume 0,1m³. Inicialmente, a temperatura da água é 20 °C e o pistão repousa sobre os esbarros fixados na parede do cilindro, com sua superfície externa exposta à pressão atmosférica ($p_0 = 101325$ Pa). A que temperatura a água deve ser aquecida de modo a erguer o êmbolo? Se a água continuar a ser aquecida até o estado de vapor saturado, determine a temperatura final, o volume e o trabalho realizado no processo. Represente o processo em um diagrama p-V.





Extra 1: Solução

Temos dois processos e três estados. O estado 1 é o inicial, o 2 é quando o êmbolo não precisa mais do batente para se manter em repouso e o estado 3 é o final.

Hipóteses:

- 1.O sistema é a água contida no conjunto;
- 2.Os processos são de quase-equilíbrio;
- 3.Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
- 4.Não há atrito entre o pistão e o cilindro.



Extra 1: Solução

◆ **Estado 1:** Definido, pois conhecemos v e T .

$$v_1 = 1/0,1 = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 1 devemos consultar a tabela de saturação com $T_1 = 20 \text{ °C}$ ($P_{\text{sat}} = 2,3385 \text{ kPa}$) e comparar o valor de v_1 com v_l e v_v . Como $v_l < v_1 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $P_1 = P_{\text{sat}}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_1 = (v_1 - v_l) / (v_v - v_l) = 0,00171$

Extra 1: Solução

◆ **Estado 2:** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_2 = v_1 = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_2 = P_0 + mg/A = 101,325 + 10^{-3} \cdot 101 \cdot 9,8/0,01 = 200 \text{ kPa}$$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com $P_2 = 200 \text{ kPa}$ ($T_{\text{sat}} = 120,23^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_2 com $v_l=0,001061$ e $v_v=0,8857 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_l < v_2 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $T_2 = T_{\text{sat}}$.

Resp. A água deve ser aquecida até $120,23 \text{ }^\circ\text{C}$ para que o êmbolo comece a subir.



Extra 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos P e x .

$$x_3 = 1 \text{ (vapor saturado) e } P_3 = P_2 = 200\text{kPa}$$

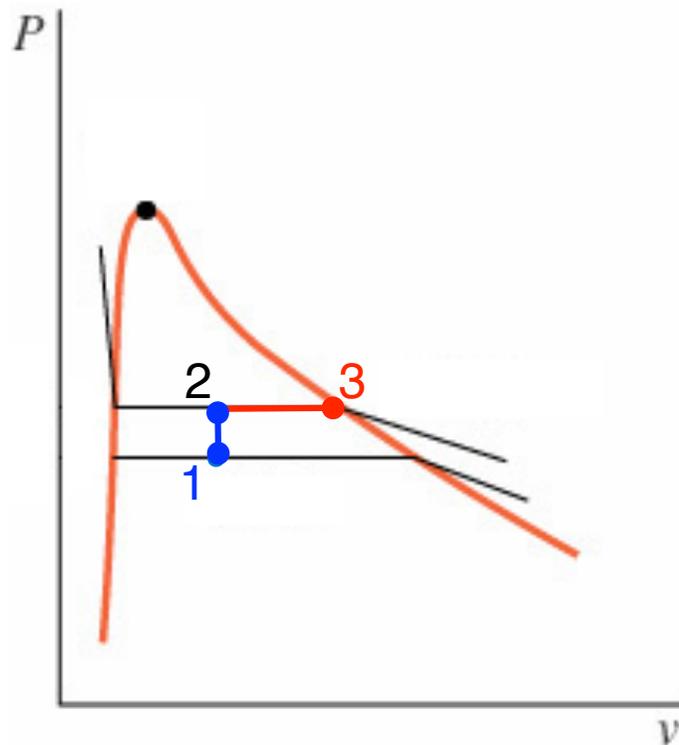
$$V_3 = v_3 \cdot m = 0,8857 \cdot 1 = 0,8857 \text{ m}^3$$

Resp. O volume final é de $0,8857 \text{ m}^3$.

Extra 1: Solução

◆ Diagrama P-v:

Antes de calcular o trabalho é preciso traçar o diagrama P-v:



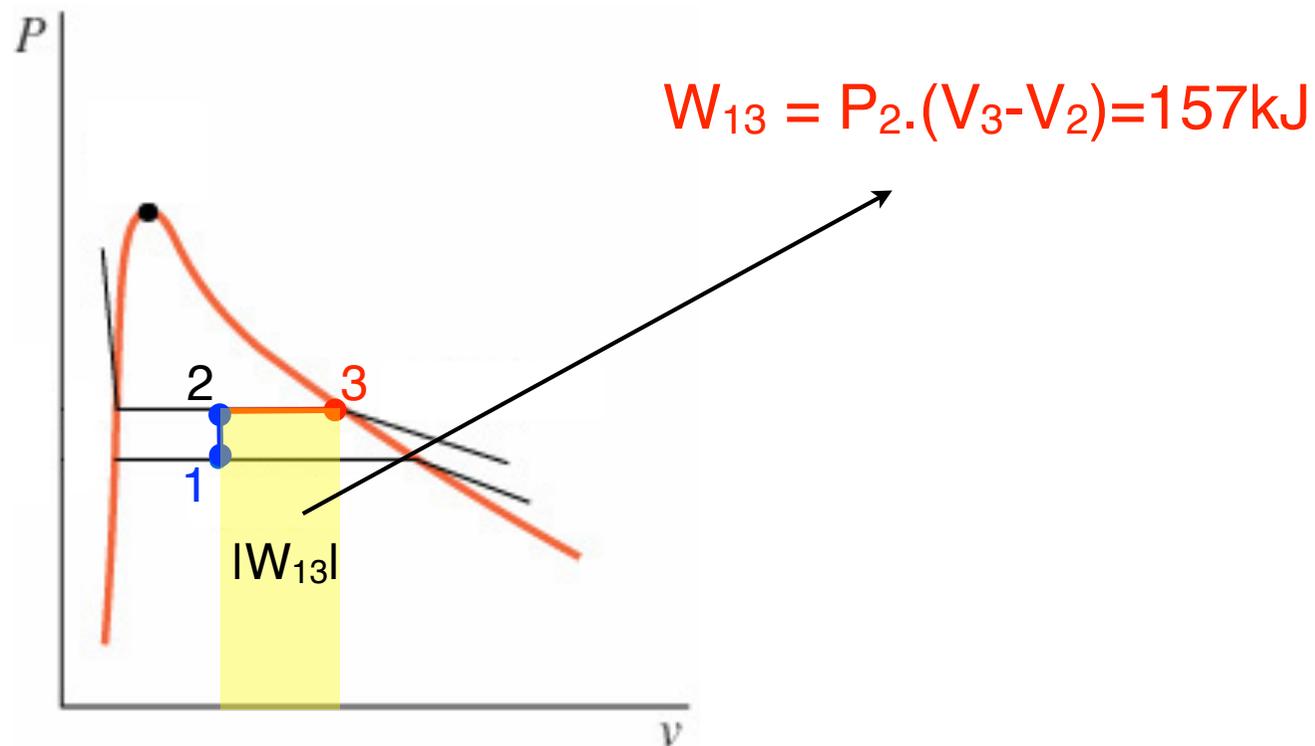
Processo a v constante

Processo a P constante

Extra 1: Solução

◆ Trabalho realizado

Pelo diagrama P-v podemos determinar o trabalho já que o processo é quase-estático.





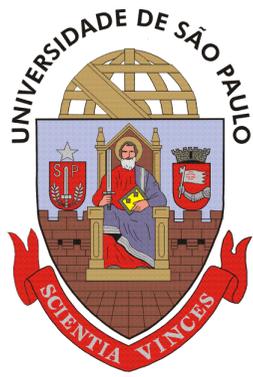
Extra 1: Observações

- ◆ O sinal é positivo pois temos o sistema realizando trabalho sobre a vizinhança.;
- ◆ O diagrama T-v tem exatamente o mesmo aspecto do P-v. Trace-o você mesmo!



Até agora já cobrimos um grande volume do livro-texto. Se você ainda não leu a teoria ou fez exercícios...

faça isso agora! O volume de matéria crescerá muito quando começarmos a falar da 1ª Lei da Termodinâmica e talvez você não tenha uma segunda chance!



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

5) Primeira Lei da Termodinâmica



Introdução



Max Planck
1858-1947

Segundo Max Planck, a *1ª Lei da Termodinâmica* nada mais é do que o princípio da conservação da energia aplicado a fenômenos que envolvem transferência de calor.



Para um sistema num ciclo termodinâmico (propriedades finais coincidem com as iniciais) tem-se que:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

Integral cíclica

$$0 = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

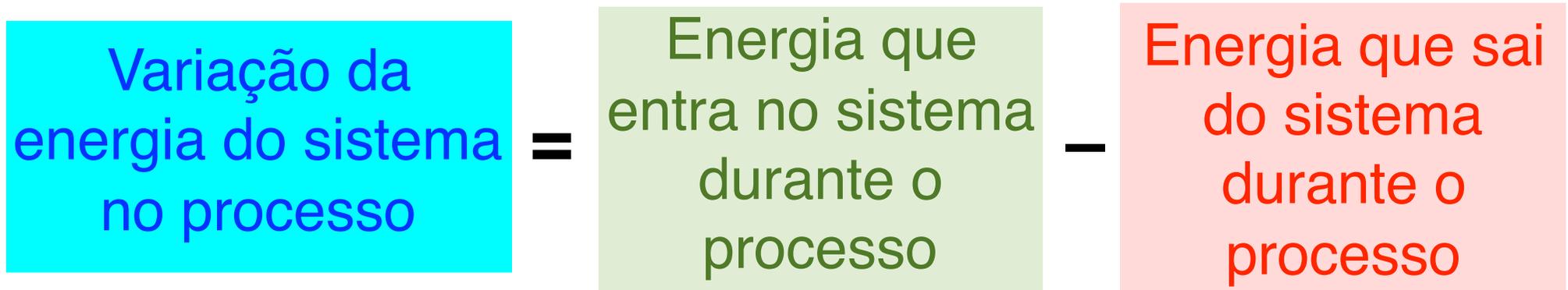
variação de uma
propriedade

$$\Delta E = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

energia



Para um sistema que passa por uma mudança infinitesimal de estado, podemos realizar um balanço de energia:



Assim: $dE = \delta Q - \delta W$



Para entender os sinais que aparecem na expressão diferencial da 1ª Lei, precisamos lembrar da convenção de sinais adotada.

$$dE = \delta Q - \delta W$$

★ $\delta Q > 0$ quando o calor é “transferido” da vizinhança para o sistema;

★ $\delta Q < 0$ quando o calor é “transferido” do sistema para a vizinhança;

★ $\delta W > 0$ trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $\delta W < 0$ trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.



Podemos integrar a expressão entre o estado 1 e 2 e obter a expressão da 1ª Lei para um sistema:

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 dE$$

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q \quad \rightarrow \quad E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W$$



Podemos realizar um balanço em um determinado instante de tempo, temos:

Taxa de variação
da energia do
sistema

=

Taxa com que
energia que
entra no sistema

-

Taxa com que
energia sai do
sistema

Assim:

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



Na expressão:

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

Taxa de transferência
de calor para o sistema

Taxa de realização de
trabalho pelo sistema

Temos uma equação diferencial ordinária (EDO), cuja solução exige o conhecimento da energia no instante inicial.

As seguintes relações
são válidas:

$$Q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

$$W_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} dt$$



Resumo

1ª Lei para um processo (1-2):

$$\Delta E = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

1ª Lei para um instante:

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



Simplificações

◆ Ciclo: $E_1 = E_2 \quad \therefore \Delta E = 0 \quad \therefore Q = W$

Podemos escrever de outra forma: $\oint \delta Q = \oint \delta W$

← integral cíclica

◆ Regime permanente (propriedades não variam com o tempo):

$$\cancel{\frac{dE}{dt}} = \dot{Q} - \dot{W} \Rightarrow \dot{Q} = \dot{W}$$

0 ←



Escrevemos expressões para a conservação da energia sem nos preocuparmos sob quais formas encontramos a energia.

Anteriormente, vimos:

A energia total (E) de um sistema composto por uma substância compressível simples em um dado estado é:

$$E = U + E_c + E_p$$

interna
cinética
potencial

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad \text{ou} \quad dE = dU + dE_c + dE_p$$

Igualdades válida pois Energia é uma função de ponto!



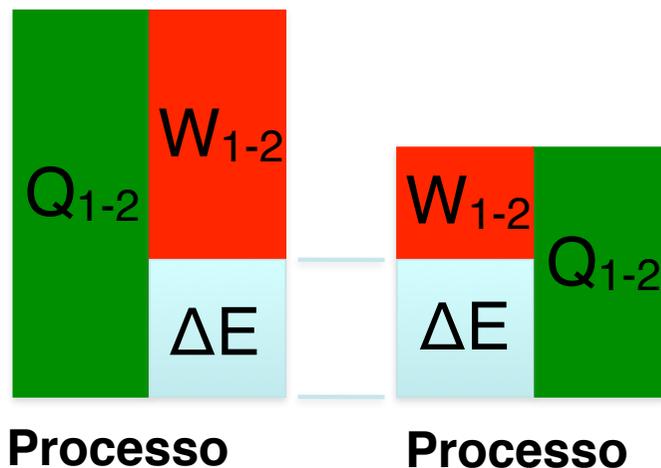
Voltando à questão de função de ponto e caminho:

$$\underbrace{E_2 - E_1}_{\text{Variação da energia (propriedades)}} = \underbrace{Q_{1-2} - W_{1-2}}_{\text{Interação de energia (não-propriedades)}}$$

Variação da energia
(propriedades)

Interação de energia
(não-propriedades)

Observe a figura:



Fica claro que apesar de seguirmos por processos em que trabalho e calor são diferentes, a variação de energia do sistema é a mesma!



Lembrando de Mecânica:

Energia cinética $\Delta E_c = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$

Energia potencial $\Delta E_p = mg (z_2 - z_1)$

Completamos a apresentação da conservação da energia para um sistema. Veremos como avaliar a propriedade energia interna!



U - energia interna (energia)

u – energia interna específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

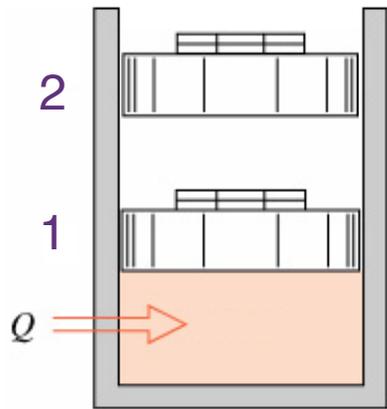
$$U = U_{liq} + U_{vap} \quad \text{ou} \quad \frac{m u = m_{liq} u_l + m_{vap} u_v}{m}$$

Dividindo por m e introduzindo o título:

$$u = (1 - x) u_l + x u_v \quad \text{ou} \quad u = u_l + x u_{lv}$$

sendo u_l a energia específica do líquido saturado, u_v a energia do vapor saturado e u_{lv} a diferença entre a primeira e a segunda.

Considere o gás no conjunto cilindro-pistão como sistema. Vamos aquecer o sistema lentamente:



• 1ª lei: $E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$

Simplificando $E_2 - E_1 \approx U_2 - U_1$ Por que?

$$W_{1-2} = \int p dV = P_1(V_2 - V_1)$$

Combinando as expressões: $U_2 - U_1 = Q_{1-2} - P_1(V_2 - V_1)$

Define-se
entalpia como:

$$H = U + PV$$

Assim: $Q_{1-2} = H_2 - H_1$



H - entalpia (energia)

h – entalpia específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

$$H = H_{liq} + H_{vap} \quad \text{ou} \quad mh = m_{liq}h_l + m_{vap}h_v$$

Introduzindo o título:

$$h = (1 - x)h_l + xh_v \quad \text{ou} \quad h = h_l + xh_{lv}$$

sendo h_l a entalpia específica do líquido saturado, h_v a entalpia do vapor saturado e h_{lv} a entalpia de vaporização.



Apresentamos novas propriedades, agora precisamos aprender a determiná-las!

Aproximações para o líquido comprimido usando as propriedades do líquido saturado

$$v_{liq\ comp}(T, P) \approx v_l(T)$$

$$u_{liq\ comp}(T, P) \approx u_l(T)$$

$$h_{liq\ comp}(T, P) \approx u_l(T) + P \cdot v_l(T)$$

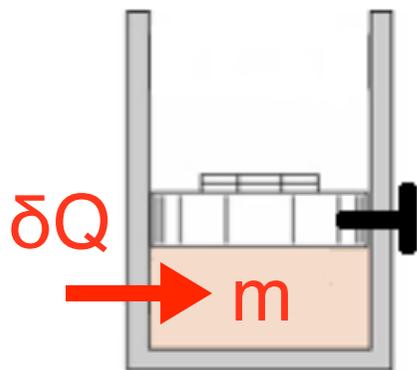
ou

$$h_{liq\ comp}(T, P) \approx h_l(T) + v_l(T) \cdot [P - P_{sat}(T)]$$

Substância incompressível

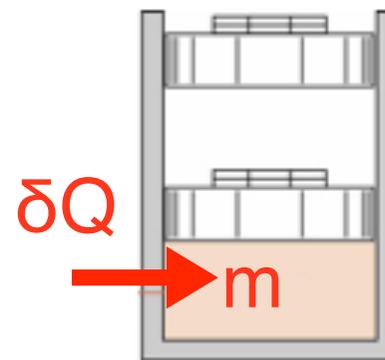
Nesse caso, para aprender a calcular as variações de entalpia e energia interna precisamos definir duas novas propriedades termodinâmicas, os **calores específicos a pressão e volume constante**.

Considere os dois experimentos com um fluido:



Calor específico a volume constante

$$c_v = \frac{\delta Q}{m \, dT}$$



Calor específico a pressão constante

$$c_p = \frac{\delta Q}{m \, dT}$$



Concluimos que:

Calor específico a volume constante $c_v = \frac{\delta Q}{m dT}$

Calor específico a pressão constante $c_p = \frac{\delta Q}{m dT}$

Podemos aplicar a 1ª Lei para os dois casos considerando a substância como sistema:

$$\delta Q = dU + \delta W (=0)$$

$$\delta Q = dU + \delta W (=pdV)$$

Combinando com as expressões dos calores específicos:

$$c_v = \frac{dU}{m dT} \rightarrow c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v$$

$$c_p = \frac{dU + pdV}{m dT} \rightarrow c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p$$



Substância incompressível

O modelo considera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \text{cte} \\ u = u(T) \Rightarrow c_v(T) = \frac{du}{dT} \end{array} \right.$$

Derivando a definição de entalpia:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p = \frac{du}{dT} \Rightarrow c = c_p = c_v \Rightarrow u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT$$

Considerando adicionalmente
calor específico constante:

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

Quando podemos fazer essa hipótese?



Gás perfeito

O modelo considera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} pv = RT \\ u(T) \end{array} \right.$$

Considerando a definição da entalpia:

$$h = h(T) = u + RT \Rightarrow dh = du + RdT$$

Combinando a equação anterior com as definições dos calores específicos:

$$c_{v0}(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT}$$

indica g.p. 

Obtém-se: $c_{p0} = c_{v0} + R$

 maior que c_v

Gás perfeito: Aproximações

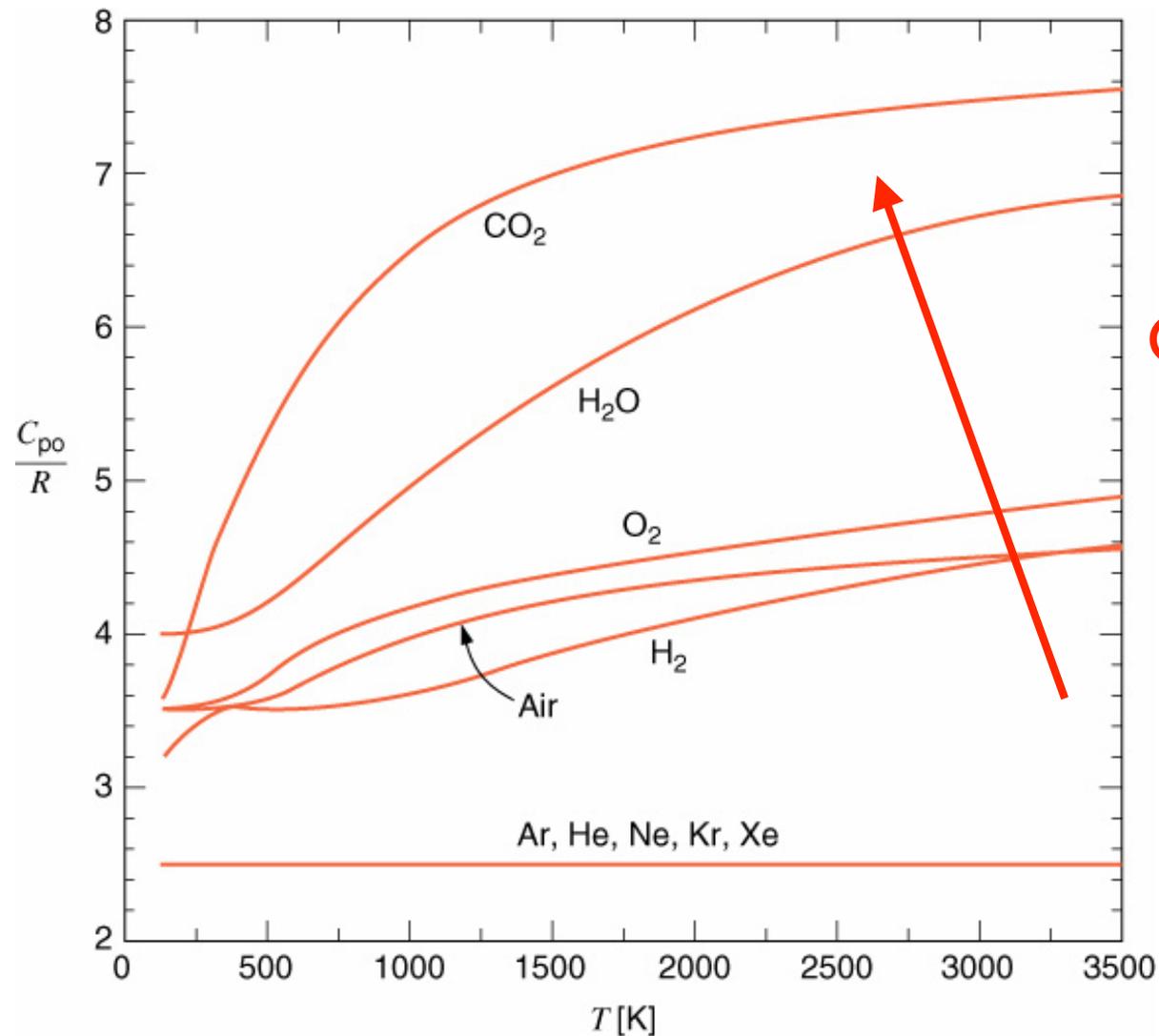
$$c_{p0} \text{ e } c_{v0} \text{ constantes: } \left\{ \begin{array}{l} c_{v0}(T) = \frac{du}{dT} \\ c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Integrando}} \begin{array}{l} u_2 - u_1 = c_{v0}(T_2 - T_1) \\ h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1) \end{array}$$

Em alguns problemas aparecem u e h isolados, isto é, não aparecem diferenças de u e h . Nessa situação como determinamos as propriedades?

Definimos um estado de referência para u , por exemplo. Nesse estado estabelecemos um valor arbitrário para u e calculamos h correspondente! Vejamos como fazer isso na seqüência.



Calor específico a pressão constante de gases a baixa pressão



Complexidade
da molécula



Gás perfeito: Aproximações

Vamos definir o estado de referência. Considere a expressão:

$$u = u(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_v dT$$

Por simplicidade vamos estabelecer que para $T = 0 \text{ K}$, $u = 0$:

$$u = u(0) + \int_0^T c_v dT \quad \rightarrow \quad u(T) = c_{v0} T$$

Agora calculamos h :

$$h(T_{ref}) = u(T_{ref}) + Pv \quad \rightarrow \quad h = 0 + RT_{ref} \quad \therefore h(0\text{K}) = 0$$

Analogamente: $h(T) = c_{po} T$



Gás perfeito: Tabelas de gás ideal

Fizemos a integração usando a hipótese de calores específicos constantes

$$c_{v0}(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT}$$

Nas tabelas de gás ideal a integração é feita a partir de um estado de referência considerando a dependência dos calores com a temperatura!

Obs. Prefira usar as Tabelas de Gás Ideal a considerar calores constantes!

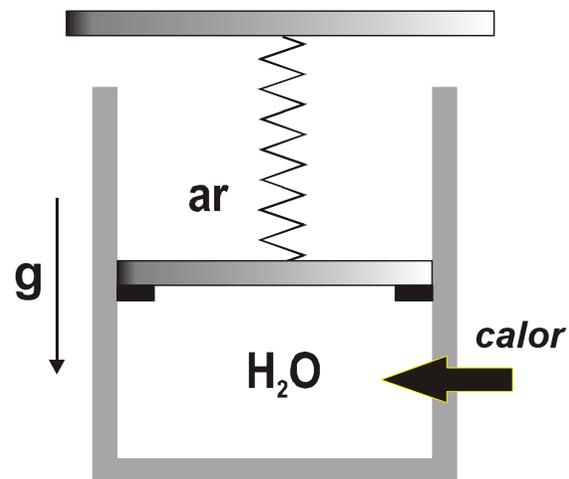
TABELA A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s_T^0 kJ/kg \times K	P_r	v_r
200	142,77	200,17	6,46260	0,2703	493,47
220	157,07	220,22	6,55812	0,3770	389,15
240	171,38	240,27	6,64535	0,5109	313,27

Extra 1:

Um conjunto cilindro-êmbolo contém 1 kg de água. A mola encontra-se comprimida na posição inicial, de modo que é necessária uma pressão de 300kPa no fluido para ergue-la. Para um volume de 1,5 m³ a força exercida pela mola é tal que a pressão no fluido é de 500 kPa. No estado inicial a água está a 100 kPa e ocupa um volume de 0,5m³. Calor é então transferido até que a pressão atinja 400 kPa. Pede-se para (a) representar o processo em um diagrama p-v, incluindo as linhas de saturação; (b) calcular o trabalho e (c) determinar calor transferido no processo.





Extra 1: Solução

Hipóteses:

- 1.O sistema é a água contida no conjunto;
- 2.Os processos são de quase-equilíbrio;
- 3.Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
- 4.Não há atrito entre o pistão e o cilindro;
- 5.A mola é linear;
- 6.Sistema estacionário;
- 7.Variação desprezível da energia potencial.

Extra 1: Solução

◆ **Estado 1:** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_1 = 0,5/1 = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 1 devemos consultar a tabela de saturação com $P_1 = 100\text{kPa}$ ($T_{\text{sat}} = 99,62^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_1 com $v_l=0,001043$ e $v_v=1,694 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_l < v_1 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $T_1 = T_{\text{sat}}$.

Aproveitamos a oportunidade para buscar da tabela $u_l=417,33$ e $u_v=2506,1\text{kJ/kg}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_1=(v_1-v_l)/(v_v-v_l) = 0,295$

A energia da mistura é calculada por $u_1=(1-x_1)u_l+x_1u_v= 1033,5 \text{ kJ/kg}$

Extra 1: Solução

◆ **Estado 2 (batente sem atuação):** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_2 = v_1 = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com $P_2 = 300\text{kPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133,55^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_2 com $v_l=0,001073$ e $v_v=0,6058 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_l < v_2 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $T_2 = T_{\text{sat}}$.

Aproveitamos a oportunidade para buscar da tabela $u_l=561,13$ e $u_v=2543,6\text{kJ/kg}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_2=(v_2-v_l)/(v_v-v_l) = 0,825$

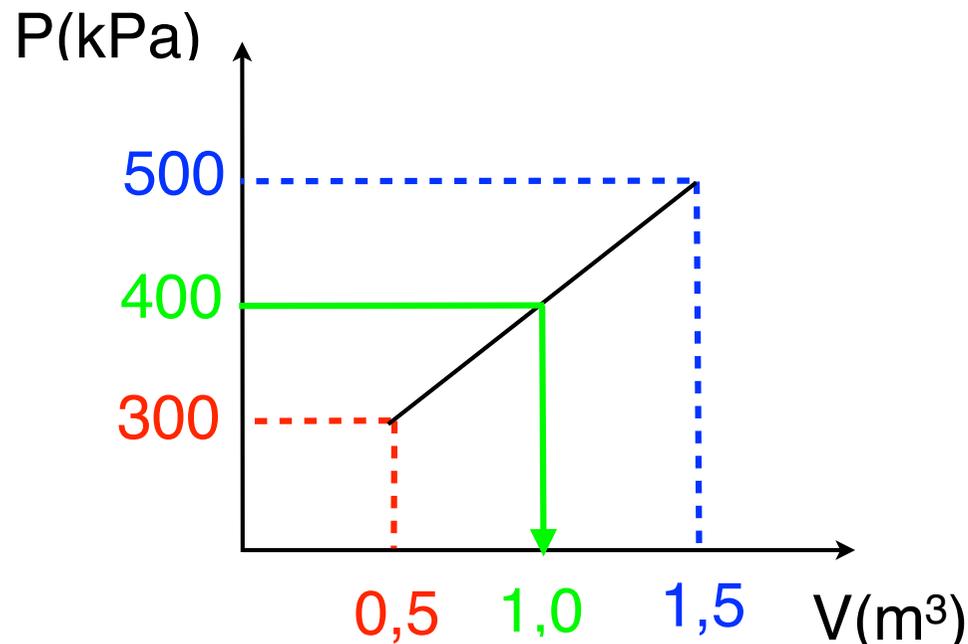
A energia da mistura é calculada por $u_2=(1-x_2)u_l+x_2u_v= 2196,7 \text{ kJ/kg}$



Extra 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos v e $P_3 = 400\text{kPa}$. **Como?**

Analizando a mola!



$$v_3 = 1/1 = 1 \text{ m}^3/\text{kg}$$



Extra 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos v e P .

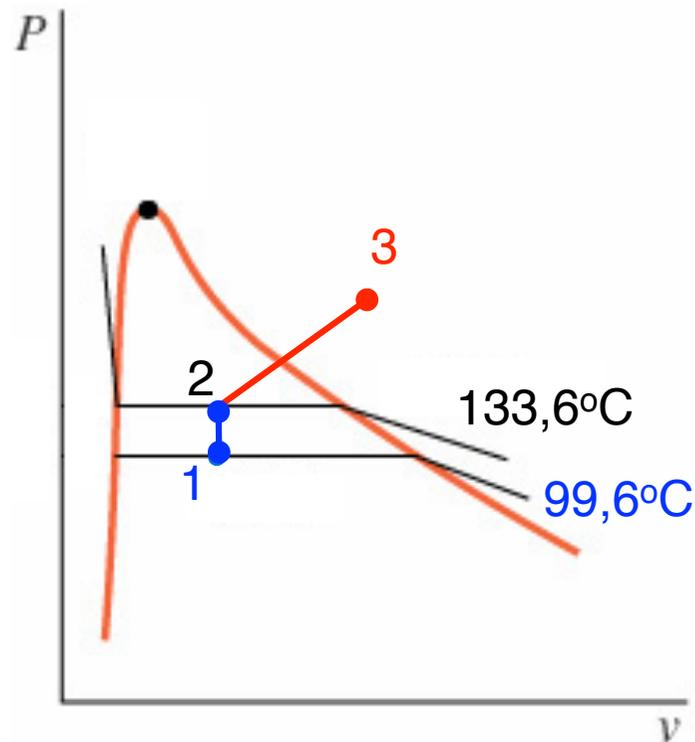
$$v_3 = 1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 3 devemos consultar a tabela de saturação com $P_3 = 400\text{kPa}$ ($T_{\text{sat}} = 143,69^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_3 com v_l e $v_v = 0,4625 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_3 > v_v$, temos **vapor superaquecido**.

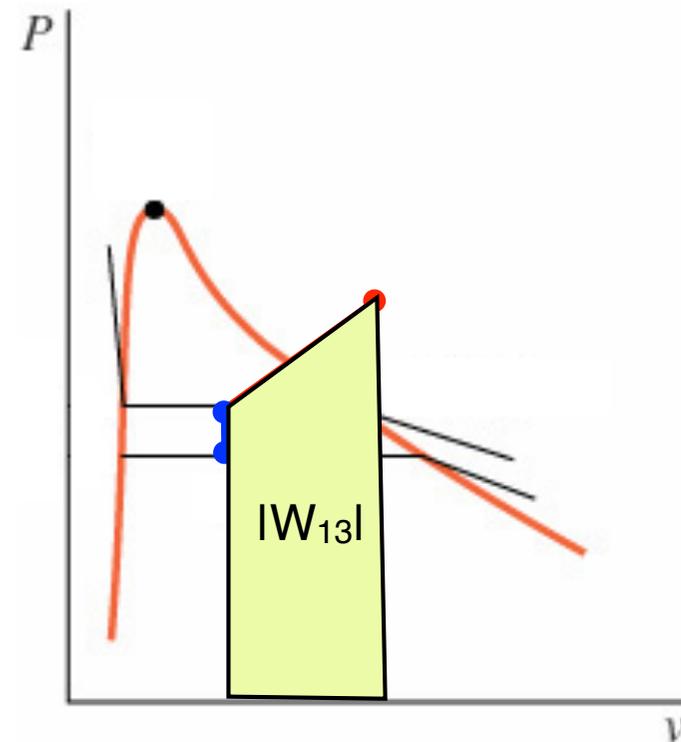
Da tabela de vapor superaquecido com $P_3 = 400\text{kPa}$ e $v_3 = 1,0056\text{m}^3/\text{kg}$, temos **$T_3 = 600^\circ\text{C}$** e **$u_3 = 3300,2\text{kJ/kg}$** .

Extra 1: Solução

◆ Diagrama P-v e o trabalho.



Processo a v constante



$$W_{13} = (P_3 + P_2)(V_3 - V_2)/2 = 175 \text{ kJ}$$

Extra 1: Solução

◆ Cálculo do calor

Aplicando a 1ª Lei para o sistema, considerando sistema estacionário a variação da energia potencial desprezível em face da variação da energia interna:

$$U_3 - U_1 = Q_{1-3} - W_{1-3}$$

$$Q_{1-3} = m(u_3 - u_1) + W_{1-3}$$

$$Q_{1-3} = 1(3300,2 - 1033,5) + 175$$

$$Q_{1-3} = 2442\text{kJ}$$



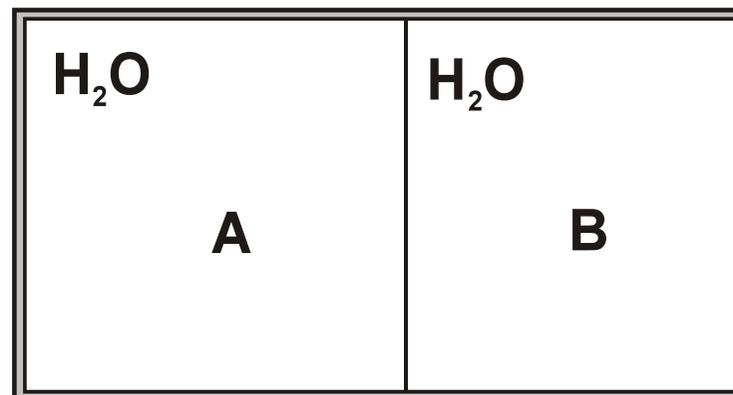
Extra 1: Observações

- ◆ O sinal do trabalho é positivo pois temos o sistema realizando trabalho sobre a vizinhança;
- ◆ O sinal do calor é positivo pois transferimos para o sistema.



Extra 2:

Um tanque rígido está dividido em dois compartimentos por uma membrana. Ambos os lados contêm água. O compartimento A, com volume de 1 m^3 , está a 400 kPa e o fluido nele contido tem volume específico de $1 \text{ m}^3/\text{kg}$. O compartimento B contém $0,5 \text{ kg}$ de água a 100 kPa e $150 \text{ }^\circ\text{C}$. A membrana rompe, ocorrendo transferência de calor com o ambiente até que a água contida no tanque atinja uma temperatura uniforme de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Pede-se para determinar o calor transferido entre o fluido no tanque e o ambiente.





Extra 2: Solução

Hipóteses:

- 1.O sistema é a água contida no conjunto;
2. O trabalho de rompimento da membrana é nulo;
- 3.Os estados 1 e 2 são estados de equilíbrio;
- 4.Variação desprezível da energia potencial;
- 5.Sistema estacionário.

Extra 2: Solução

◆ **Estado 1** / Volume A: Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_{A1} = 1 \text{ m}^3/\text{kg} \quad P_{A1} = 400 \text{ kPa}$$

Da tabela de saturação $T_{\text{sat}} = 143,63^\circ\text{C}$ e $v_v = 0,4265 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_{A1} > v_v$, temos **vapor superaquecido**.

Da tabela de vapor superaquecido com $P = 400 \text{ kPa}$ e $v = 1,0056 \text{ m}^3/\text{kg}$, temos **$T_{A1} = 600^\circ\text{C}$** e **$u_{A1} = 3300,2 \text{ kJ/kg}$** .

Extra 2: Solução

◆ **Estado 1** / Volume B: Definido, pois conhecemos T e P.

$$T_{B1} = 150^\circ\text{C} \quad P_{B1} = 100 \text{ kPa}$$

Da tabela de saturação $T_{B1} > T_{\text{sat}}$ a 100 kPa temos **vapor superaquecido**.

Da tabela de vapor superaquecido $v_{B1} = 1,9364 \text{ m}^3/\text{kg}$ e $u_{B1} = 2582,7 \text{ kJ/kg}$.

Calculamos então $m_{A1} = 1 \text{ kg}$ e $V_{B1} = 0,9682 \text{ m}^3$.

Extra 2: Solução

◆ **Estado 2:** Definido, pois conhecemos T e v .

$$T_2 = 100^\circ\text{C} \quad v_2 = 1,9682 / 1,5 = 1,31 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Da tabela de saturação com $T_2 = 100^\circ\text{C}$ ($P_{\text{sat}} = 101,35 \text{ kPa}$) $v_l = 0,001044$ e $v_v = 1,6729 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_l < v_2 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $P_2 = P_{\text{sat}}$.

Aproveitamos a oportunidade para buscar da tabela $u_l = 418,91$ e $u_v = 2506,5 \text{ kJ/kg}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_2 = (v_2 - v_l) / (v_v - v_l) = 0,784$

A energia da mistura é calculada por $u_2 = (1 - x_2)u_l + x_2u_v = 2055,6 \text{ kJ/kg}$



Extra 1: Solução

◆ Cálculo do calor

Aplicando a 1ª Lei para o sistema A + B:

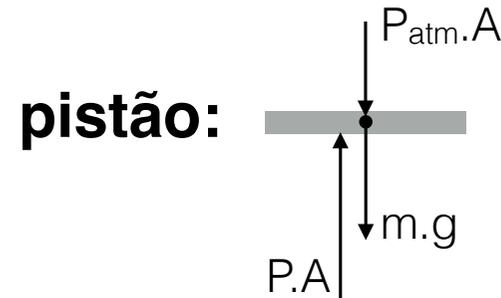
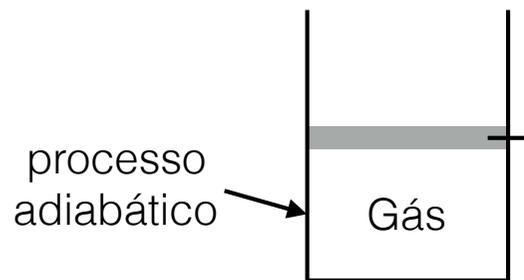
$$U_2 - (U_{A1} + U_{B1}) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$Q_{1-2} = m_2 u_2 - m_{A1} u_{A1} - m_{B1} u_{B1}$$

$$Q_{1-2} = -1508 \text{ kJ}$$



Considere um gás contido em um conjunto cilindro-pistão:



$$m.a = (P - P_{atm}).A - m.g$$

1ª lei para gás na forma diferencial (calores específicos constantes):

$$dU = \delta Q - \delta W \Rightarrow dU = -\delta W \quad \Rightarrow \quad m.c_v.dT = -Pd\forall$$

quase-estático

$$m.c_v.dT = -Pd\forall$$



1ª lei para gás na forma diferencial:

$$mc_v d\left(\frac{P \nabla}{mR}\right) = -Pd\nabla \quad \Rightarrow \quad m \frac{c_v}{R} d(P \nabla) = -Pd\nabla$$

$$\Rightarrow d(P \nabla) = (1 - k)Pd\nabla \quad \Rightarrow \quad \nabla dP + P d\nabla = (1 - k)Pd\nabla$$

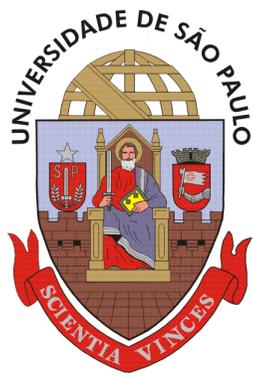
$$\Rightarrow \nabla dP = -kPd\nabla \quad \Rightarrow \quad \frac{dP}{P} = -k \frac{d\nabla}{\nabla} \quad \Rightarrow \quad \int_1^2 \frac{dP}{P} = -k \int_1^2 \frac{d\nabla}{\nabla}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\nabla_2}{\nabla_1}\right)^{-k} \quad \Rightarrow \quad P_1 \nabla_1^k = P_2 \nabla_2^k \quad \text{para um processo adiabático, quase-estático de um gás perfeito com calores específicos constantes}$$



Falta pouco para a primeira prova.

Resolva mais exercícios!



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

6) Primeira Lei da Termodinâmica para volume de controle



Os princípios básicos que nos são importantes estão escritos para um sistema. Assim, temos as expressões a seguir para a conservação da massa e da energia:

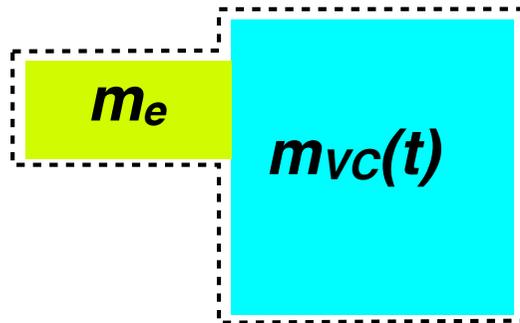
$m = \text{constante}$	$\frac{dm}{dt} = 0$
$E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$	$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$



Vamos escrever expressões equivalentes para um volume de controle.

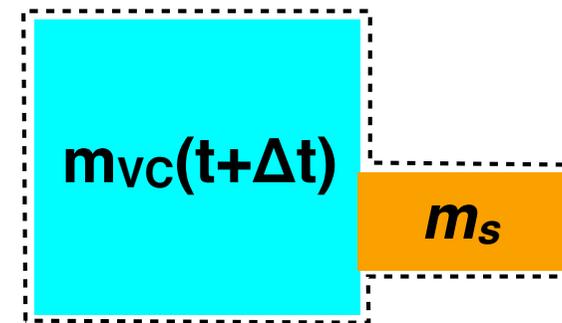
Podemos fazer isso considerando um sistema com fronteira móvel:

No instante t



$$\text{sistema} \equiv m(t) = m_{vc}(t) + m_e$$

No instante $t + \Delta t$



$$\text{sistema} \equiv m(t + \Delta t) = m_{vc}(t + \Delta t) + m_s$$

$$m_{vc}(t) + m_e = m_{vc}(t + \Delta t) + m_s$$

Agrupando os termos e dividindo por Δt :

$$\frac{m_{vc}(t+\Delta t) - m_{vc}(t)}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

vazão mássica (massa/tempo)

Generalizando para outras entradas e saídas:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$



Deduzimos:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

De fato fizemos a seguinte conta:

Taxa de variação da
massa contida no
VC no instante t

=

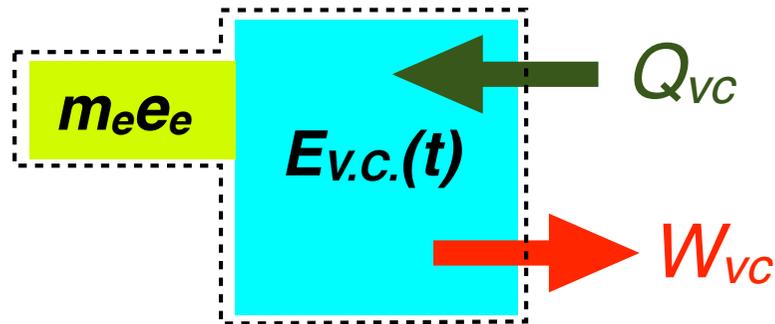
Taxa com que
massa entra no
VC

-

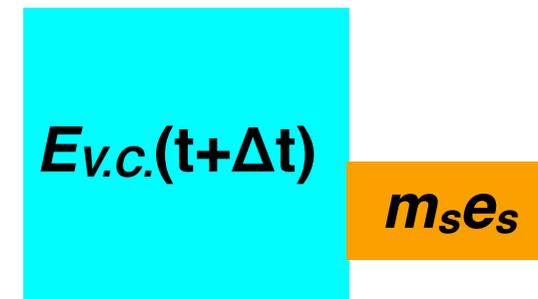
Taxa com que
massa sai do VC

De forma análoga podemos deduzir a expressão da conservação da energia para um volume de controle:

No instante t



No instante $t+\Delta t$



$$E = E_{vc}(t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$E = E_{vc}(t + \Delta t) + m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

$$E_{vc}(t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) + Q_{vc} - W = E_{vc}(t + \Delta t) + m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$



Agrupando os termos:

$$E_{vc}(t + \Delta t) - E_{vc}(t) = m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - m_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W$$

Dividindo por Δt e aplicando o limite ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}$$

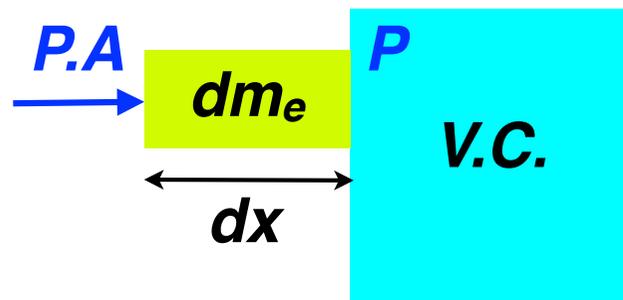
A potência pode ser dividida em dois componentes:

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + \dot{W}_{fluxo}$$

O que é essa tal de potência de fluxo?

Para entender o porque da divisão e a introdução do trabalho de fluxo, considere as figuras a seguir:

No instante t



O trabalho realizado pela vizinhança para que dm_e entre no sistema é: $P.A.dx$

Por sua vez a potência é dada: $P.A.V$

V é a velocidade média com dm_e entre no sistema.

Analogamente poderíamos repetir a análise para uma saída. Dessa forma, chegamos na expressão da potência de fluxo:

$$\dot{W} = p_s A_s V_s - p_e A_e V_e = \dot{m}_s p_s v_s - \dot{m}_e p_e v_e$$

Por que o sinal negativo associado à entrada?



Expressão para volume de controle

Substituindo o resultado anterior na expressão da 1ª Lei:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{m}_e \left(u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + p_s v_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Lembrando da definição de entalpia e generalizando para várias entradas e saídas:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Princípios de conservação para volume de controle:

Conservação da massa

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$

Conservação da energia

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$



Regime permanente:

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;
- ★ O fluxo e o estado da massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo;
- ★ As taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.



Regime permanente:

★O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;

As velocidades do fluido nas entradas e saídas são velocidades relativas ao VC, portanto, nesse caso, absolutas

★O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0$$



Resumos das equações com uma entrada e uma saída:

$$\cancel{\frac{dm_{vc}}{dt}} = \cancel{\sum_e \dot{m}_e} - \cancel{\sum_s \dot{m}_s} \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \dot{m}_e = \dot{m}_s$$

$$\cancel{\frac{dE_{vc}}{dt}} = \cancel{\sum_e \dot{m}_e} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \cancel{\sum_s \dot{m}_s} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

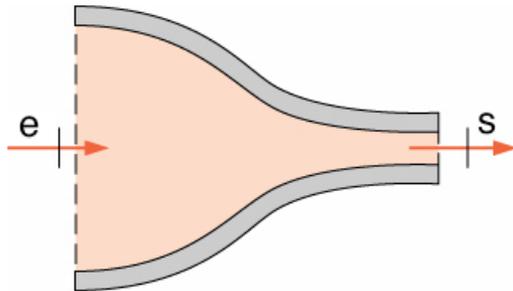
Combinando com a
conservação da massa

$$\dot{m} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} = 0$$

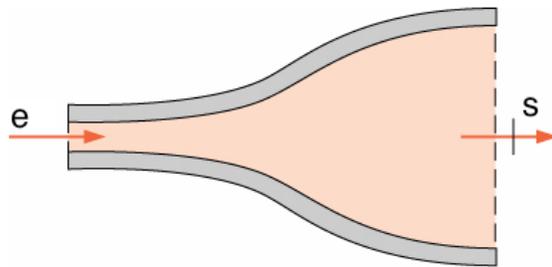
Dividindo pela
vazão mássica

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Bocal / Difusor

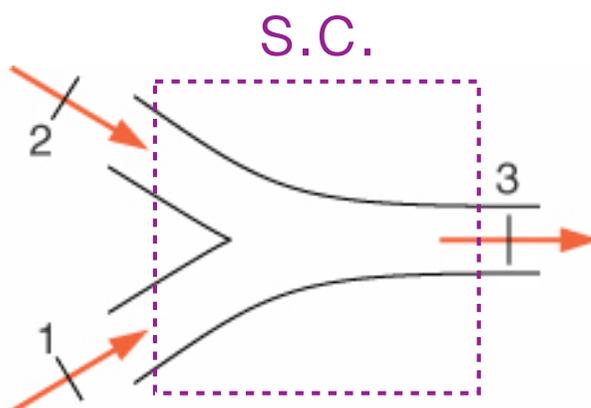


$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + \cancel{q_{vc}} - \cancel{w_{vc}} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + \cancel{gz_s}$$



$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

Misturador

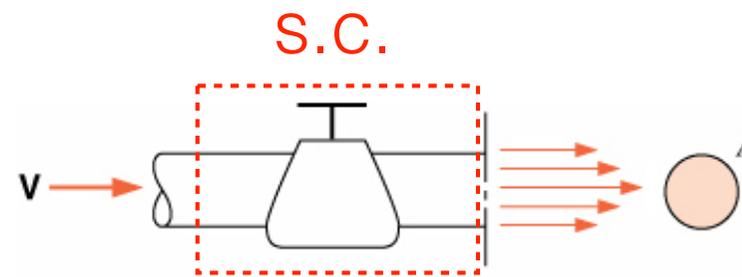


$$\sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s + \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} = 0$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

Restrição

Exemplos: válvula e tubo capilar.

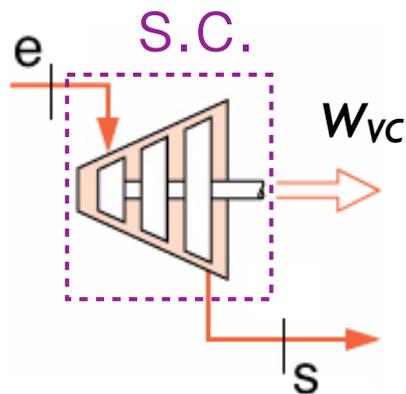


I^a Lei: $h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s$

$$h_e = h_s$$

isentálpica

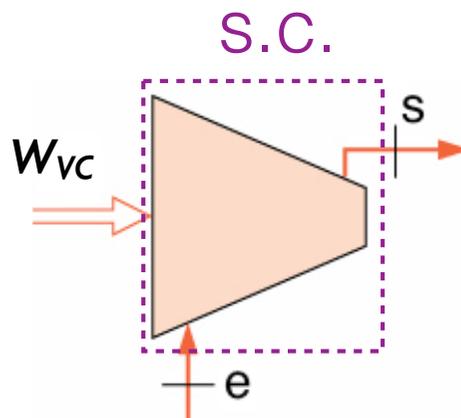
Turbina



$$\cancel{h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s}$$

$w_{vc} = h_e - h_s$ Note que resulta $w_{vc} > 0$ e que a vazão mássica dita a potência

Compressor / Bomba



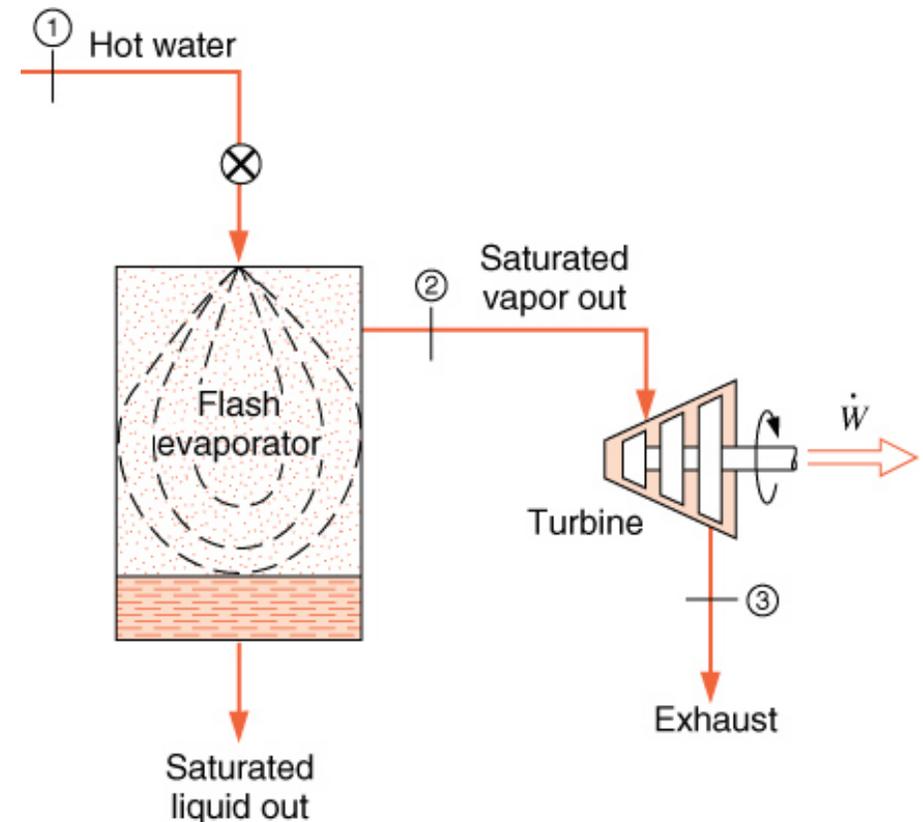
$$\cancel{h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s}$$

$w_{vc} = h_e - h_s$ Note que resulta $w_{vc} < 0$ e que a vazão mássica dita a potência

Exercício 1 - Evaporador "flash"



Propõem-se usar um suprimento geotérmico de água quente para acionar uma turbina a vapor d'água utilizando o dispositivo esquematizado na figura. Água a alta pressão, 1,5 MPa e 180 °C, é estrangulada e segue para um evaporador instantâneo ("flash") adiabático, de modo a se obter líquido e vapor à pressão de 400 kPa. O líquido sai pela parte inferior do evaporador, enquanto o vapor é retirado para alimentar a turbina. O vapor sai da turbina a 10 kPa e com título igual a 90%. Sabendo que a turbina produz uma potência de 1 MW, qual é a vazão necessária de água quente que deve ser fornecida pela fonte geotérmica.



Exercício 1



Estado 1: conhecemos P e T

Tabela de saturação a 1500 kPa, $T_{\text{sat}} = 198,32 \text{ °C}$, como $T_1 < T_{\text{sat}}$, temos líquido comprimido.

$$v_1 \approx v_l = 0,001154 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 \approx u_l = 843,14 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 \approx u_1 + P_1.v_1 = 844,9 \text{ kJ/kg}$$

Estado 2: vapor saturado seco a 400 kPa e $T_{\text{sat}} = 143,63 \text{ °C}$

$$h_2 = h_v = 2738,53 \text{ kJ/kg}$$

Estado 3: líquido e vapor saturados a 10 kPa e $x_3 = 0,9$

$$h_3 = (1 - x_3).h_l + x_3.h_v = (1 - 0,9).191,81 + 0,9.2584,63 = 2345,3 \text{ kJ/kg}$$

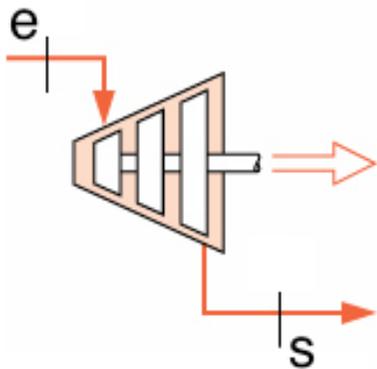
Exercício 1



VC \equiv turbina

Hipóteses:

- 1) Processo adiabático (2 - 3);
- 2) Variações de energia cinética e potencial desprezível;
- 3) Regime permanente



$$w_t = h_2 - h_3 = 393,23 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_t = w_t \cdot \dot{m}_t \Rightarrow \dot{m}_t = \frac{\dot{W}_t}{w_t} = \frac{1000}{393,23} = 2,54 \text{ kg/s}$$

$$w_{VC} = h_e - h_s$$

Exercício 1



No evaporador temos líquido e vapor saturados com título desconhecido.

Esse título permite determinar a relação entre as vazões mássicas na entrada e saídas do evaporador. Por que?

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

Podemos determinar o título aplicando a 1ª lei à válvula.

Hipóteses:

1) Válvula adiabática;

$$\longrightarrow h_e = h_s$$

2) Variações de energia cinética e potencial desprezível.

$$h_s = h_1 = 763,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_l @ 400 \text{ kPa} = 604,73 \text{ kJ/kg}$$

$$\longrightarrow x = 0,07447$$

$$h_v @ 400 \text{ kPa} = 2738,53 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2}{x} = \frac{2,54}{0,07447} \longrightarrow \dot{m}_1 = 34,1 \text{ kg / s}$$



Regime uniforme

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa dentro do VC pode variar com o tempo, mas é uniforme ao longo de todo o VC;
- ★ o estado da massa que atravessa cada uma das áreas de fluxo na superfície de controle é constante e uniforme, embora as vazões possam variar com o tempo.

Hipótese principal



Vamos integrar as expressões a seguir de um instante inicial (1) até um instante t (2) de forma a eliminar a equação diferencial:

$$\int_1^2 \frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad dt$$

$$\int_1^2 \frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} \quad dt$$



Vamos integrar termo a termo a expressão da conservação da massa e energia:

$$\int_1^2 \frac{dm_{vc}}{dt} dt = m_2 - m_1$$

$$\int_1^2 \sum_e \dot{m}_e dt = \sum_e m_e$$

$$\int_1^2 \sum_s \dot{m}_s dt = \sum_s m_s$$

Combinando as expressões anteriores:

$$m_2 - m_1 = \sum_e m_e - \sum_s m_s$$

$$\int_1^2 \frac{dE_{vc}}{dt} dt = E_2 - E_1$$

$$\int_1^2 \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) dt = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\int_1^2 \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) dt = \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

$$\int_1^2 \dot{Q}_{vc} dt = Q_{vc}$$

$$\int_1^2 \dot{W}_{vc} dt = W_{vc}$$

Combinando as expressões anteriores:

$$E_2 - E_1 = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W_{vc}$$



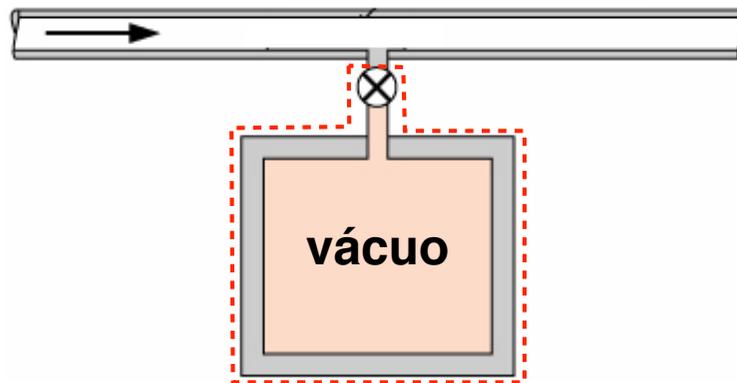
Resumo das equações:

$$(m_2 - m_1)_{vc} = \sum m_e - \sum m_s$$

$$m_2 \left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W_{vc}$$

Enchimento de um tanque com um gás perfeito ($T_{\text{final}} ?$)

gás a P_0, T_0
(estado constante)



Hip\u00f3teses:

- G\u00e1s perfeito;
- Calores espec\u00edficos constantes;
- Regime uniforme;
- Processo adiab\u00e1tico;
- Estado final de equil\u00edbrio.

Sobre o estado final conhecemos apenas uma propriedade intensiva independente, a press\u00e3o (P_0). A outra ser\u00e1 determinada pela aplica\u00e7\u00e3o dos princ\u00edpios de conserva\u00e7\u00e3o.

~~$$(m_2 - m_1)_{vc} = \sum m_e - \sum m_s \rightarrow m_2 = m_e$$~~

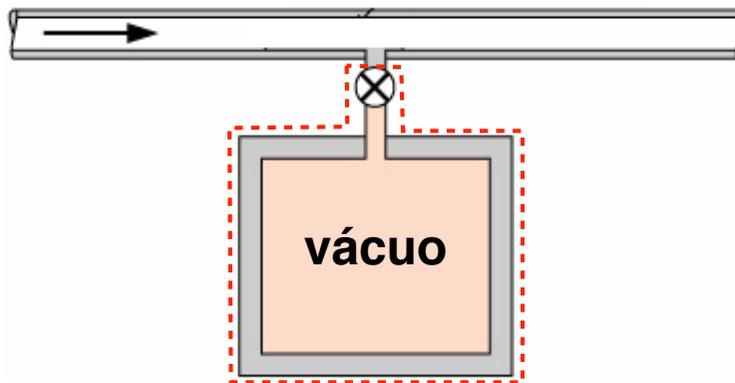
~~$$E_2 - E_1 = \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + Q_{vc} - W_{vc} \rightarrow m_2 u_2 = m_e h_e$$~~

Exemplo



Enchimento de um tanque com um gás perfeito ($T_{\text{final}} ?$)

gás a P_0, T_0
(estado constante)



$$m_2 = m_e$$



$$m_2 u_2 = m_e h_e$$

Combinando as expressões, obtém-se: $u_2 = h_e$

Considerando calores específicos constantes: $c_{v0} T_2 = c_{p0} T_0$

Quais são as demais
considerações usadas
nessa equação?

→ $T_2 = k T_0$ Portanto T_2 será maior que T_0 , pois k é maior que um.

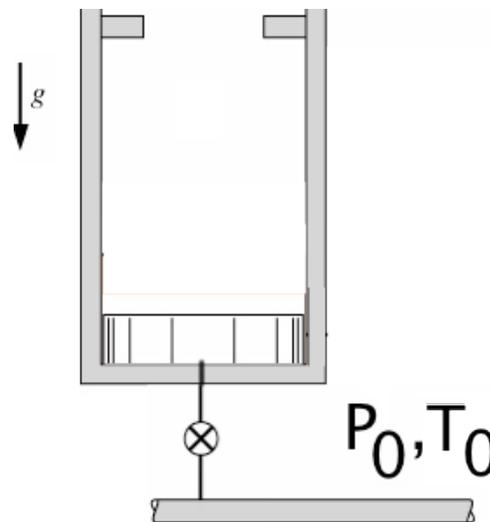
Resolva novamente o exercício usando a abordagem de sistema.

Exercício 2



Considere a situação proposta em que um reservatório inicialmente evacuado é enchido lentamente com ar oriundo de uma grande linha de ar comprimido ($P_0 = 1 \text{ MPa}$ e $T_0 = 27^\circ\text{C}$) após a abertura da válvula. A pressão necessária para erguer o pistão é de 100 kPa . O volume do reservatório quando o pistão encontra os batentes é de 1 m^3 . O reservatório e o êmbolo estão isolados termicamente. Determine:

- o trabalho realizado pelo gás no tanque;
- a temperatura e massa do ar no reservatório quando o pistão encosta nos batentes;
- a temperatura e a pressão do ar no reservatório na condição de equilíbrio, momento em que a válvula é fechada;
- a pressão e o calor trocado entre o ambiente a 27°C e o ar no tanque, após a remoção do isolante e até a nova condição de equilíbrio (ponto de partida é o estado do item c).



Exercício 2

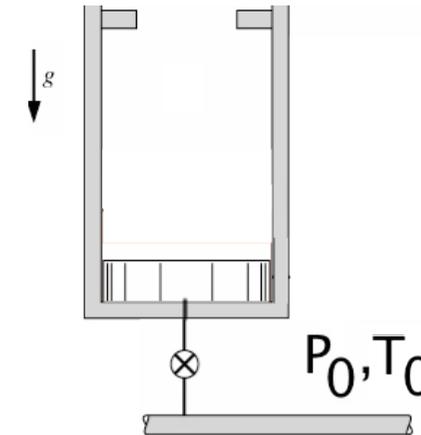


Estado 1: início

Estado 2: pistão toca batentes

Estado 3: fim do enchimento

Estado 4: Equilíbrio com ambiente



Hipóteses:

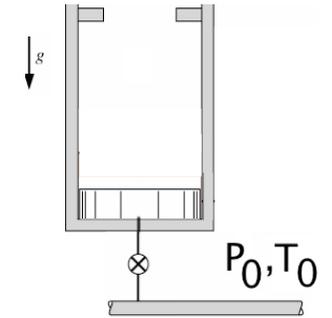
- 1) O volume de controle envolve o ar no interior do tanque;
- 2) Os estados 1, 2, 3 e 4 são estados de equilíbrio;
- 3) O processo de enchimento é quase-estático;
- 4) Não há atrito entre o pistão e o cilindro;
- 5) Condições de regime uniforme;
- 6) Comportamento de gás perfeito;
- 7) Calores específicos constantes avaliados em 300 K.

Exercício 2



a) o trabalho realizado pelo gás no tanque.

$$W_{14} = \int P.dV = P_2.V_2 = 100.1 \quad \mathbf{W_{14} = 100 \text{ kJ}}$$



b) a temperatura e massa do ar no reservatório quando o pistão encosta nos batentes.

1ª lei (regime uniforme): $U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12} + \sum m_{in}.h_{in} - \sum m_{out}.h_{out}$

Simplificando: $U_2 = -W_{12} + m_{in}.h_0$

C.M.: $m_2 = m_{in}$

$\rightarrow U_2 = -W_{1-2} + m_2.h_0$

$m_2.c_v.T_2 = -W_{1-2} + m_2.c_p.T_0 \rightarrow \cancel{P_2.V_2/(R.T_2).c_v.T_2} = -\cancel{P_2.V_2} + \cancel{P_2.V_2/(R.T_2).c_p.T_0}$

$1/R.c_v = -1 + 1/(R.T_2).c_p.T_0 \xrightarrow{\times R} c_v = -R + c_p.T_0/T_2 \xrightarrow{\div c_v} 1 = -R/c_v + k.T_0/T_2$

$1 = 1 - k + k.T_0/T_2 \rightarrow \mathbf{T_0 = T_2} \quad m_2 = P_2.V_2/(R.T_2) \rightarrow \mathbf{m_2 = 1,16 \text{ kg}}$

Exercício 2



c) a temperatura e a pressão do ar no reservatório na condição de equilíbrio, momento em que a válvula é fechada.

$$\mathbf{1^a\ lei\ (regime\ uniforme):\ } U_3 - U_1 = Q_{12} - W_{12} + \sum m_{in}.h_{in} - \sum m_{out}.h_{out}$$

$$\mathbf{Simplificando: } U_3 = -W_{12} + m_3.h_0$$

$$m_3.c_v.T_3 = -W_{1-2} + m_3.c_p.T_0$$

$$\mathbf{Após\ alguma\ álgebra} \quad \rightarrow \quad T_3 = k.T_0 / [1 - W_{1-2}.(1-k) / (P_3.V_3)]$$

$$\mathbf{P_3 = P_0 = 1\ MPa}$$

$$\mathbf{T_3 = 404\ K}$$

Exercício 2



d) a pressão e o calor trocado entre o ambiente a 27°C e o ar no tanque, após a remoção do isolante e até a nova condição de equilíbrio (ponto de partida é o estado do item c).

$$\mathbf{1^a \text{ lei (regime uniforme): } U_4 = Q_{3-4} - W_{1-4} + m_3 \cdot h_0}$$

$$\mathbf{\text{ou, } 1^a \text{ lei para sistema: } U_4 - U_3 = Q_{3-4}}$$

$$Q_{3-4} = m_3 \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3)$$

$$Q_{3-4} = P_3 \cdot V_3 / (R \cdot T_3) \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3)$$

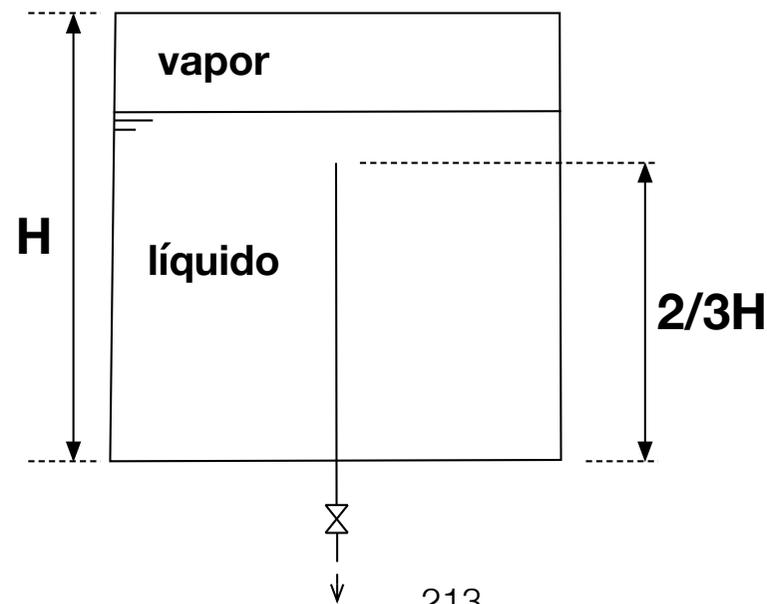
$$Q_{3-4} = P_3 \cdot V_3 \cdot (T_4 / T_3 - 1) / (k - 1)$$

$$\mathbf{Q_{3-4} = - 644 \text{ kJ}}$$

Exercício 3



Um vaso de pressão cilíndrico, com volume de 900 litros, contém água saturada a 300°C , sendo 70% do volume ocupado por líquido. Retiram-se lentamente 90% da massa de água pela parte inferior, por um tubo vertical no centro do cilindro, o qual dispõe de uma válvula de descarga e cuja tomada de fluido está a $2/3$ da altura do tanque. Durante o processo, transfere-se calor de forma a manter a temperatura nesse tanque constante. Defina o estado final da água no tanque. Calcule a quantidade de calor transferida. Determine a temperatura do fluido na saída da tubulação. Despreze as variações de energia potencial e cinética.



Exercício 3



Estado 1: início

Estado 2: líquido atinge o dreno

Estado 3: fim do esvaziamento

Hipóteses:

- 1) O volume de controle envolve o fluido no interior do tanque;
- 2) Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
- 3) O processo de esvaziamento é quase-estático;
- 4) Condições de regime uniforme;
- 6) Modelo de substância pura.

Exercício 3 - Estado 1



Estado 1: mistura líquido - vapor saturados ($x_{\text{vol}} = 0,3$)

Da tabela de saturação a 300 °C:

$$P_1 = 8581 \text{ kPa}$$

$$v_l = 0,001404 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_v = 0,02167 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_l = 1331,97 \text{ kJ/kg}$$

$$u_v = 2562,96 \text{ kJ/kg}$$

$$h_l = 1344,01 \text{ kJ/kg}$$

$$h_v = 2748,9 \text{ kJ/kg}$$

Massas de líquido e vapor no estado 1

$$m_{l,1} = \frac{V_{l,1}}{v_l} = \frac{0,7 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,001404} = 448,7 \text{ kg}$$

$$m_{v,1} = \frac{V_{v,1}}{v_v} = \frac{0,3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,02167} = 12,46 \text{ kg}$$

$$m_1 = m_{l,1} + m_{v,1} = 461,2 \text{ kg}$$

Demais propriedades do estado 1

$$x_1 = \frac{m_{v,1}}{m_1} = 0,02702$$



$$u_1 = (1 - x_1)u_{l,1} + x_1u_{v,1} = 1365 \text{ kJ / kg}$$

Exercício 3 - Estado 2



Processo 1 - 2: extraímos apenas líquido saturado do tanque

Estado 2: mistura líquido - vapor saturados ($x_{vol} = 1/3$) a 300 °C

Massas de líquido e vapor no estado 2

$$m_{l,2} = \frac{V_{l,2}}{v_l} = \frac{2/3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,001404} = 427,4\text{ kg}$$

$$m_{v,2} = \frac{V_{v,2}}{v_v} = \frac{1/3 \cdot 900 \times 10^{-3}}{0,02167} = 13,84\text{ kg}$$

$$m_2 = m_{l,2} + m_{v,2} = 441,2\text{ kg}$$

Massa e entalpia correspondente do líquido saturado que deixa o volume de controle

$$m_{s,12} = m_1 - m_2 = 20\text{ kg}$$

$$h_{s,12} = h_l @ 300\text{ °C} = 1344,01\text{ kJ / kg}$$

Exercício 3 - Estado 3



Processo 2 - 3: extraímos apenas vapor saturado do tanque?

Estado 3

$$m_3 = 0,1m_1 = 46,12\text{kg}$$

$$v_3 = \frac{V}{m_3} = 0,01952\text{m}^3 / \text{kg} \quad v_l < v_3 = 0,01952 < v_v = 0,02167\text{ m}^3 / \text{kg} \therefore \text{mistura}$$

$$x_3 = \frac{v_3 - v_l}{v_v - v_l} = 0,8937 \quad \longrightarrow \quad u_3 = (1 - x_3)u_{l,3} + x_3u_{v,3} = 2432\text{kJ} / \text{kg}$$

Massa e entalpia correspondente do vapor saturado que deixa o volume de controle

$$m_{s,23} = m_2 - m_3 = 395,1\text{kg}$$

$$h_{s,23} = h_v @ 300^\circ\text{C} = 2748,9\text{kJ} / \text{kg}$$

Exercício 3 - Calor transferido



Cálculo do calor transferido no processo 1 para 3

1ª lei em regime uniforme:

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - \cancel{W_{12}} + \cancel{\sum m_{in} \cdot h_{in}} - \sum m_{out} \cdot h_{out}$$

$$U_3 - U_2 = Q_{23} - \cancel{W_{23}} + \cancel{\sum m_{in} \cdot h_{in}} - \sum m_{out} \cdot h_{out}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - m_{s,12} \cdot h_{s,12}$$

+

$$U_3 - U_2 = Q_{23} - m_{s,23} \cdot h_{s,23}$$

$$U_3 - U_1 = Q_{13} - m_{s,12} \cdot h_{s,12} - m_{s,23} \cdot h_{s,23}$$

$$Q_{13} = U_3 - U_1 + m_{s,12} \cdot h_{s,12} + m_{s,23} \cdot h_{s,23}$$

$$Q_{13} = m_3 \cdot u_3 - m_1 \cdot u_1 + m_{s,12} \cdot h_{s,12} + m_{s,23} \cdot h_{s,23}$$

$$Q_{13} = 595400 \text{ kJ}$$

Exercício 3 - Estado na saída



Para determinar o estado do fluido na saída vamos fazer duas hipóteses adicionais:

- válvula isentálpica;
- pressão atmosférica igual a 100 kPa.

Para o processo 1–2: $T_{out,12} = T @ h_{s,12} = 1344,01 \text{ kJ/kg}$ e P_{atm}

como $h_l = 417,44 < h_{s,12} < h_v = 2675,46 \text{ kJ/kg}$ @ 100 kPa temos uma mistura na saída:

$$\therefore T_{out,12} = 99,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Exercício 3 - Estado na saída



Para o processo 2–3: $T_{\text{out},23} = T @ h_{s,23} = 2748,9 \text{ kJ/kg}$ e P_{atm}

como $h_{s,23} > h_v = 2675,46 \text{ kJ/kg}$ @ 100 kPa temos vapor superaquecido na saída:

T	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$				
Sat.	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	-	-	-	-
100	-	-	-	-
150	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182

interpolando

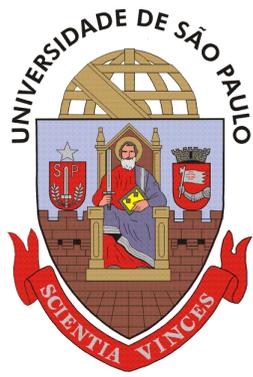
$$T_{\text{out},23} = 136,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

**Mesma temperatura
obtida com software!**



Encerramos o conteúdo para a primeira prova.

Alguma dúvida?



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



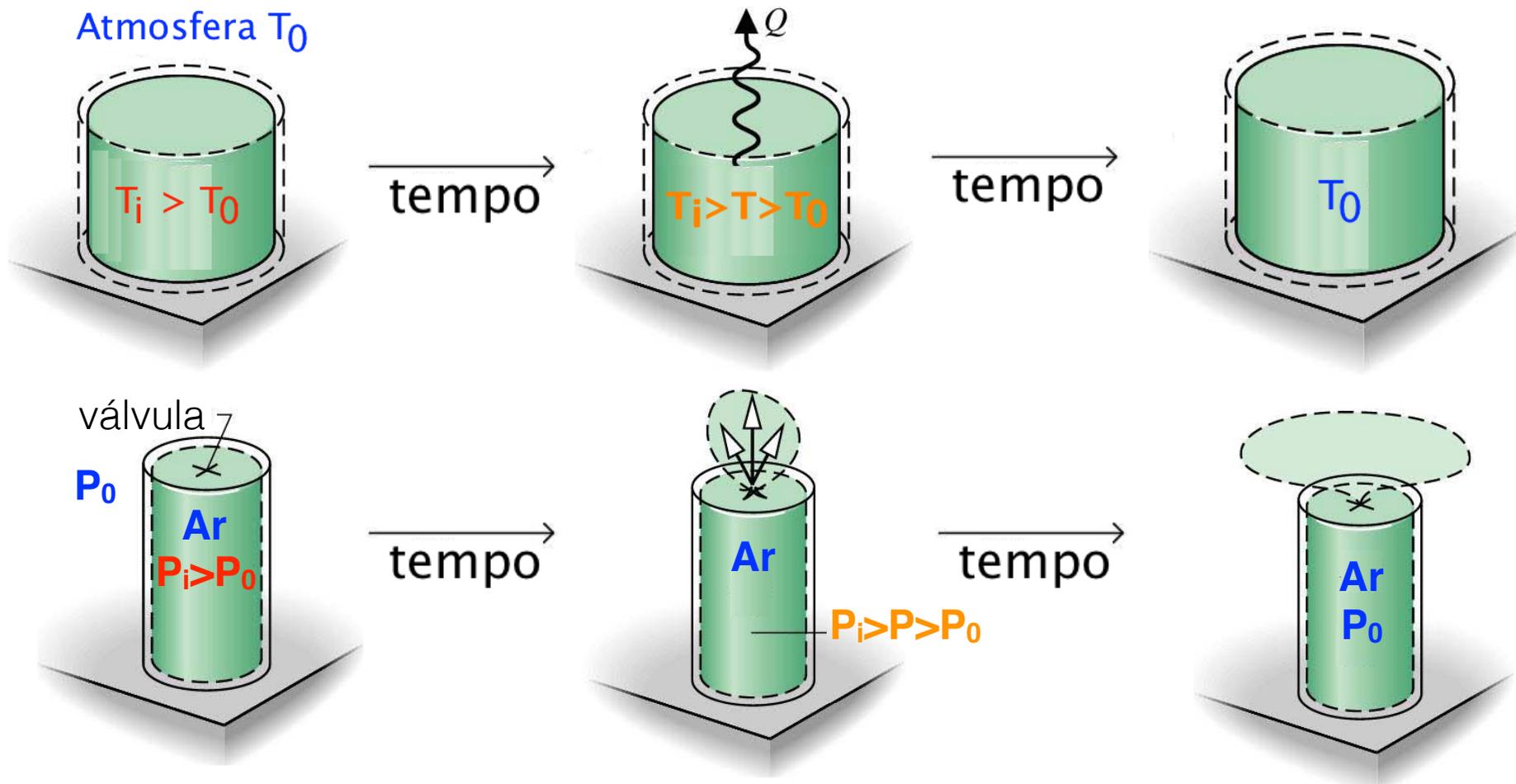
Termodinâmica

2ª Lei da Termodinâmica

Introdução



1ª lei da termodinâmica não estabelece restrições no sentido da interação de calor ou trabalho. De nossa experiência sabemos que há um único sentido para os processos *espontâneos*, veja os exemplos:





Aspectos importantes dos experimentos anteriores:

- *a condição inicial pode ser restaurada, mas não espontaneamente. Alguma mudança permanente na condição da vizinhança ocorreria;
- *existe a possibilidade de realização de trabalho à medida que o equilíbrio é atingido.

Perguntas:

- *Qual é o valor teórico máximo para o trabalho que poderia ser realizado?
- *Quais os fatores que poderiam impedir a realização do valor máximo?



Aspectos da 2ª Lei da Termodinâmica:

- prever a direção de processos;
- estabelecer condições para o equilíbrio;
- determinar o melhor desempenho teórico de ciclos, motores e dispositivos;
- avaliar quantitativamente os fatores que impedem a obtenção do melhor desempenho teórico;
- definir uma escala de temperatura independente das propriedades de qualquer substância termométrica.



Motor Térmico: dispositivo que, **operando segundo um ciclo termodinâmico**, realiza um trabalho líquido positivo a custa de interação de calor de um corpo a uma temperatura mais alta e para um corpo a temperatura mais baixa.

Reservatório Térmico: sistema com capacidade térmica elevada, de modo que qualquer interação de calor é **insuficiente para alterar significativamente sua temperatura.**

Aplicando a 1ª lei ao motor:

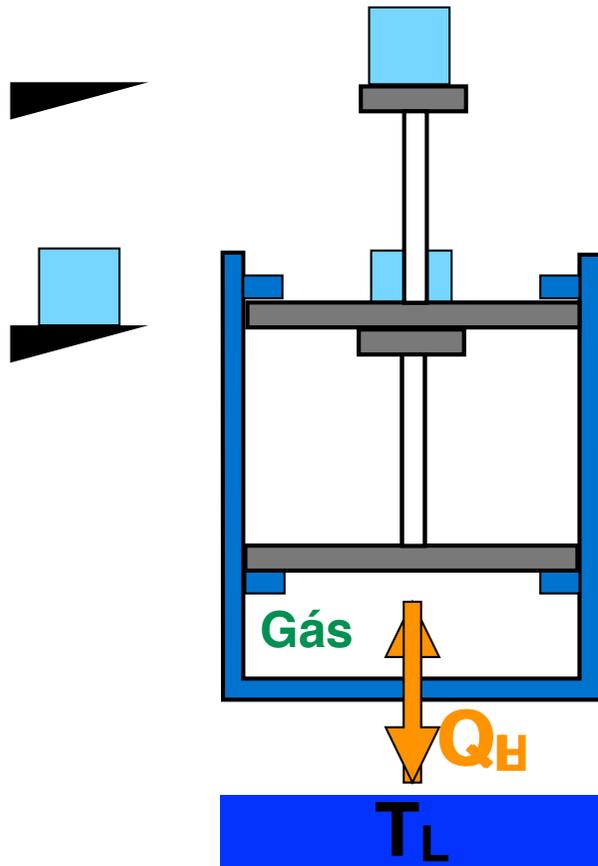
$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

$$W_{\text{ciclo}} = Q_H - Q_L$$

Podemos definir um rendimento:

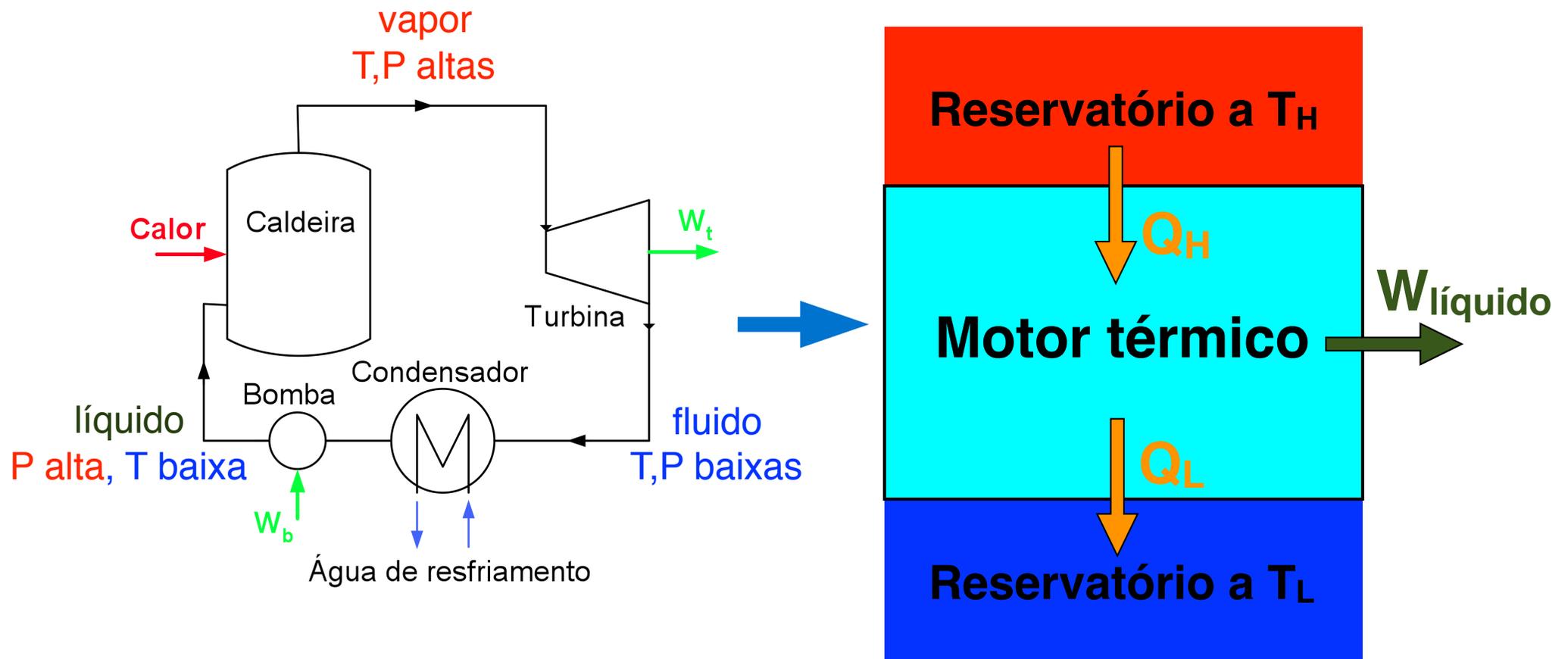
$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{efeito desejado}}{\text{gasto}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H}$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$



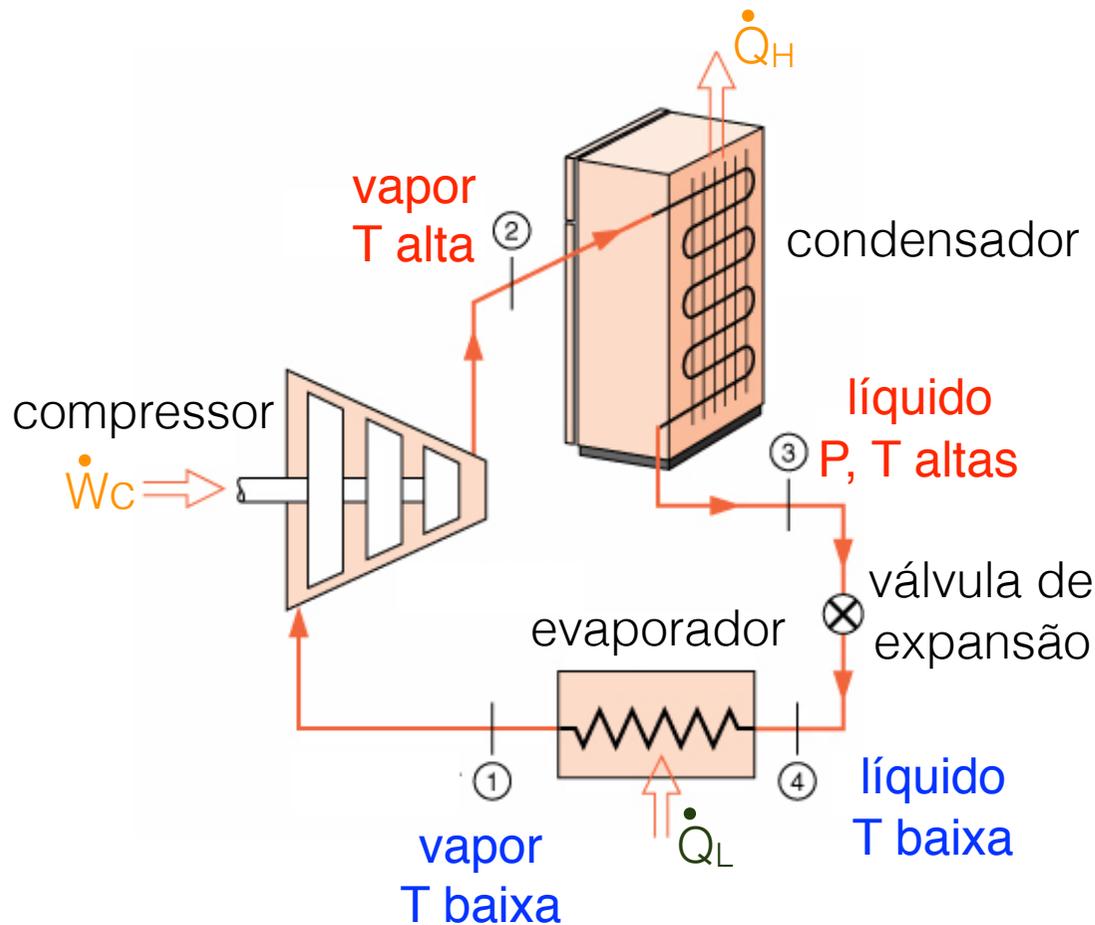
*Note que para o motor operar $Q_L \neq 0$, o que significa que $\eta < 1$.

Esquema



★ Podemos trabalhar, também, com potências!

Ciclo de refrigeração



Aplicando a 1ª lei ao refrigerador:

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

$$W_c = Q_H - Q_L$$

Coeficiente de desempenho:

$$\beta = \frac{Q_L}{W_c}$$

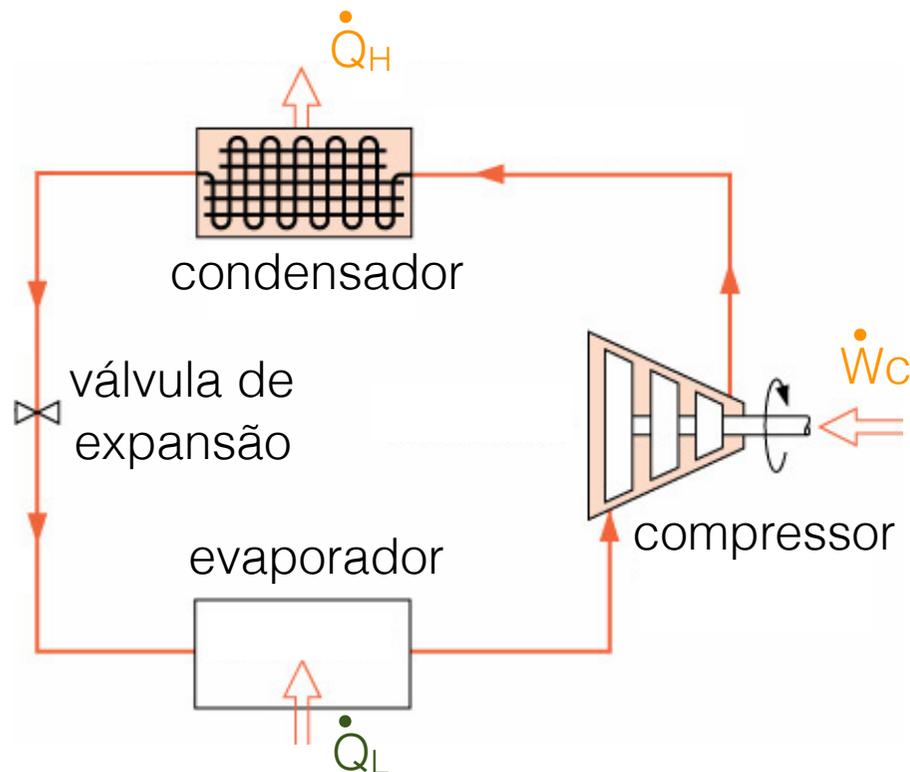
*Note que β pode, e de preferência deve, ser maior do que 1.

Nota: o balanço de energia é feito com base no sentido das setas. “Abandonamos” a convenção de sinais provisoriamente.



Bomba de calor

Objetivo da bomba é aquecimento,
por exemplo, de uma piscina.



Por que não utilizar um dispositivo
mais simples e barato como um
resistor?

Aplicando a 1ª lei ao refrigerador:

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

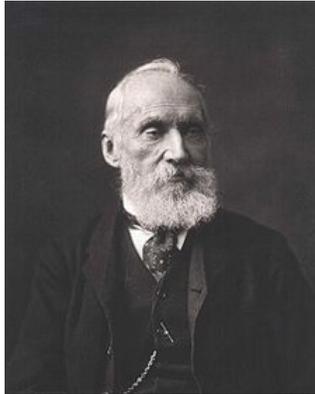
$$W_c = Q_H - Q_L$$

Coeficiente de desempenho:

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_c}$$

*Note que β' é maior do que 1.

Enunciados da 2ª Lei



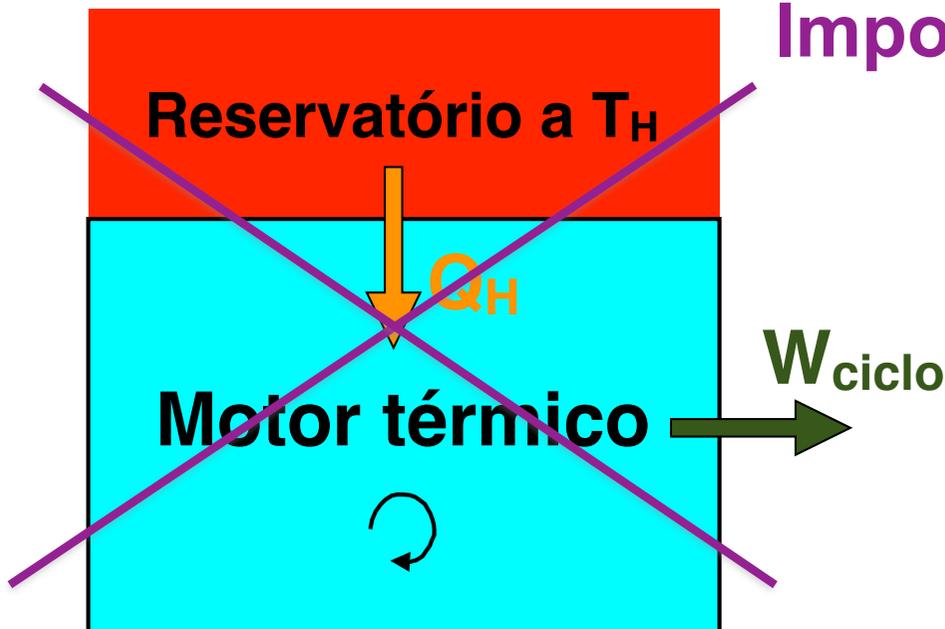
1824-1907

Enunciado de Kelvin-Planck: é impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico.



1858-1947

Impossível!

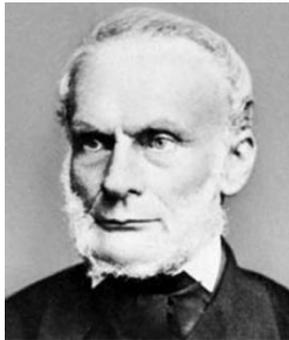


1ª Lei: $W_{ciclo} = Q_{ciclo}$

2ª Lei: ~~$W_{ciclo} \geq 0$~~

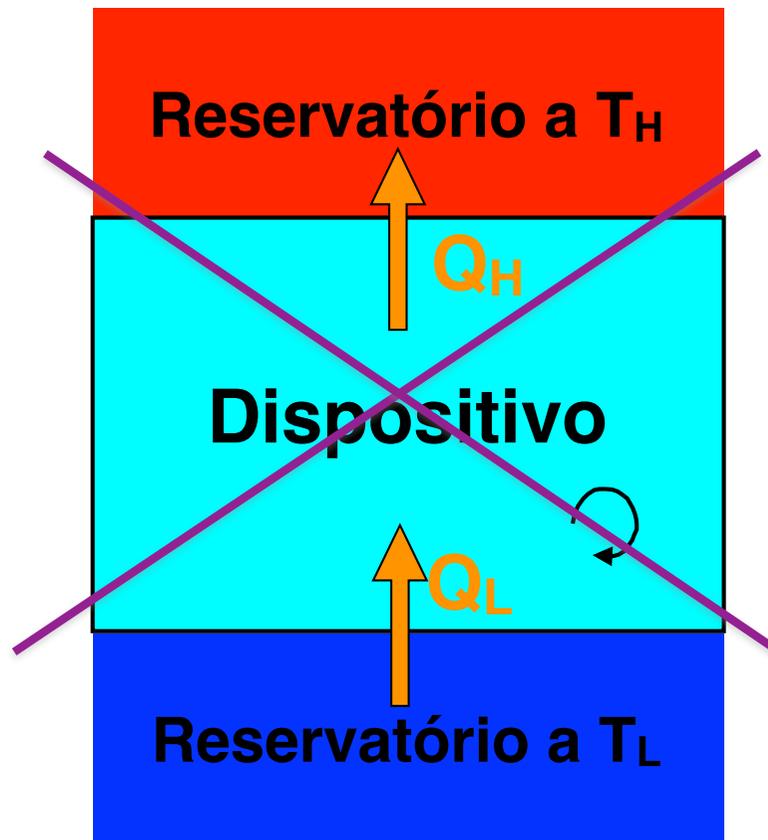
$W_{ciclo} \leq 0$

Enunciados da 2ª Lei



1822-1888

Enunciado de Clausius: é impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.



Impossível!

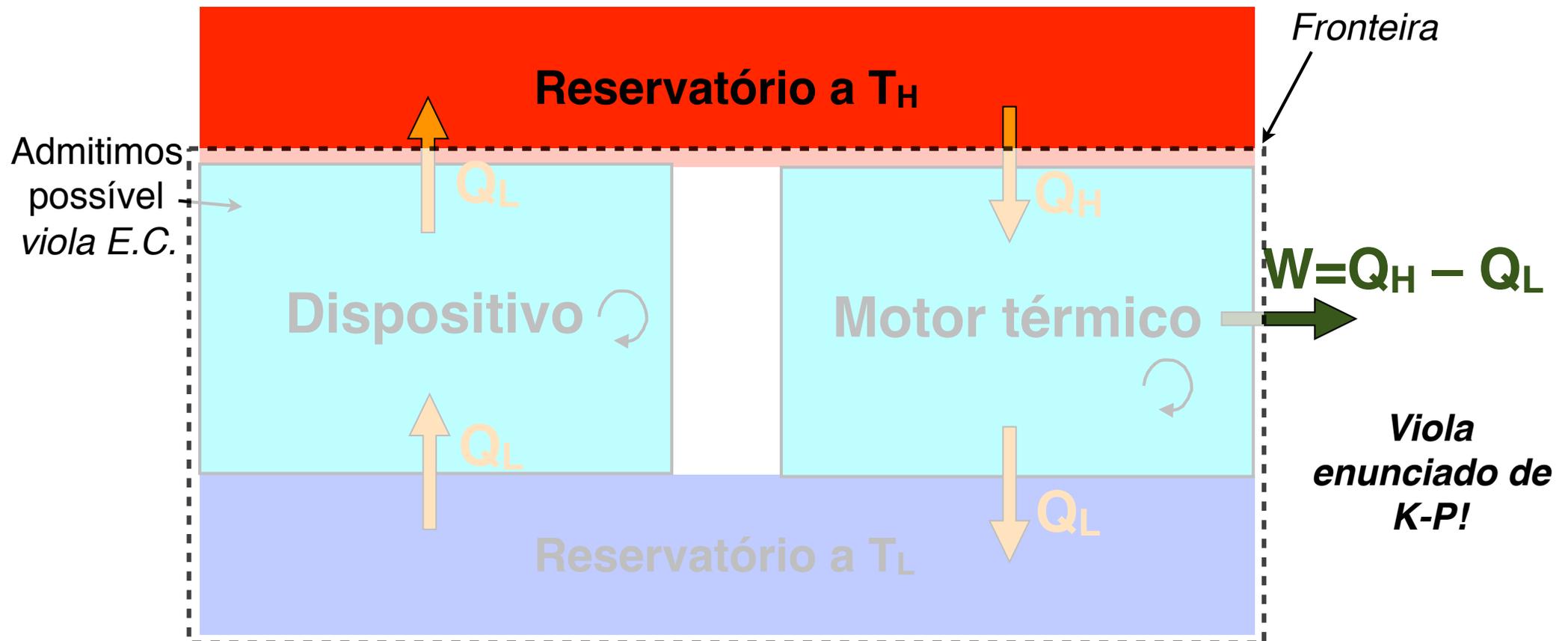
$$1^a \text{ Lei: } Q_{\text{ciclo}} = Q_H = Q_L$$

$$2^a \text{ Lei: } W_{\text{ciclo}} \leq 0$$

Equivalência entre enunciados

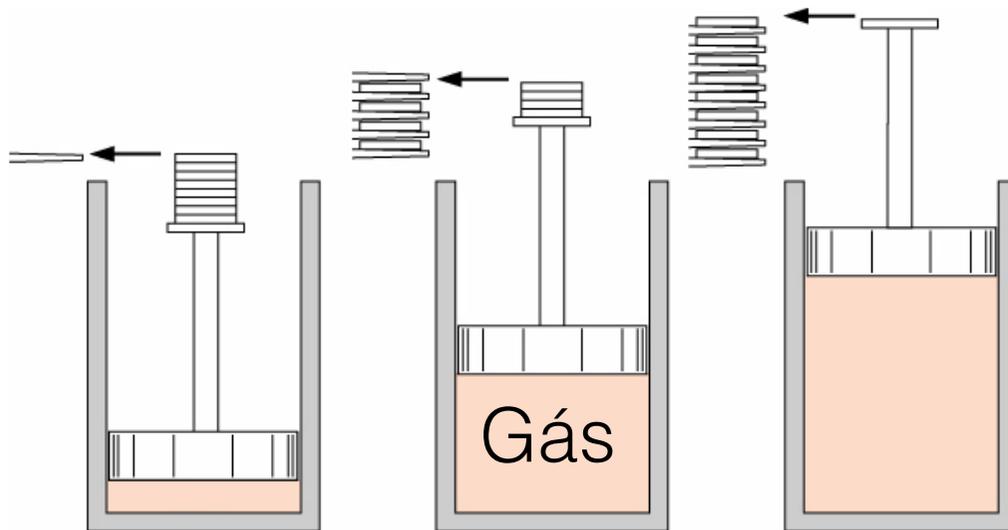


Para demonstrar a equivalência entre os enunciados devemos provar que a violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kevin – Planck e vice-versa. Vamos fazer apenas a primeira demonstração.



- ◆ **Processo reversível:** processo que, depois de ocorrido, pode ser revertido sem deixar nenhum traço no sistema e nas redondezas.
- ◆ **Processo reversível:** processo em que o sistema e todas as partes que compõe sua vizinhança puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais.

Exemplo (expansão adiabática):



Note:

- ◆ um único valor de P e T descreve o estado do gás durante o processo de expansão;
- ◆ o processo pode ser revertido. Um processo de compressão seguindo o histórico de P e T , inversamente, pode ser realizado recolocando os pesos;
- ◆ a vizinhança retornou ao seu estado original (mesmo valor em módulo do trabalho na expansão e na compressão).

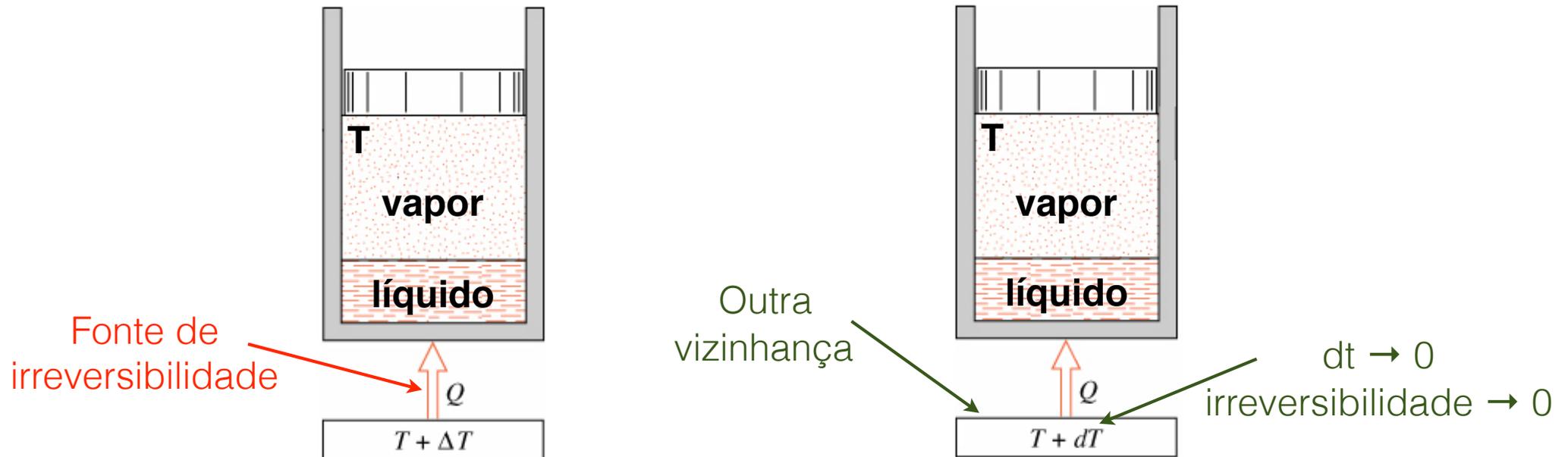


- ★ Expansão não resistida;
- ★ Transferência de calor com diferença de temperatura;
- ★ Atrito;
- ★ Atrito no fluido em escoamento;
- ★ Mistura de duas substâncias;
- ★ Reação química espontânea;
- ★ Efeito Joule.



Processo internamente reversível: é aquele que pode ser realizado de forma reversível, de pelo menos um modo, com outra vizinhança.

Exemplo (sistema \equiv vapor + líquido):





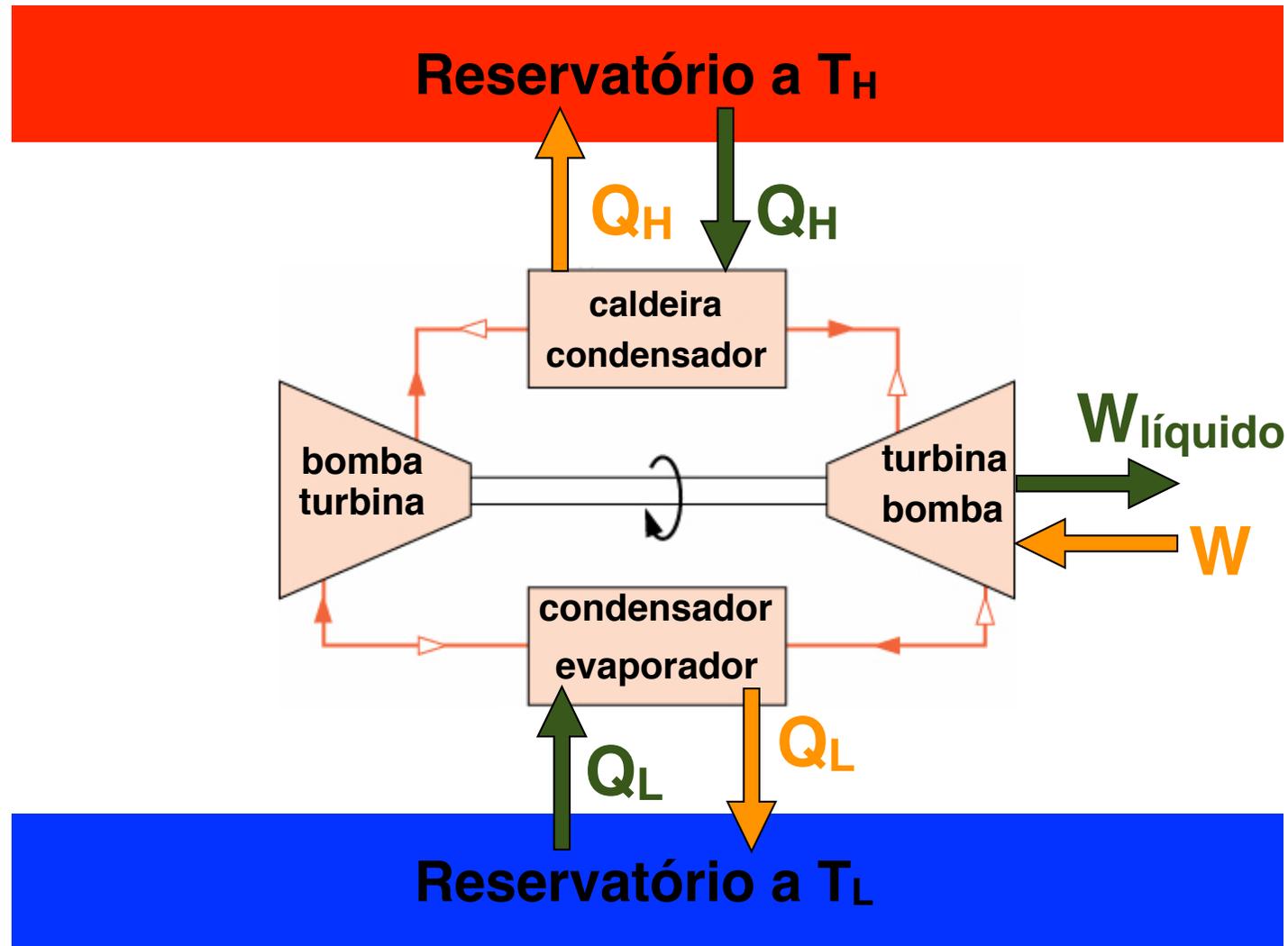
Sadi Carnot
1796-1832

- Ciclo reversível composto por quatro processos;
- Cada estado visitado pelo ciclo é um estado de equilíbrio;
- O sistema pode executar o mesmo ciclo no sentido inverso.



- ★ **Processo 1**: processo reversível isotérmico no qual calor é transferido de ou para o reservatório a alta temperatura;
- ★ **Processo 2**: processo adiabático reversível no qual a temperatura do fluido de trabalho decresce;
- ★ **Processo 3**: processo reversível isotérmico no qual calor é transferido para ou do reservatório a baixa temperatura;
- ★ **Processo 4**: processo adiabático reversível no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta.

Máquina de Carnot





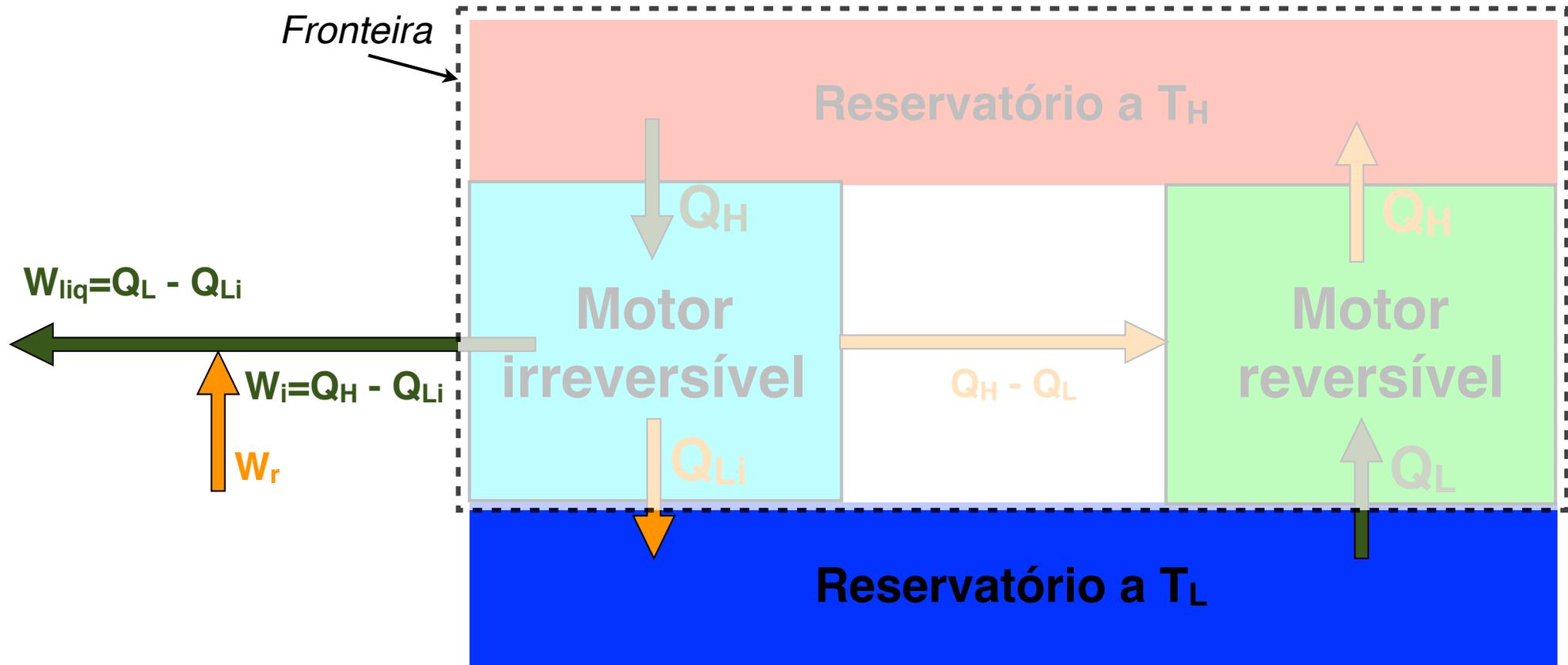
1º Corolário: é impossível construir motor que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que seja mais eficiente que um motor térmico reversível operando entre os mesmos dois reservatórios.

2º Corolário: todos os motores reversíveis que operam entre dois reservatórios térmicos apresentam o mesmo rendimento.

A demonstração dos dois corolários pode ser feita de forma similar àquela demonstração da equivalência entre os dois enunciados da 2ª Lei.

Por exemplo, com referência ao primeiro corolário, admitimos que existe um motor mais eficiente que um reversível e mostramos que essa hipótese conduz a uma violação da 2ª Lei!

Ciclo de Carnot: corolários



Viola enunciado de K-P!

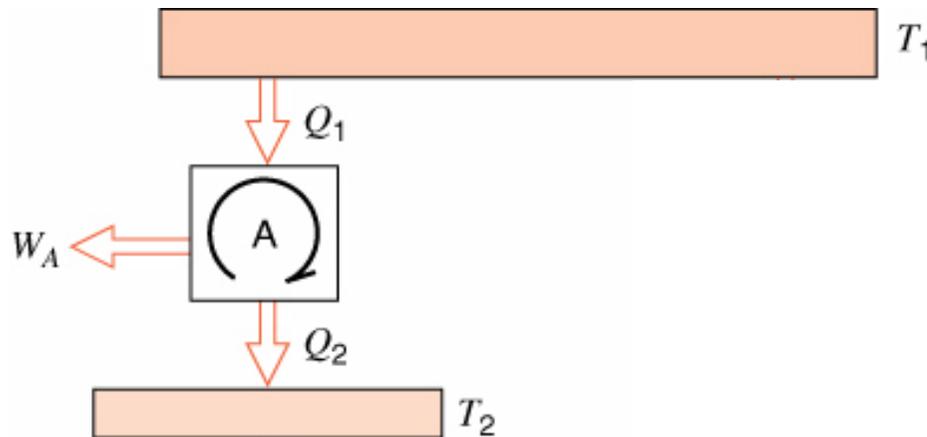
A demonstração do 2º corolário é análoga, basta substituir o motor irreversível por um outro reversível e repetir a mesma linha de raciocínio.



Será que podemos medir a temperatura de forma absoluta independente de uma substância termométrica?

A resposta é sim. Utilizaremos motores reversíveis para alcançar esse fim.

Para um motor térmico: $\eta_{\text{térmica}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

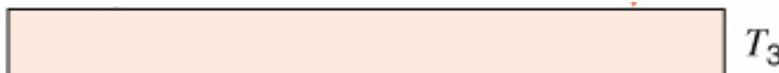


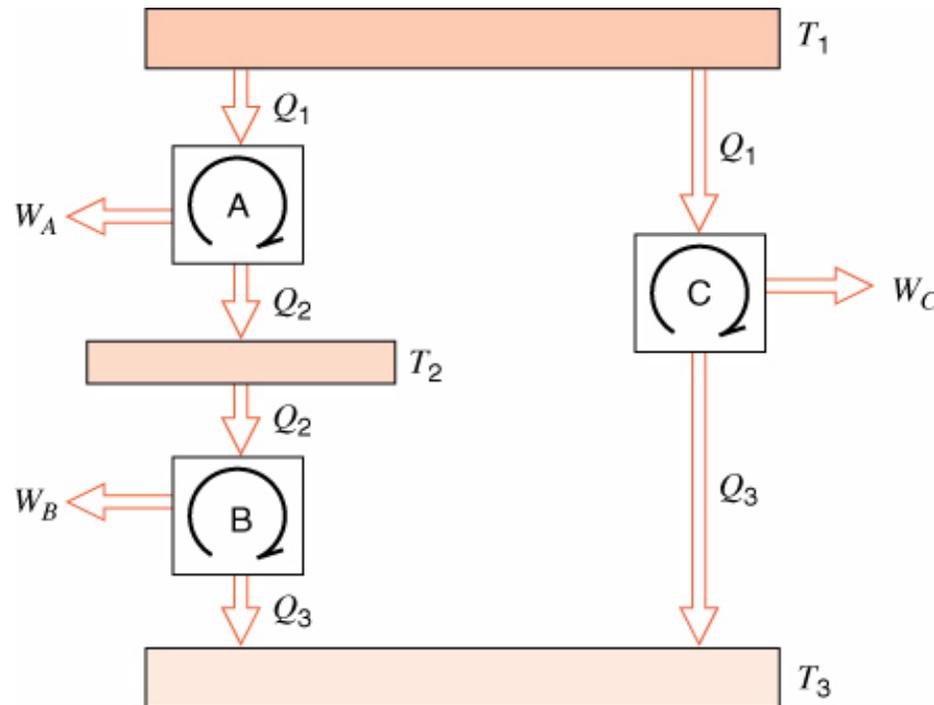
Observe a figura:

$$\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)_{\text{rev}} = f(T_1, T_2)$$

$$\left(\frac{Q_3}{Q_2} \right)_{\text{rev}} = f(T_2, T_3)$$

$$\left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)_{\text{rev}} = f(T_1, T_3)$$





$$\frac{Q_3}{Q_1} = \frac{Q_3}{Q_2} \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow f(T_3, T_1) = f(T_3, T_2) \cdot f(T_2, T_1)$$

mas dever haver uma relação entre as temperaturas tal que:

$$f(T_2, T_1) = \frac{\Psi(T_2)}{\Psi(T_1)} \quad f(T_3, T_2) = \frac{\Psi(T_3)}{\Psi(T_2)}$$

Assim: $f(T_3, T_1) = \frac{\Psi(T_2)}{\Psi(T_1)} \frac{\Psi(T_3)}{\Psi(T_2)} = \frac{\Psi(T_3)}{\Psi(T_1)}$

Kelvin escolheu: $\frac{\Psi(T_3)}{\Psi(T_1)} = \frac{T_3}{T_1}$

Sendo que T é a **escala termodinâmica de temperatura** que é igual à **escala dos gases ideais**.



Extra 1

Vendedores estão apregoando máquinas térmicas excepcionais para operar entre reservatórios térmicos a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, com características apresentadas na tabela. Verifique se elas são possíveis, e se impossíveis, justifique a causa indicando o enunciado que violam. Existe a necessidade de uma diferença mínima de temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para torna real a transferência de calor entre a máquina e a fonte.

Solução:

– Para que a operação seja possível nas condições especificadas é preciso que não haja violação da 1ª Lei **ou** da 2ª Lei. Basta que haja violação de apenas uma delas para que possamos dizer que é impossível!

Exercícios



Tipo	Q_H	Q_L	W	Possível?	Por que não?
Bomba de calor	100	76	24		
Motor	100	16	74		
Refrigerador	100	0	100		
Motor	100	85	15		
Motor	100	0	100		
Refrigerador	100	78	22		
Motor	100	100	0		
Motor	100	75	25		
Refrigerador	100	100	0		
Bomba de Calor	100	0	100		

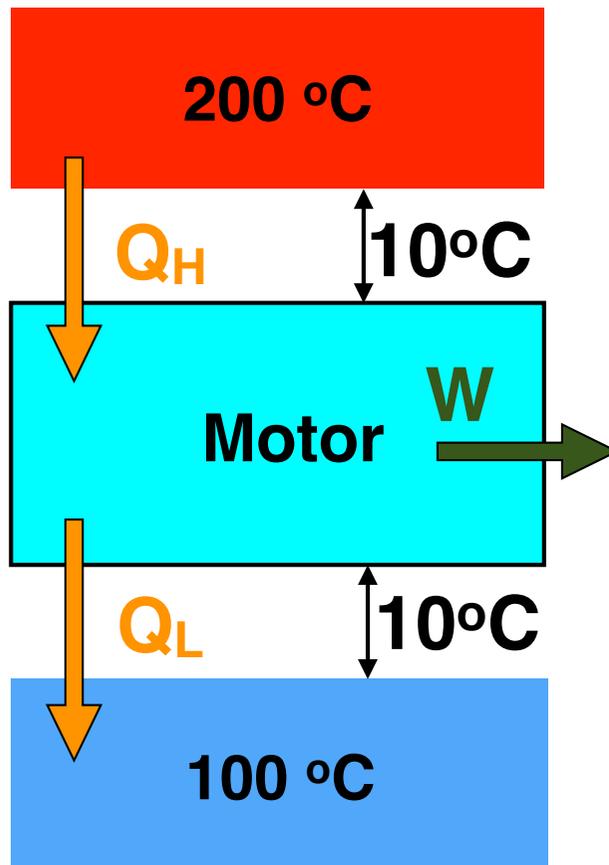
Exercícios



1ª Lei:

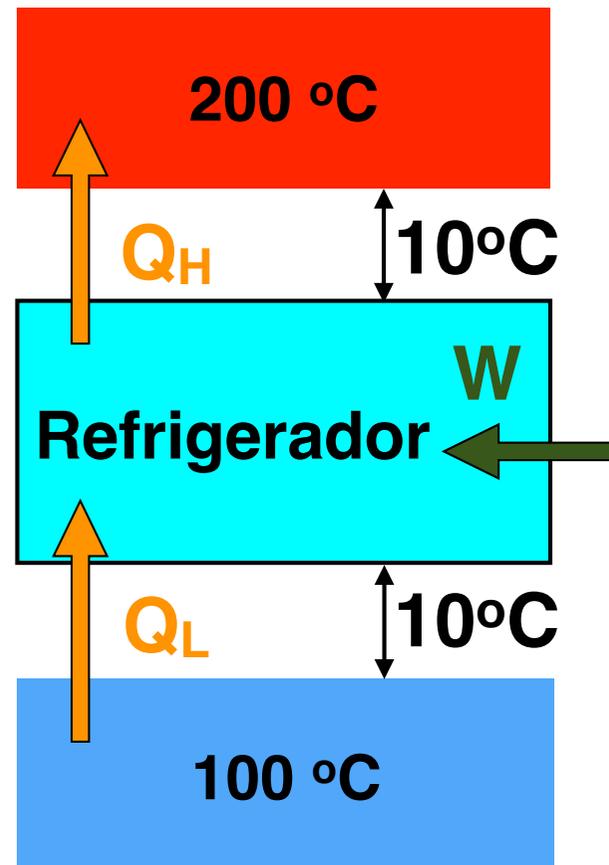
Tipo	Q_H	Q_L	W	Possível?	Por que não?
Bomba de calor	100	76	24		
Motor	100	16	74	Não	Viola a 1ª Lei!
Refrigerador	100	0	100		
Motor	100	85	15		
Motor	100	0	100		
Refrigerador	100	78	22		
Motor	100	100	0		
Motor	100	75	25		
Refrigerador	100	100	0		
Bomba de Calor	100	0	100		

Exercícios



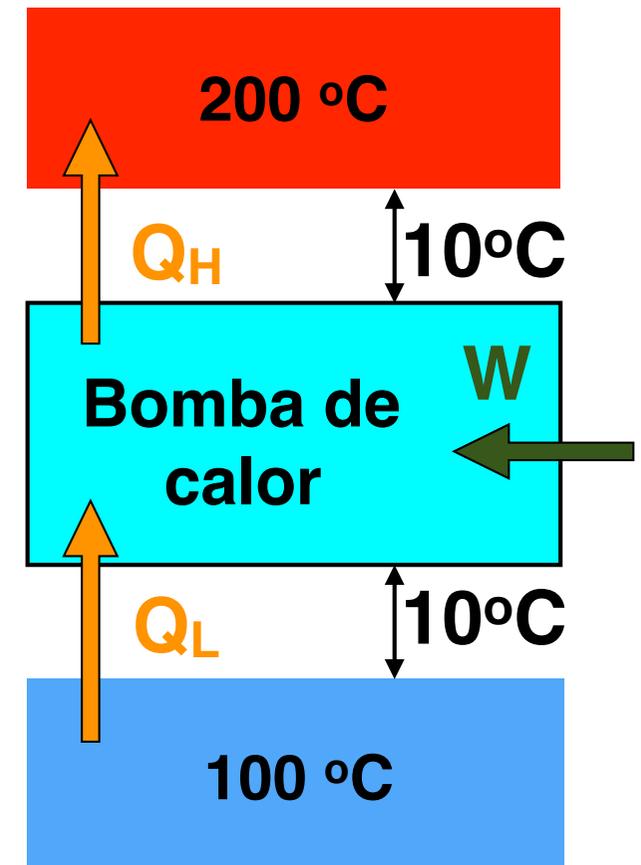
$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

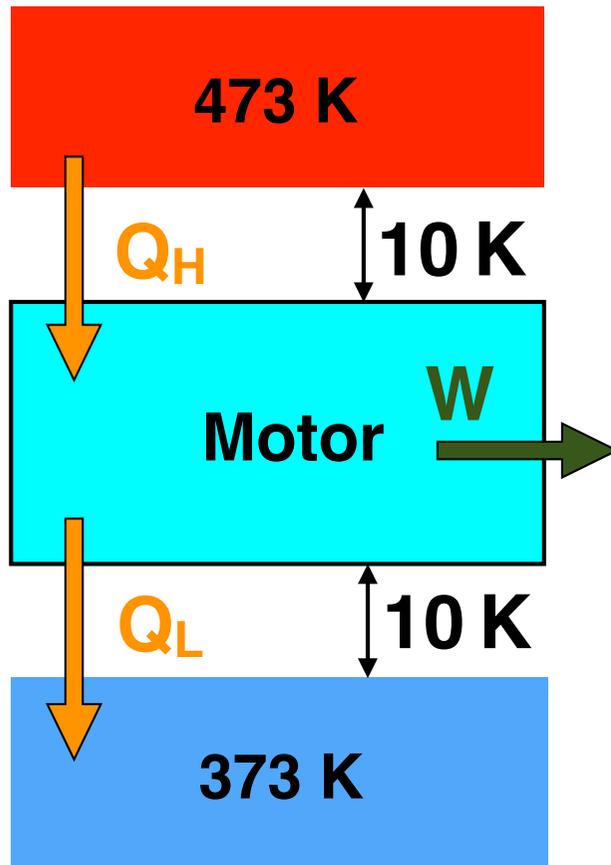
$$\beta_{\text{rev}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$



$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

$$\beta'_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Exercícios



$$2^a \text{ Lei: } \eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

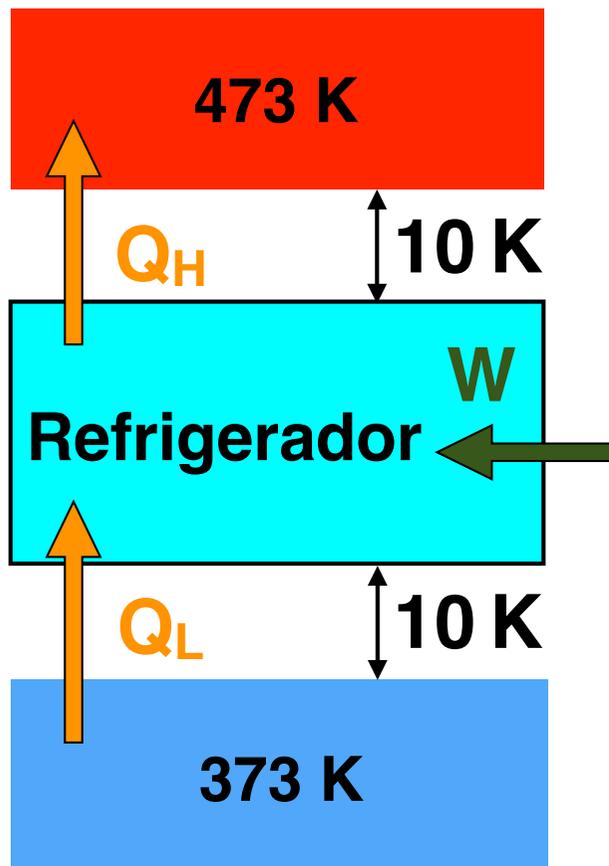
$$\eta \leq \eta_{\text{rev}}$$

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{383}{463} = 0,173$$

Tipo	Q_H	Q_L	W	η	Possível?
Bomba de calor	100	76	24		
Motor	100	16	74	0,74	Não
Refrigerador	100	0	100		
Motor	100	85	15	0,15	Sim
Motor	100	0	100	1	Não, K-P
Refrigerador	100	78	22		
Motor	100	100	0	0	Sim
Motor	100	75	25	0,25	Não
Refrigerador	100	100	0		
Bomba de Calor	100	0	100		

Exercícios



$$2^a \text{ Lei: } \beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

$$\beta \leq \beta_{\text{rev}}$$

$$\beta_{\text{rev}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{363}{483 - 363}$$

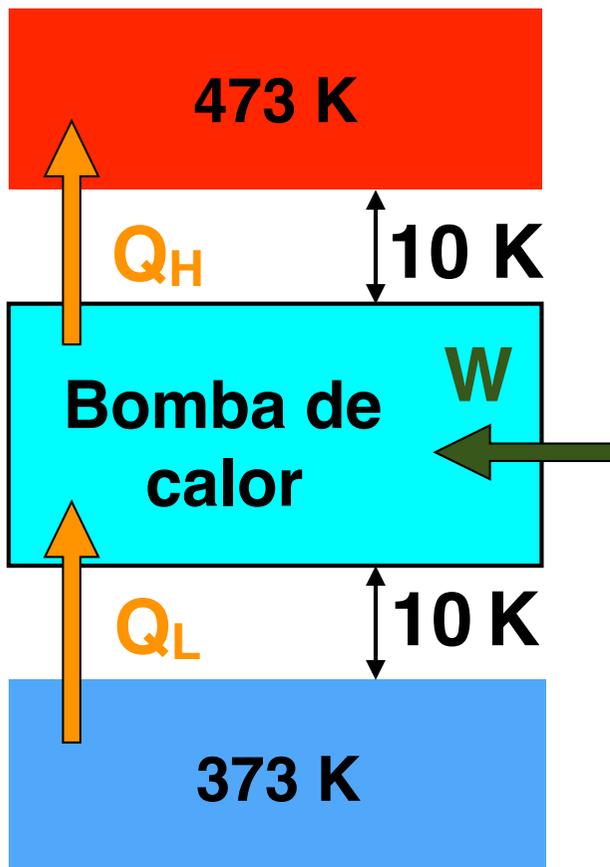
$$\beta_{\text{rev}} = 3,03$$

Tipo	Q_H	Q_L	W	β	Possível?
Bomba de calor	100	76	24		
Motor	100	16	74		
Refrigerador	100	0	100	0	Sim
Motor	100	85	15		
Motor	100	0	100		
Refrigerador	100	78	22	3,55	Não
Motor	100	100	0		
Motor	100	75	25		
Refrigerador	100	100	0		Não, Clausius
Bomba de Calor	100	0	100		

Exercícios



$$2^{\text{a}} \text{ Lei: } \beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$



$$\beta' \leq \beta'_{\text{rev}}$$

$$\beta_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{483}{483 - 363}$$

$$\beta'_{\text{rev}} = 4,03$$

Tipo	Q_H	Q_L	W	β	Possível?
Bomba de calor	100	76	24	4,17	Não
Motor	100	16	74		
Refrigerador	100	0	100		
Motor	100	85	15		
Motor	100	0	100		
Refrigerador	100	78	22		
Motor	100	100	0		
Motor	100	75	25		
Refrigerador	100	100	0		
Bomba de Calor	100	0	100	1	Sim

Exercícios



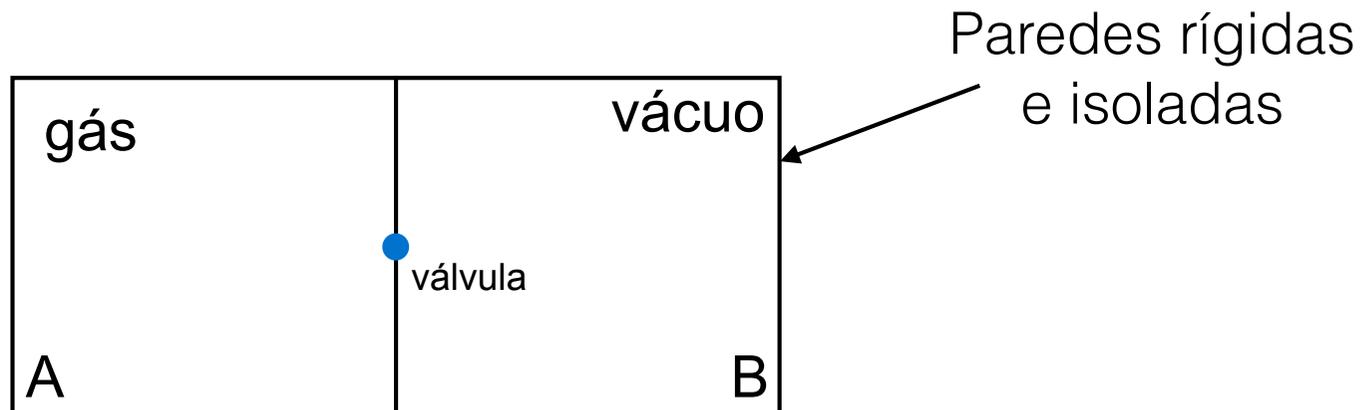
1ª Lei:

Tipo	Q_H	Q_L	W	Possível?	Por que não?
Bomba de calor	100	76	24	Não	Viola a 2ª Lei!
Motor	100	16	74	Não	Viola a 1ª Lei!
Refrigerador	100	0	100	Sim	
Motor	100	85	15	Sim	
Motor	100	0	100	Não	Viola a 2ª Lei, Kelvin-Planck
Refrigerador	100	78	22	Não	Viola a 2ª Lei!
Motor	100	100	0	Sim	
Motor	100	75	25	Não	Viola a 2ª Lei!
Refrigerador	100	100	0	Não	Viola a 2ª Lei, Clausius
Bomba de Calor	100	0	100	Sim	

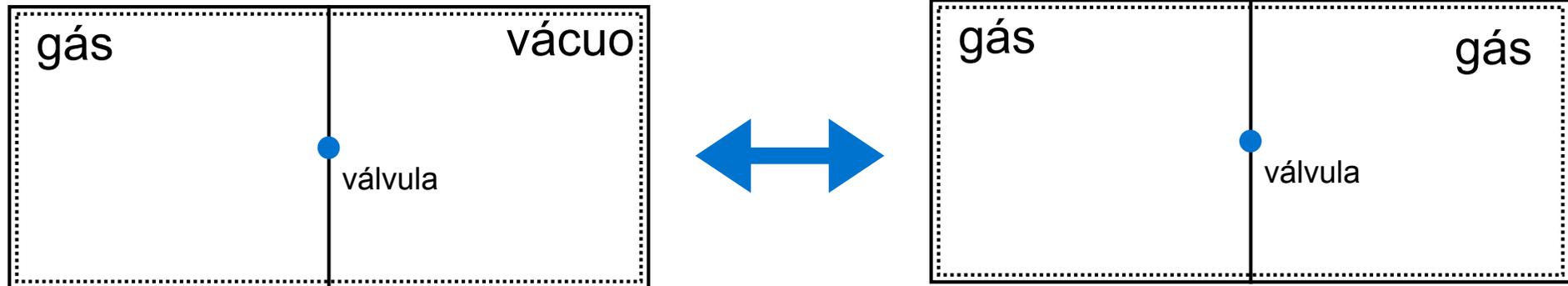


Extra 2

Um tanque rígido isolado é dividido pela metade por uma divisória. De um lado da divisória está um gás. O outro lado está inicialmente em vácuo. Uma válvula na divisória é aberta e o gás se expande preenchendo todo o volume. Usando o enunciado de Kelvin-Planck, demonstre que este processo é irreversível.



Análise:



Hipóteses:

- Estados iniciais e finais são estados de equilíbrio;
- Não há variações de energia cinética e potencial.

1ª Lei:

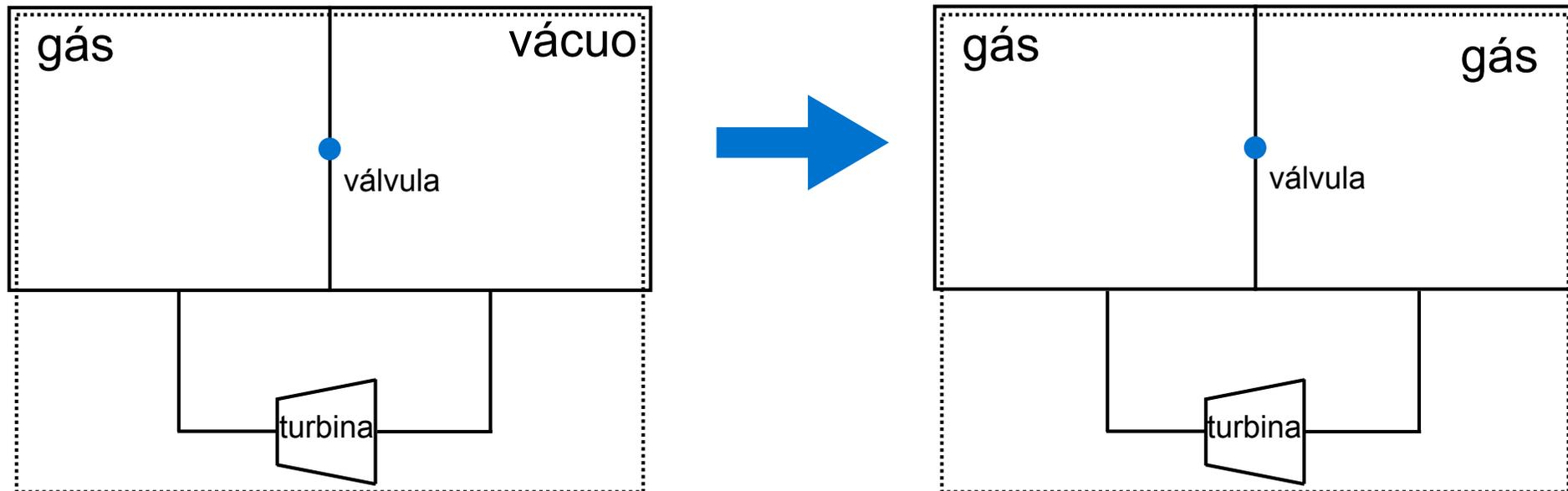
$$\Delta U = Q - W \Rightarrow \Delta U = 0$$

Análise:

Vamos assumir que o processo seja reversível; isto é, todo o gás em B mova-se espontaneamente para A.

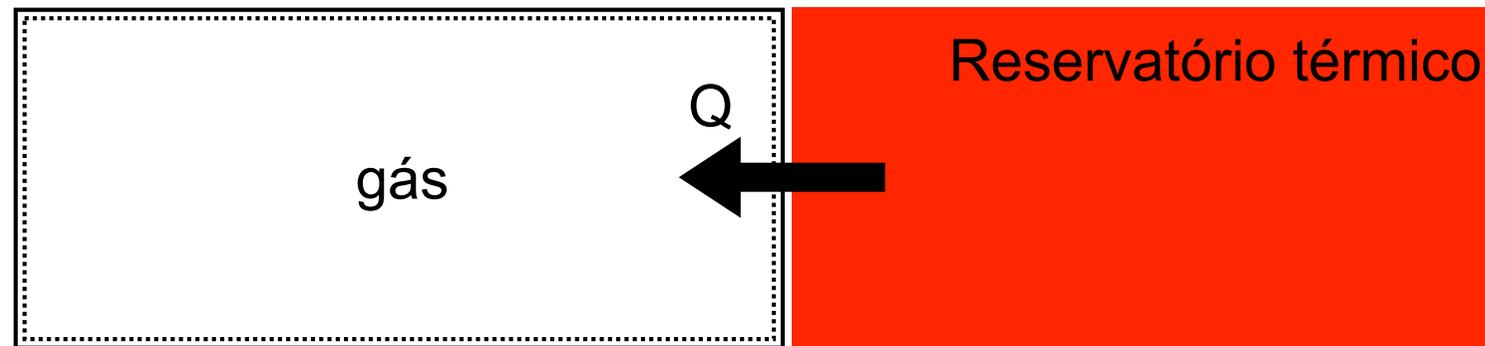
– Vamos construir um ciclo termodinâmico composto por 3 processos.

1 - 2: Expansão de parte do gás através de uma turbina;



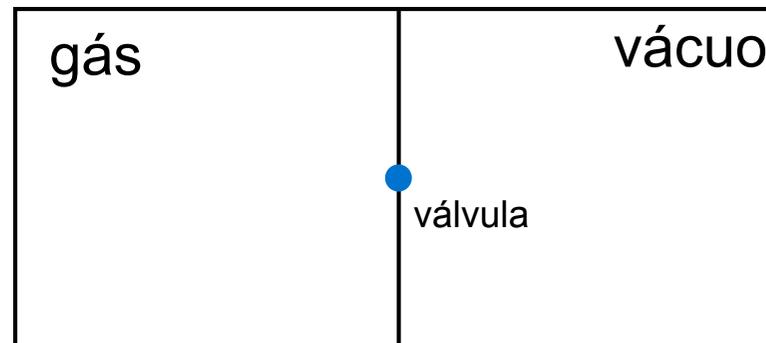
$$1^{\text{a}} \text{ Lei: } U_2 - U_1 = -W \Rightarrow U_2 < U_1$$

2 - 3: Remoção de parte do isolante e transferência de calor até que a energia interna do gás retorne ao valor inicial;



1ª Lei: $U_3 - U_2 = Q \Rightarrow U_3 = U_1$

3 - 4: Evocamos a suposta irreversibilidade do sistema de forma que o gás retorne ao estado inicial



Observamos que o resultado líquido do ciclo foi a realização de trabalho e a transferência de calor com um único reservatório térmico, o que viola o enunciado de Kelvin - Planck.

Como os processos 1-2 e 2-3 são possíveis, concluímos que o processo 3-4 é impossível. Logo, o processo original é irreversível.



Extra 3

Demonstre que a *escala de temperatura de gás* é idêntica à *escala de temperatura de Kelvin*.

Hipóteses:

- 1) O sistema é um gás em um conjunto cilindro-pistão;
- 2) O gás comporta-se como perfeito, sendo T a temperatura na escala do gás;
- 3) O sistema percorre um ciclo reversível composto por quatro processos – 1-2 isotérmico a T_H , 2-3 adiabático, 3-4 isotérmico a T_L e 4-1 adiabático;
- 4) Variações de energia cinética e potencial ausentes.



1ª lei para o sistema na forma diferencial:

$$dU = \delta Q - \delta W$$

$$\Rightarrow mdu = \delta Q - \delta W$$

$$\Rightarrow du = \delta q - pdv \quad \Rightarrow c_v dT = \delta q - \frac{RT}{v} dv$$

$$c_v dT = \delta q - RT d \ln v$$



1ª lei para o sistema na forma diferencial: $c_v dT = \delta q - RT d \ln v$

Processo 1-2 (isotérmico): ~~$c_v dT = \delta q_H - RT_H d \ln v$~~ $\Rightarrow \delta q_H = RT_H d \ln v$

$$\Rightarrow q_H = RT_H \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1)$$

Process 2-3 (adiabático): ~~$c_v dT = \delta q - RT d \ln v$~~ $\Rightarrow c_v \frac{dT}{T} = -R d \ln v$

$$\Rightarrow \int_{T_H}^{T_L} c_v \frac{dT}{T} = -R \ln \frac{v_3}{v_2} \quad (2)$$

1ª lei para o sistema na forma diferencial: $c_v dT = \delta q - RT d \ln v$

Processo 3-4 (isotérmico): ~~$c_v dT = \delta q_L - RT_L d \ln v$~~ $\Rightarrow \delta q_L = RT_L d \ln v$

$$\Rightarrow q_L = RT_L \ln \frac{v_4}{v_3} \quad (3)$$

Process 4-1 (adiabático): ~~$c_v dT = \delta q - RT d \ln v$~~ $\Rightarrow c_v \frac{dT}{T} = -R d \ln v$

$$\Rightarrow \int_{T_L}^{T_H} c_v \frac{dT}{T} = -R \ln \frac{v_1}{v_4} \quad (4)$$



Obtivemos:

$$q_H = RT_H \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1)$$

$$\int_{T_H}^{T_L} c_v \frac{dT}{T} = -R \ln \frac{v_3}{v_2} \quad (2)$$

$$q_L = -RT_L \ln \frac{v_4}{v_3} \quad (3)$$

$$\int_{T_L}^{T_H} c_v \frac{dT}{T} = -R \ln \frac{v_1}{v_4} \quad (4)$$

De (2) e (4):

$$\ln \frac{v_3}{v_2} = -\ln \frac{v_1}{v_4} \Rightarrow \ln \frac{v_3}{v_2} = \ln \frac{v_4}{v_1} \Rightarrow \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1} \quad (5)$$

De (1) e (3):

$$\frac{q_H}{T_H} = R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{q_L}{T_L} = -R \ln \frac{v_4}{v_3}$$

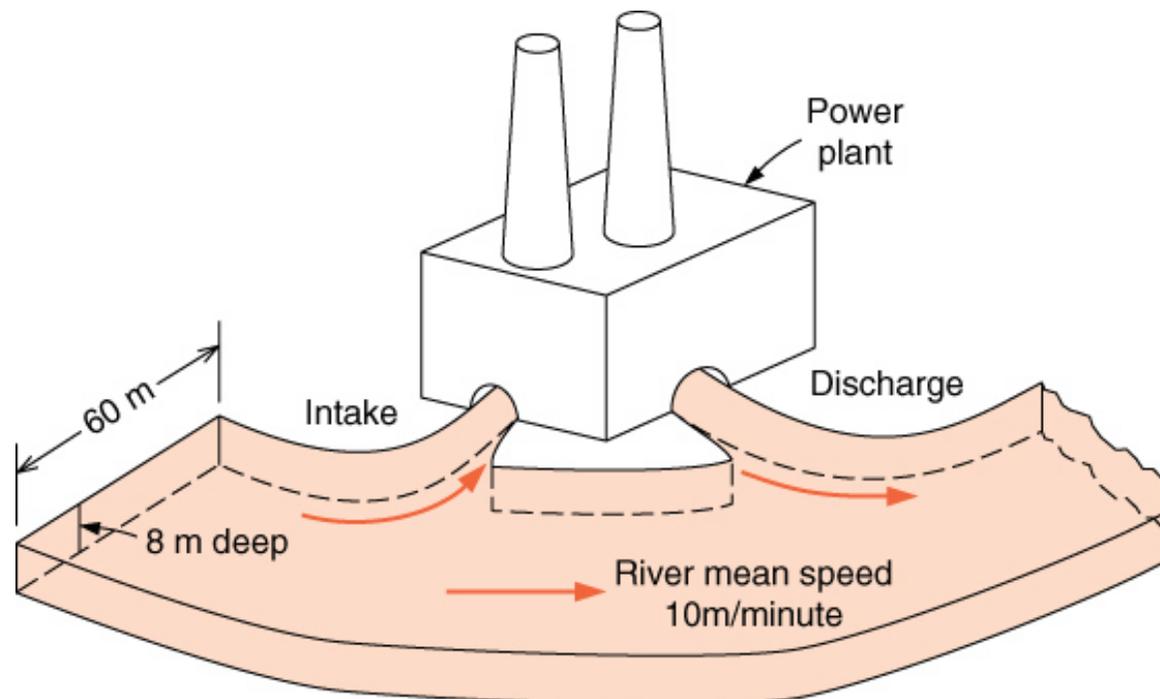
$$\frac{q_H}{T_H} - \frac{q_L}{T_L} = R \left(\ln \frac{v_2}{v_1} + \ln \frac{v_4}{v_3} \right)$$

Combinando com (5):

$$\frac{q_H}{T_H} - \frac{q_L}{T_L} = 0 \Rightarrow \frac{q_H}{q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

Ex. 7.67 – 7ª Ed.

Propõe-se construir uma central termoelétrica com potência de 1000 MW e utilizando vapor d'água como fluido de trabalho. Os condensadores devem ser resfriados com água de um rio. A temperatura máxima do vapor será de 550°C e a pressão no condensador de 10 kPa. Como consultor de engenharia você é solicitado a estimar o aumento de temperatura da água do rio. Qual é a sua estimativa.





Hipóteses:

- A planta opera em regime permanente;
- O ciclo a vapor é reversível;
- O sistema é o ciclo a vapor;
- O volume de controle é o rio, incluindo a entrada e saída de água para a planta;
- A água comporta-se como incompressível, com calor específico independente da temperatura e igual ao valor a 25 °C.



Solução:

$$T_H = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_H = 823 \text{ K}$$

$$T_L = T_{\text{sat}} @ 10 \text{ kPa} = 45,81 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_L = 319 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{319}{823} = 0,612$$

Taxa com que calor rejeitado para o rio (\dot{Q}_L): $\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}$

$$\eta_{\text{rev}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_H = \frac{\dot{W}}{\eta_{\text{rev}}} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_L = (1/\eta_{\text{rev}} - 1)\dot{W}$$

$$\dot{Q}_L = 634 \text{ MW}$$

Vazão mássica do rio:

$$\dot{m} = \frac{VA}{v} = \frac{10 \cdot 8 \cdot 60}{0,001} = 4,8 \times 10^6 \text{ kg} / \text{min}$$

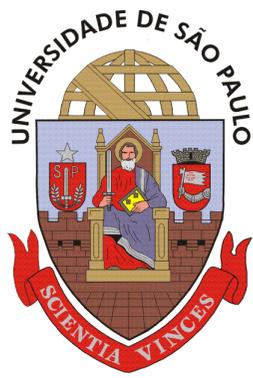
$$\dot{m} = 80.000 \text{ kg} / \text{s}$$

Aquecimento do rio:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}c} = \frac{634 \times 10^6}{80.000 \cdot 4,184 \times 10^3}$$

$$\Delta T = 1,9^\circ \text{C}$$

Para um rendimento de 0,3 obteríamos: $\Delta T = 7^\circ \text{C}$



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

8) Entropia



Falamos nas aulas anteriores sobre a **2ª Lei da Termodinâmica**.

Vimos dois enunciados da 2ª Lei, o de Kelvin-Planck e o de Clausius.

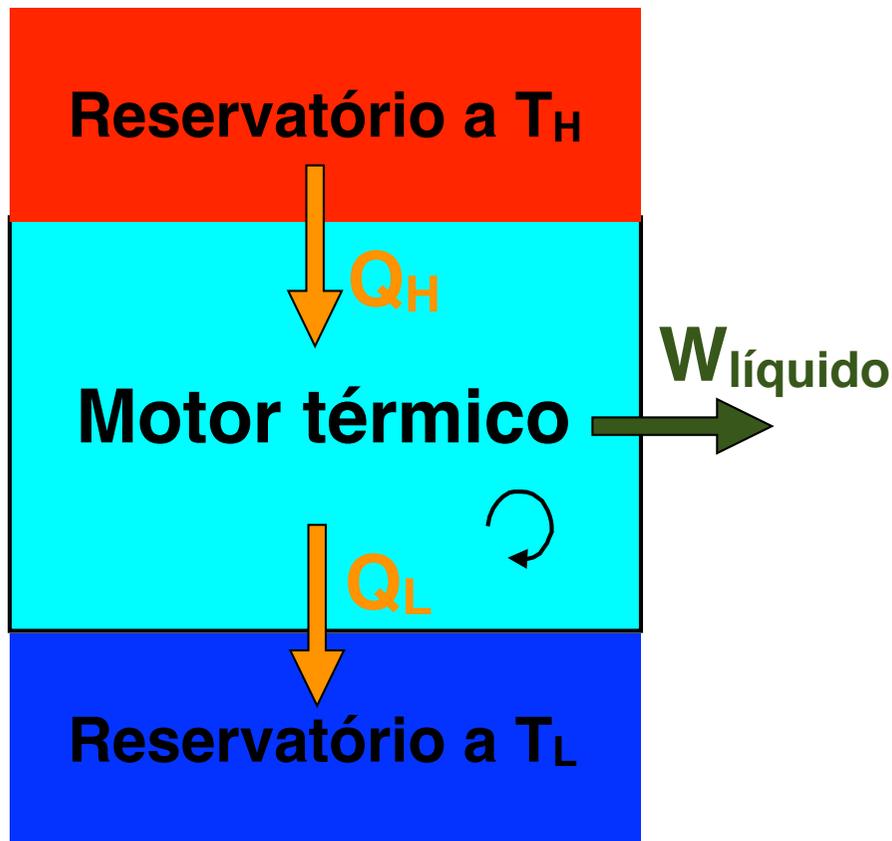
Falamos sobre sentido natural dos processos, oportunidade de realizar trabalho ou perda da, fatores que impedem a realização do máximo trabalho (irreversibilidades), reversibilidade, ciclo de Carnot e escala termodinâmica de temperatura.

O que não fizemos foi desenvolver uma expressão matemática para a 2ª Lei, é o que faremos na seqüência.

Desigualdade de Clausius



Buscamos escrever uma equação matemática para representar a 2ª Lei da Termodinâmica. Considere um ciclo motor, reversível ou irreversível.



Para esse ciclo, a eficiência térmica é dada por:

$$\eta_{\text{motor}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Para um ciclo reversível vimos que o rendimento pode ser calculado por:

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



No caso do motor reversível podemos escrever:

$$1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \longrightarrow \frac{T_L}{T_H} = \frac{Q_L}{Q_H} \longrightarrow \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Comparemos o rendimento de um ciclo irreversível com aquele de um reversível operando entre os mesmos reservatórios térmicos:

$$\eta_{\text{rev}} > \eta_{\text{irrev}} \longrightarrow 1 - \frac{T_L}{T_H} > 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \longrightarrow \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

Generalizando para qualquer motor operando ciclicamente:

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \leq 0$$



Podíamos ter feito análise similar, comparando os coeficientes de desempenho de refrigeradores e bombas de calor reversíveis e irreversíveis, teríamos chegado à mesma conclusão:

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \leq 0$$

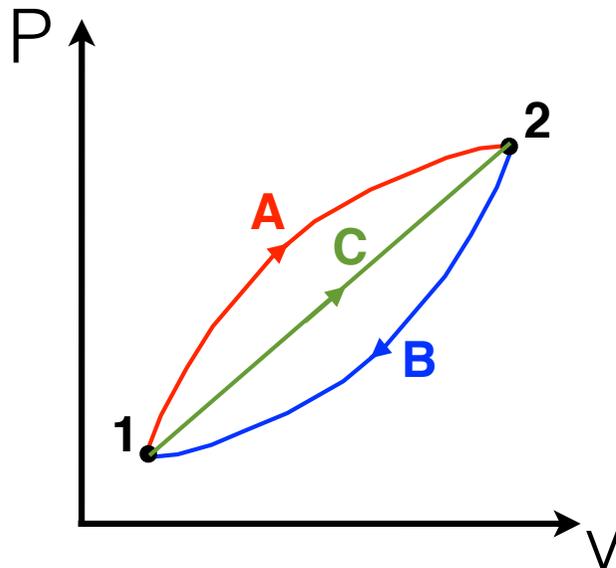
Demonstramos, assim, a desigualdade de Clausius:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

A propriedade entropia



Considere um sistema que percorre dois ciclos reversíveis. Ambos os ciclos começam no estado 1 e vão até o estado 2, sendo compostos por dois processos. O primeiro ciclo é formado por dois processos, **A** e **B**. O segundo pelos processos **B** e **C**.



Como os ciclos são compostos por processos reversíveis podemos escrever:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$

A propriedade entropia



Combinando as equações anteriores:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$
$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

Observe que a integral não depende do caminho, para qualquer processo reversível, ela só depende dos estados inicial e final!



Assim sendo, quando resolvemos a integral de linha ao longo de um processo reversível estamos calculando a variação de uma propriedade termodinâmica!

$$\Delta \text{Propriedade} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

A essa propriedade dá-se o nome de *entropia* (S), que, como pode ser observado na expressão, é dada em kJ / K no S.I.

Na forma diferencial: $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$

O ciclo de Carnot de é composto apenas por processos reversíveis. Podemos, então, calcular variações de entropia usando a integral anterior.

◆ **Processo 1-2**: Isotérmico / interação de calor com o reservatório H.

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \longrightarrow S_2 - S_1 = \frac{Q_H}{T_H}$$

◆ **Processo 2-3**: Adiabático / expansão. $S_3 = S_2$

◆ **Processo 3-4**: Isotérmico / interação de calor com o reservatório L.

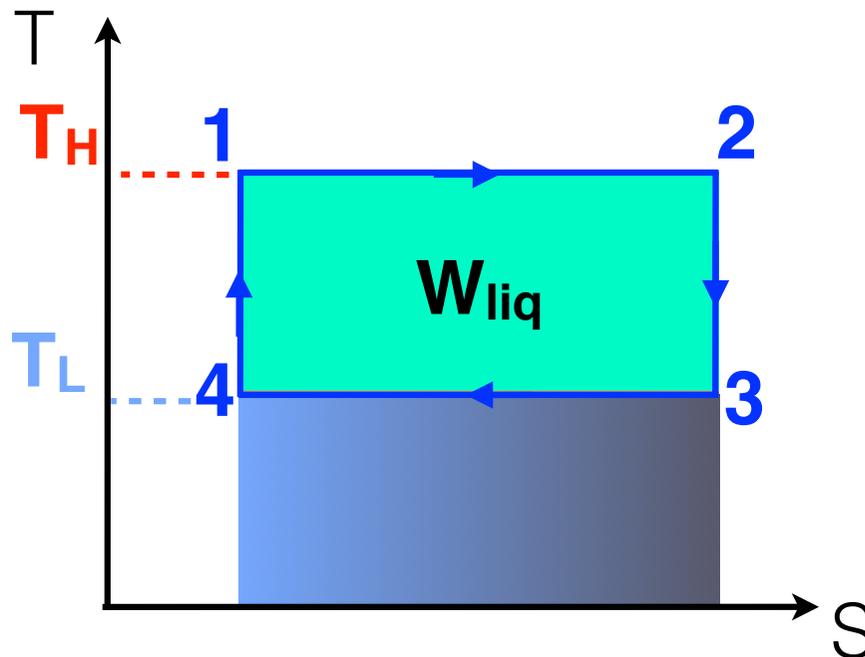
$$\longrightarrow S_4 - S_3 = -\frac{Q_L}{T_L}$$

◆ **Processo 4-1**: Adiabático / compressão. $S_4 = S_1$

Ciclo de Carnot



As características do Ciclo de Carnot sugerem a utilização de um diagrama T-s para visualização dos processos, observe:



Área = Q_H

Área = Q_L

Como aumentar o trabalho realizado e o rendimento do ciclo?

Importante: essa relação com as áreas só é válida quando todos os processos que compõem o ciclo forem reversíveis.



Agora precisamos aprender a calcular variações de entropia a partir de outras propriedades não mensuráveis, energia e entalpia, e de propriedades mensuráveis como pressão e temperatura...

Considere a 1ª Lei para um sistema na forma diferencial: $dU = \delta Q - \delta W$

Para uma substância compressível simples que passa por um processo reversível: $\delta W_{\text{rev}} = pdV$

Para um processo reversível: $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$

Combinando as expressões anteriores: $dU = TdS - pdV$

A primeira relação procurada é: $TdS = dU + pdV$



A segunda relação pode ser obtida usando a definição de entalpia.

Definição de entalpia: **$H = U + PV$**

Derivando: **$dH = dU + d(PV)$**

Pela regra do produto: **$dH = dU + VdP + PdV$**

Substituindo a expressão anterior na relação: **$TdS = dU + pdV$**

obtemos a segunda relação: **$TdS = dH - VdP$**



As duas relações obtidas foram:

$$\mathbf{TdS = dU + PdV}$$

$$\mathbf{TdS = dH - VdP}$$

Podemos escrevê-las em termos de propriedades intensivas:

$$\mathbf{Tds = du + Pdv}$$

$$\mathbf{Tds = dh - vdP}$$



As variações de entropia de substâncias puras compressíveis simples podem ser obtidas a partir da integração das relações anteriores:

$$Tds = du + Pdv \quad \longrightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv$$

$$Tds = dh - vdP \quad \longrightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dh}{T} - \int_1^2 \frac{v}{T} dP$$

- líquido saturado para vapor saturado:

$$s_v - s_l = \int_l^v \frac{dh}{T} - \int_l^v \frac{v}{T} dP \quad \longrightarrow \quad s_v - s_l = \frac{h_v - h_l}{T_{\text{sat}}}$$

processo isobárico

- entropia de uma mistura saturada:

$$s = (1 - x)s_l + xs_v$$

- entropia do líquido comprimido (aproximação):

$$s_{\text{liq. comp.}}(T, P) \cong s_l(T)$$

- líquido ou sólido (modelo incompressível):

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv \rightarrow \Delta s = \int_1^2 \frac{du}{T} \rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{cdT}{T}$$

incompressível

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$



- gás perfeito:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + \int_1^2 \frac{R}{v} dv$$

integrando $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

- gás perfeito:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dh}{T} - \int_1^2 \frac{v}{T} dp \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - \int_1^2 \frac{R}{P} dP$$

integrando $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

- gás perfeito (utilização da tabela)

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$s^0_T = \int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T}$$

Quando não pudermos admitir c_p independente de T , a integral da equação deve ser calculada. A integração do 1º termo entre a temperatura de um estado de referência (T_0) e a temperatura de um estado em análise (T) foi calculada e encontra-se tabelada:

TABELA A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s^0_T kJ/kg \times K	P_r	v_r
200	142,77	200,17	6,46260	0,2703	493,47
220	157,07	220,22	6,55812	0,3770	389,15
240	171,38	240,27	6,64535	0,5109	313,27

$$s_2 - s_1 = (s^0_{T_2} - s^0_{T_1}) - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Processo politrópico reversível



As equações desenvolvidas para a variação de entropia de um gás ideal com c_p e c_v constantes podem ser usadas para obter expressões que relacionam em pares P , T e v em um processo isentrópico ($\Delta s = 0$):

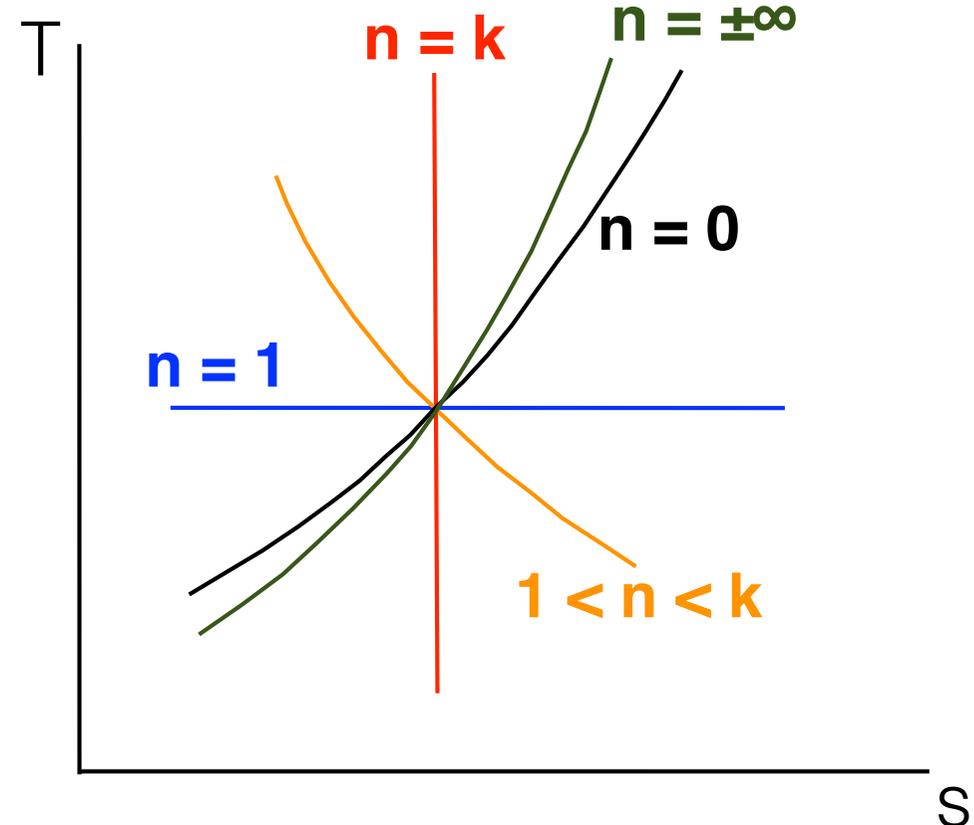
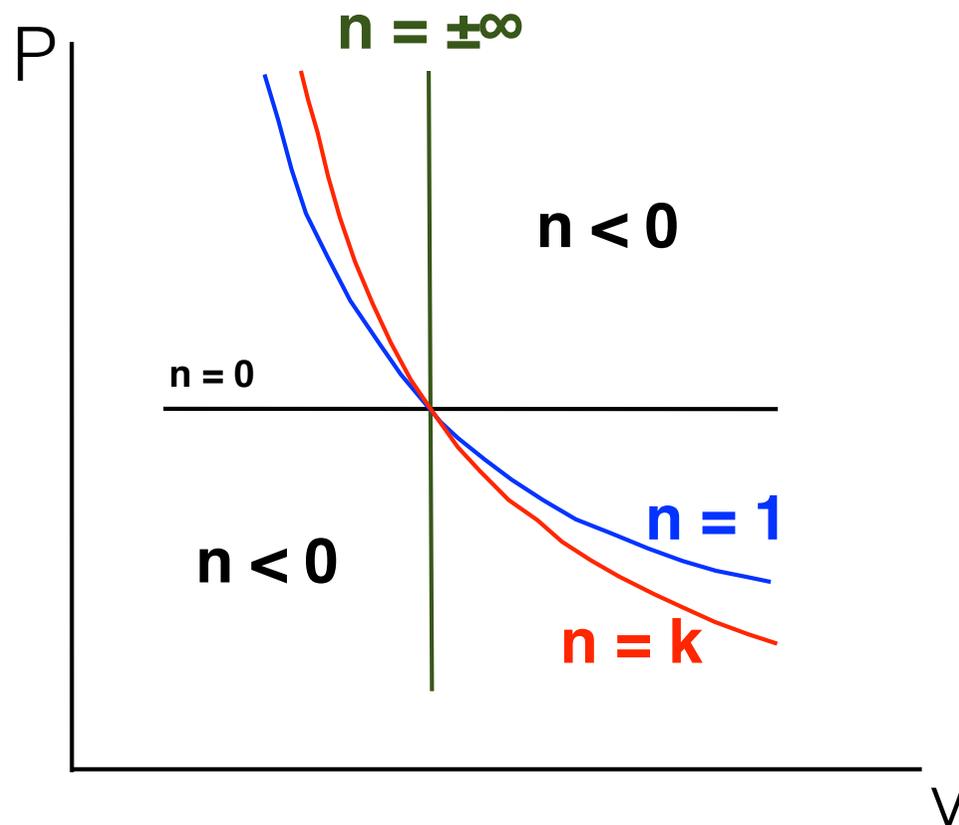
$$0 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

$$0 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Combinando as equações anteriores: $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$

Trata-se de um processo politrópico ($PV^n = \text{cte}$) com $n = k$!

Processo politrópico gás perfeito



processo isobárico ($n = 0$)

processo isocórico ($n = \pm\infty$)

processo isotérmico ($n = 1$)

processo isentrópico ($n = k$)



Considere a desigualdade de Clausius:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Para um ciclo reversível composto por dois processos:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$$

Para um ciclo irreversível composto por dois processos:

$$S_2 - S_1 > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$$



Chegamos em:

$$S_2 - S_1 > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$$

Podemos eliminar a desigualdade introduzindo a entropia gerada (S_{ger}):

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{ger}$$

Finalmente chegamos em uma expressão da 2ª Lei para um sistema!



Introduzimos o conceito de entropia gerada sem, no entanto, dar qualquer explicação...

Notas:

- ❖ S_{ger} não é uma propriedade termodinâmica;
- ❖ $S_{\text{ger}} = 0$ para um processo reversível;
- ❖ $S_{\text{ger}} > 0$ para um processo irreversível;
- ❖ S_{ger} não pode ser menor que 0;
- ❖ S_{ger} tem unidade de entropia.

Vamos agora associar um significado para a entropia gerada. Para um processo reversível temos:

$$\delta Q = TdS \quad \delta W = PdV$$

Considere um processo irreversível:

$$dS = \left(\frac{\delta Q_{\text{irr}}}{T} \right) + \delta S_{\text{ger}} \longrightarrow \delta Q_{\text{irr}} = TdS - T\delta S_{\text{ger}}$$

A interação de calor no caso irreversível é menor do que no reversível. Aplicando a 1ª lei para esse processo:

$$dU = \delta Q_{\text{irr}} - \delta W_{\text{irr}} \longrightarrow dU = TdS - T\delta S_{\text{ger}} - \delta W_{\text{irr}}$$

$$dU = TdS - T\delta S_{\text{ger}} - \delta W_{\text{irr}}$$

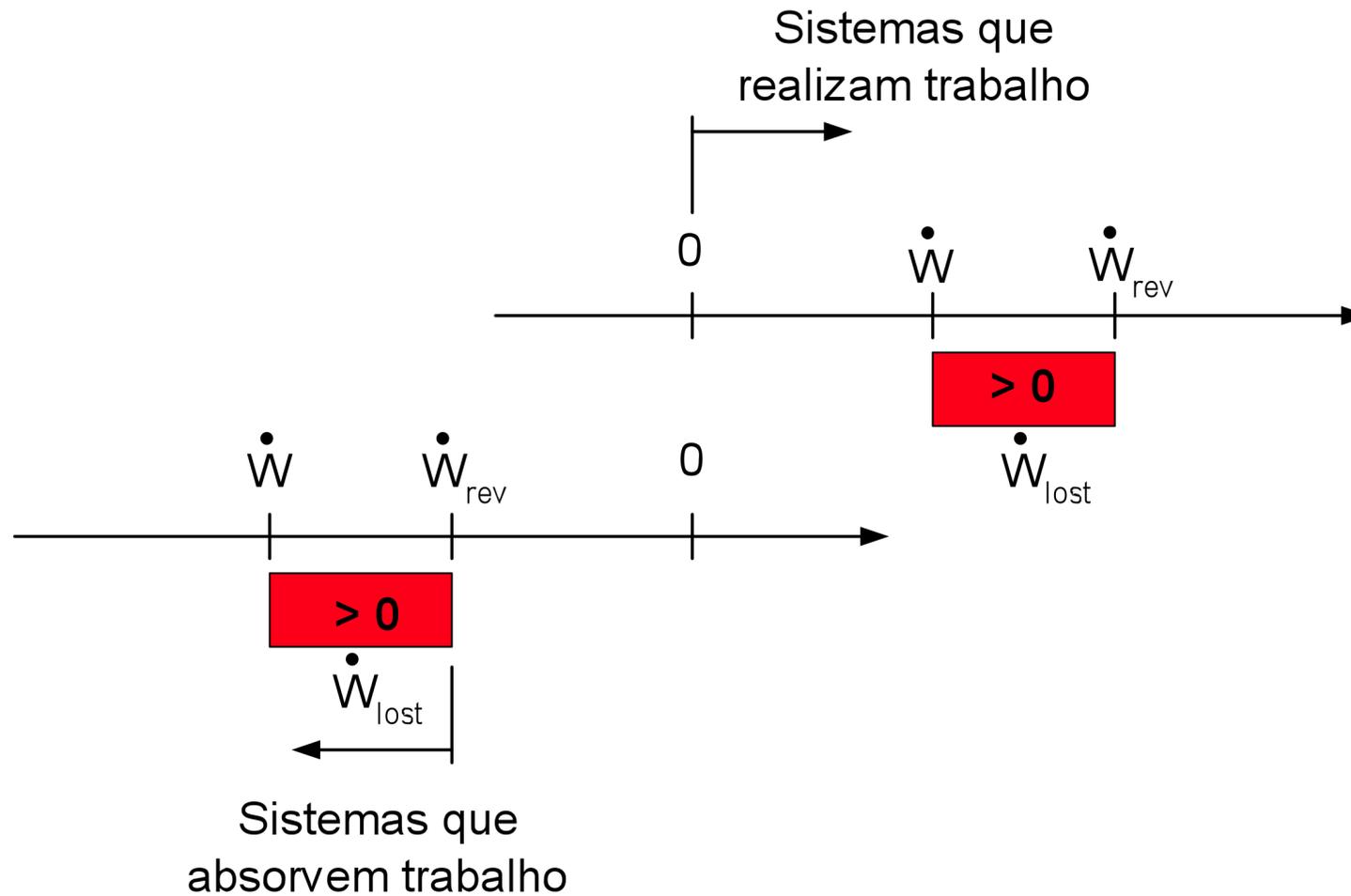
$$\longrightarrow pdV - T\delta S_{\text{ger}} - \delta W_{\text{irr}} = 0$$

Lembrando de $TdS = dU + pdV$

$$\text{Como } \delta W = PdV \longrightarrow \delta W_{\text{irr}} = \delta W - T\delta S_{\text{ger}}$$

Observamos que W_{irr} é menor do que W_{rev} . A diferença é igual a $T\delta S_{\text{ger}}$. Esse termo é chamado de trabalho perdido, significando, na verdade, uma perda de oportunidade de realização de trabalho.

Veja a figura:





Resumo das equações para sistema:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{ger}$$

Na forma de taxas:

$$\frac{dS}{dt} = \int_1^2 \left(\frac{\delta \dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{ger}$$

Processo reversível: $\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + \cancel{S_{\text{ger}}} \rightarrow \Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$

Processo adiabático reversível: $\Delta s = 0$

Perguntas:

1ª) Δs pode ser menor que zero?

2ª) Quando $\Delta s = 0$ o processo é necessariamente adiabático reversível ?

Regime permanente: $\cancel{\frac{dS_{\text{vc}}}{dt}} = \int_1^2 \left(\frac{\delta \dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{\text{ger}}$

Representação em diagramas



A partir de agora utilizaremos o diagrama T-s na representação de processos, veja suas características:

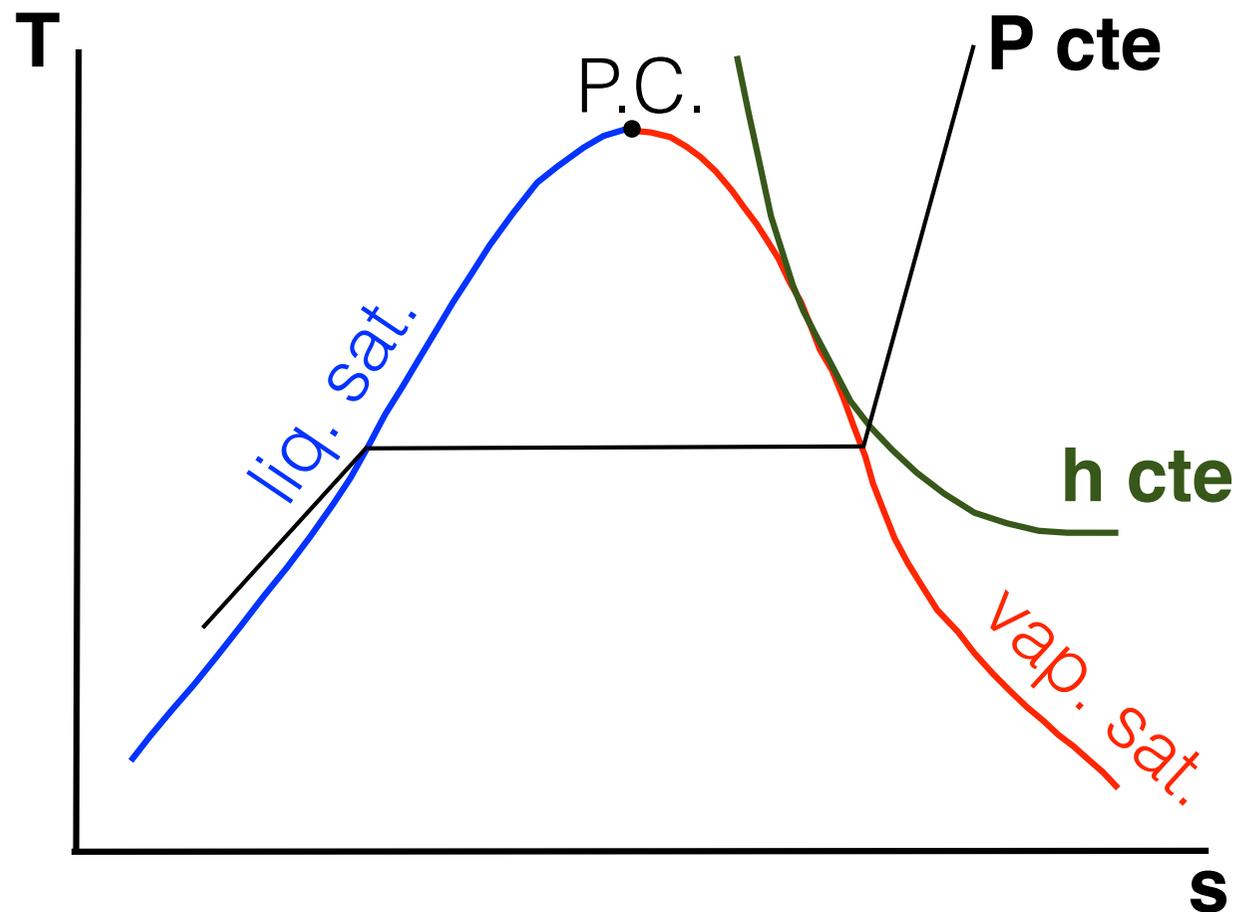
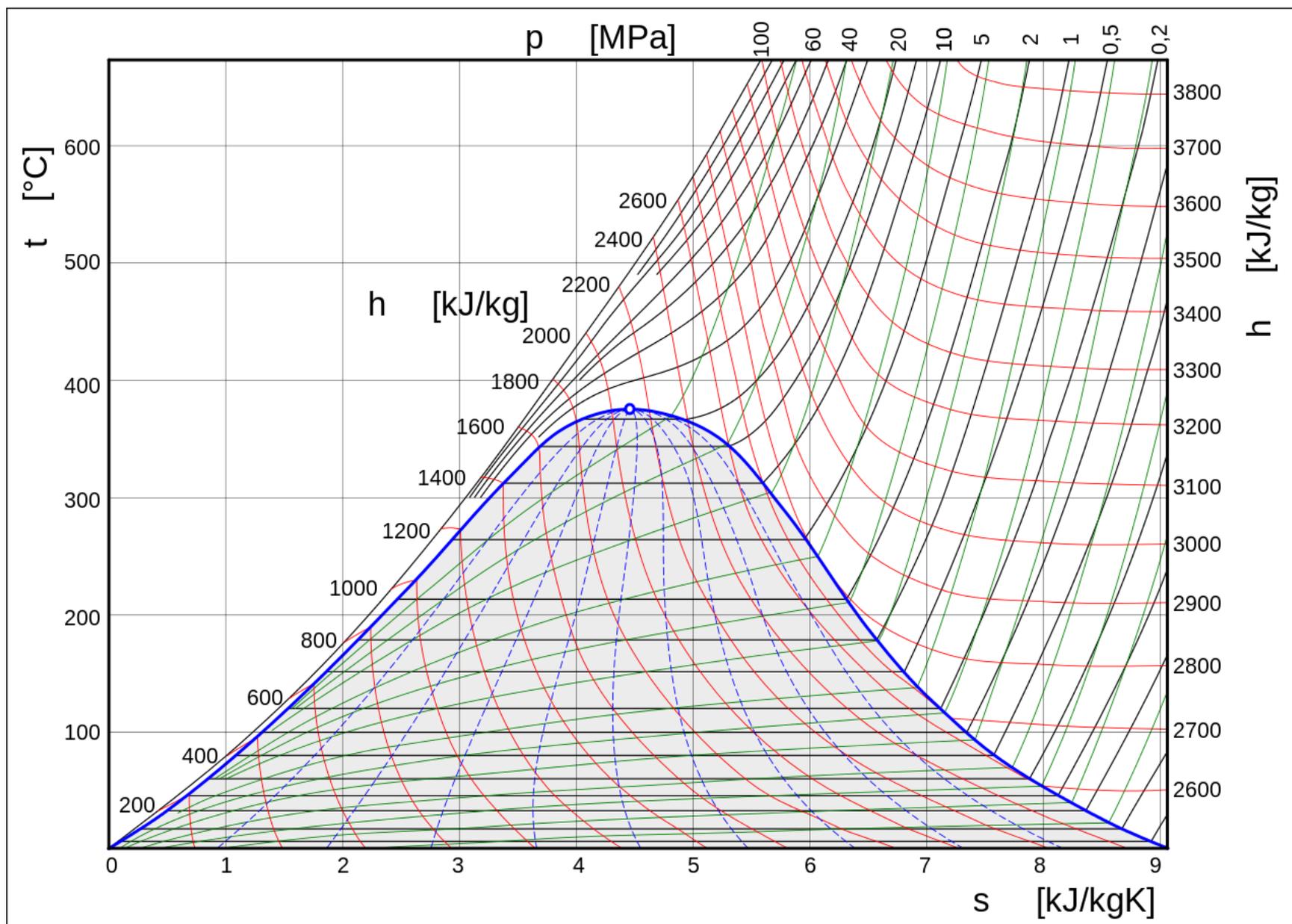


Diagrama T-s: isentálpicas (H₂O)



Representação em diagramas



Em algumas situações o diagrama h-s também pode ser útil. Em particular, é mostrado o da água:

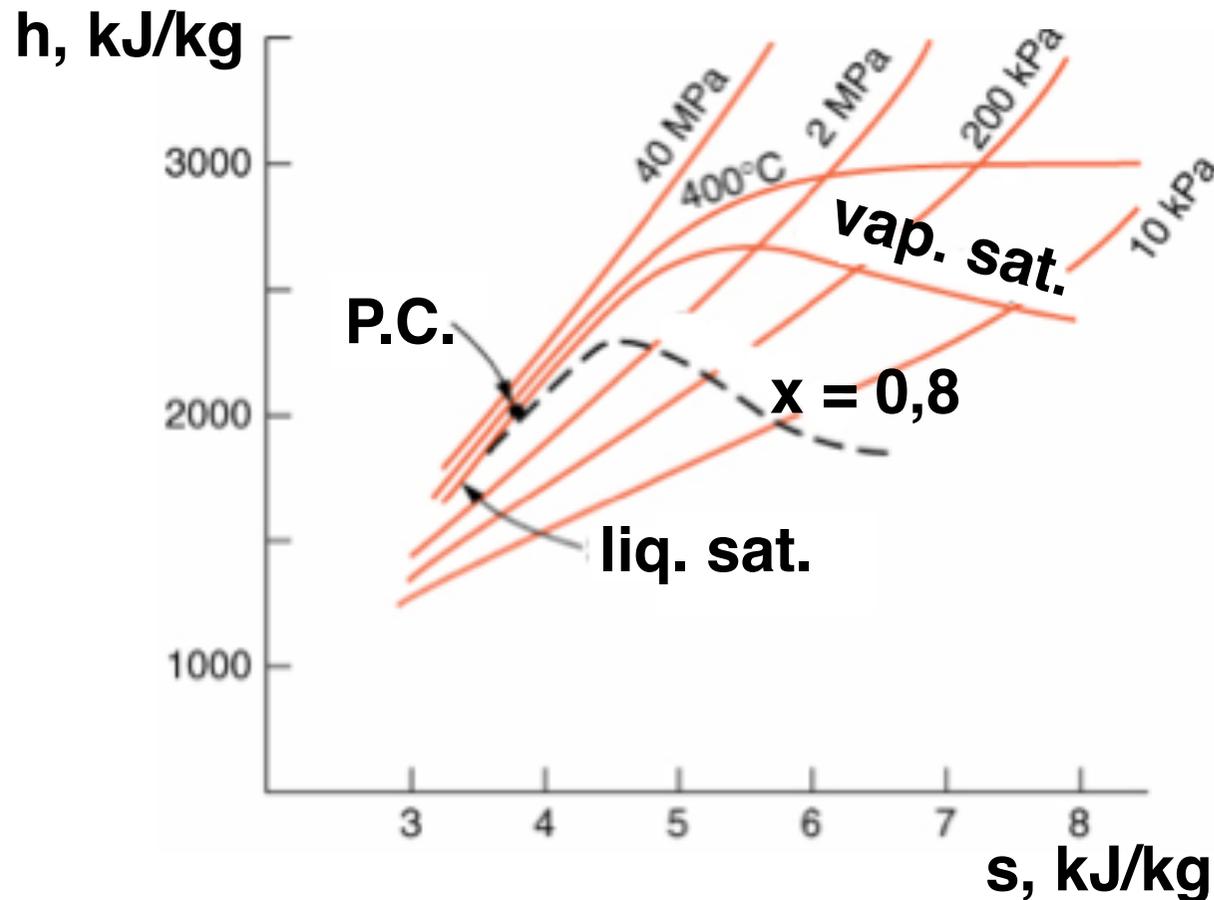
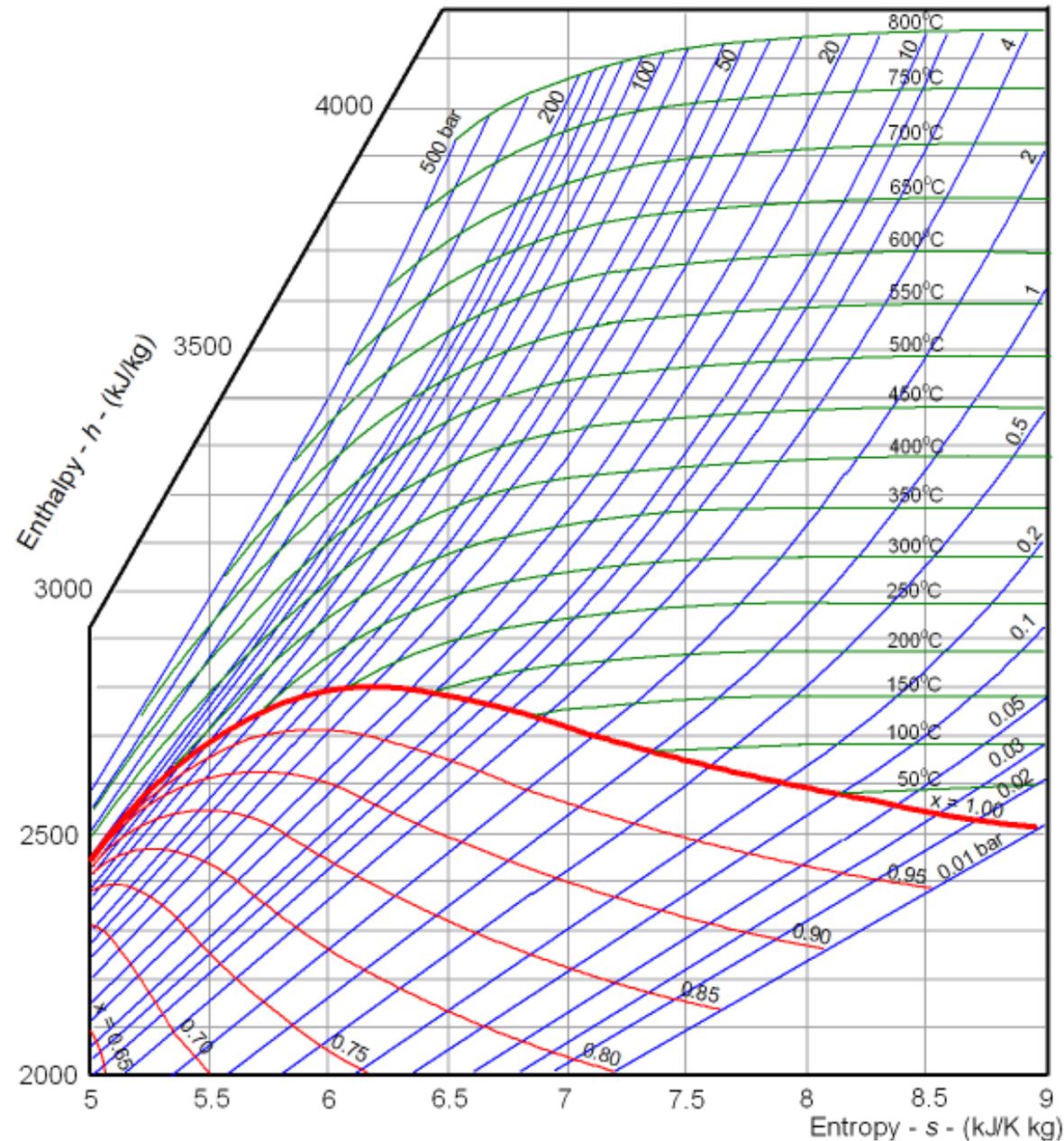


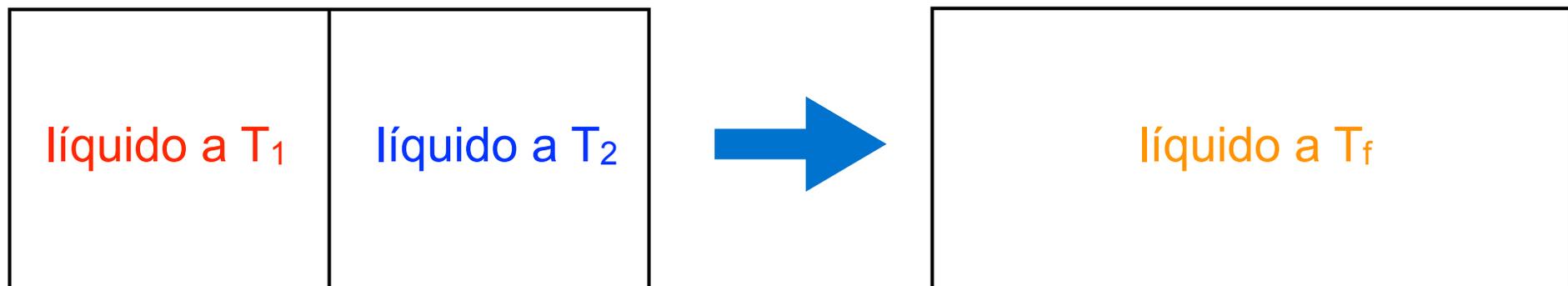
Diagrama h-s: Mollier (H₂O)



1) Um sistema isolado de massa total m é formado pela mistura de duas quantidades de massa iguais do mesmo líquido inicialmente a temperaturas T_1 e T_2 . Eventualmente, o sistema atinge um estado de equilíbrio. Cada quantidade de massa é considerada incompreensível com calor específico c constante.

- determine a entropia gerada;
- demonstre que ela é positiva.

(6.14 – Moran; Shapiro, 4^a ed)



Hipóteses:

- 1) O sistema é todo o líquido contido no tanque;
- 2) O modelo de substância incompressível é válido;
- 3) O processo de mistura é adiabático;
- 4) O calor específico é constante;
- 5) Os estados inicial e final são estados de equilíbrio.

Solução (a):

2ª lei para o sistema $S_f - S_i = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{ger} \rightarrow S_{ger} = S_f - S_i$

$$S_f - S_i = m/2(s_f - s_1) + m/2(s_f - s_2)$$

Solução (a):

$$S_{\text{ger}} = m/2(s_f - s_1) + m/2(s_f - s_2)$$

Para uma substância incompressível

$$s_f - s_1 = c \ln \frac{T_f}{T_1}$$

$$s_f - s_2 = c \ln \frac{T_f}{T_2}$$

Combinando as expressões acima

$$S_{\text{ger}} = \frac{mc}{2} \left(\ln \frac{T_f}{T_1} + \ln \frac{T_f}{T_2} \right) \rightarrow S_{\text{ger}} = \frac{mc}{2} \left(\ln \frac{T_f^2}{T_1 T_2} \right)$$

$$S_{\text{ger}} = mc \left(\ln \frac{T_f}{\sqrt{T_1 T_2}} \right)$$

Solução (a):

A temperatura final pode ser obtida pela aplicação da 1ª Lei ao sistema

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Combinando com a expressão para a entropia gerada $S_{ger} = mc \left(\ln \frac{T_f}{\sqrt{T_1 T_2}} \right)$

$$\rightarrow S_{ger} = mc \left(\ln \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2}} \right)$$

Solução (b):

A entropia gerada é dada por $S_{ger} = mc \left(\ln \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2}} \right)$

Para que ela seja positiva precisamos que $T_1 + T_2 > 2\sqrt{T_1 T_2}$

$$T_1 + T_2 - 2\sqrt{T_1 T_2} > 0$$

$$T_1 + T_2 - 2\sqrt{T_1 T_2} = (T_1^{0,5} - T_2^{0,5})^2 > 0$$



2) Um sistema é submetido a um ciclo termodinâmico de potência enquanto recebe energia sobre a forma de calor de um corpo incompressível de massa total m e calor específico c inicialmente a T_H . O sistema submetido ao ciclo rejeita energia sob a forma de calor para outro corpo incompressível de massa total m e calor específico c , porém a T_L . Trabalho é realizado pelo ciclo até que a temperatura dos dois corpos seja a mesma, T_f .

a) desenvolva uma expressão para a temperatura mínima teórica final, T_f , em função dos dados do problema;

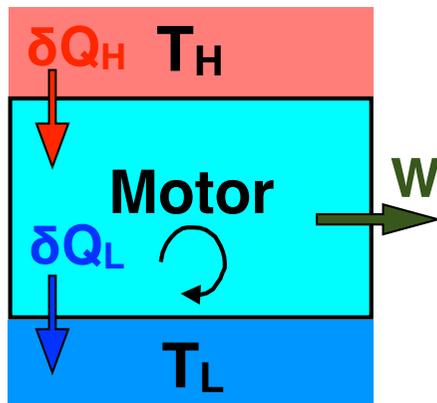
b) desenvolva uma expressão para a quantidade máxima teórica de trabalho que pode ser produzida, W_{max} , em função dos dados do problema;

c) qual é o trabalho mínimo teórico necessário para que um ciclo de refrigeração restabeleça as temperaturas dos dois corpos aos valores iniciais?

Hipóteses:

- 1) O modelo de substância incompressível é válido;
- 2) O calor específico das massas é constante e igual a c .

Solução (a)

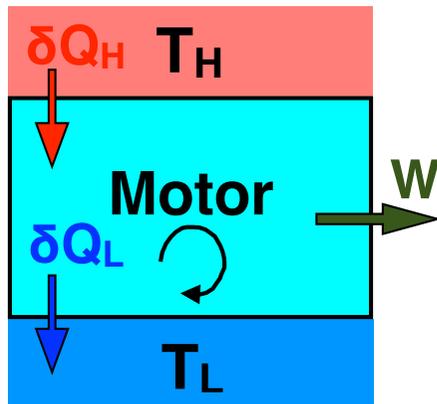


1ª lei para o sistema H, corpo inicialmente a T_H : $dU_H = -\delta Q_H$

1ª lei para o sistema L, corpo inicialmente a T_L : $dU_L = \delta Q_L$

$$\begin{aligned} \longrightarrow \quad mcdT_H &= -\delta Q_H \\ mcdT_L &= \delta Q_L \end{aligned}$$

Solução (a)



$$mcdT_H = -\delta Q_H$$

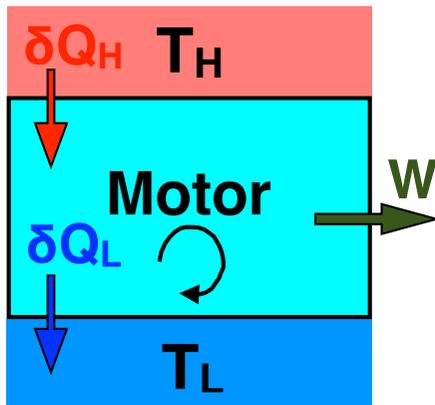
$$mcdT_L = \delta Q_L$$

Desigualdade de Clausius $\frac{\delta Q_H}{T_H} - \frac{\delta Q_L}{T_L} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \delta Q_L \geq \frac{T_L}{T_H} \delta Q_H$

Substituindo nas expressões da 1ª lei

$$\begin{aligned} mcdT_H &= -\delta Q_H \\ mcdT_L &\geq \frac{T_L}{T_H} \delta Q_H \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad mcdT_L \geq -\frac{T_L}{T_H} mcdT_H$$

Solução (a)



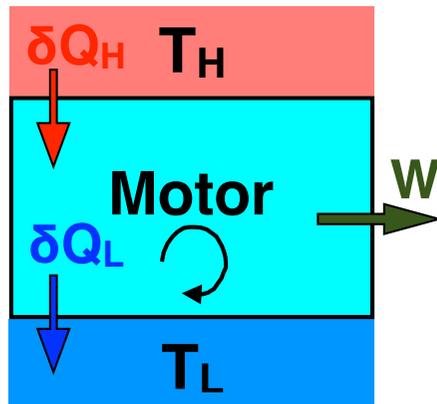
$$mcdT_L \geq -\frac{T_L}{T_H} mcdT_H$$

Separando as variáveis e integrando entre o início e o fim:

$$\frac{dT_L}{T_L} \geq -\frac{dT_H}{T_H} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_f}{T_L} \geq \frac{T_H}{T_f} \quad \longrightarrow \quad T_f^2 \geq T_L T_H$$

T_f será mínima no limite reversível: $T_f = \sqrt{T_L T_H}$

Outra solução (a)



Tomemos as duas massas e o motor como sistema

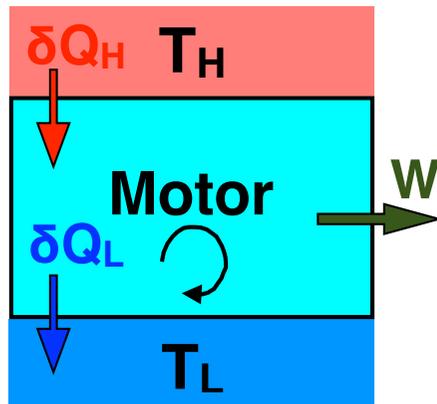
2ª lei para o novo sistema:

$$\Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + S_g \quad \longrightarrow \quad \Delta S_H + \Delta S_M + \Delta S_L = S_g$$

$$mc \ln \frac{T_f}{T_H} + mc \ln \frac{T_f}{T_L} = S_g \quad \longrightarrow \quad mc \ln \frac{T_f^2}{T_H T_L} = S_g \quad \longrightarrow \quad T_f = \sqrt{T_H T_L \exp\left(\frac{S_g}{mc}\right)}$$

T_f será mínima no limite reversível ($S_g = 0$): $T_f = \sqrt{T_H T_L}$

Solução (b)



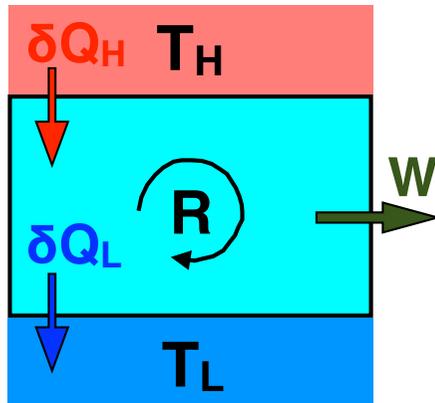
Tomemos as duas massas
e o motor como sistema

1ª lei para o novo sistema: $\Delta U = -W \quad \rightarrow \quad \Delta U_H + \Delta U_L = -W$

$$mc \left[(T_f - T_H) + (T_f - T_L) \right] = -W \quad \rightarrow \quad W = mc (T_H + T_L - 2T_f)$$

W será máximo quando T_f for mínima: $W_{\max} = mc \left(T_H + T_L - 2\sqrt{T_H T_L} \right)$

Solução (c)



Tomemos as duas massas e o refrigerador como sistema

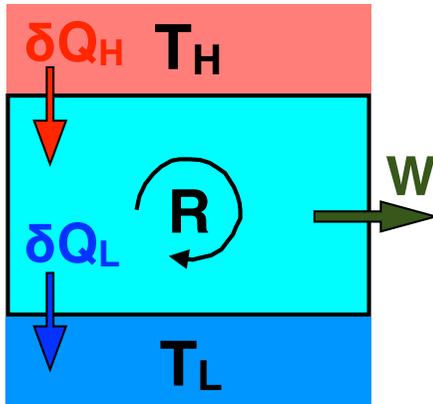
$$1^{\text{a}} \text{ lei para o novo sistema: } \Delta U = -W \quad \longrightarrow \quad \Delta U_H + \Delta U_L = -W$$

$$mc(T_H - T_f + T_L - T_f) = -W \quad \longrightarrow \quad -W = mc(T_H + T_L - 2T_f)$$

$$2^{\text{a}} \text{ lei para o novo sistema: } \Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + S_g \quad \longrightarrow \quad mc \ln \frac{T_H}{T_f} + mc \ln \frac{T_L}{T_f} = S_g$$

$$\longrightarrow S_g = mc \ln \frac{T_H T_L}{T_f^2} \quad \longrightarrow \quad T_f = \sqrt{T_H T_L / \exp\left(\frac{S_g}{mc}\right)}$$

Solução (c)



$$-W = mc(T_H + T_L - 2T_f)$$

$$T_f = \sqrt{T_H T_L / \exp\left(\frac{S_g}{mc}\right)}$$

Combinando as duas expressões:

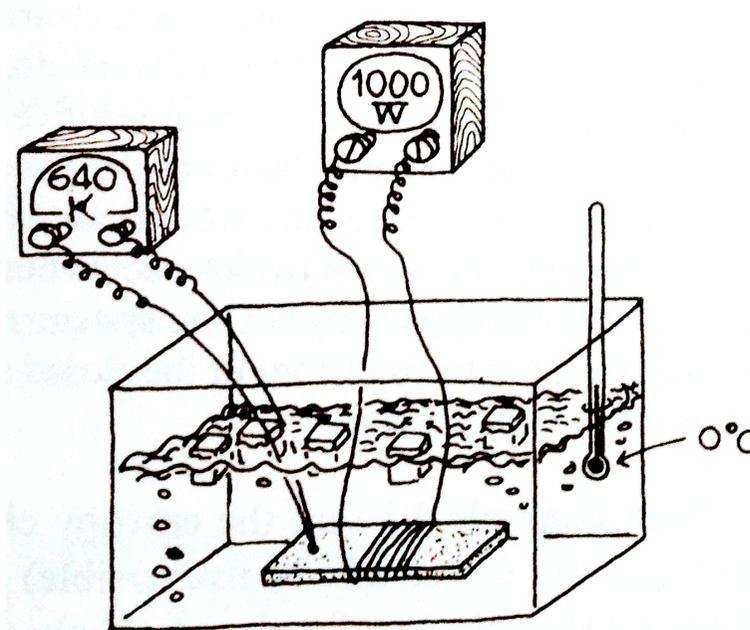
$$\rightarrow -W = mc \left(T_H + T_L - 2 \sqrt{T_H T_L / \exp\left(\frac{S_g}{mc}\right)} \right)$$

$-W$ será máximo quando S_g for zero:

$$-W_{\min} = mc \left(T_H + T_L - 2 \sqrt{T_H T_L} \right)$$

3) Uma barra de alumínio é colocada em um grande banho com água e gelo. Corrente elétrica passa pela barra até que, em regime permanente, a potência dissipada seja de 1000 W. Um termopar na superfície da barra indica 640 K. Ebulição ocorre na interface barra/banho com posterior colapso ruidoso das bolhas. Qual é a variação de entropia da barra, banho e do universo durante os 2 min de operação dessa operação extremamente irreversível. Assuma que ainda haja gelo no final do processo.

(Exemplo 4.2 – Modell; Reid, Thermodynamics and its applications, 2^a ed)

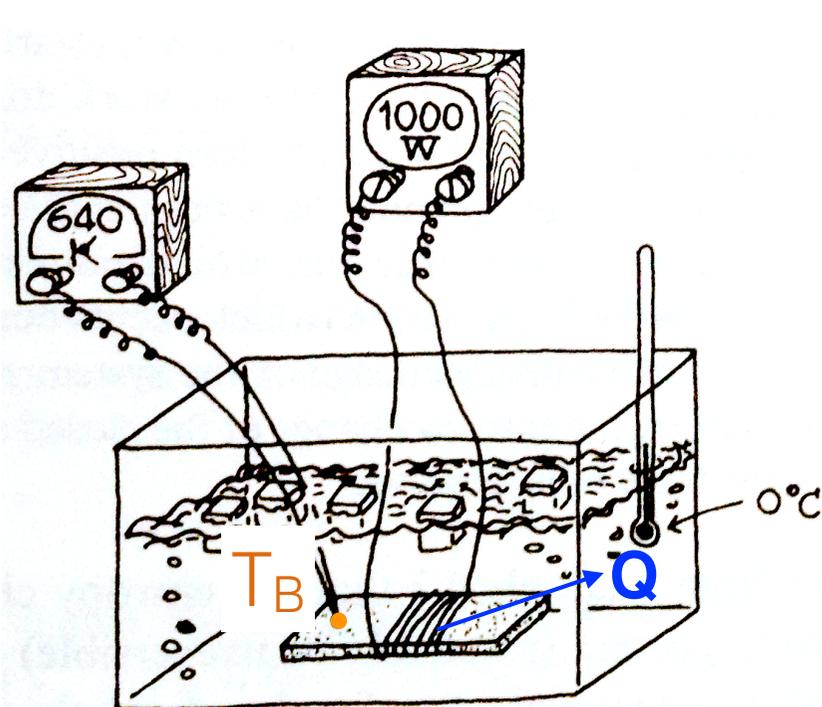


Hipóteses:

- 1) A transferência de calor entre o banho e o ambiente é desprezível;
- 2) A variação de volume durante a fusão do gelo é desprezível.

Solução

Vamos considerar dois sistemas, a barra (B) e o banho água-gelo (A). Adicionalmente, vamos calcular a entropia gerada em cada sistema.



$$\cancel{\Delta S_B = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + S_{g,B}} \rightarrow S_{g,B} = -\frac{-Q}{T_B}$$

$$Q = 2 \cdot 60 \cdot 1000 = 1,2 \times 10^5 \text{ J}$$

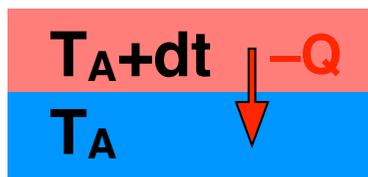
$$S_{g,B} = \frac{1,2 \times 10^5}{640} \rightarrow S_{g,B} = 187,5 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Solução

Para o banho gelo-água (A) o resultado líquido foi que parte do gelo derreteu e a temperatura permaneceu constante.

Para calcular a variação de entropia precisamos imaginar um processo reversível entre os mesmos estados inicial e final:

2ª lei para o banho:



$$\Delta S_A = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + \cancel{S_{g,A}} \quad \longrightarrow \quad \Delta S_A = \frac{Q}{T_A}$$

$$\Delta S_A = \frac{1,2 \times 10^5}{273,2} \quad \longrightarrow \quad \Delta S_A = 439,2 \frac{J}{K}$$

Solução

Em resumo:

$$\Delta S_B = 0$$

$$\Delta S_A = 439,2 \frac{J}{K}$$

Como o sistema composto é isolado termicamente, podemos escrever:

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_B + \Delta S_A = 439,2 \frac{J}{K}$$

$$\rightarrow \Delta S_{univ} = 439,2 \frac{J}{K}$$



4) Com o intuito de explicar um ponto adicional, vamos modificar o problema anterior. Consideremos que a barra está imersa em ar ao invés do banho com água e gelo. Todas as demais condições são mantidas.

Solução

Vamos considerar três sistemas, a barra (B), o ar longe da barra (A) e o ar próximo à barra (I).

Para a barra:

$$\Delta S_B = 0$$

$$S_{g,B} = \frac{Q}{T_B}$$

Solução

Se nos afastarmos da barra (pode ser bem pouco) a temperatura do ar tende a T_A . De modo que a transferência de calor para esse sistema se dá de forma reversível.

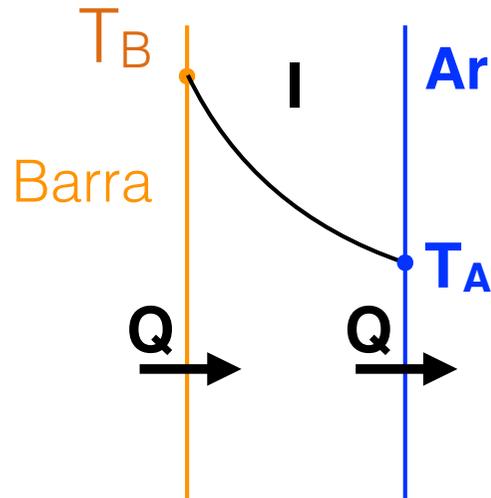
Para o ar:

$$\Delta S_A = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + S_{g,A}$$

$$\rightarrow \Delta S_A = \frac{Q}{T_A}$$
$$S_{g,A} = 0$$

Solução

Para o ar próximo à barra, na interface (I), temos:



2ª lei para a interface

$$\cancel{\Delta S_I} = \int_i^f \frac{\delta Q}{T} + S_{g,I}$$

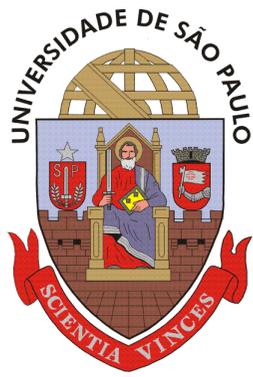
$$\rightarrow 0 = \frac{Q}{T_B} - \frac{Q}{T_A} + S_{g,I}$$

$$\rightarrow S_{g,I} = \frac{Q}{T_A} - \frac{Q}{T_B}$$

$$\Delta S_I = 0$$

Quadro resumo

Sistema	ΔS	S_g
Barra (B)	0	$\frac{Q}{T_B}$
Interface (I)	0	$\frac{Q}{T_A} - \frac{Q}{T_B}$
Ar (A)	$\frac{Q}{T_A}$	0
Universo	$\frac{Q}{T_A}$	$\frac{Q}{T_A}$



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

9) 2ª Lei da Termodinâmica para Volume de Controle

Estenderemos o balanço de entropia desenvolvido para considerar entrada e saída de massa. Não nos ocuparemos da dedução da expressão e analisaremos casos particulares.

A expressão da 2ª Lei para Sistema:

$$\frac{dS}{dt} = \int_1^2 \left(\frac{\delta \dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{ger}$$

A expressão da 2ª Lei para Volume de Controle:

Taxa de variação da
entropia no VC no
instante t

=

Contribuição da
taxa de interação
de calor

+

Taxa com que
entropia entra no
VC

-

Taxa com que
entropia sai do
VC

+

Taxa com que
entropia é
gerada no VC

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc}}{T} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger}$$



Regime permanente:

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;
- ★ O fluxo e o estado da massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo;
- ★ As taxas nas quais calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.



Com as simplificações anteriores:

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e - \sum \left(\frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T} \right)$$

Considerando, adicionalmente, uma entrada e uma saída:

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \sum \dot{m} (s_s - s_e) - \sum \left(\frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T} \right)$$



Regime uniforme

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa dentro do VC pode variar com o tempo, mas é uniforme ao longo de todo o VC;
- ★ o estado da massa que atravessa cada uma das áreas de fluxo na superfície de controle é constante e uniforme, embora as vazões possam variar com o tempo.

Hipótese principal

Vamos integrar a expressão a seguir de um instante inicial (1) até um instante t (2) de forma a eliminar a equação diferencial:

$$\int_1^2 \frac{dS_{vc}}{dt} = \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc}}{T} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger} dt$$

Obtemos:

$$S_2 - S_1 = \sum \left(\frac{Q_{1-2}}{T} \right) + \sum m_e s_e - \sum m_s s_s + S_{ger,1-2}$$

○ que significa cada um dos termos?



Considere a expressão da 1ª lei para um volume de controle com uma entrada e uma saída através do qual escoa um fluido em regime permanente:

$$q + h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e = w + h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s$$

Desejamos eliminar q da expressão. Para isso considere a expressão da 2ª lei em regime permanente na forma diferencial:

$$ds = \frac{\delta q}{T} + \delta s_{\text{ger}} \quad \text{combinando com} \quad Tds = dh - vdP$$

$$\text{obtém-se} \quad \delta q = dh - vdP - T\delta s_{\text{ger}}$$



Integrando a expressão a seguir $\delta q = dh - vdP - T\delta s_{ger}$

obtém-se $q = h_s - h_e - \int_e^s vdP - \int_e^s T\delta s_{ger}$

Combinando com a expressão da 1a Lei

$$q + h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e = w + h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Obtém-se:

$$w = - \int_e^s vdP + \frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s T\delta s_{ger}$$



$$w = - \int_e^s v dP + \frac{v_e^2}{2} - \frac{v_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s T \delta s_{ger}$$

Observe que:

a integral não tem nada a ver com trabalho de fronteira (pdV);

aparece variação de energia cinética / massa de fluido;

aparece variação de energia potencial / massa de fluido;

o último termo é sempre positivo.



$$\cancel{w} = - \int_e^s v dP + \frac{v_e^2}{2} - \frac{v_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s \cancel{1} \delta s_{ger}$$

Simplificações:

Processo reversível;

Sem trabalho de eixo;

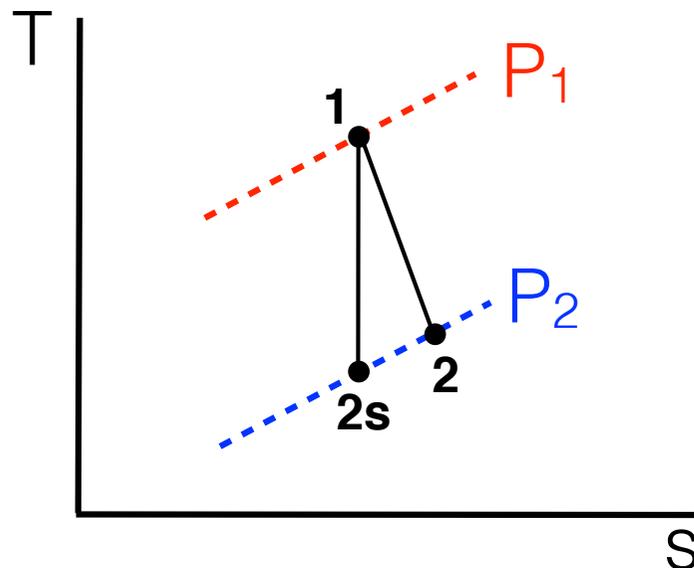
Fluido incompressível (v cte).

$$v(P_s - P_e) + \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} + gz_s - gz_e = 0 \quad \text{que é a equação de Bernoulli!}$$

Como avaliar o desempenho de uma máquina real?

Comparando seu desempenho com o de uma máquina ideal operando sob as mesmas condições.

O desempenho é dado pela eficiência isentrópica. Consideremos, inicialmente, 2 turbinas adiabáticas, uma reversível e outra não:

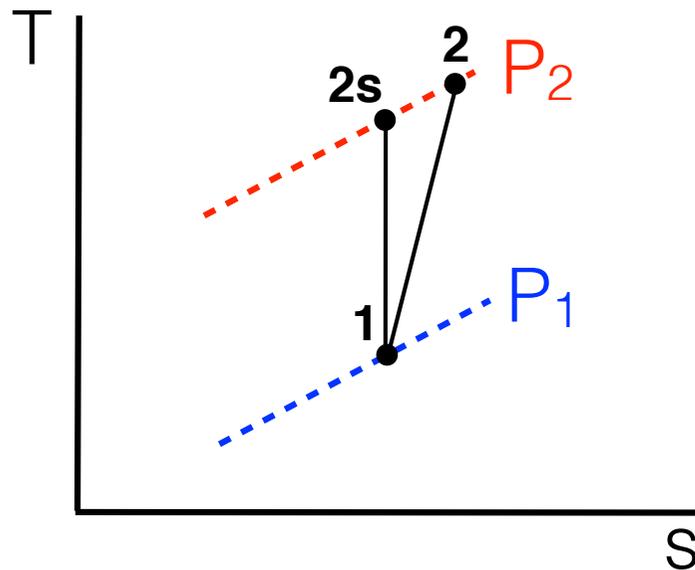


Podemos definir:

$$\eta_{s,tur} = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{ideal}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2)}{\dot{m}(h_1 - h_{2s})}$$

$$\eta_{s,tur} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad 0,7 < \eta_{s,tur} < 0,88$$

Analogamente para um compressor:



Podemos definir:

$$\eta_{s,\text{com}} = \frac{\dot{W}_{\text{ideal}}}{\dot{W}_{\text{real}}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_{2s})}{\dot{m}(h_1 - h_2)}$$

$$\eta_{s,\text{com}} = \frac{(h_1 - h_{2s})}{(h_1 - h_2)} \quad 0,7 < \eta_{s,\text{com}} < 0,88$$

Exercícios

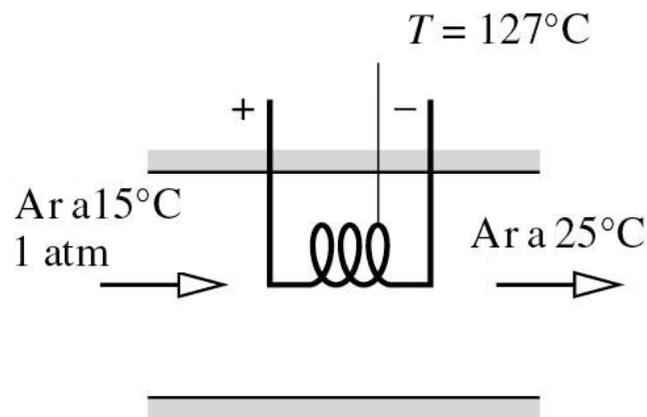


1) Na figura é mostrada uma resistência elétrica localizada em um duto isolado pelo qual escoa ar. Em regime permanente uma corrente elétrica passa através da resistência. Nessa condição a potência dissipada é igual a 6,75 kW e a temperatura da superfície da resistência é uniforme e igual a 127 °C. O ar entra no duto a 15 °C, 1 atm e sai a 25 °C, com perda de carga desprezível. Variações de energia cinética e potencial podem ser desprezadas.

a) considerando a resistência como o sistema, determine a taxa de geração de entropia.

b) para um volume de controle envolvendo o ar no duto e a resistência, determine a vazão volumétrica de ar entrando no duto e a taxa de geração de entropia.

c) Por que os valores de geração de entropia calculados nos itens (a) e (b) são diferentes?



(6.17 – Moran; Shapiro, 4ª ed)

a) Sistema é a resistência

Balanço de energia em RP, ΔE_c e ΔE_p desprezíveis:

$$\mathbf{Q = W_{elet} = - 6,75 \text{ kW}}$$

Balanço de entropia em RP:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_g$$

$$\Rightarrow \dot{S}_g = -\frac{\dot{Q}}{T} = \frac{6,75}{400} = 0,0169 \text{ kW} / \text{K}$$

b) Sistema = resistência + ar no duto

Balanço de energia em RP, ΔEc e ΔEp desprezíveis:

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \Rightarrow -\dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_e - h_s) = 0 \Rightarrow \dot{m} = \frac{-\dot{W}_{vc}}{h_s - h_e}$$

Considerando g.p. e c_p constante:
$$\dot{m} = \frac{-\dot{W}_{vc}}{\dot{m}(T_s - T_e)}$$

com $c_p = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ (298 K):
$$\dot{m} = \frac{-(-6,75)}{1,004(25 - 15)} = 0,672 \text{ kg} / \text{s}$$

$$\dot{V} = \dot{m}v_1 = \dot{m} \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,672 \text{ kg} / \text{s} \cdot 0,287 \text{ kJ} / (\text{kgK}) \cdot 288 \text{ K}}{101,325 \text{ kPa}} = 0,548 \text{ m}^3 / \text{s}$$

b) Sistema = resistência + ar no duto

Balanço de entropia em RP:

$$\dot{S}_g = \frac{dS_{vc}}{dt} - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{sai} \dot{m}_s s_s - \sum_{entra} \dot{m}_e s_e \quad \Rightarrow \quad \dot{S}_g = \dot{m} (s_s - s_e)$$

Considerando g.p. e c_p constante:

$$\dot{S}_g = \dot{m} \left(c_p \ln \frac{T_s}{T_s} - R \ln \frac{p_s}{p_e} \right)$$

$$\Rightarrow \dot{m} c_p \ln \frac{T_s}{T_s} = 0,672 \cdot 1,004 \cdot \ln \frac{298}{288} = 0,0231 \text{ kW} / K$$



c) Por que os valores de geração de entropia calculados nos itens (a) e (b) são diferentes?

(a) a entropia gerada diz respeito à irreversibilidade associada à passagem da corrente elétrica pelo resistor (efeito Joule).

(b) a entropia gerada também inclui a irreversibilidade oriunda da transferência de calor da resistência para o ar.

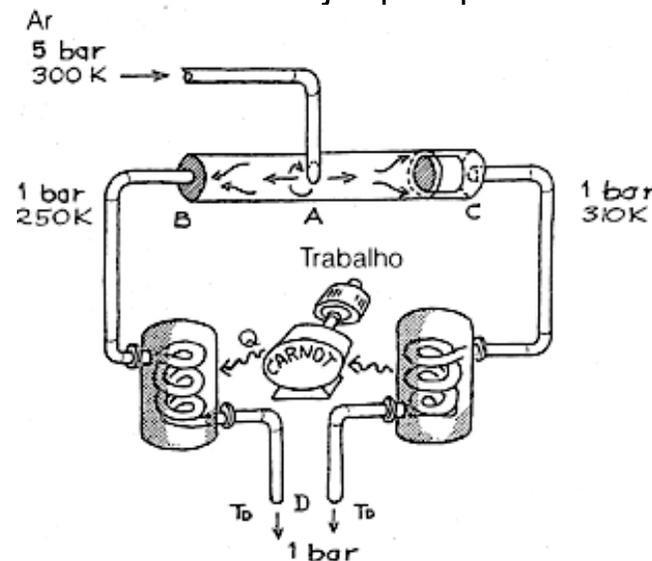
Exercícios

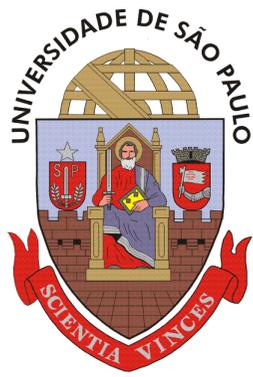


2) Um inventor diz ter desenvolvido um dispositivo extraordinário que ele chamou de tubo de vórtice. Em primeira análise trata-se de um tubo que deve ser alimentado em A com ar comprimido a 5 bar e 300K e que produz ar em diferentes estados em suas duas saídas, B e C . Não se sabe o que acontece no interior do dispositivo, apenas que ele produz duas correntes de ar, ambas a 1 bar, mas com temperaturas diferentes em B e C , 250 K e 310 K, respectivamente. Considere que não há transferência de calor entre o tubo e o ambiente.

(a) O dispositivo apresentado pode, em tese, funcionar? Considere uma vazão de entrada de 30 g/s de ar.

(b) Outro engenheiro sugere aproveitar a diferença de temperatura usando um motor térmico para realizar trabalho. Cabe a você a tarefa de calcular o máximo trabalho que pode ser realizado. Considere o arranjo proposto na figura.





Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

10) Ciclos motores a vapor

Por que estudar ciclos?



Pergunta: Quanto custa operar uma usina termelétrica de 1000 MW de potência elétrica, queimando combustível fóssil, operando segundo um Ciclo de Rankine com eficiência de 35%, funcionando 24 h / dia, 365 dias / ano, se o custo do combustível é de US\$ 2 por Milhão de BTU?

Resposta:

US\$ 468.000 / dia

US\$ 170.820.000 / ano



Pergunta: Se você pudesse melhorar a eficiência desta usina termelétrica de 1000 MW de 35% para 36%, qual seria um preço razoável para este serviço de engenharia?

Resposta:

US\$ 13.000 / dia

US\$ 4.745.000 / ano



- *Ciclo de Potência a Vapor = Ciclo de Rankine;
- *O Ciclo de Rankine é o ciclo mais utilizado no mundo para produzir eletricidade;
- *O Ciclo de Rankine pode funcionar com diversos tipos de combustíveis (óleo, gás, biomassa, carvão mineral, combustível nuclear, etc.).
- *O fluido de trabalho convencional do Ciclo de Rankine é a água.

Algumas imagens...



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

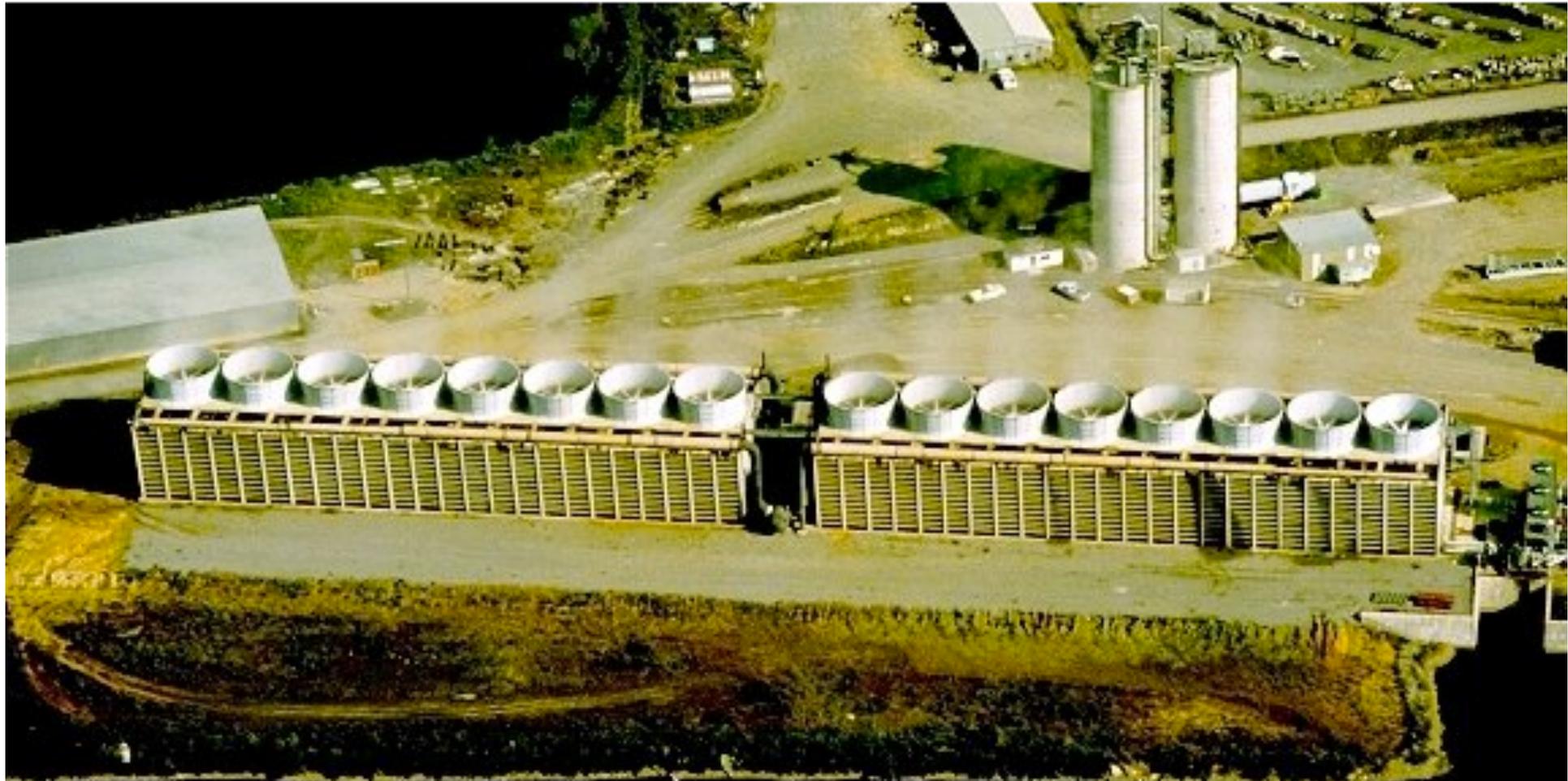


Central termoeleétrica a carvão

Algumas imagens...

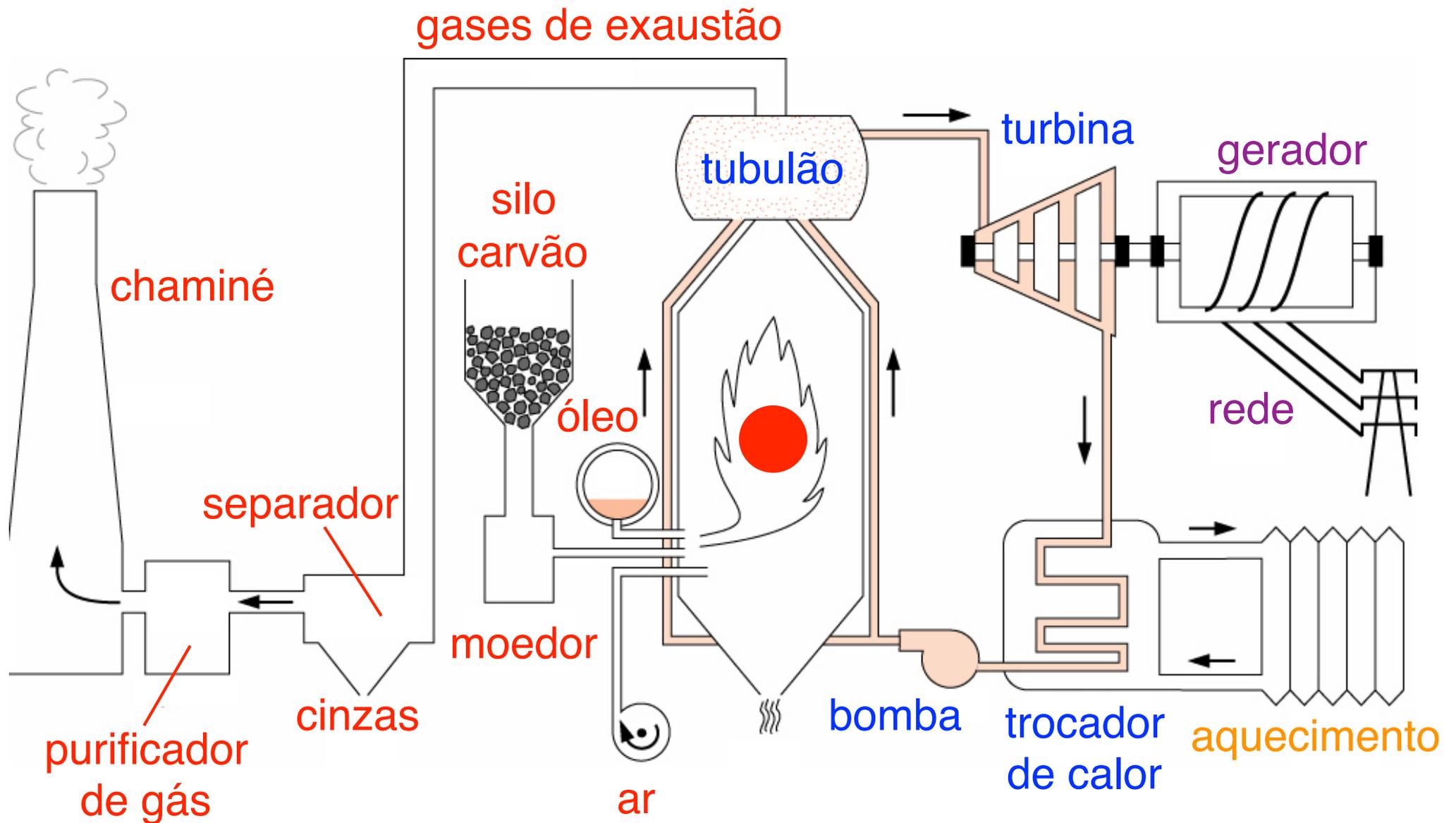


Tubulão de vapor



Torres de resfriamento

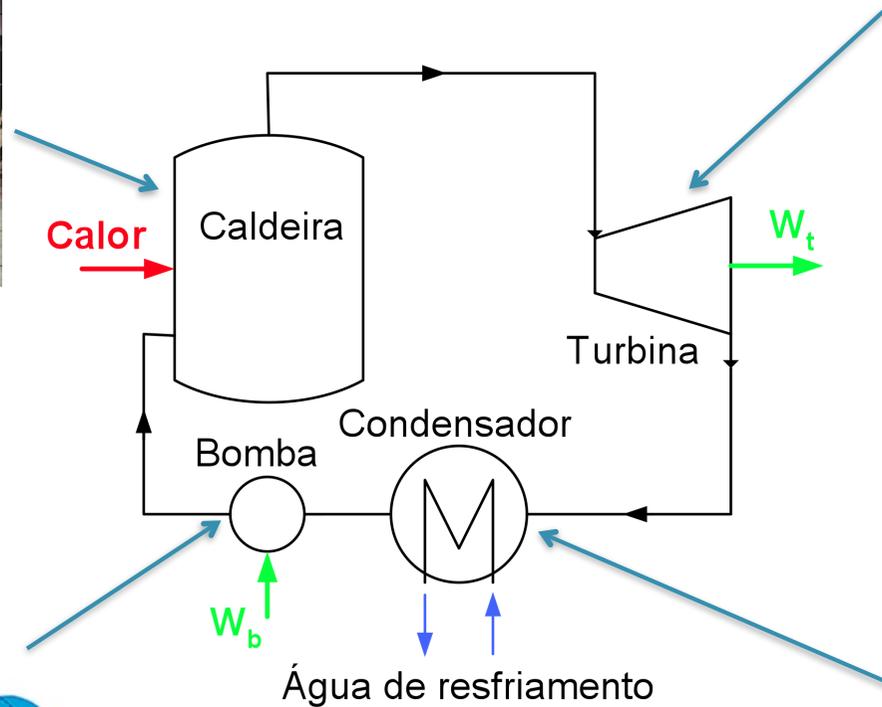
Central termoelétrica a carvão



Ciclo de potência a vapor



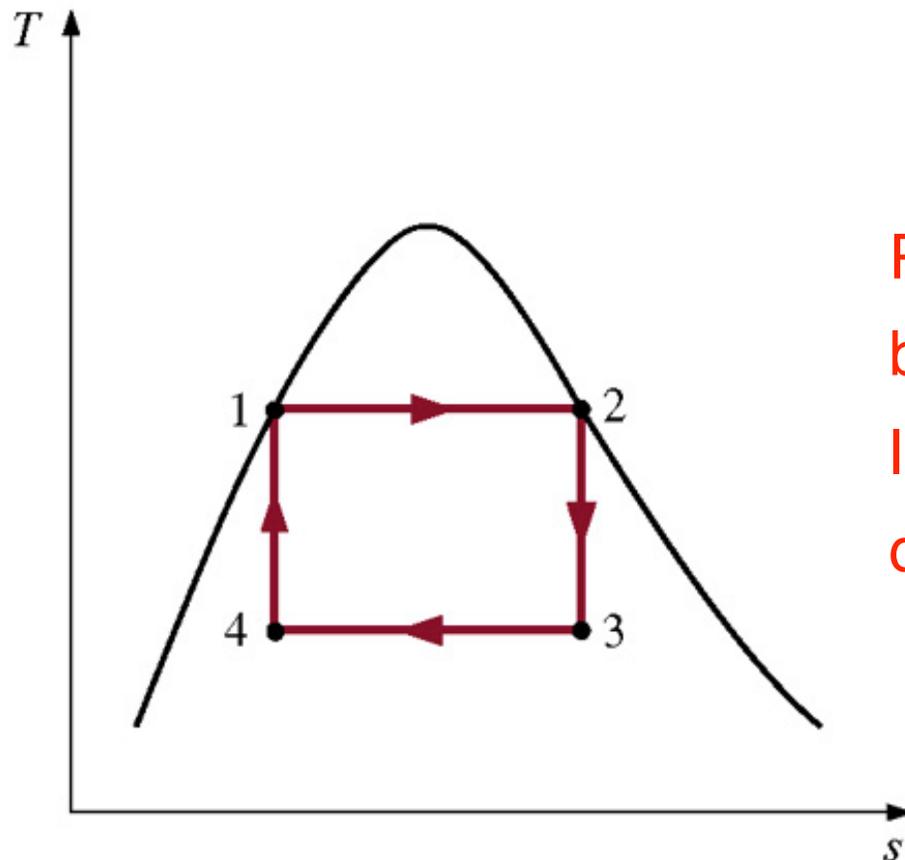
Fluido de trabalho: água



Por que não usar Carnot?



Observe:

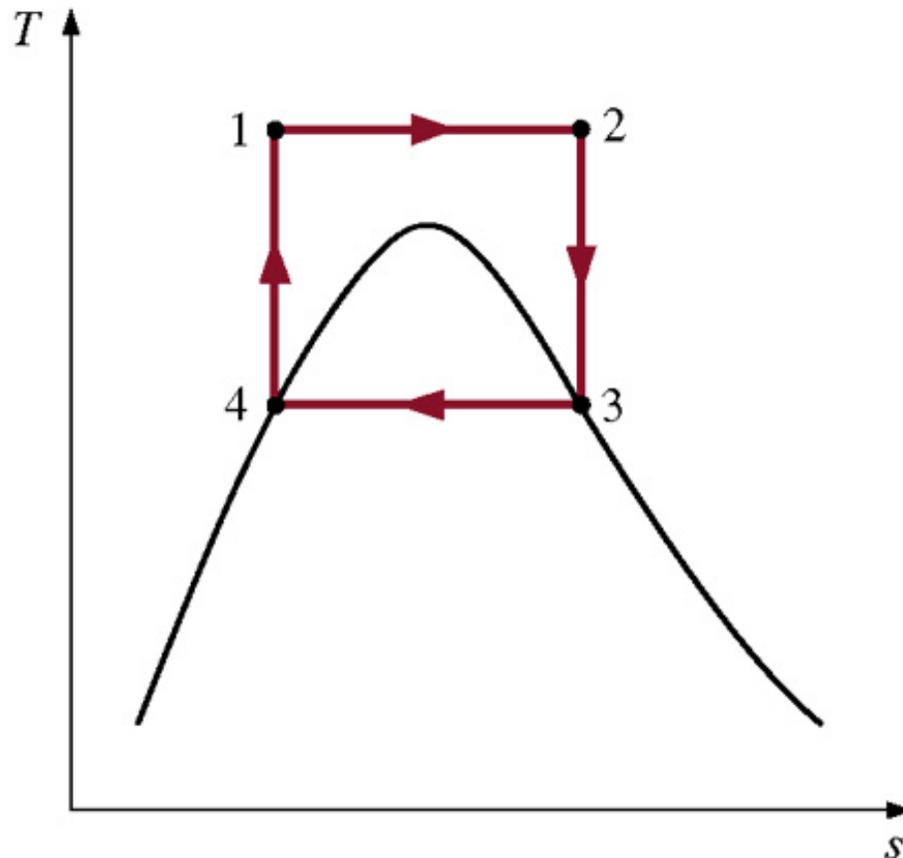


Para o ciclo, o processo 4-1 envolve o bombeamento de uma mistura de líquido e vapor saturados que deve sair da bomba como líquido saturado.

Por que não usar Carnot?



Observe:



Para o ciclo, a temperatura T_{1-2} deve ser mantida constante durante o processo de aquecimento, o que exige um sistema de controle elaborado.

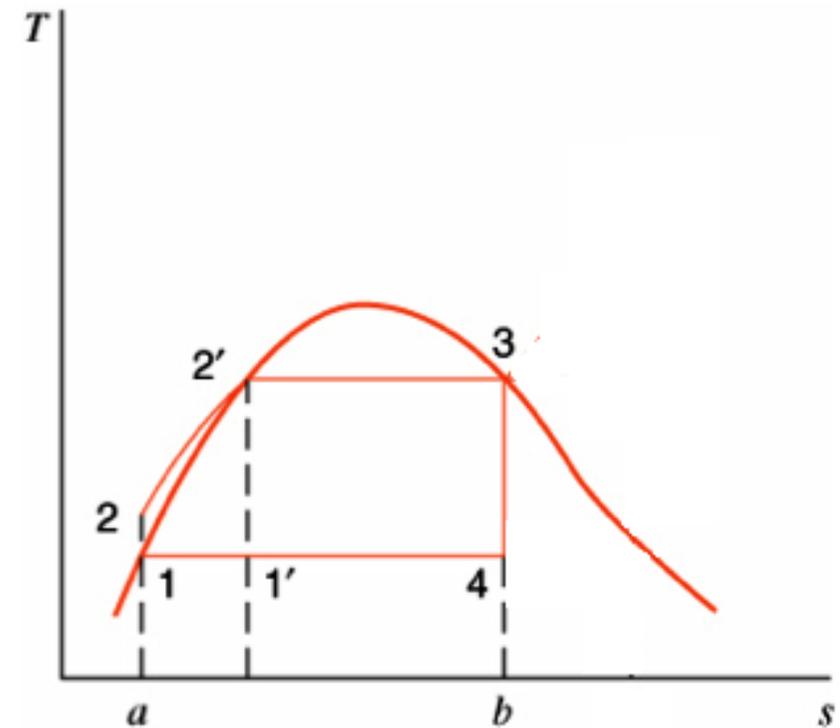
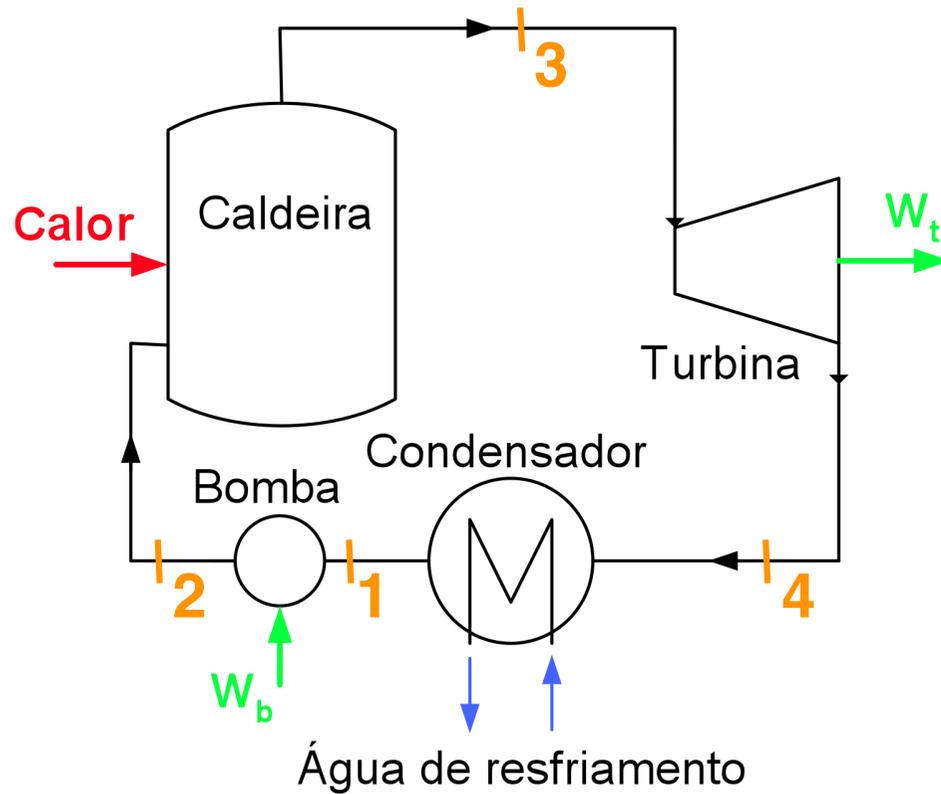
O Ciclo de Carnot não é um modelo adequado para ciclos a vapor pois não pode ser realizado na prática!

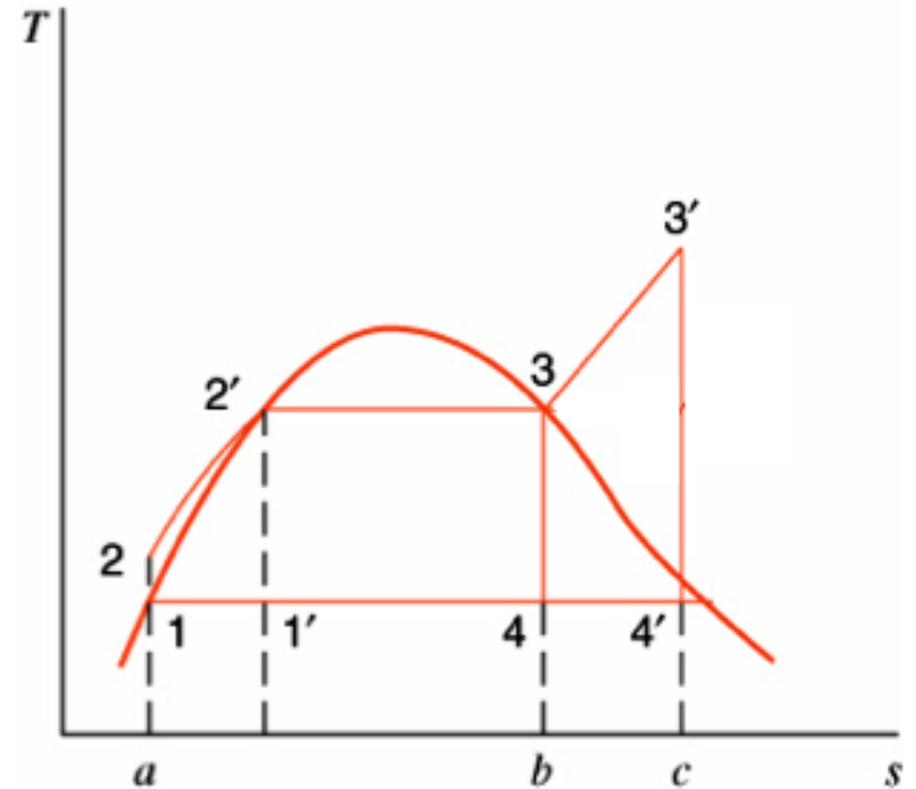
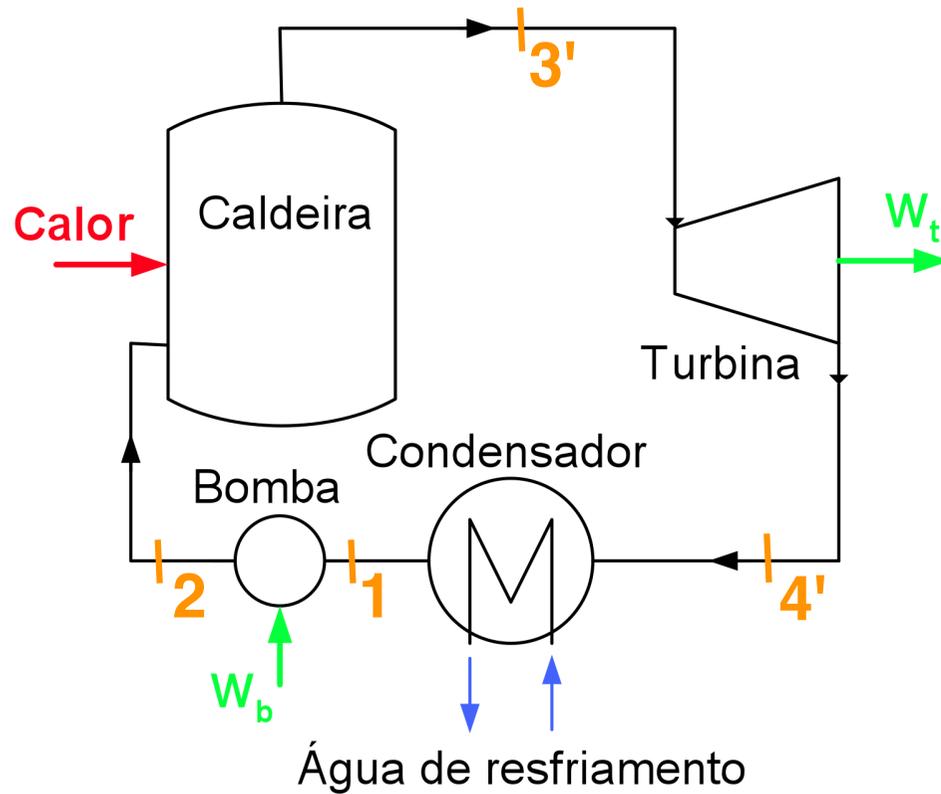


O ciclo de potência a vapor ideal é o Ciclo de Rankine, que é composto por quatro processos reversíveis:

- Compressão isentrópica (bomba);
- Fornecimento de calor a pressão constante (gerador de vapor);
- Expansão isentrópica (turbina);
- Rejeição de calor a pressão constante (condensador).

Ciclo Rankine ideal

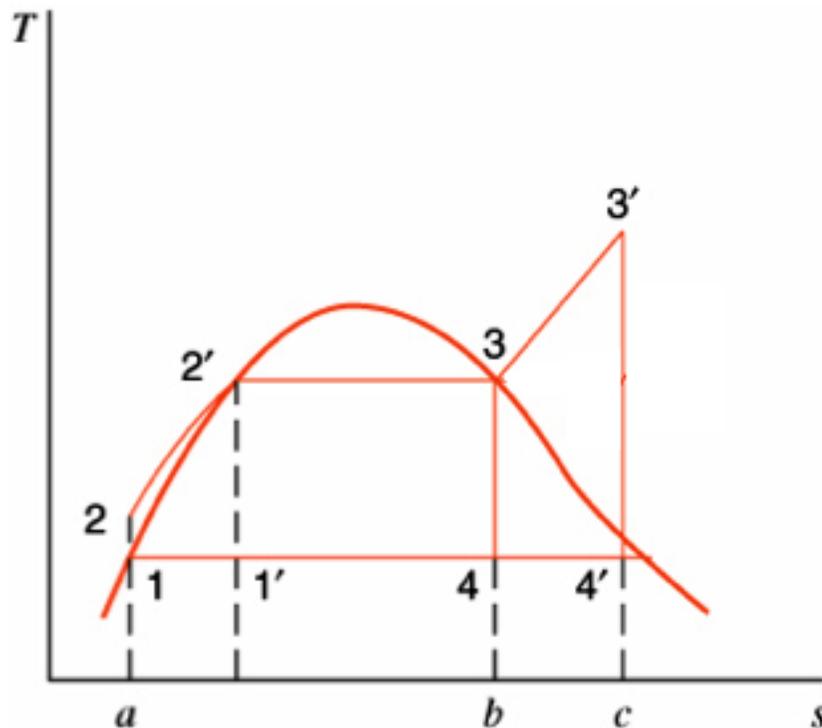




Rankine - exemplos



1) Comparar os rendimentos térmicos e os títulos na saída de dois ciclos de Rankine, que operem entre 4 MPa e 7,5kPa, sendo um sem superaquecimento, e outro com 250°C de superaquecimento.



s/ superaquecimento:

1-2-2'-3-4-1

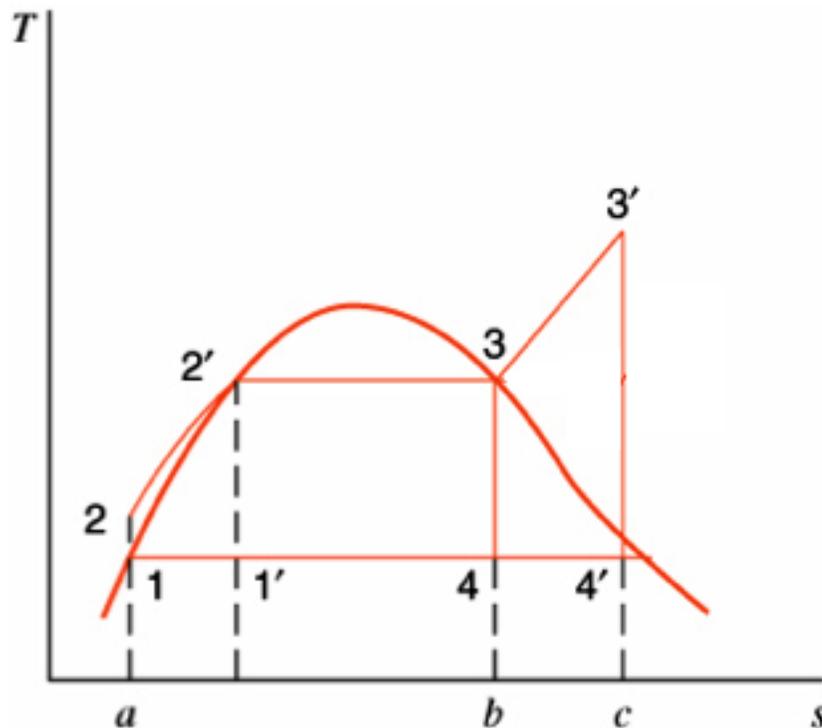
c/ superaquecimento:

1-2-2'-3-3'-4'-1

Rankine - exemplos



1) Comparar os rendimentos térmicos e os títulos na saída de dois ciclos de Rankine, que operem entre 4 MPa e 7,5kPa, sendo um sem superaquecimento, e outro com 250°C de superaquecimento.



s/ superaquecimento:

1-2-2'-3-4-1

c/ superaquecimento:

1-2-2'-3-3'-4'-1

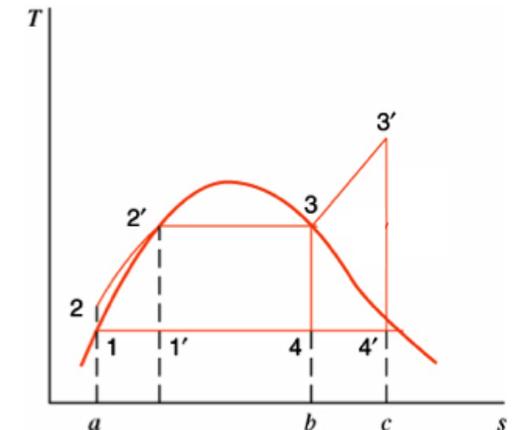


Estado 3: vapor saturado

Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
MPa	°C	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
4,00	250,40	0,001252	0,049778	1082,28	2602,3	1087,29	2801,4	2,7963	6,0700

Estado 4: mistura - processo isentrópico

$$s_3 = s_4 = 6,0700 \text{ kJ / kgK}$$



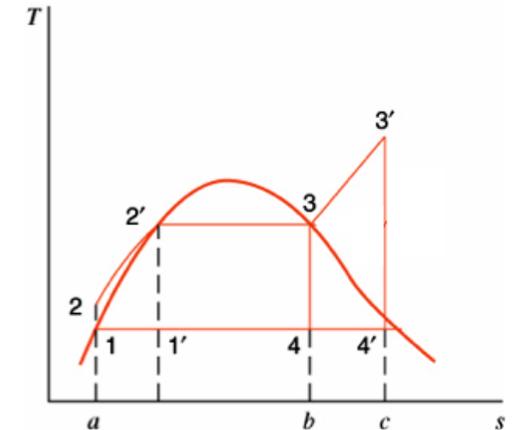
Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
kPa	°C	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514

$$s_4 = (1 - x_4)s_l + x_4s_v \Rightarrow x_4 = 0,716 \Rightarrow h_4 = 1891 \text{ kJ / kg}$$



Estado 3': vapor superaquecido

$$T_{3'} = T_3 + 250^{\circ}C = 500,4^{\circ}C$$



Estado 4': mistura - processo isentrópico

$$s_{3'} = s_{4'} = 7,0900 \text{ kJ / kgK}$$

		Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
Pressão	Temp.	m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
kPa	°C	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514

$$s_{4'} = (1 - x_{4'})s_l + x_{4'}s_v \Rightarrow x_{4'} = 0,849 \Rightarrow h_{4'} = 2211 \text{ kJ / kg}$$



Vale a pena agrupar os dados em uma tabela...

Estado	P / kPa	T / °C	v / (m ³ /kg)	h / (kJ/kg)	s / (kJ/kg K)	x
1	7,5	40,29	0,001008	168,77	-----	0
2	4000	-----	-----	172,8	-----	-----
3	4000	250,4	-----	2801,4	6,0700	1
3'	4000	500,4	-----	3445,21	7,0900	-----
4	7,5	40,29	-----	1891	6,0700	0,716
4'	7,5	40,29	-----	2211	7,0900	0,848

$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = 0,344$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 910 \text{ kJ/kg}$$

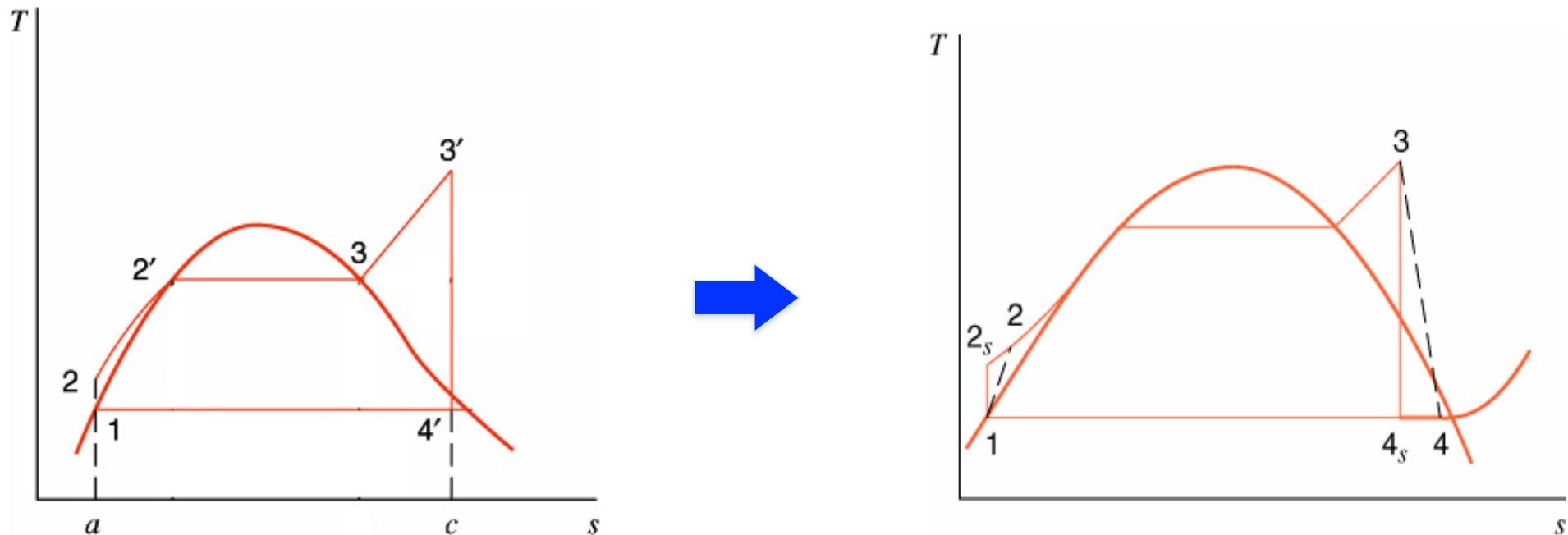
$$\eta' = \frac{h_{3'} - h_{4'} + h_1 - h_2}{h_{3'} - h_2} = 0,376$$

$$w_t = h_{3'} - h_{4'} = 1234 \text{ kJ/kg}$$

Rankine - exemplos



2) No ciclo Rankine anterior, com superaquecimento, admita que os rendimentos isentrópicos da turbina e da bomba sejam de 90 % e 85 %, respectivamente. Qual o novo rendimento térmico?





Estado 2: líquido comprimido

$$\eta_b = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} \Rightarrow h_1 - h_2 = \frac{h_1 - h_{2s}}{\eta_b} = \frac{-4,02}{0,85} = -4,73 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 173,5 \text{ kJ/kg}$$

Estado 4': mistura (?)

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \Rightarrow h_3 - h_4 = \eta_t \cdot (h_3 - h_{4s}) = 0,9 \cdot (3445,21 - 2211) = 1111 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 2334 \text{ kJ/kg} \Rightarrow x_4 = 0,900$$

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg		Entropia kJ/(kg.K)	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514



Novo rendimento

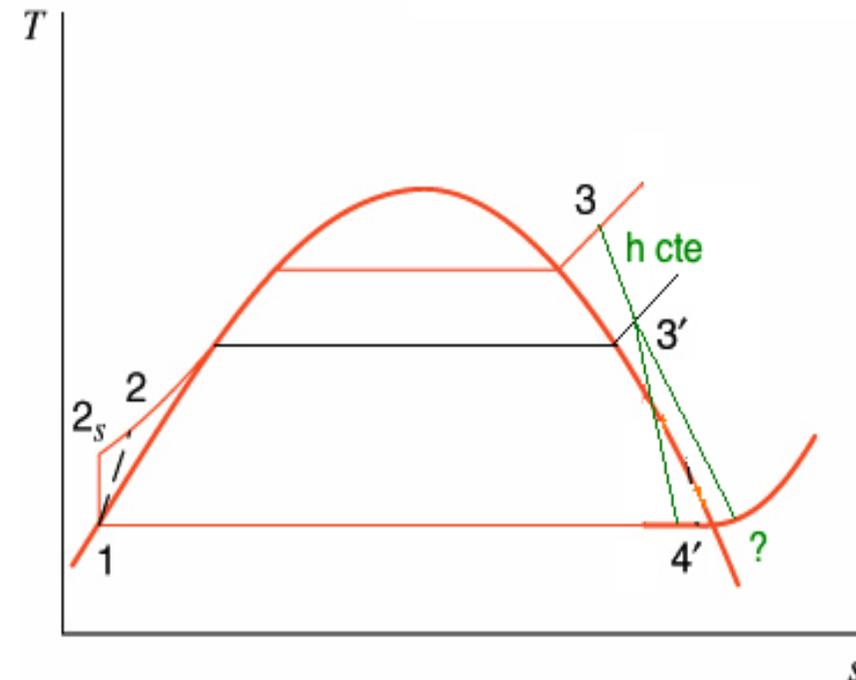
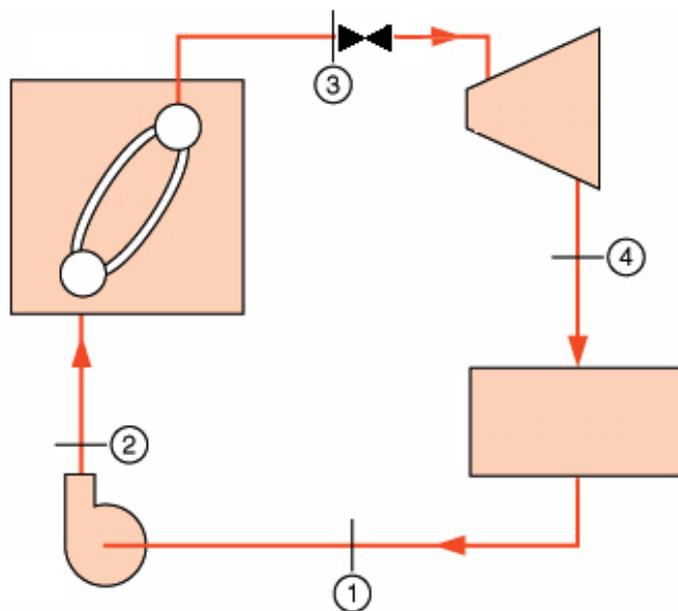
$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{1111 - 4,73}{3445,21 - 173,5} = 0,338$$

Compare com o anterior de 0,376.

Rankine - exemplos



3) No ciclo anterior, para qual pressão deve o vapor ser estrangulado em uma válvula garganta antes da turbina, para operar em carga parcial de 80% da potência anterior? Admita a mesma vazão no novo ciclo, proporcionada pelo sistema de controle da planta.



$$h_3 = 3445,21 \text{ kJ/kg}$$

- Potência anterior e trabalho específico

$$\dot{W} = \dot{m}(h_3 - h_4) \Rightarrow \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = 1111 \text{ kJ/kg}$$

- Nova potência e trabalho específico (mesma vazão)

$$\dot{W}' = 0,8 \cdot \dot{W} \Rightarrow \frac{\dot{W}'}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}(h_{3'} - h_{4'})}{\dot{m}(h_3 - h_4)} = \frac{h_{3'} - h_{4'}}{h_3 - h_4} = 0,8$$

$$\Rightarrow h_{3'} - h_{4'} = 889 \text{ kJ/kg}$$

- Para o mesmo rendimento isentrópico da turbina

$$\eta_t = \frac{h_{3'} - h_{4'}}{h_{3'} - h_{4s}} \Rightarrow h_{4s} = h_{3'} - \frac{h_{3'} - h_{4'}}{\eta_t} = 2457 \text{ kJ/kg}$$



Estado 4's: mistura

$$h_{4s} = 2457 \text{ kJ / kg}$$

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico m ³ / kg		Energia interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg		Entropia kJ / (kg.K)	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514

$$\Rightarrow x_{4s} = 0,951 \Rightarrow s_{4s} = 7,88 \text{ kJ / kgK}$$

Estado 3': vapor superaquecido

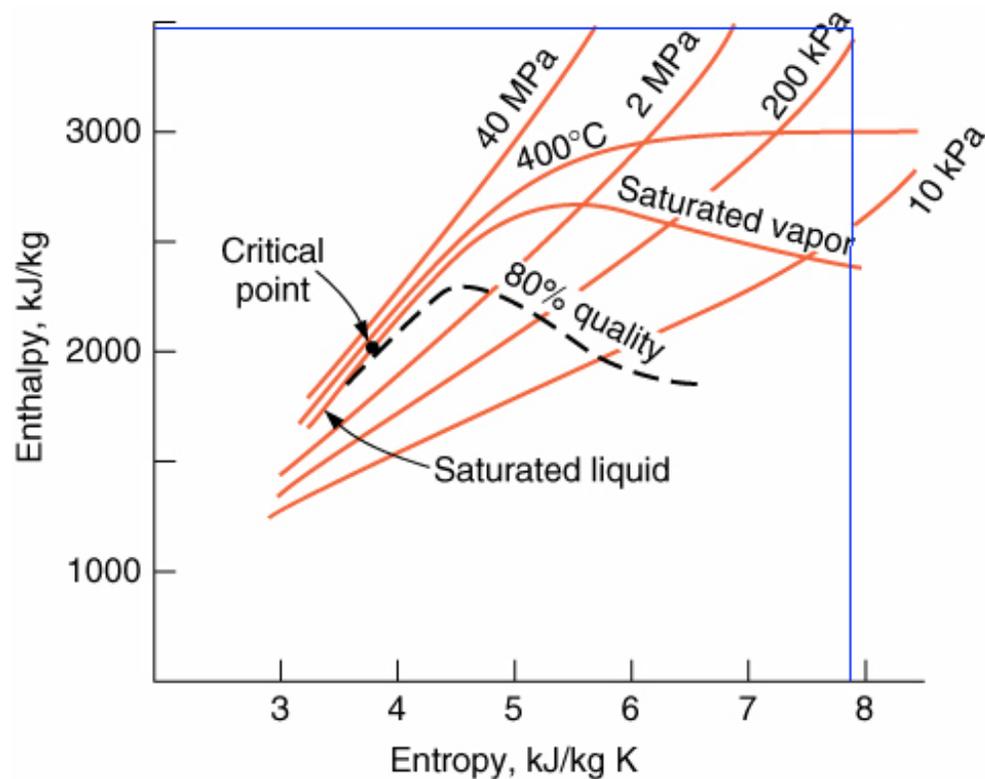
$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ / kgK}$$

$$h_{3'} = h_3 = 3445,21 \text{ kJ / kg}$$



Estado 3': vapor superaquecido

$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ/kgK} \quad h_{3'} = h_3 = 3445,21 \text{ kJ/kg}$$



$$400 \text{ }^\circ\text{C} < T < 500 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$200 \text{ kPa} < P < 2 \text{ MPa}$$



Estado 3': vapor superaquecido

	$P = 600 \text{ kPa (158,85 } ^\circ\text{C)}$				$P = 800 \text{ kPa (170,43 } ^\circ\text{C)}$			
$T (^\circ\text{C})$	v	u	h	s	v	u	h	s
400	0,51372	2962,0	3270,2	7,7078	0,38426	2959,7	3267,1	7,5715
500	0,59199	3127,6	3482,7	8,0020	0,44331	3125,9	3480,6	7,8672

Inteporlação para
determinar T

Inteporlação para determinar P

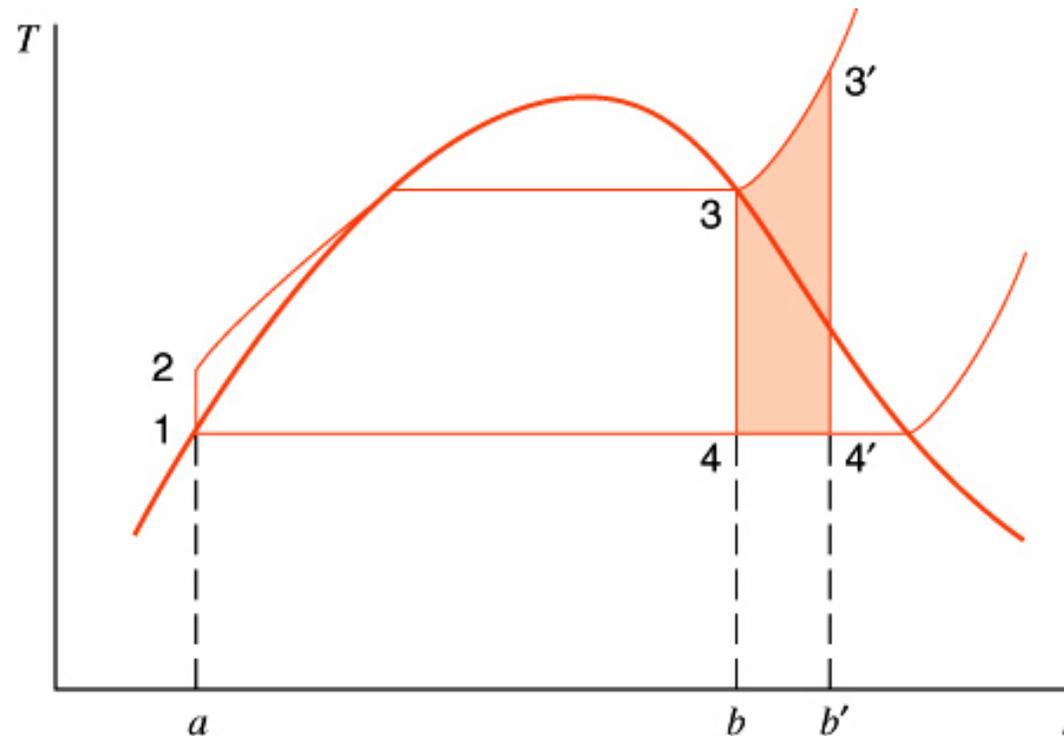
Chegamos em $T = 482 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $P = 700 \text{ kPa}$

Software $T = 482,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $P = 705 \text{ kPa}$

Resposta $P = 700 \text{ kPa}$

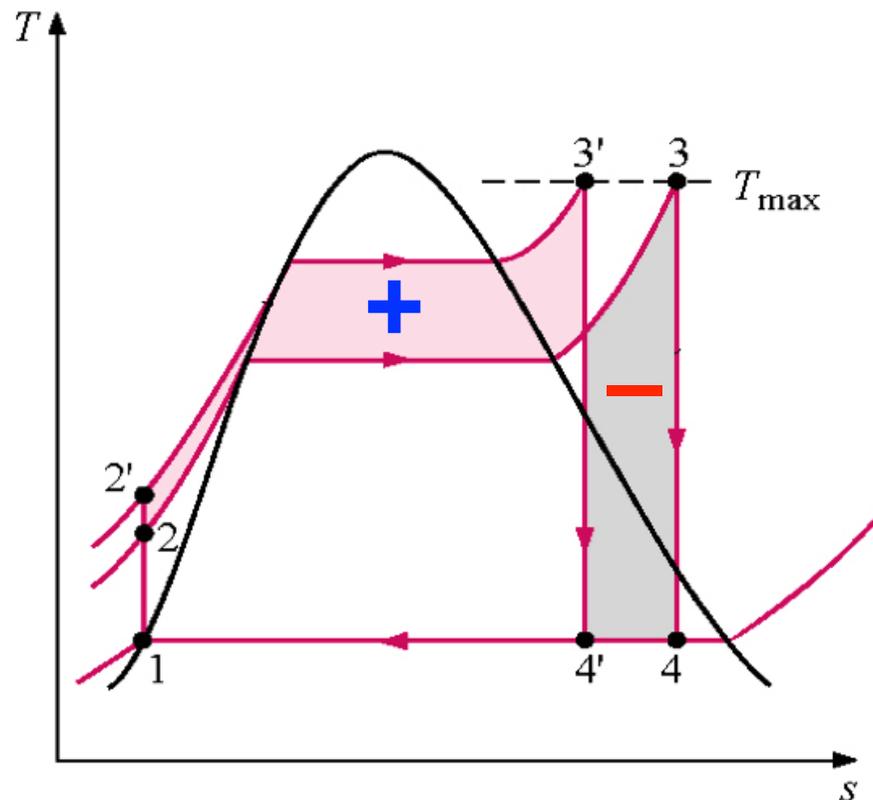
★ Superaquecimento do vapor:

- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Menor umidade na saída da turbina.

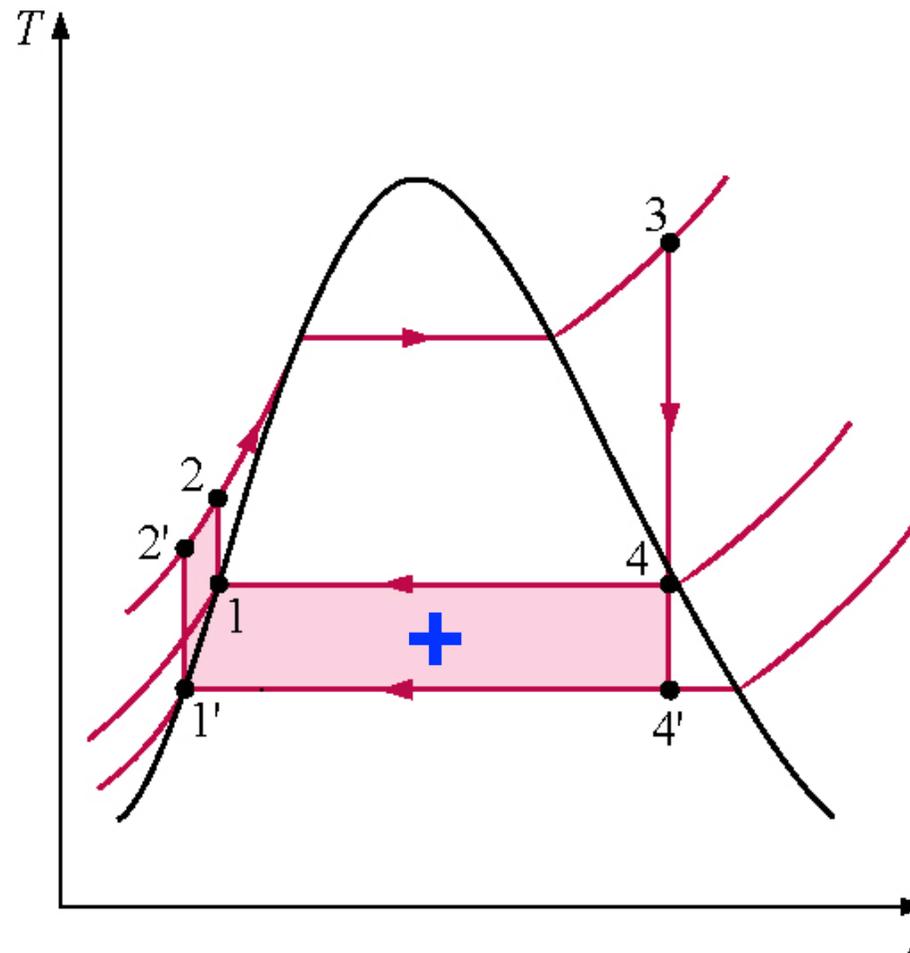


★ Aumento da pressão do gerador de vapor

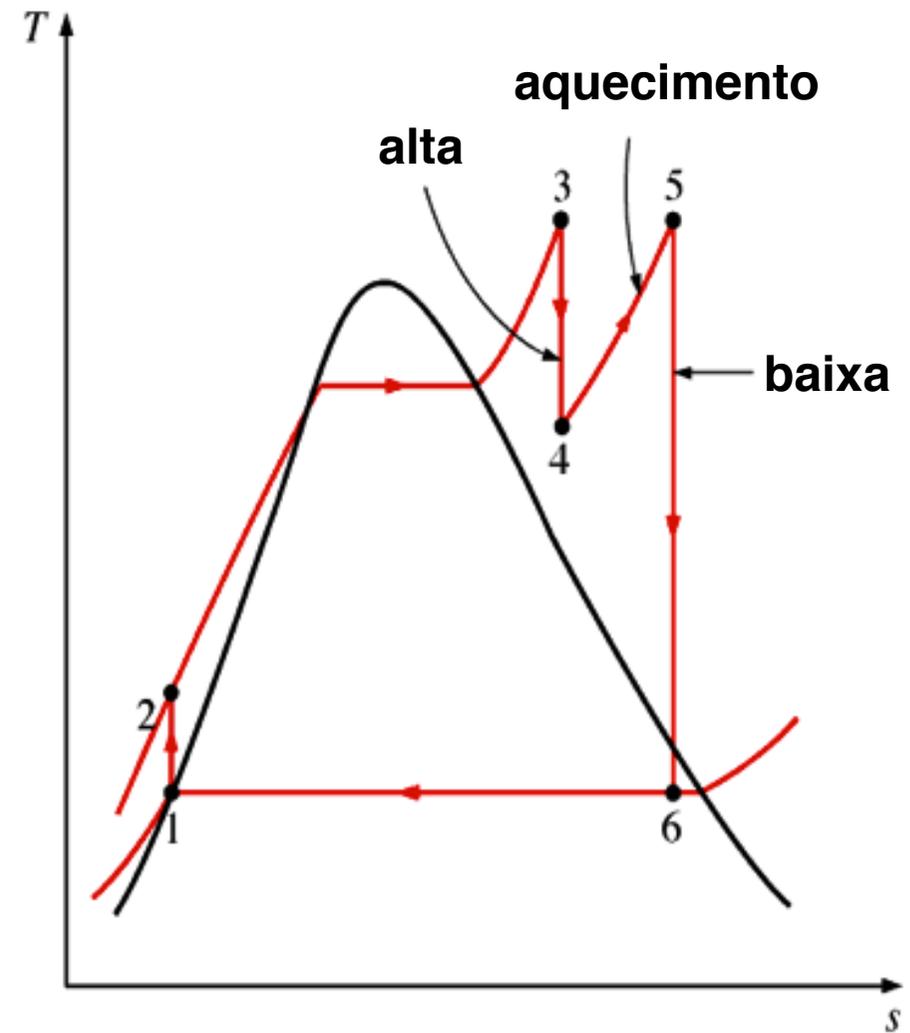
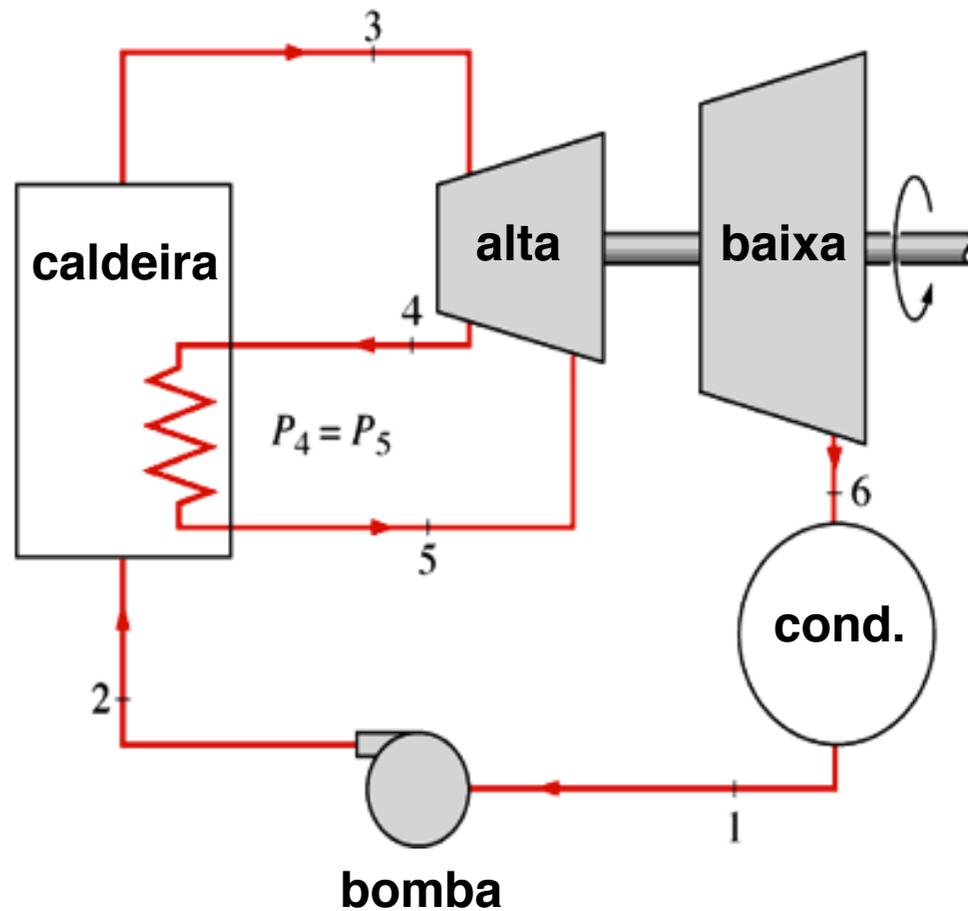
- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Maior umidade na saída da turbina.



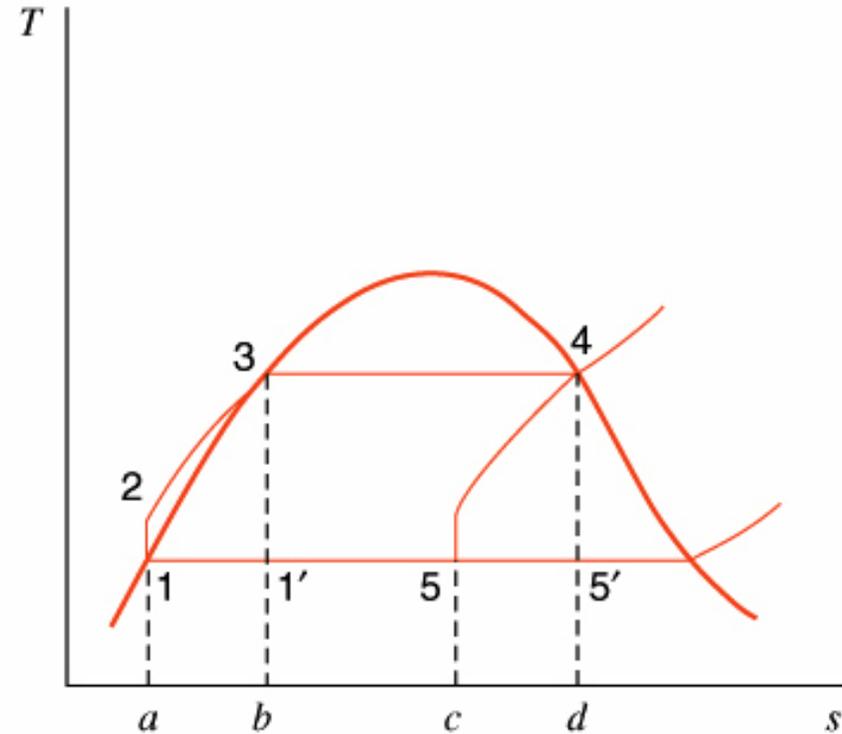
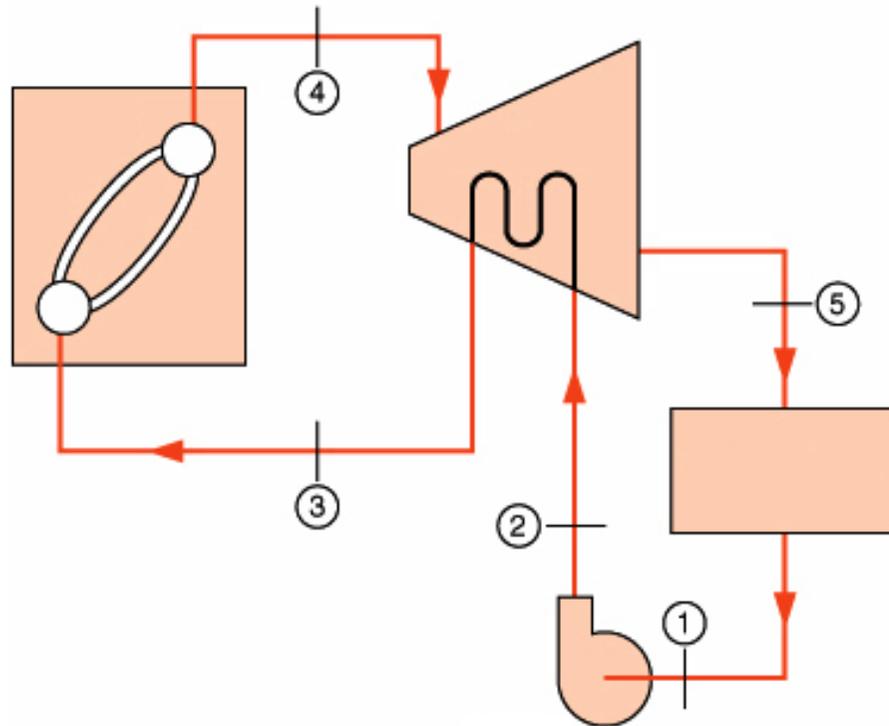
- ★ Diminuição da pressão no condensador
 - Menor perda de calor para o ambiente;
 - Maior umidade na saída da turbina.



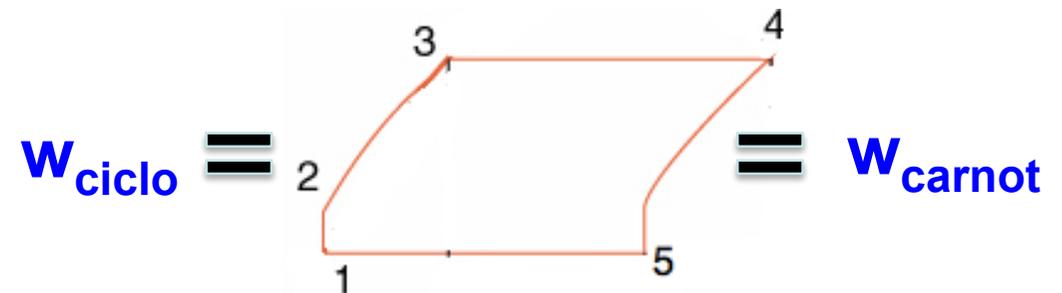
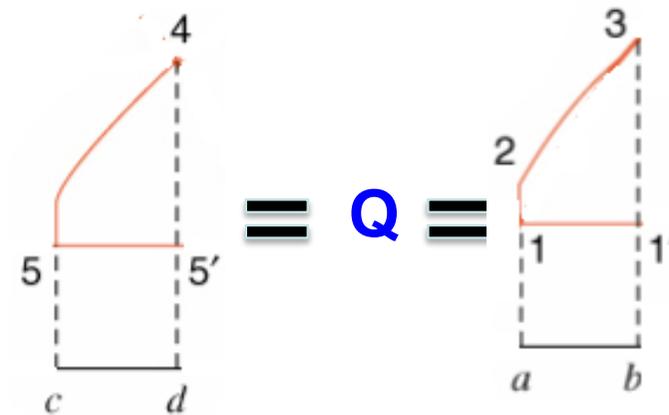
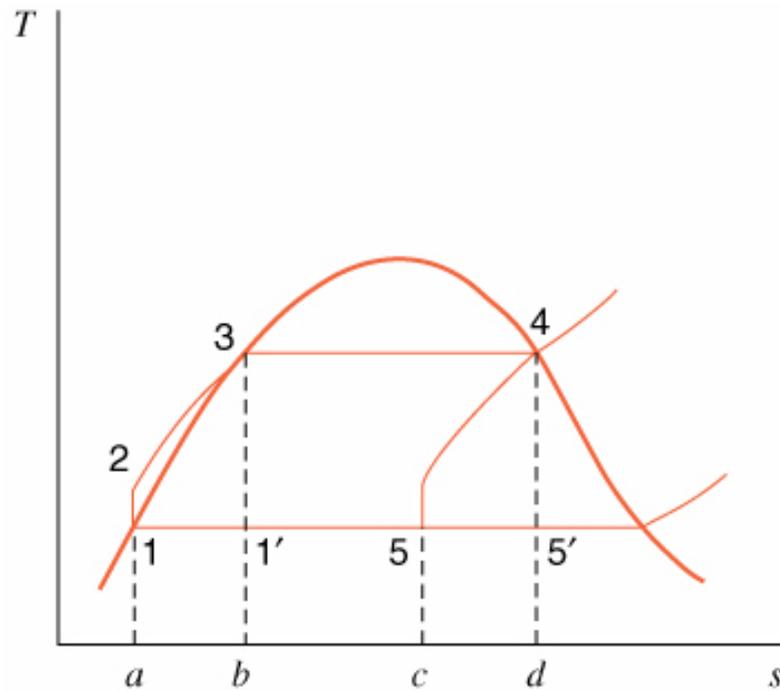
Rankine com reaquecimento



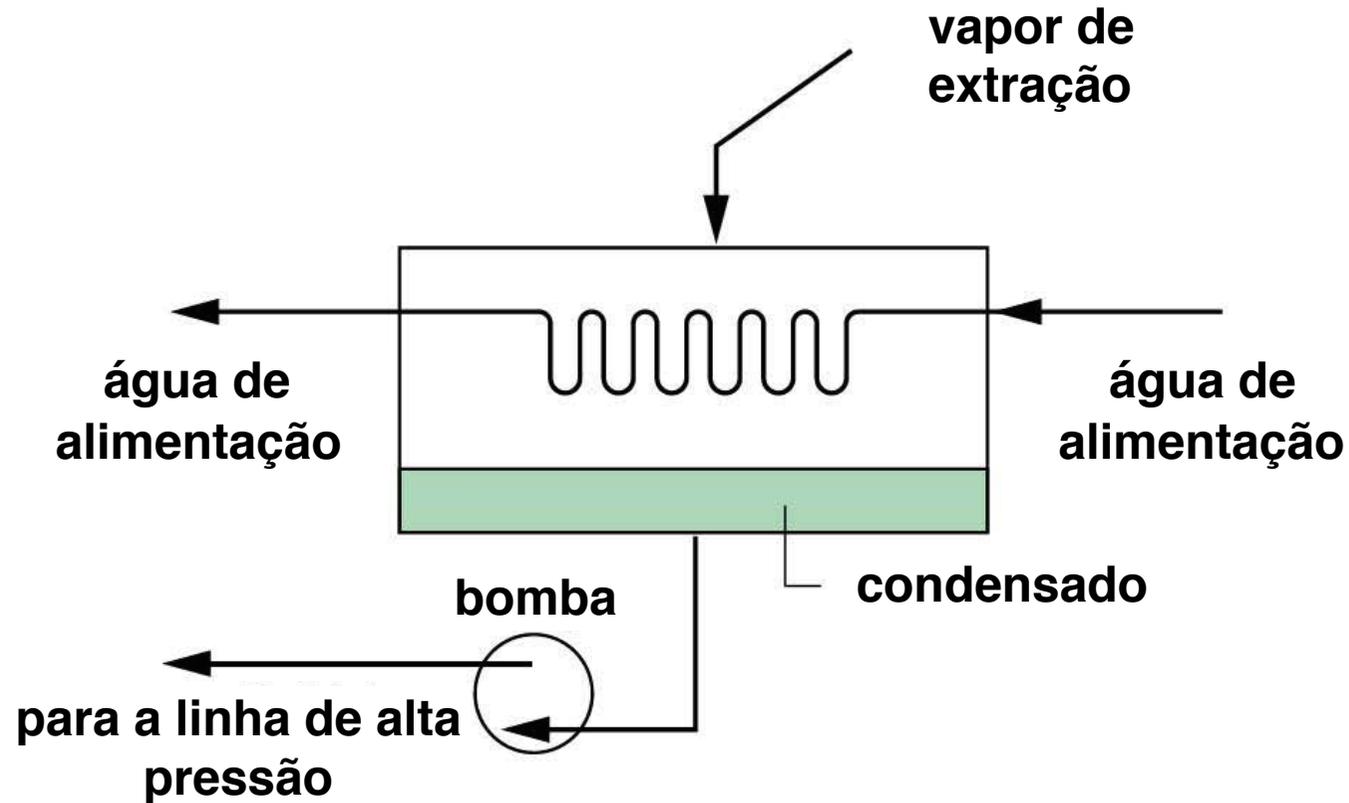
Rankine regenerativo



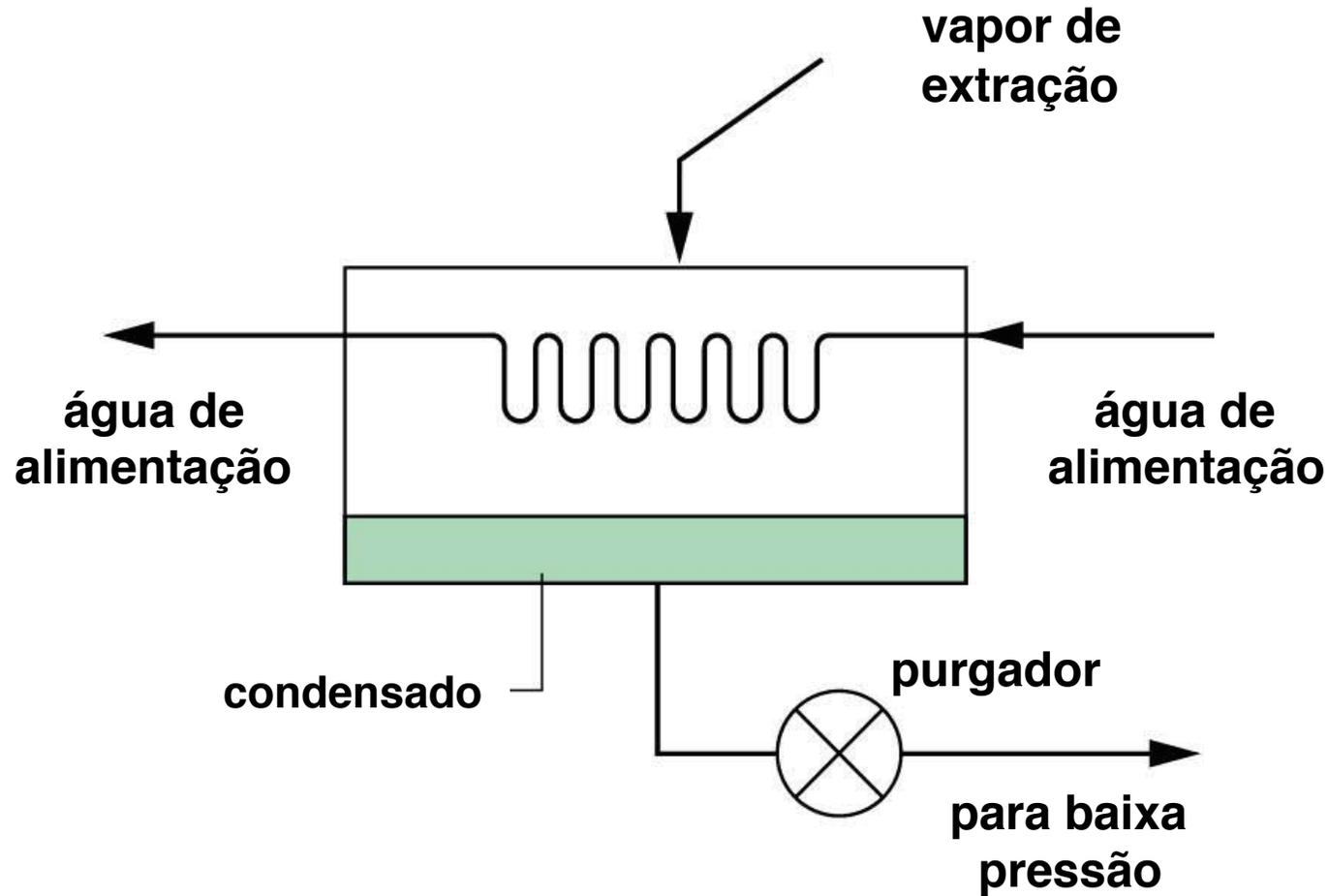
Rankine regenerativo



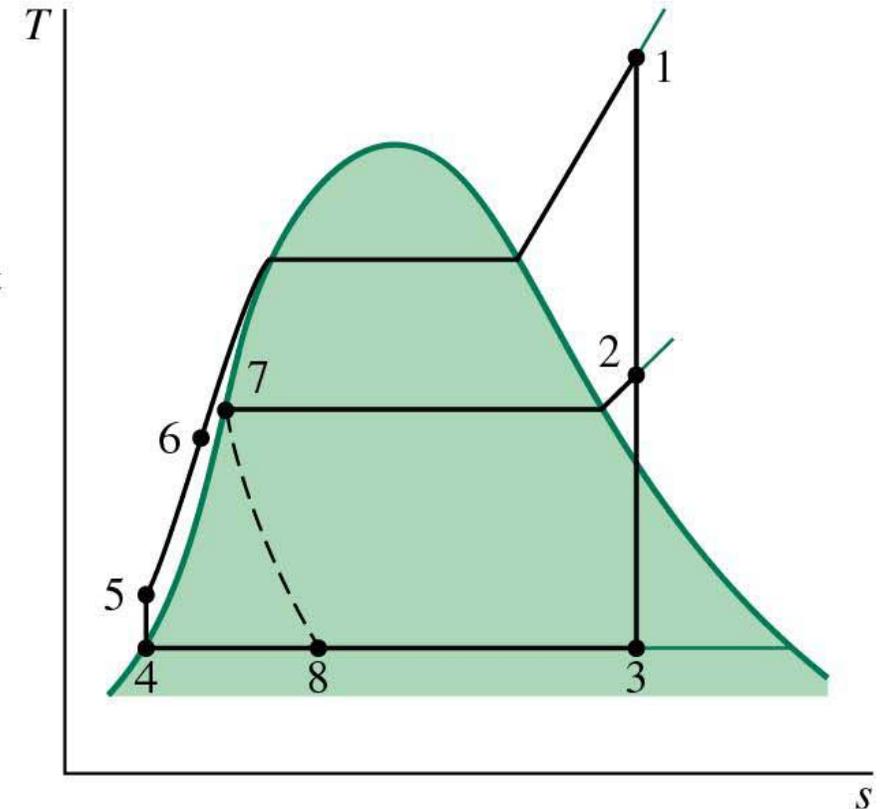
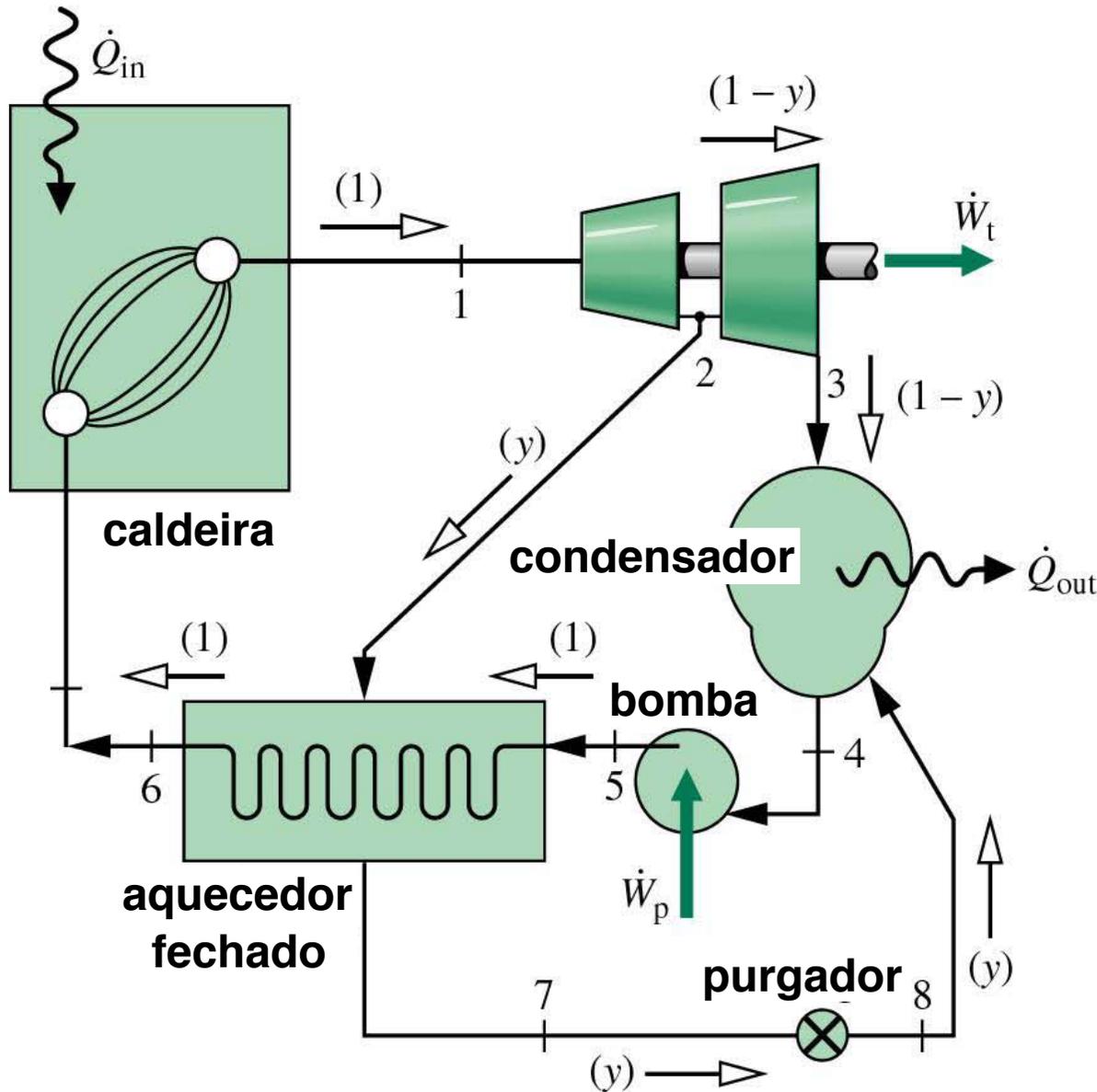
1º arranjo



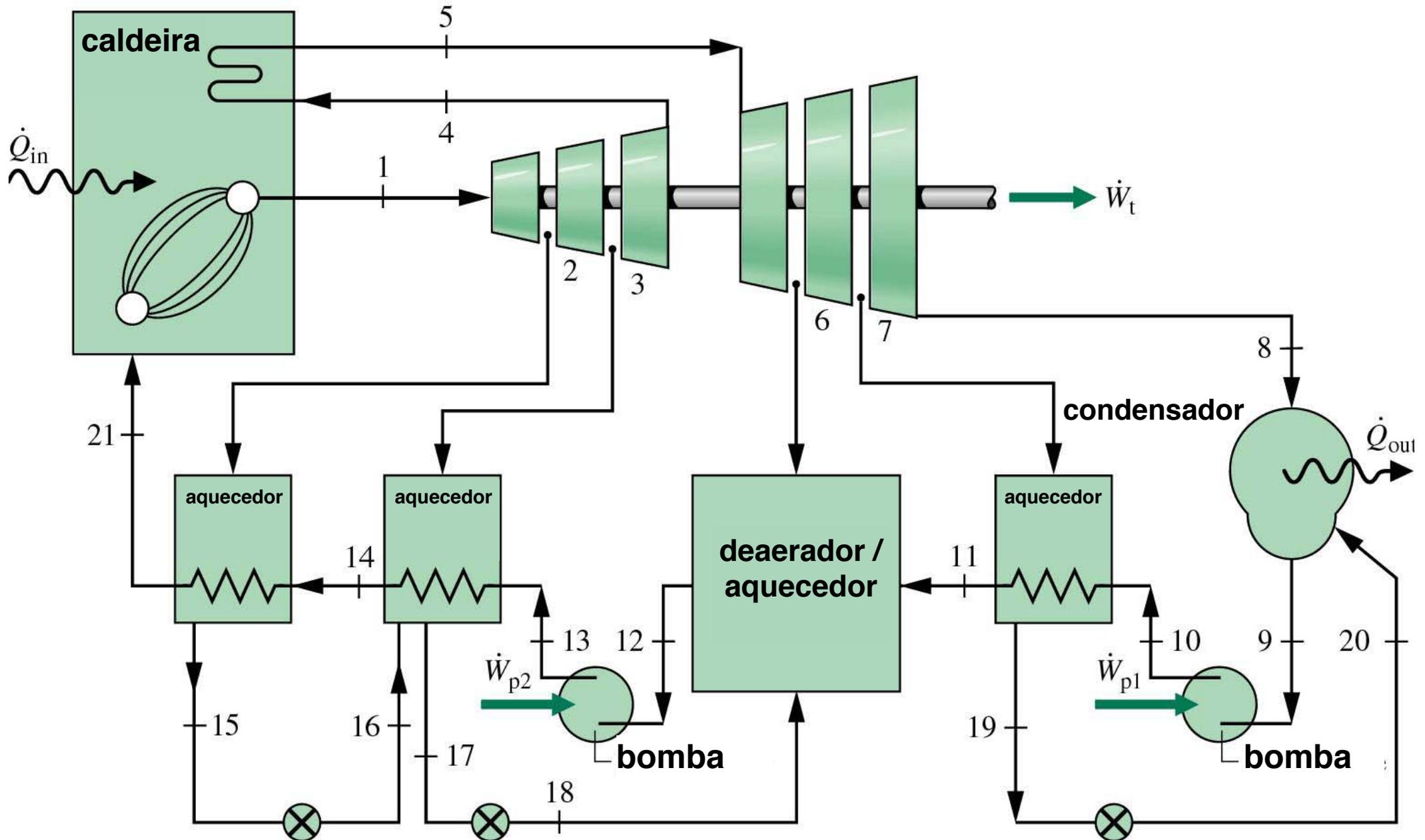
2º arranjo



Regenerativo c/ aquecedor de passagem



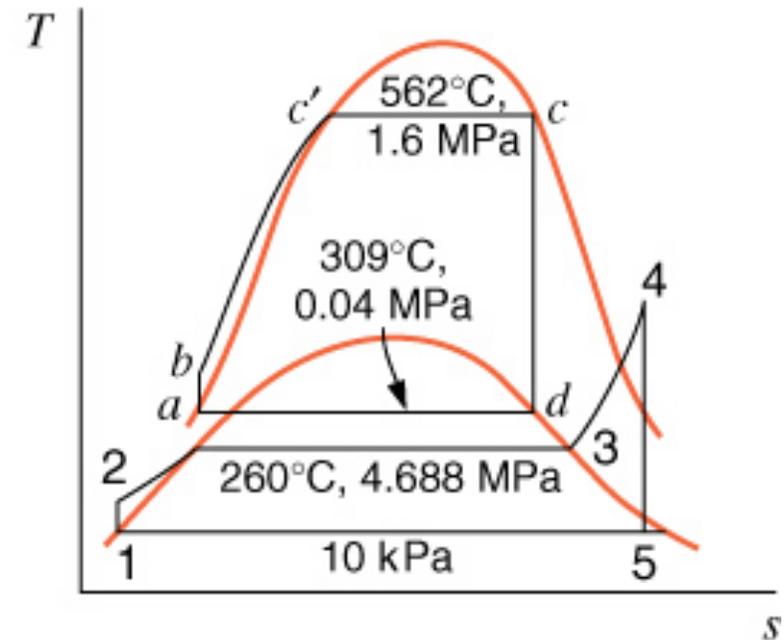
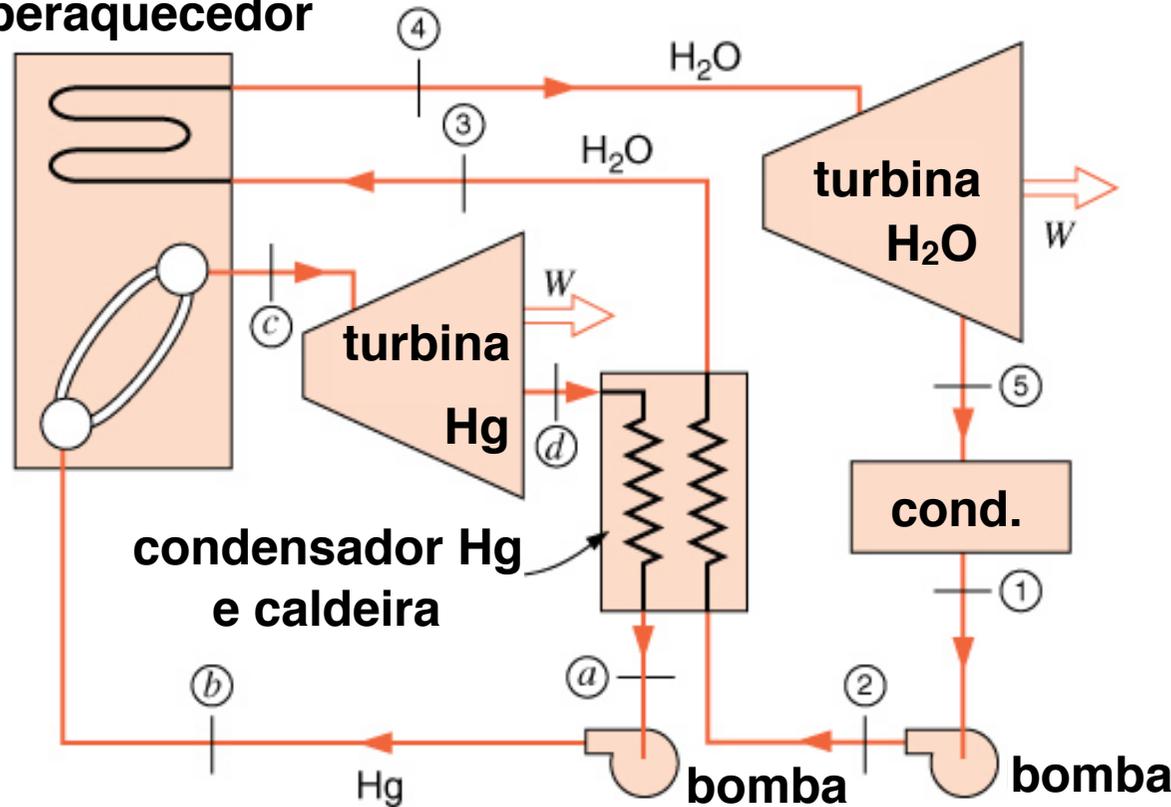
Regenerativo c/ reaquecimento

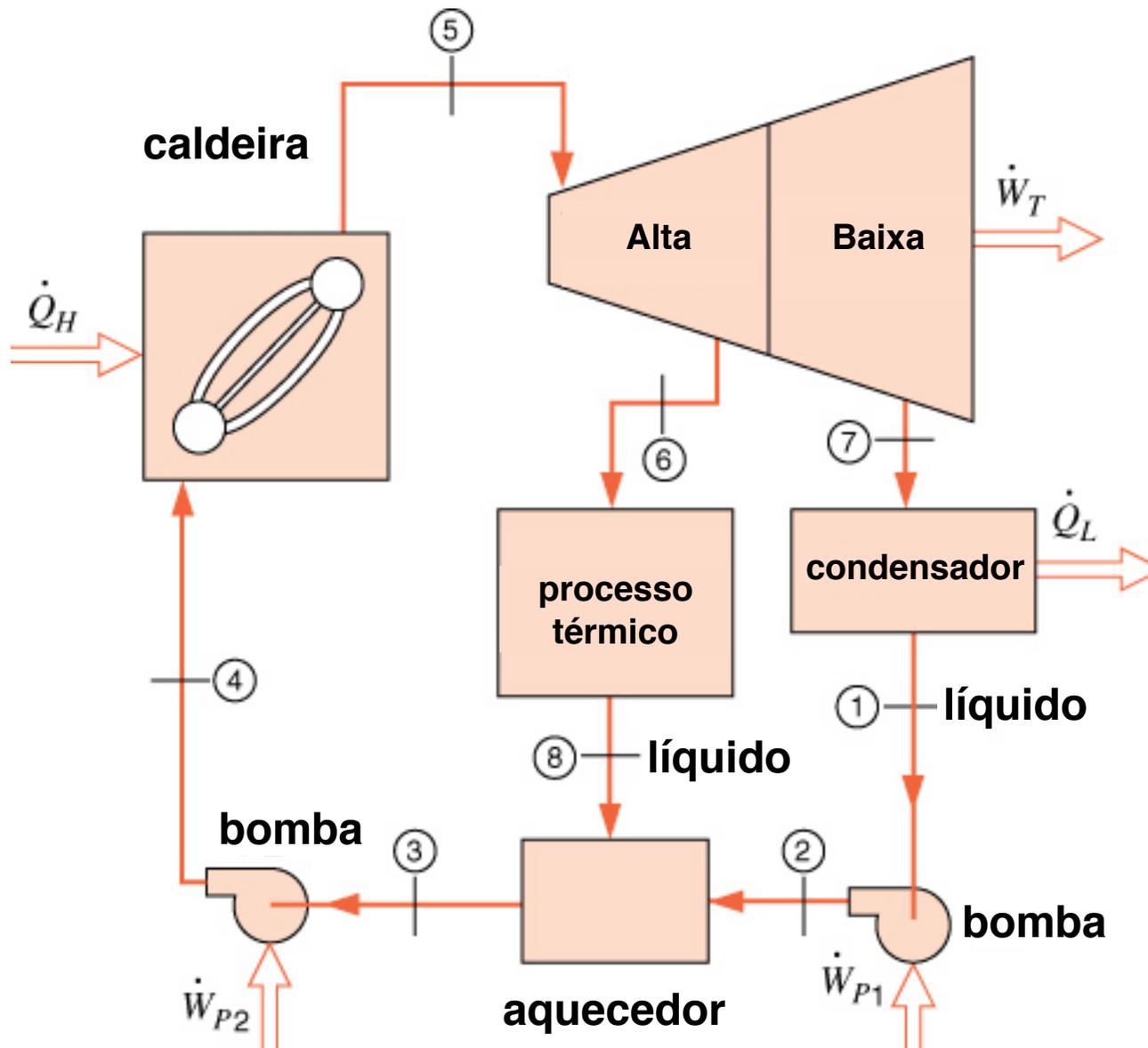


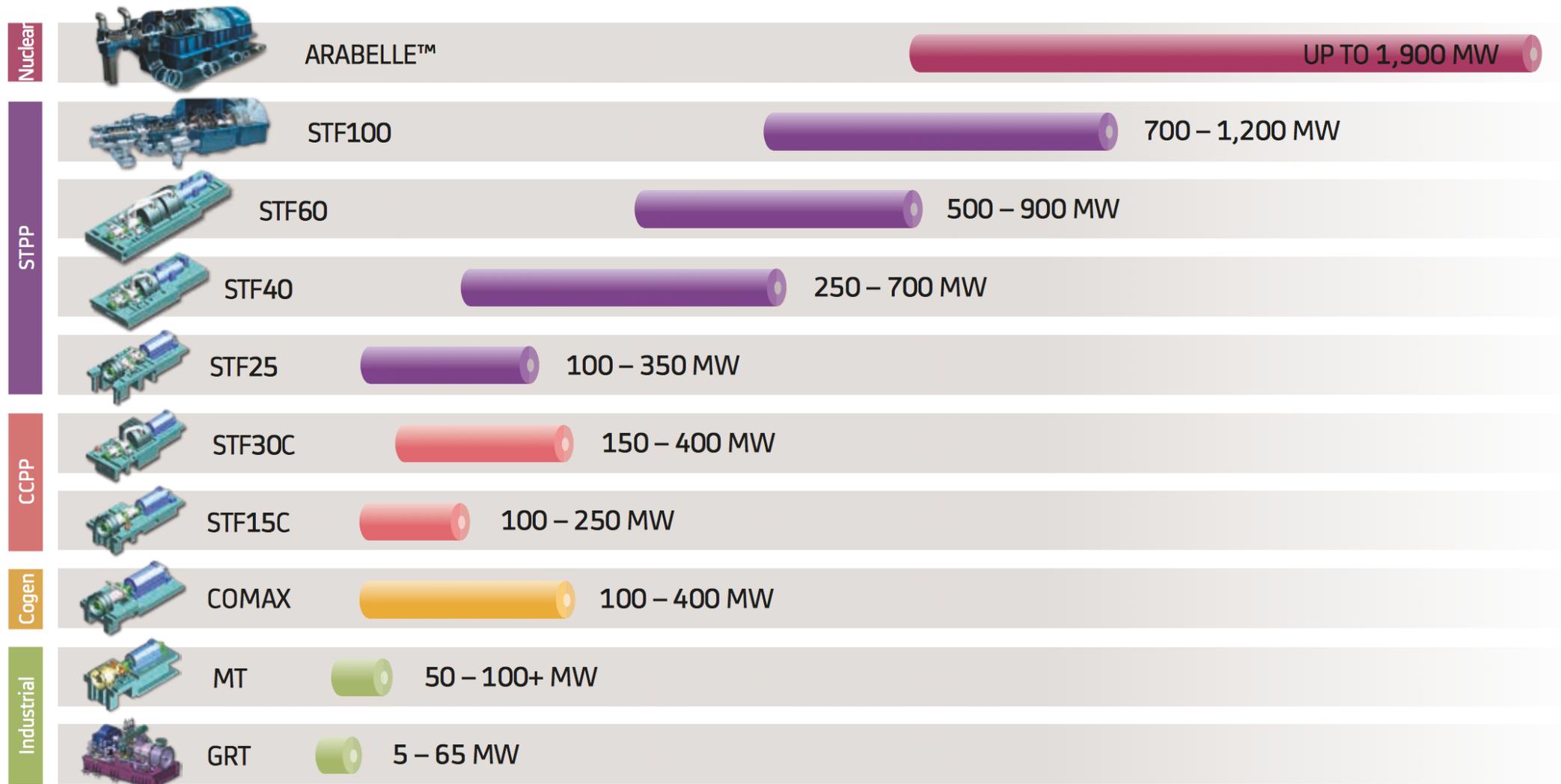
Ciclo Rankine binário



caldeira de
mercúrio e
superaquecedor







<http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/steam-turbines-a-full-range-to-fit-your-needs.pdf>



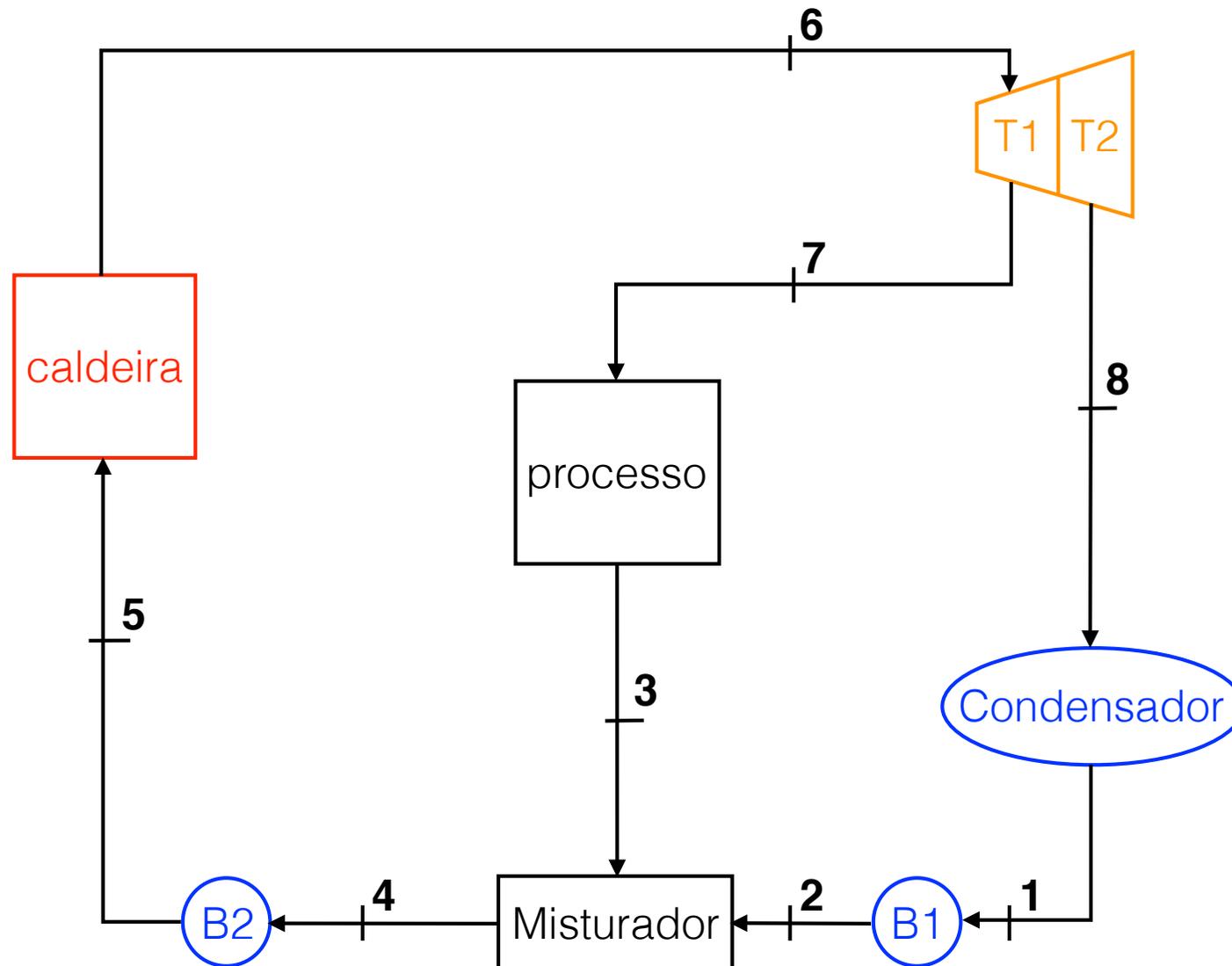
4) Uma planta têxtil utiliza 4kg/s de vapor a 2MPa, extraído da turbina de dois estágios de uma planta de cogeração. Vapor entra na turbina a 8MPa e 500°C com vazão mássica de 11kg/s e a deixa a 20kPa. O vapor extraído deixa o aquecedor de processo como líquido saturado e mistura com a água de alimentação. A mistura é então bombeada para a caldeira. Assumindo eficiências isentrópicas de 88% para as turbinas e bombas, pede-se para:

- (a)** determinar a potência fornecida em cada estágio da turbina;
- (b)** determinar a taxa de transferência de calor no aquecedor de processo;
- (c)** desenhar o diagrama T-s incluindo as linhas de saturação;
- (d)** determinar o rendimento térmico do ciclo considerando o calor fornecido ao processo como energia útil;
- (e)** listar todas as hipóteses envolvidas nos cálculos.

Rankine - exemplos



Esquema da instalação:



Rankine - exemplos



◆ **Estado 6:** vapor superaquecido

$$P_6 = 8000\text{kPa}$$

$$T_6 = 500^\circ\text{C}$$

$$h_6 = 3399\text{kJ/kg}$$

$$s_6 = 6,724\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estado 7s:** vapor superaquecido

$$s_{7s} = s_6 = 6,724\text{kJ/kgK}$$

$$P_7 = 2000\text{kPa e } h_{7s} = 3000\text{kJ/kg}$$

$$T_{7s} = 290,1^\circ\text{C}$$

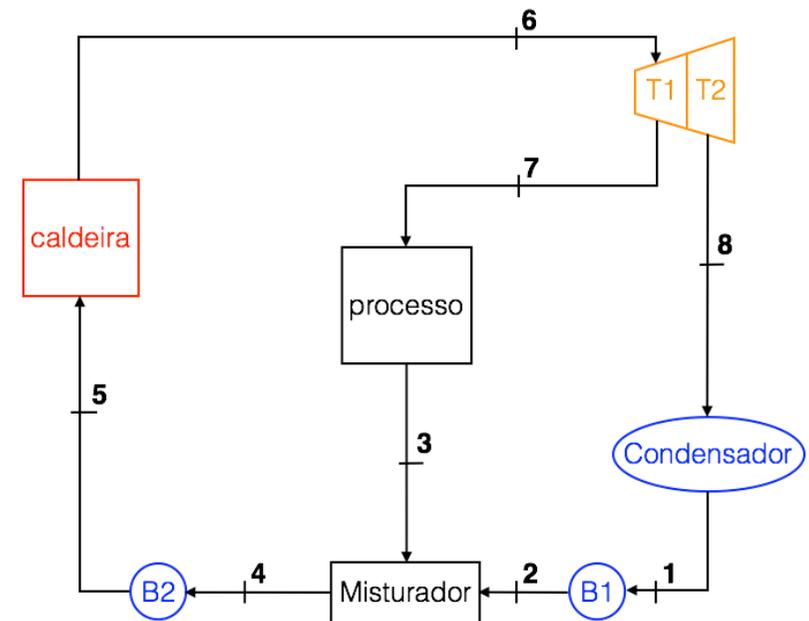
◆ **Estado 7:** vapor superaquecido

$$s_7 = 6,808\text{kJ/kgK}$$

$$P_7 = 2000\text{kPa}$$

$$h_7 = 3047\text{kJ/kg}$$

$$T_7 = 310,7^\circ\text{C}$$



$$\eta_{T,s} = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}}$$

Rankine - exemplos



◆ Estado 8s: vapor superaquecido

$$s_{8s} = s_7 = 6,808 \text{kJ/kgK}$$

$$P_8 = 20 \text{kPa e } h_{8s} = 2243 \text{kJ/kg}$$

$$T_{8s} = 60,07^\circ\text{C}$$

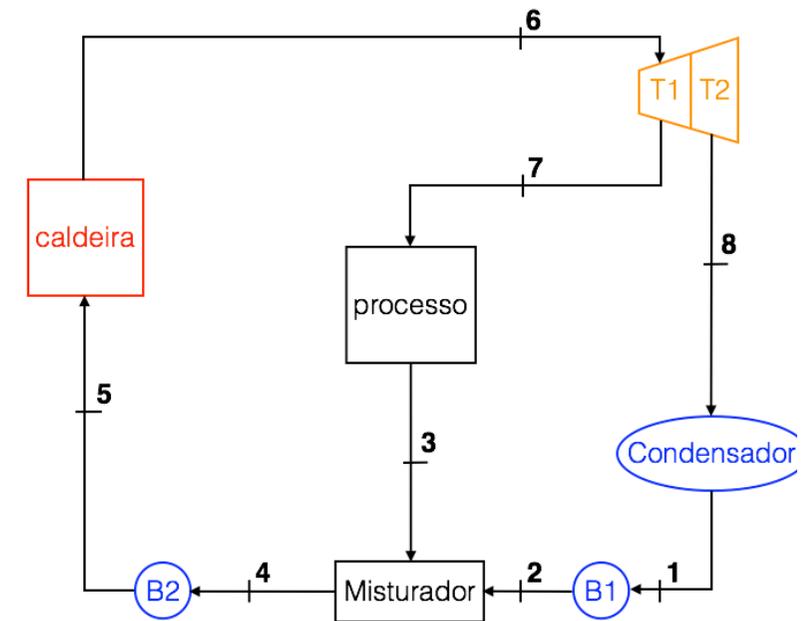
◆ Estado 8: mistura

$$h_8 = 2339 \text{kJ/kg}$$

$$x_8 = 0,8856$$

$$P_8 = 20 \text{kPa}$$

$$T_8 = 60,07^\circ\text{C}$$



$$0,88 = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8s}}$$

◆ Trabalho específico em B1:

$$W_{B1,rev} = v_1(P_1 - P_2) = 0,001017(20 - 2000) = -2,014\text{kJ/kg}$$

$$W_{B1} = W_{B1,rev} / \eta_{s,B1} = -2,289\text{kJ/kg}$$

◆ Estado 2: líquido comprimido

$$W_{B1} = h_1 - h_2 = -2,289\text{kJ/kg}$$

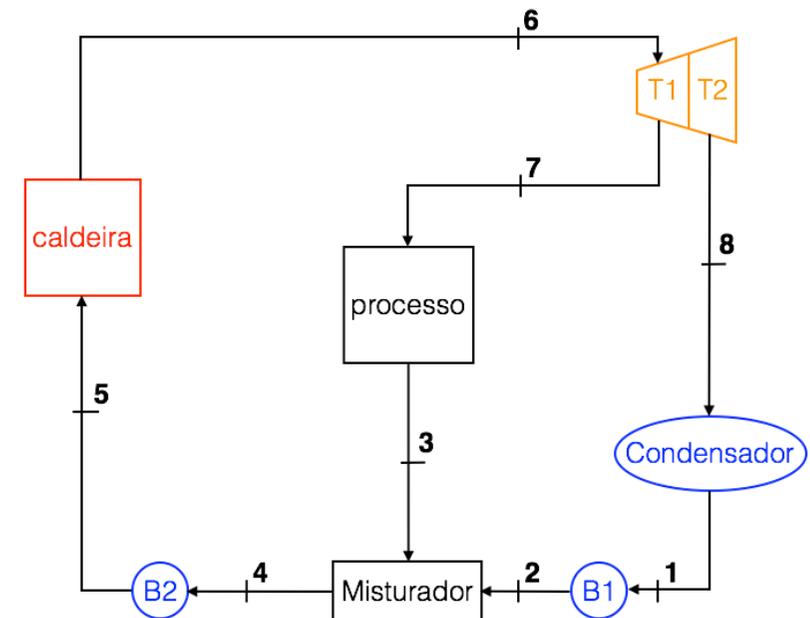
$$h_2 = 253,7\text{kJ/kg}$$

◆ Estado 3: líquido saturado

$$h_3 = 908,7\text{kJ/kg}$$

◆ Estado 4: $\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_2 h_2$

$$h_4 = 491,9\text{kJ/kg}$$



◆ Trabalho específico em B2:

$$W_{B2,rev} = v_4(P_4 - P_5) = 0,001056(2000 - 8000) = -6,339\text{kJ/kg}$$

$$W_{B2} = W_{B2,rev} / \eta_{s,B2} = -7,203\text{kJ/kg}$$

◆ Estado 5: líquido comprimido

$$W_{B2} = h_4 - h_5 = -7,203\text{kJ/kg}$$

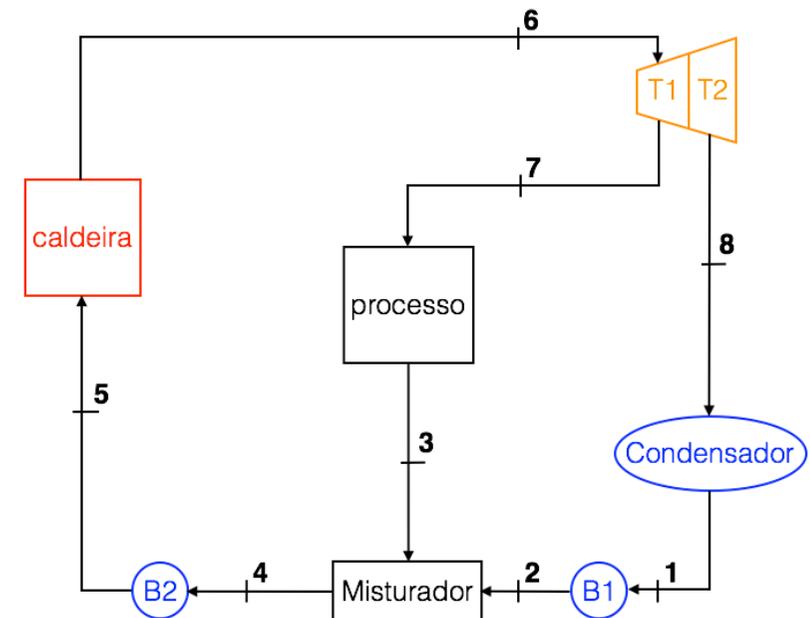
$$h_5 = 499,1\text{kJ/kg}$$

◆ Taxa de calor para o processo:

$$\dot{Q} = \dot{m}_7(h_7 - h_3) = 8555\text{kW}$$

◆ Taxa de calor na caldeira:

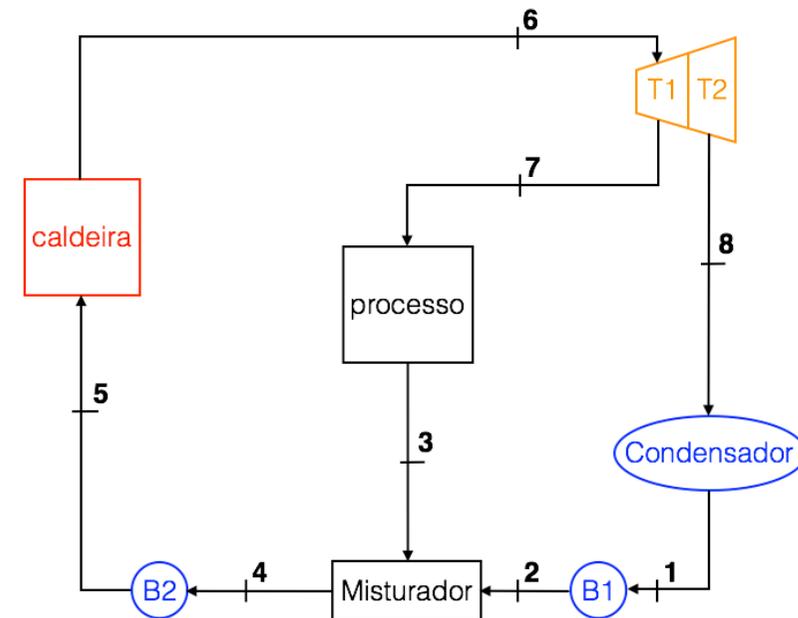
$$\dot{Q}_H = \dot{m}_5(h_6 - h_5) = 31894\text{kW}$$



◆ Rendimento

$$\eta_t = 0,5445$$

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} + \dot{W}_{B1} + \dot{W}_{B2} + \dot{Q}}{\dot{Q}_H}$$



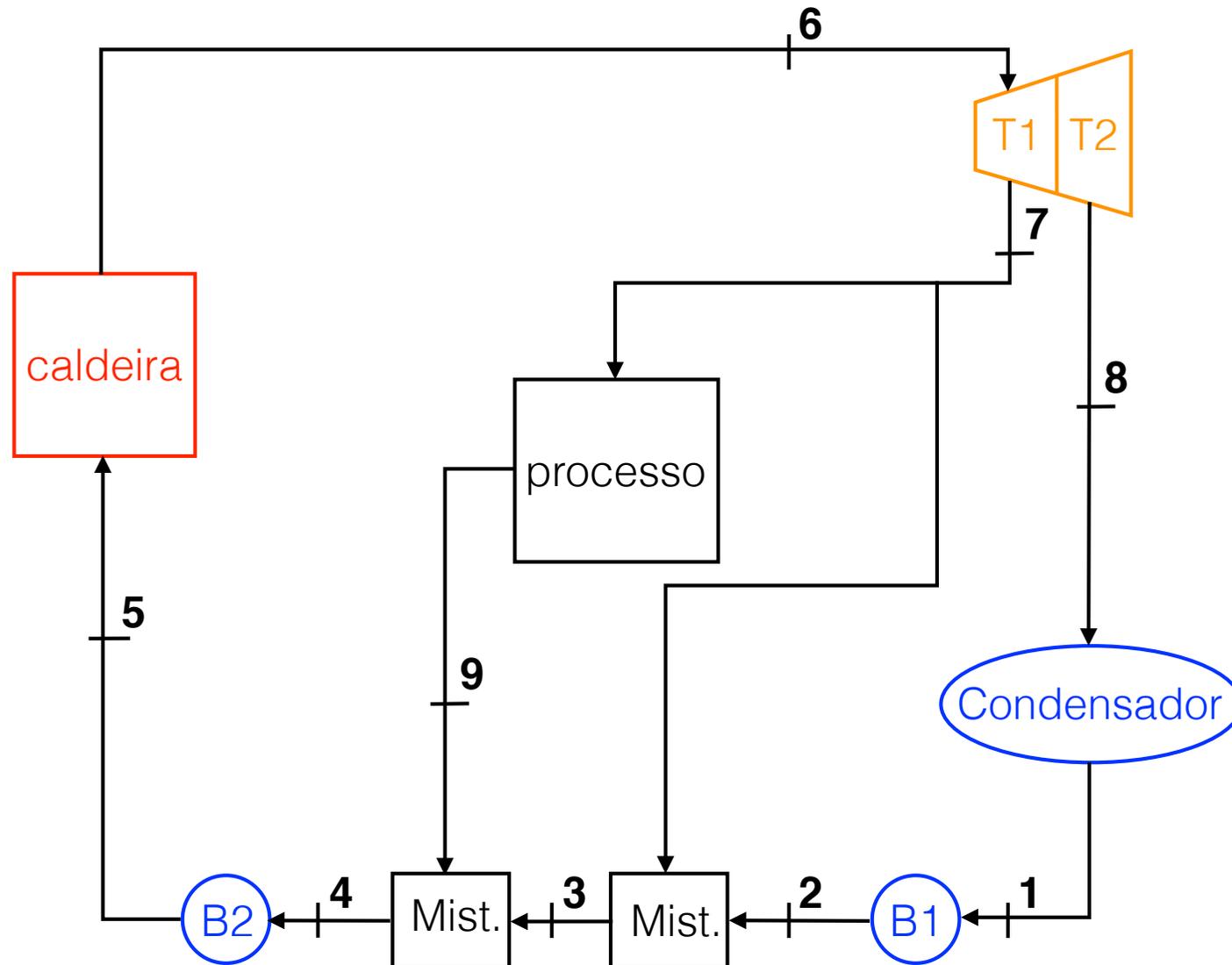


5) Considere uma planta de cogeração modificada para incluir regeneração. Vapor entra na turbina a 6MPa e 450°C e expande até uma pressão de 0,4MPa. Nessa pressão, 60% do vapor é extraído da turbina e o restante expande até 10kPa. Parte do fluido extraído é usado para aquecimento industrial e deixa o aquecedor como líquido saturado a 0,4MPa. Na sequência ele é misturado com água de alimentação que deixa o primeiro misturador. A mistura é, então, bombeada até a pressão da caldeira. Assuma turbinas e bombas adiabáticas reversíveis. Determine a vazão mássica de vapor no ciclo para uma potência de 15MW. Represente o ciclo em um diagrama T–s.

Rankine - exemplos



Esquema da instalação:





Solução

Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis.
3. Turbinas e bombas adiabáticas e reversíveis.

Rankine - exemplos



◆ **Estado 1:** líquido saturado

$$P_1 = 10\text{kPa}$$

$$h_1 = 191,8\text{kJ/kg}$$

$$v_1 = 0,00101\text{m}^3/\text{kg}$$

◆ **Trabalho específico em B1:**

$$W_{B1} = 0,4 \cdot v_1 (P_1 - P_2)$$

$$W_{B1} = 0,4 \cdot 0,001010 (10 - 400) = -0,1576\text{kJ/kg}$$

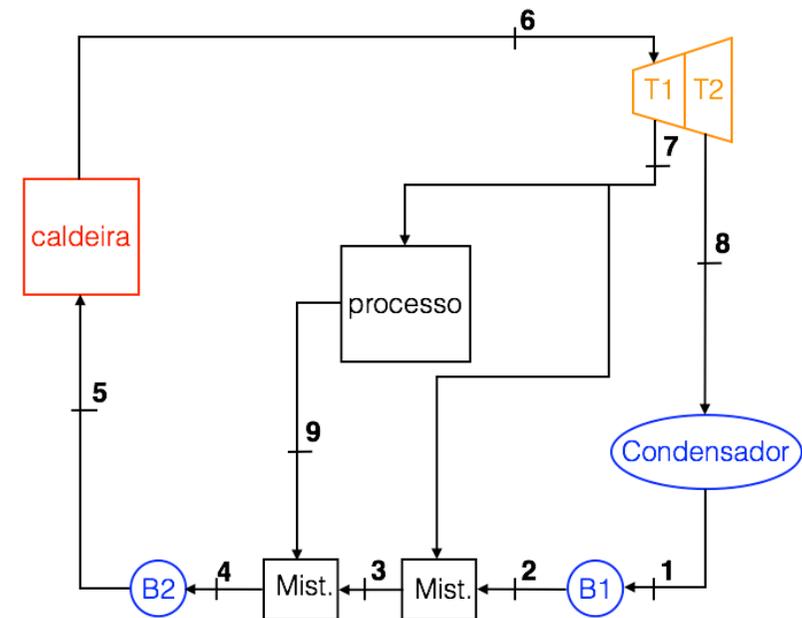
◆ **Estado 2:** líquido comprimido

$$h_2 = h_1 + w_{b1} / 0,4 = 192,2\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estados 4 e 9:** líquido saturado ($P = 0,4\text{MPa}$)

$$h_4 = h_9 = 604,9\text{kJ/kgK}$$

$$v_4 = 0,001084\text{m}^3/\text{kg}$$



Rankine - exemplos



◆ trabalho específico em T1 + T2:

$$w_T = (h_6 - h_7) + 0,4(h_7 - h_8)$$

$$w_T = 851,8 \text{ kJ/kg}$$

◆ Trabalho específico em B1 + B2:

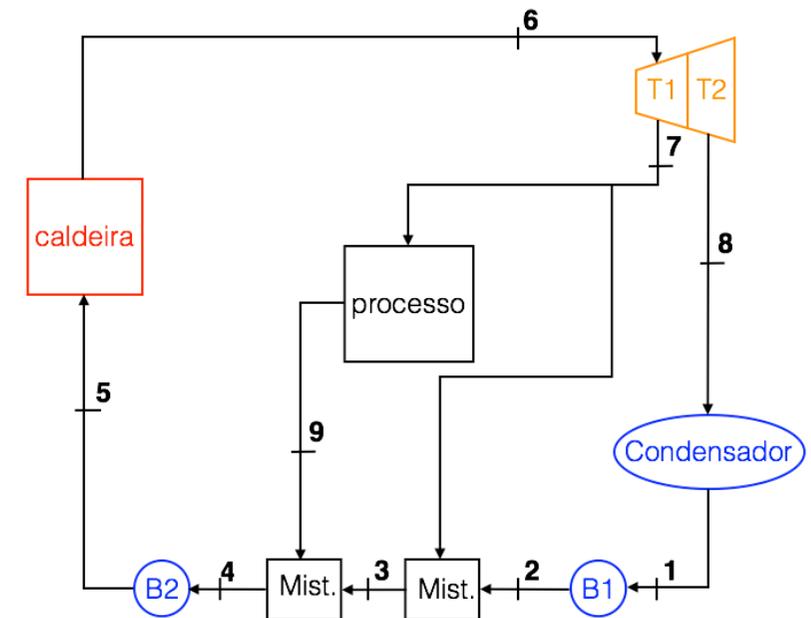
$$w_B = w_{B1} + w_{B2} = -6,225 \text{ kJ/kg}$$

◆ Trabalho líquido:

$$w_{liq} = w_T - w_B = 845,8 \text{ kJ/kg}$$

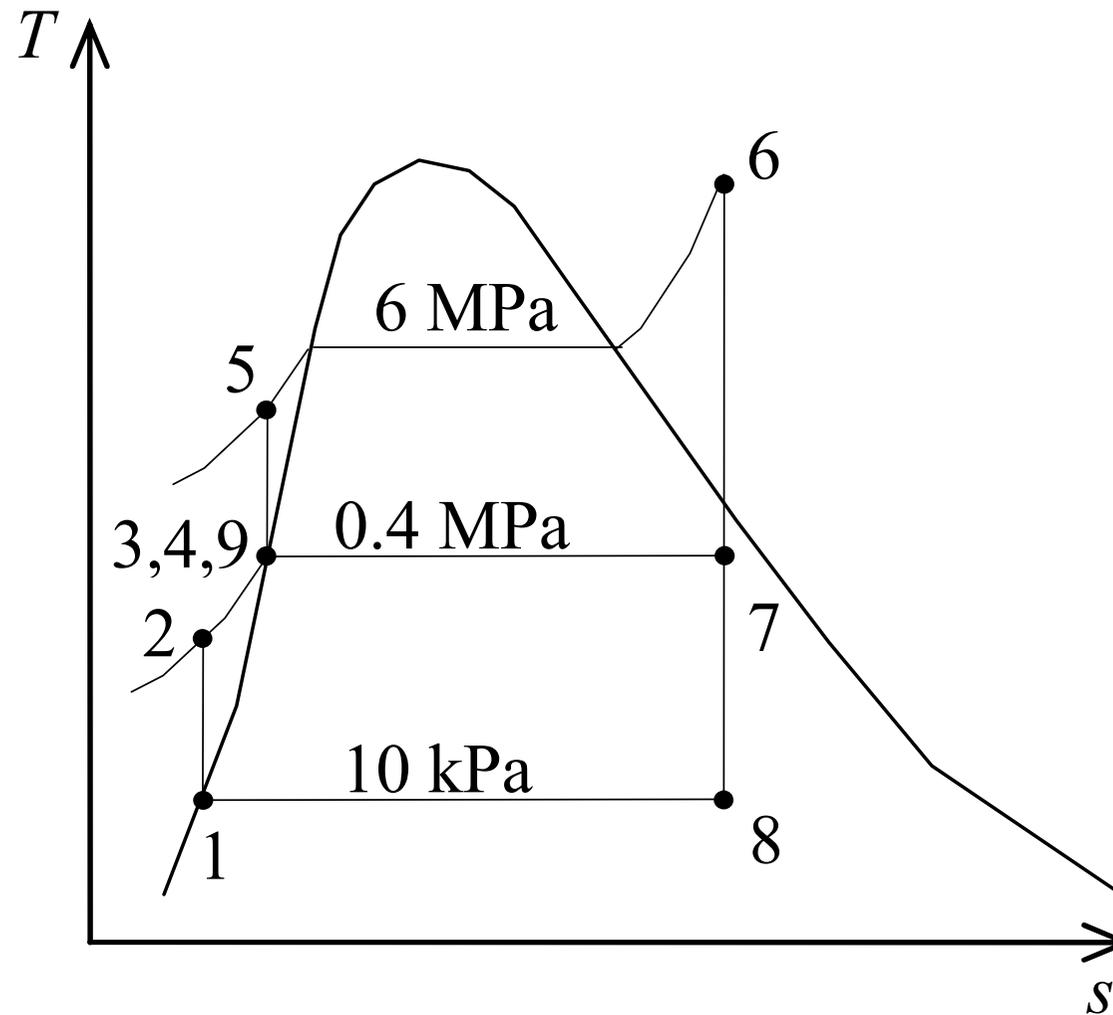
◆ vazão mássica

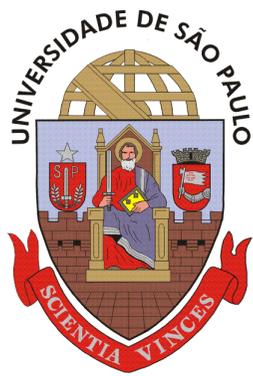
$$\dot{m} = 15000 / 845,5 = 17,74 \text{ kg/s}$$





◆ Diagrama T-s





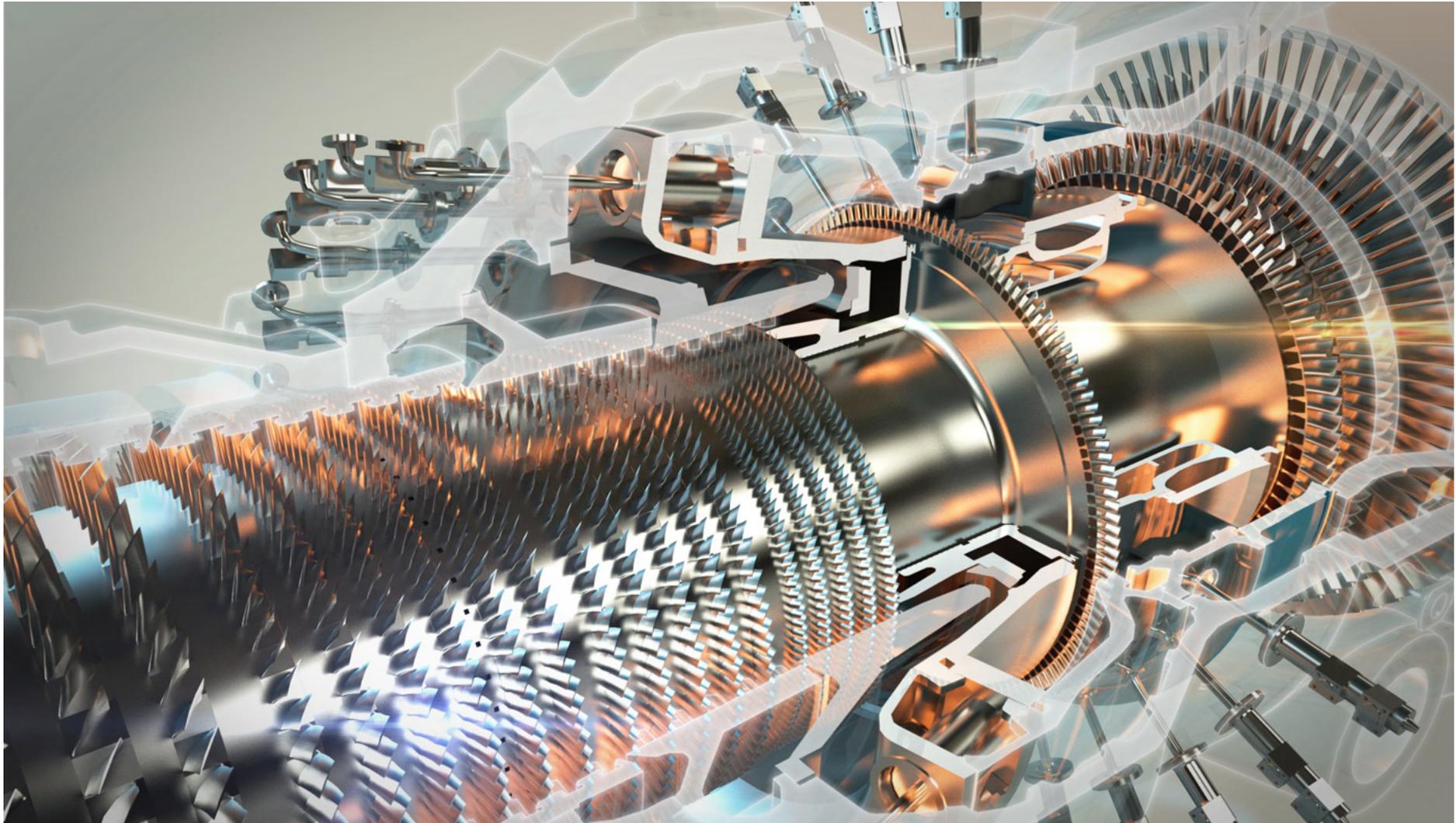
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



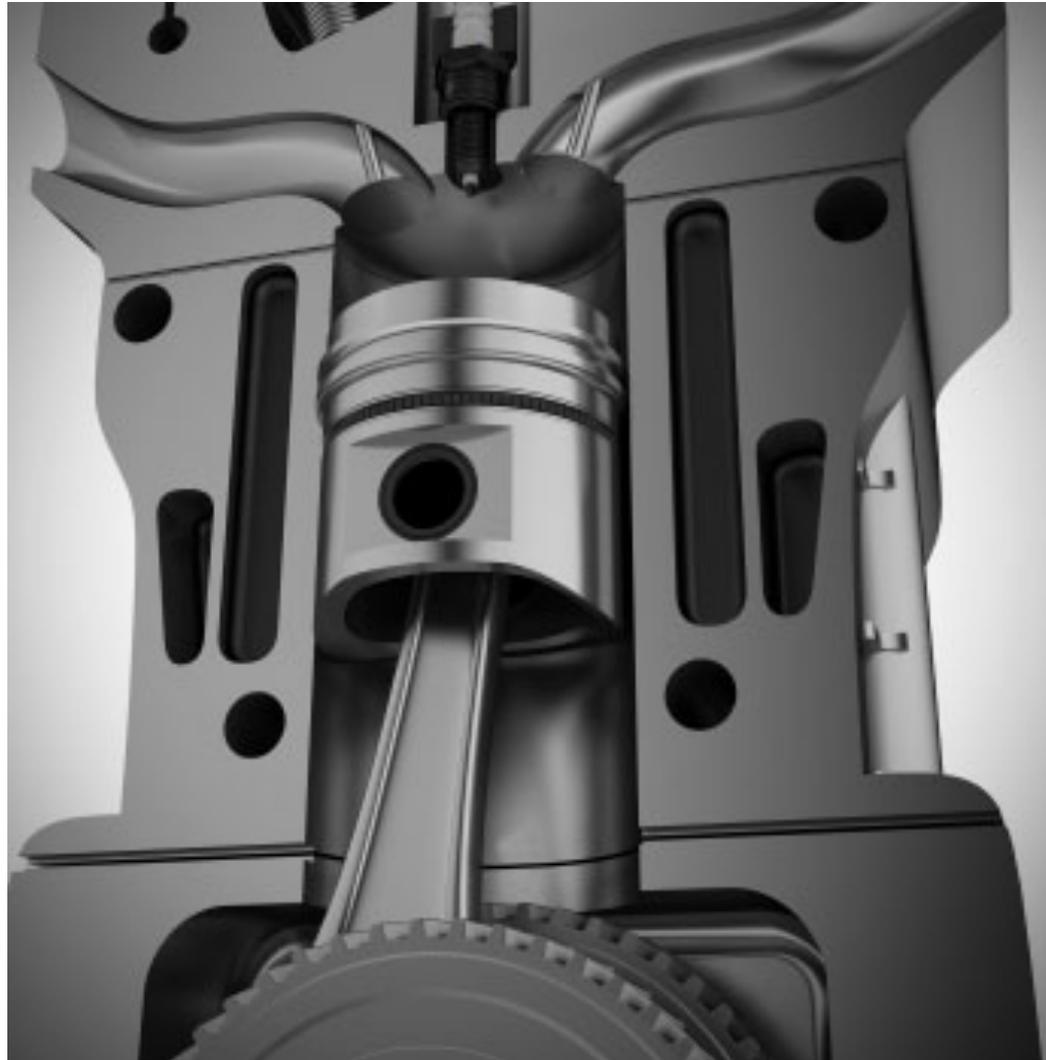
Termodinâmica

11) Ciclos motores a ar Ciclo Brayton

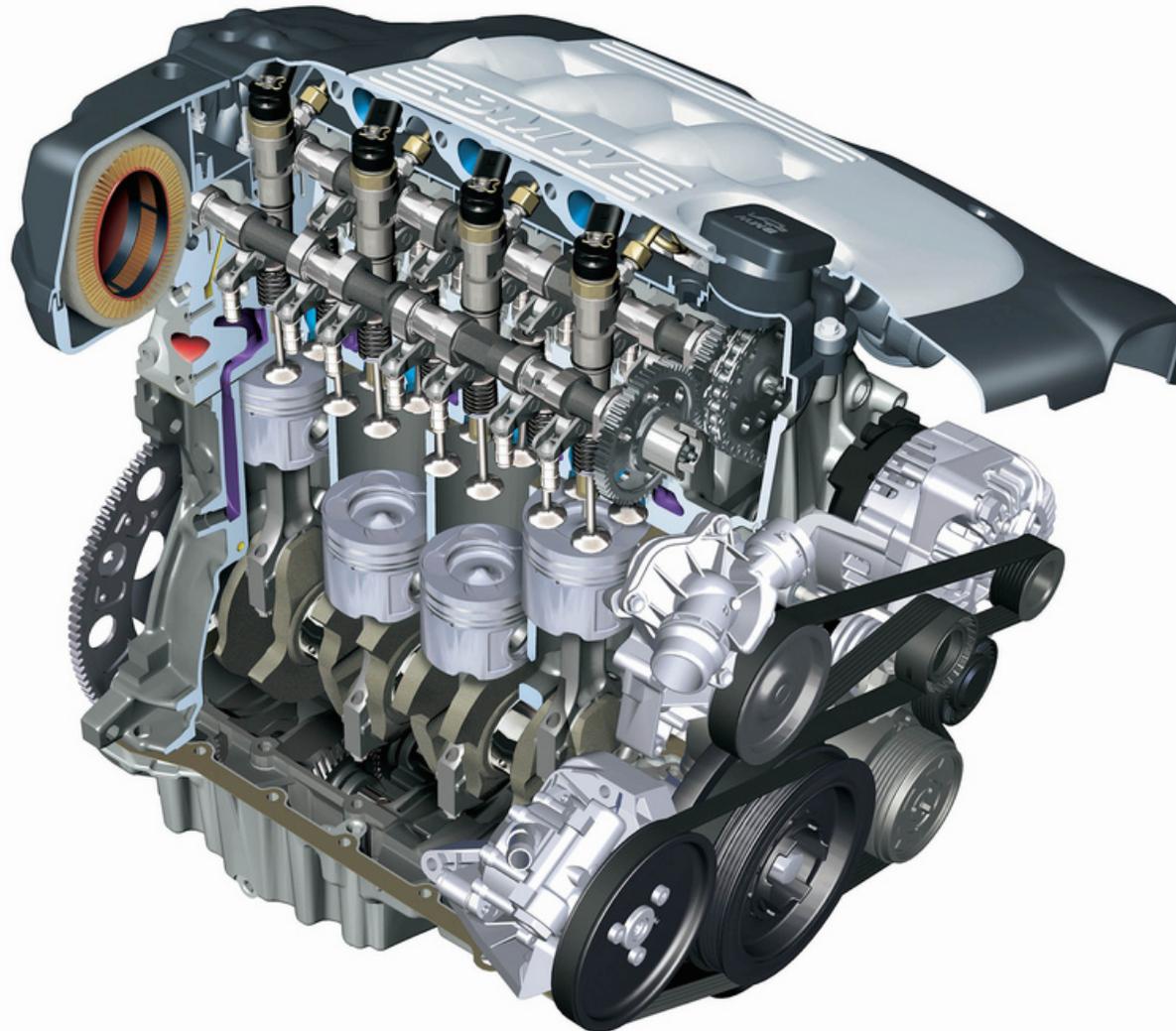
◆ Turbinas a gás



◆ Motor de combustão interna ciclo Otto



◆ Motor de combustão interna ciclo Diesel



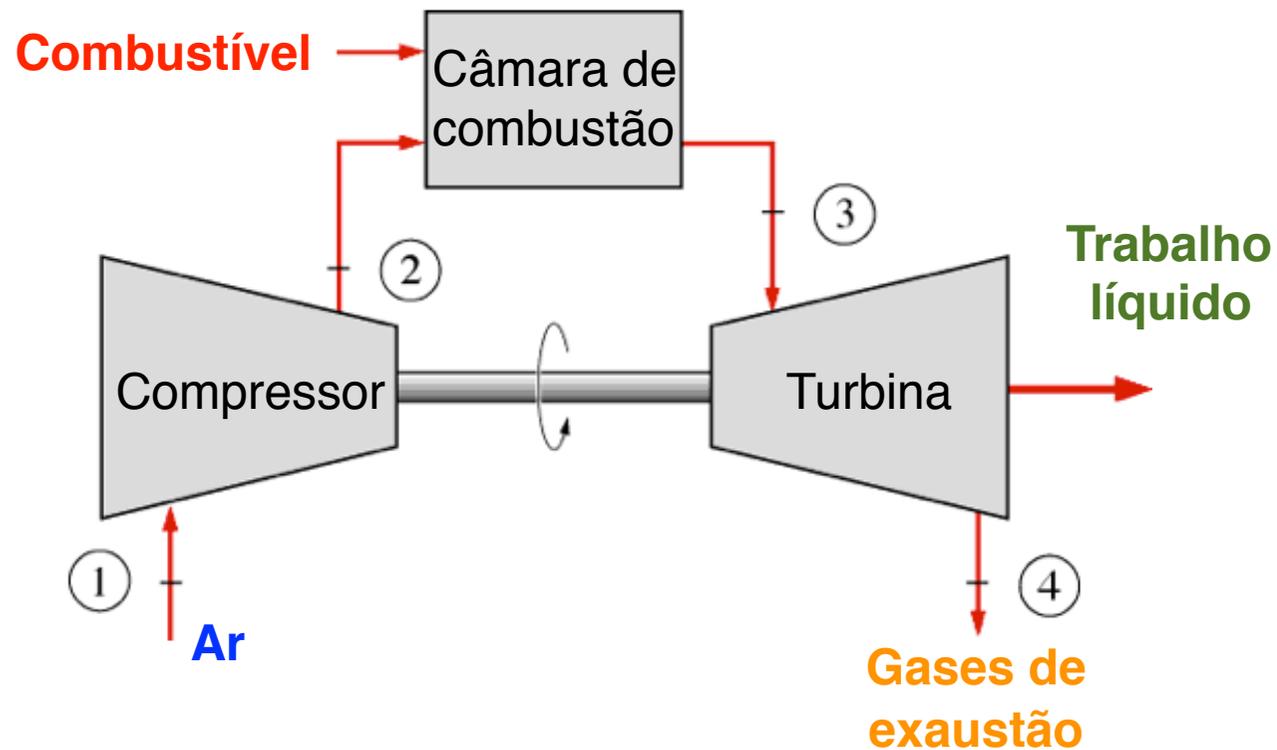


*Trata-se de um modelo simplificado para representar alguns sistemas de potência com processos complexos.

Exemplos:

- ◆ Motores de combustão interna de ignição por faísca (ciclo **Otto**);
- ◆ Motores de combustão interna de ignição por compressão (ciclo **Diesel**);
- ◆ Turbinas a gás (ciclo **Brayton**).

Ciclo Brayton



Engenheiro norte-americano
1830 – 1892



Hipóteses:

- ★ O fluido de trabalho é uma quantidade fixa de ar modelado como gás ideal com calores específicos constantes, circulando em circuito fechado;
- ★ Os processos que compõem o ciclo são internamente reversíveis;
- ★ O processo de combustão é substituído por uma transferência de calor a partir uma fonte externa;
- ★ O processo de exaustão é substituído por uma rejeição de calor que restaura o fluido de trabalho ao seu estado inicial
- ★ Os processos de admissão e descarga não existem;



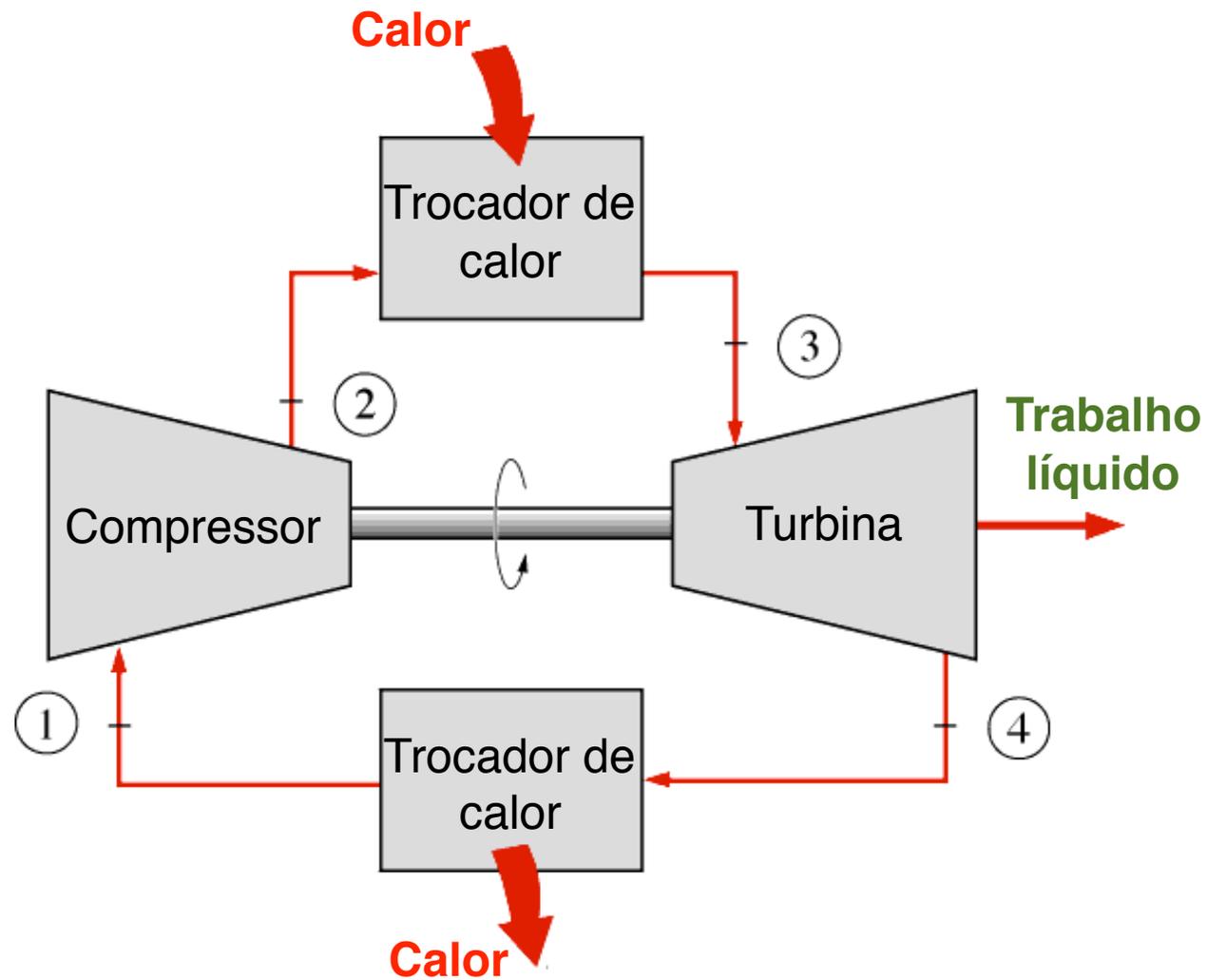
Para um gás ideal com c_p e c_v constantes em um processo isentrópico ($\Delta s = 0$):

$$0 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

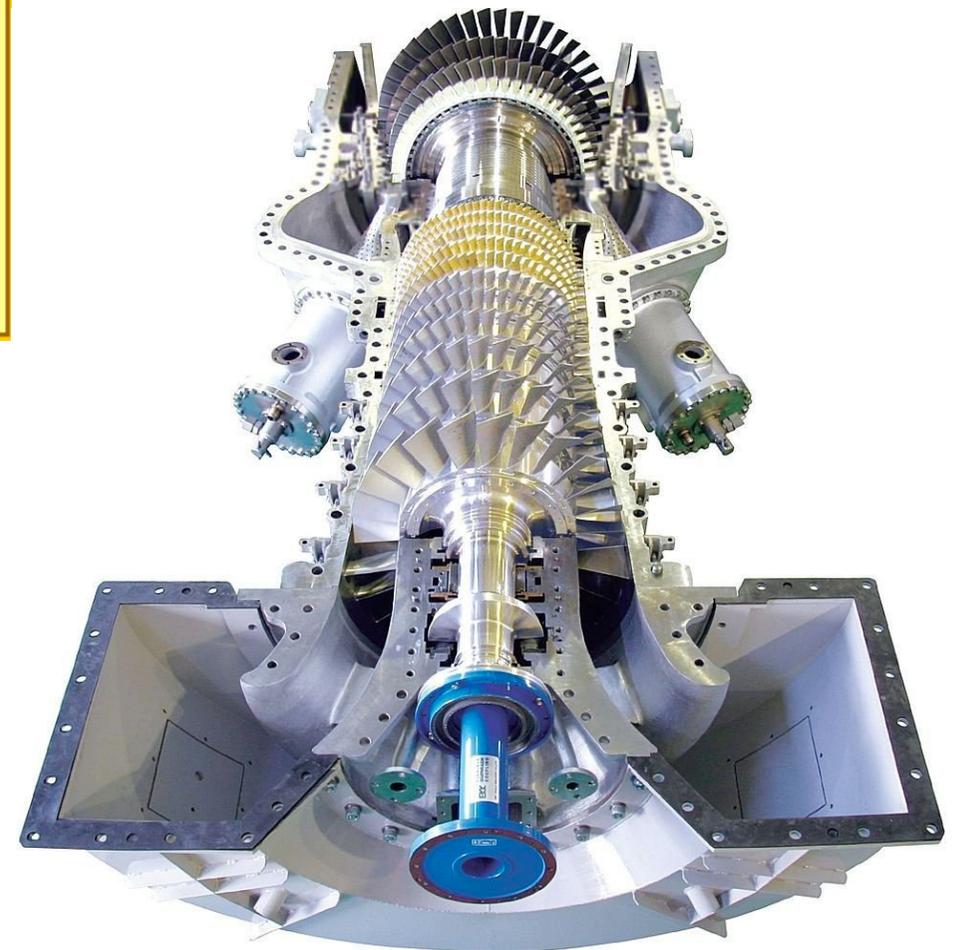
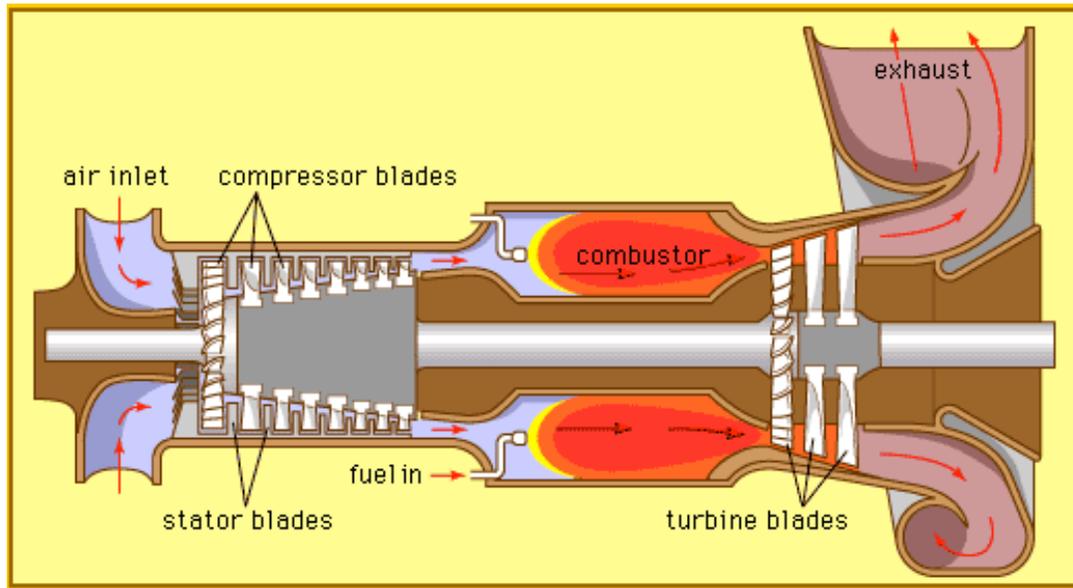
$$0 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Combinando as equações anteriores: $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$

Ciclos padrão a ar: Brayton



Turbina a gás





O ciclo de potência Brayton ideal é composto por quatro processos reversíveis:

- Compressão isentrópica em um compressor;
- Fornecimento de calor a pressão constante em um aquecedor;
- Expansão isentrópica em uma turbina;
- Rejeição de calor a pressão constante em um trocador de calor.

Ciclo Brayton



Eficiência térmica (calores específicos constantes):

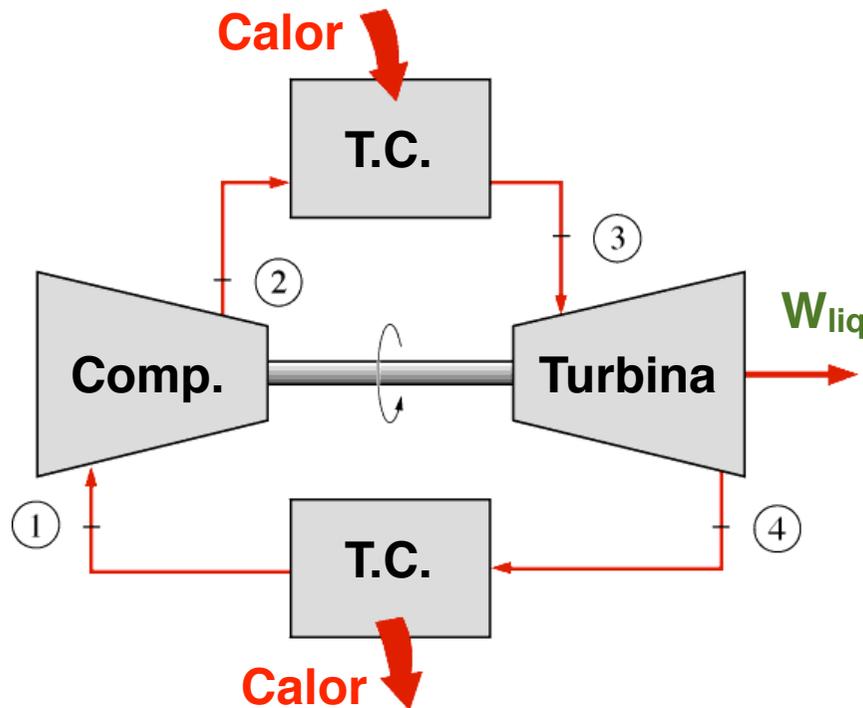
$$\eta = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_H}$$

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p[(T_3 - T_4) + (T_1 - T_2)]}{\dot{m}c_p(T_3 - T_2)}$$



$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$

com $r_p = \frac{P_2}{P_1}$, razão de pressão

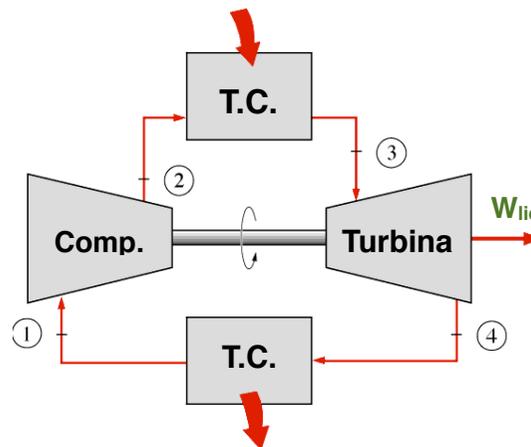


Dedução da eficiência



$$\eta = \frac{(T_3 - T_4) + (T_1 - T_2)}{(T_3 - T_2)} \rightarrow \eta = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

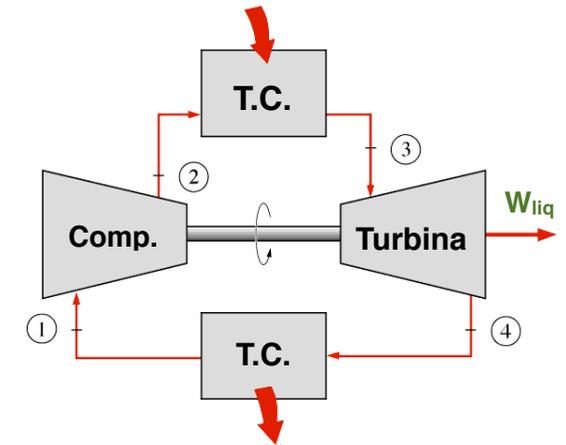
$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1 (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 (T_3 / T_2 - 1)}$$



Dedução da eficiência



$$\eta = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$



$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$



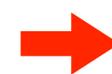
$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

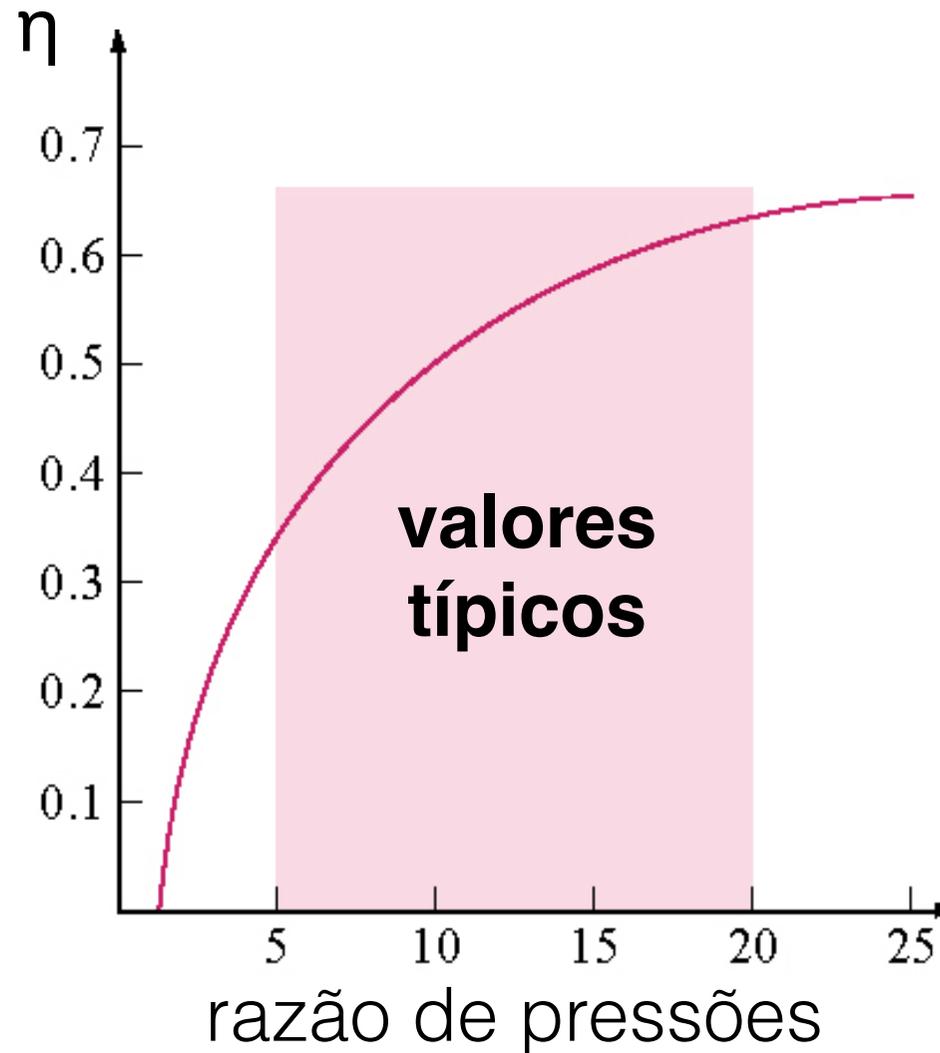


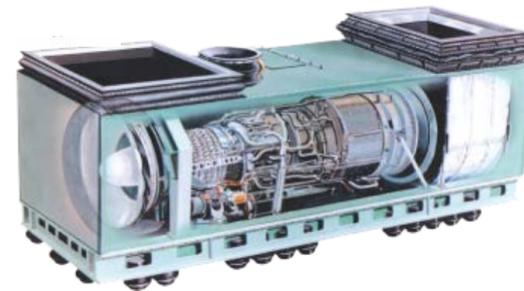
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$



$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$

Eficiência térmica (calores específicos constantes):





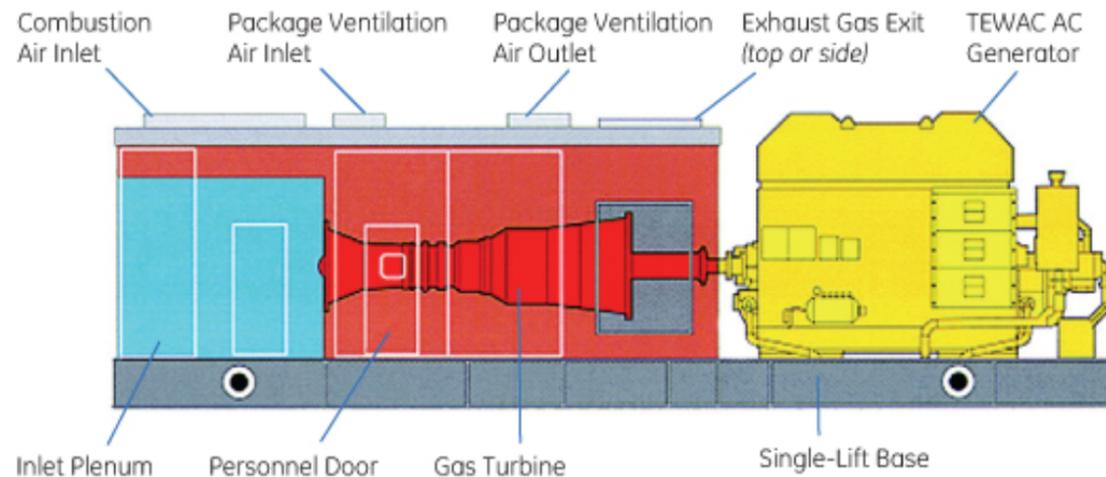
**Ciclo simples
dois eixos**



The LM2500 has four major components: a 16-stage, 18:1 pressure ratio compressor with seven stages of variable stators and inlet guide vanes; a fully annular combustor with externally mounted fuel nozzles; a two-stage, air-cooled high-pressure turbine which drives the compressor and the accessory-drive gearbox; and a six-stage, aerodynamically coupled, low-pressure power turbine which is driven by the gas generator's high-energy exhaust gas flow.

Dimensions*

Base plate width		104 in (2.64 m)
Base plate length		549 in (13.94 m)
Enclosure height		157 in (3.98 m)
Base plate weight		198,000 lb (435,600 kg)
Duct flow areas	Inlet	48 sq ft (4.46 sq m)
	Exhaust	30 sq ft (3.34 sq m)



Performance

Output	33,600 shp (25,060 kW)
SFC	.373 lb/shp-hr (227 g/kW-hr)
Heat rate	6,860 Btu/shp-hr 9,200 Btu/kWs-hr 9,705 kJ/kWs-hr
Exhaust gas flow	155 lb/sec (70.5 kg/sec)
Exhaust gas temperature	1,051°F (566°C)
Power turbine speed	3600 rpm

Average performance, 60 Hertz, 59°F, sea level, 60% relative humidity, no inlet/exhaust losses

Performance*

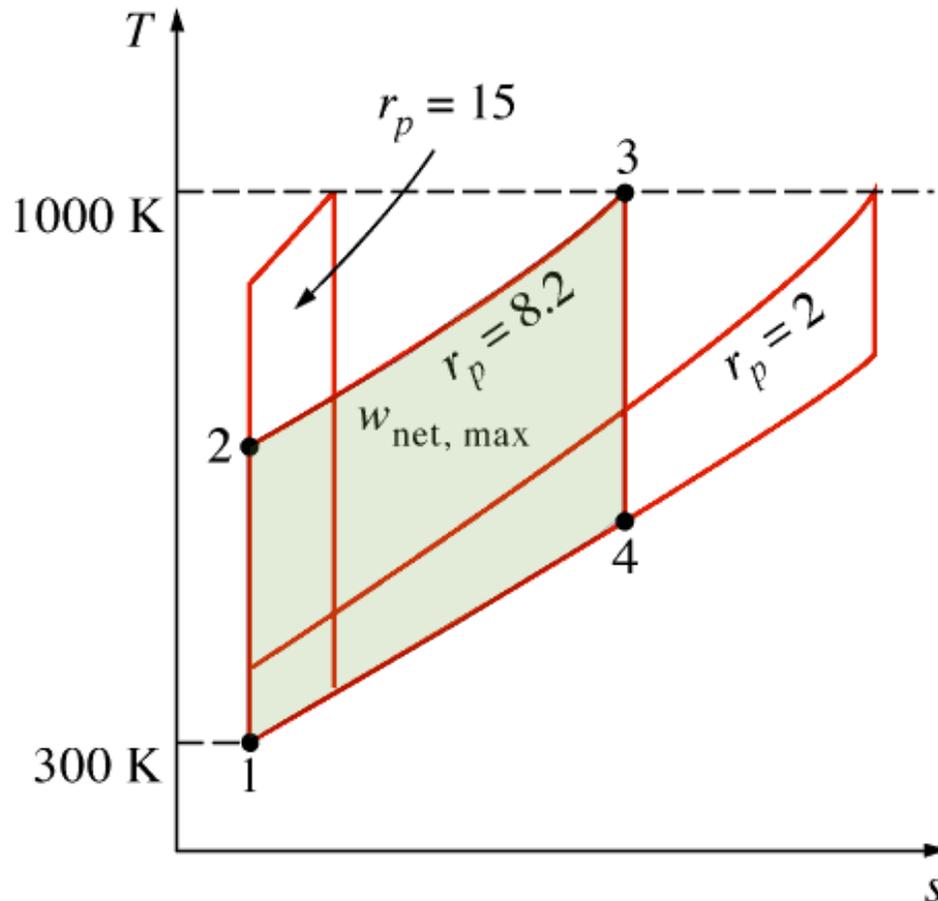
Output	24,050 kW
Heat rate	9,421 Btu/kW-hr
Thermal efficiency	36%

Average performance, 60 Hertz, 59°F, sea level, 60% relative humidity, 4 inches water inlet loss, 6 inches water exhaust loss

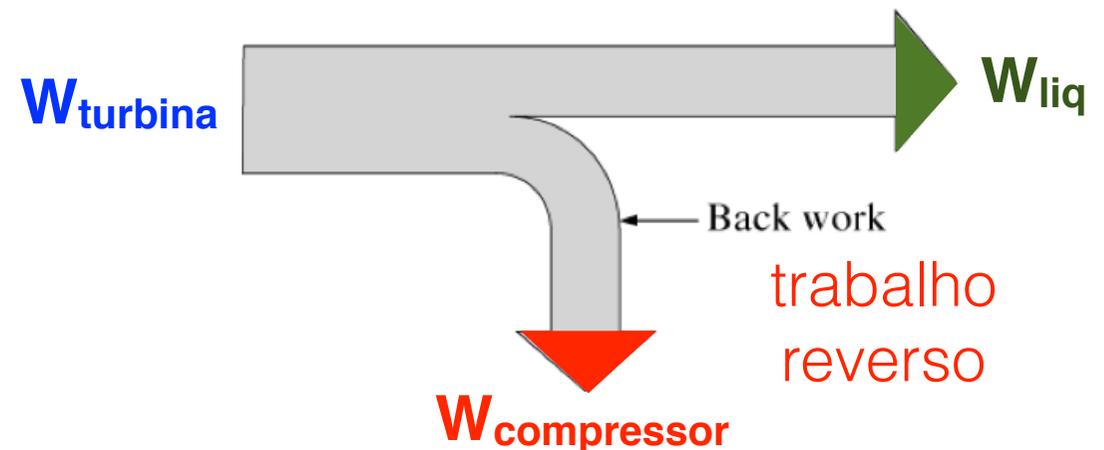


- ◆ A máxima temperatura do ciclo ocorre no final do processo de combustão (estado 3);
- ◆ A máxima temperatura é limitada pela resistência do material das palhetas (1700 K, valor atual);
- ◆ Essa restrição também limita a razão máxima de pressão;
- ◆ Para uma temperatura T_3 fixa na entrada da turbina, o trabalho líquido cresce, passa por um máximo e depois decresce (veja a figura a seguir).

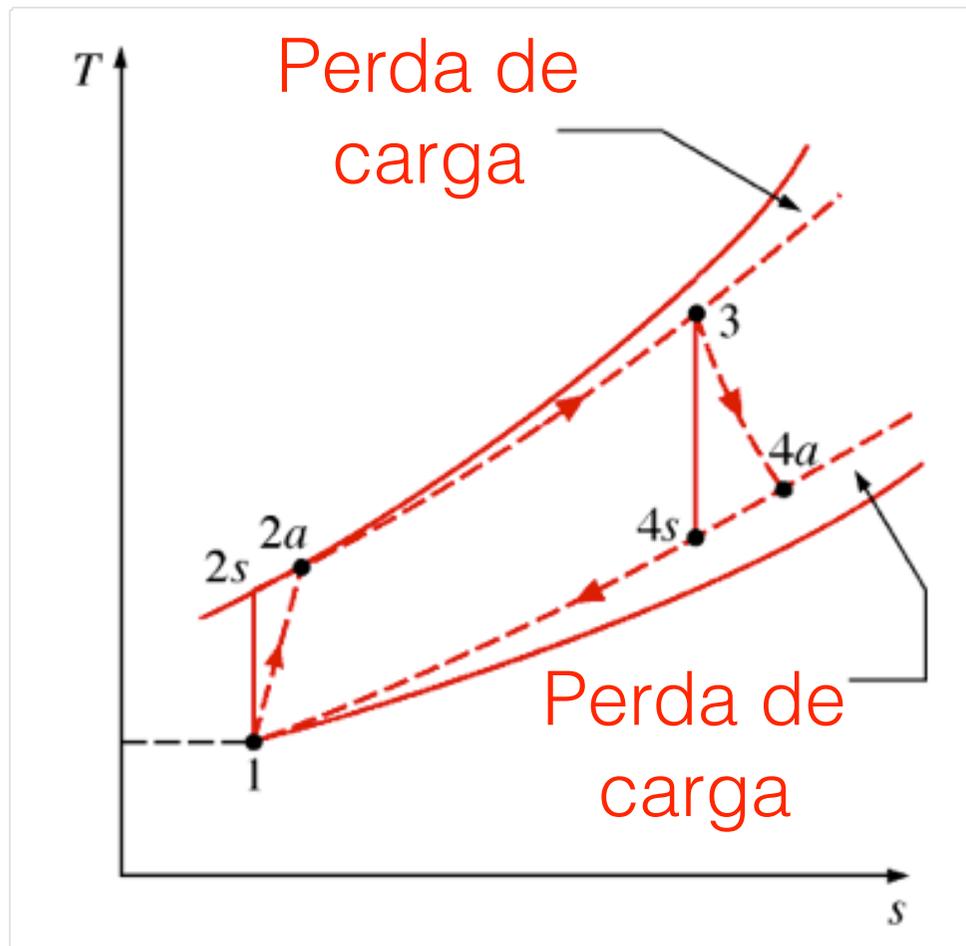
Eficiência térmica X trabalho líquido



- ◆ Menores trabalhos líquidos resultam na necessidade de maiores vazões mássicas e, portanto, maiores instalações;
- ◆ Uma parcela significativa do trabalho é usada para acionar o compressor.



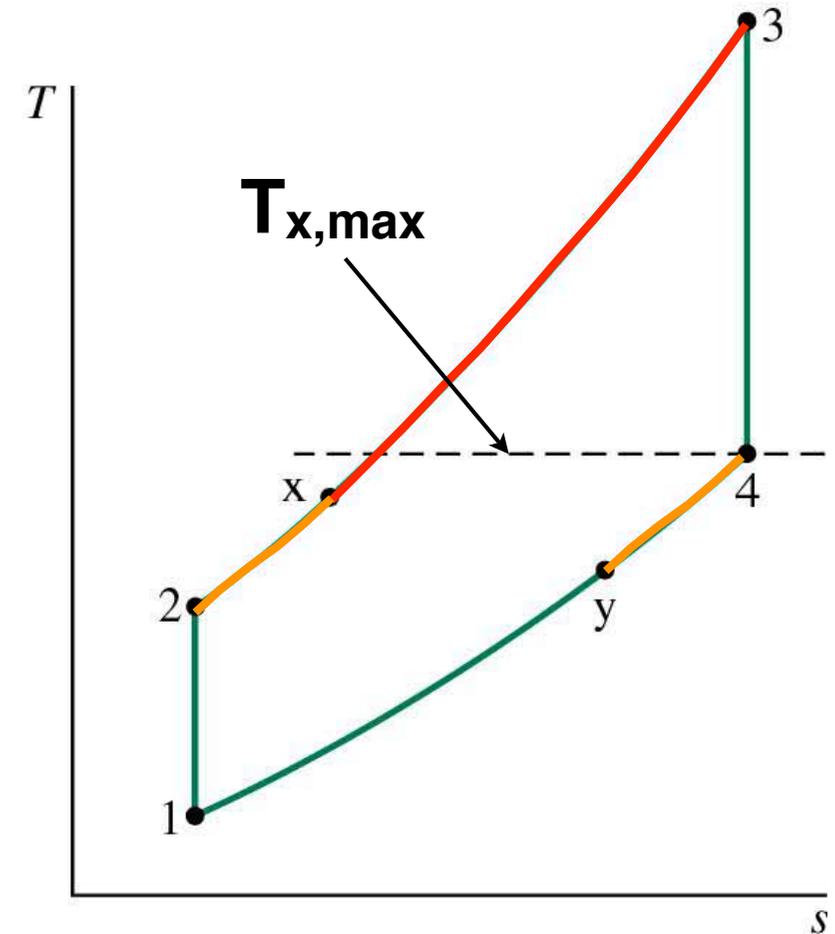
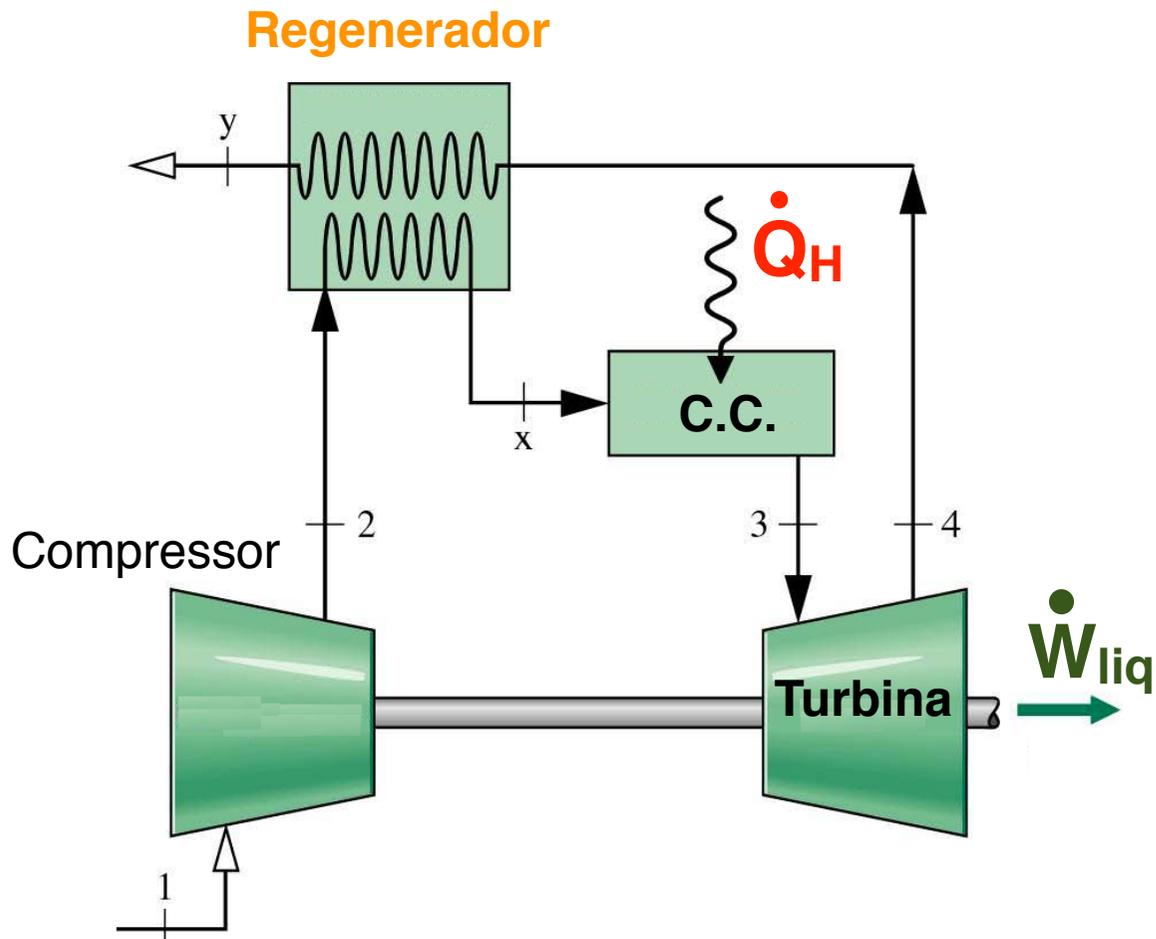
Desvios do comportamento ideal



$$\eta_c = \frac{(h_1 - h_{2s})}{(h_1 - h_{2a})}$$

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_{4a})}{(h_3 - h_{4s})}$$

Ciclo Brayton regenerativo

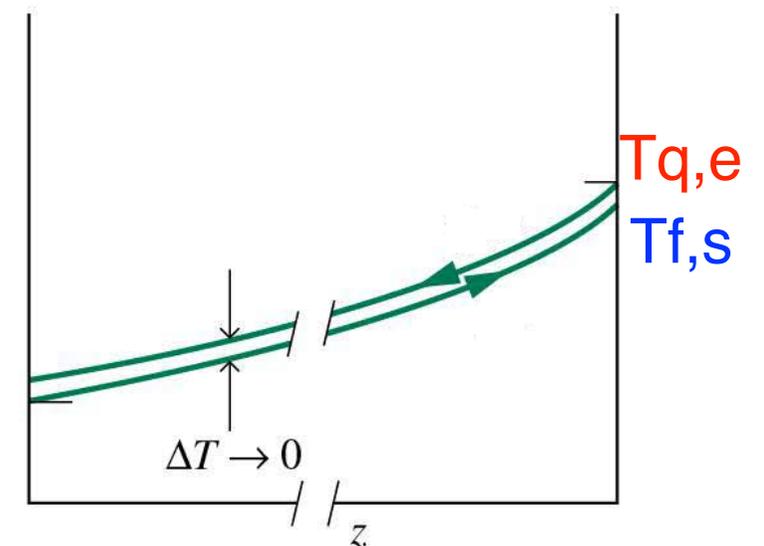
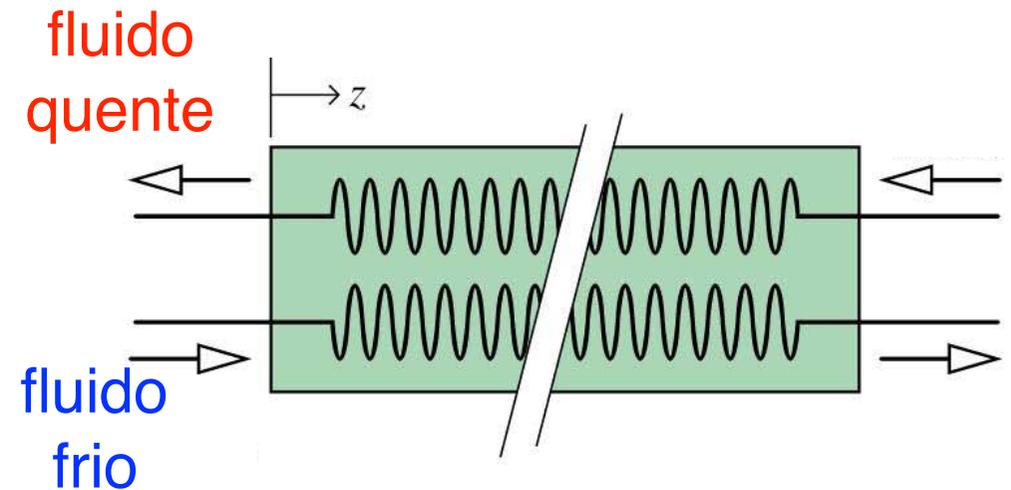
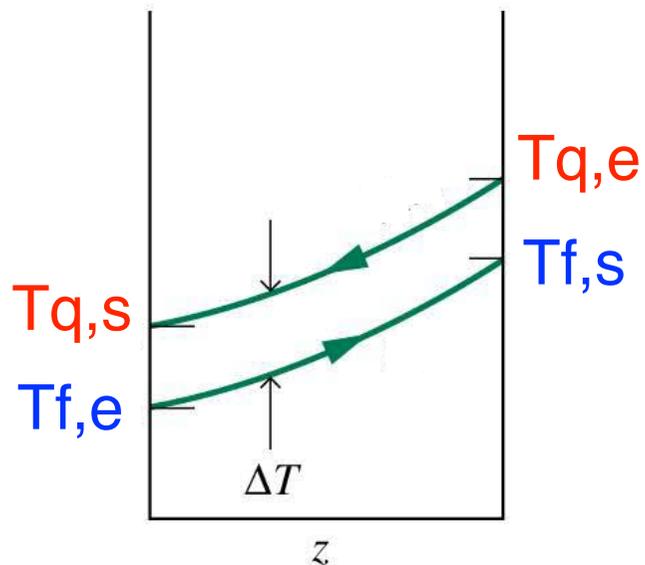
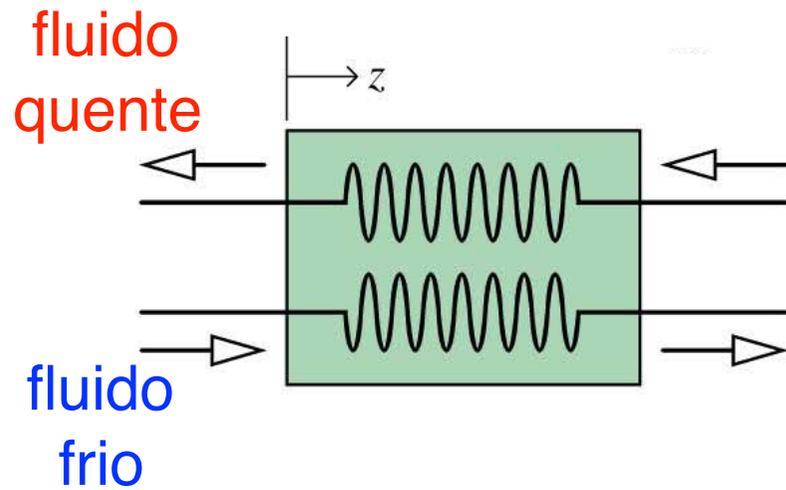


$$\eta_{\text{reg}} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} \quad 60 \text{ a } 80\%$$

Regenerador



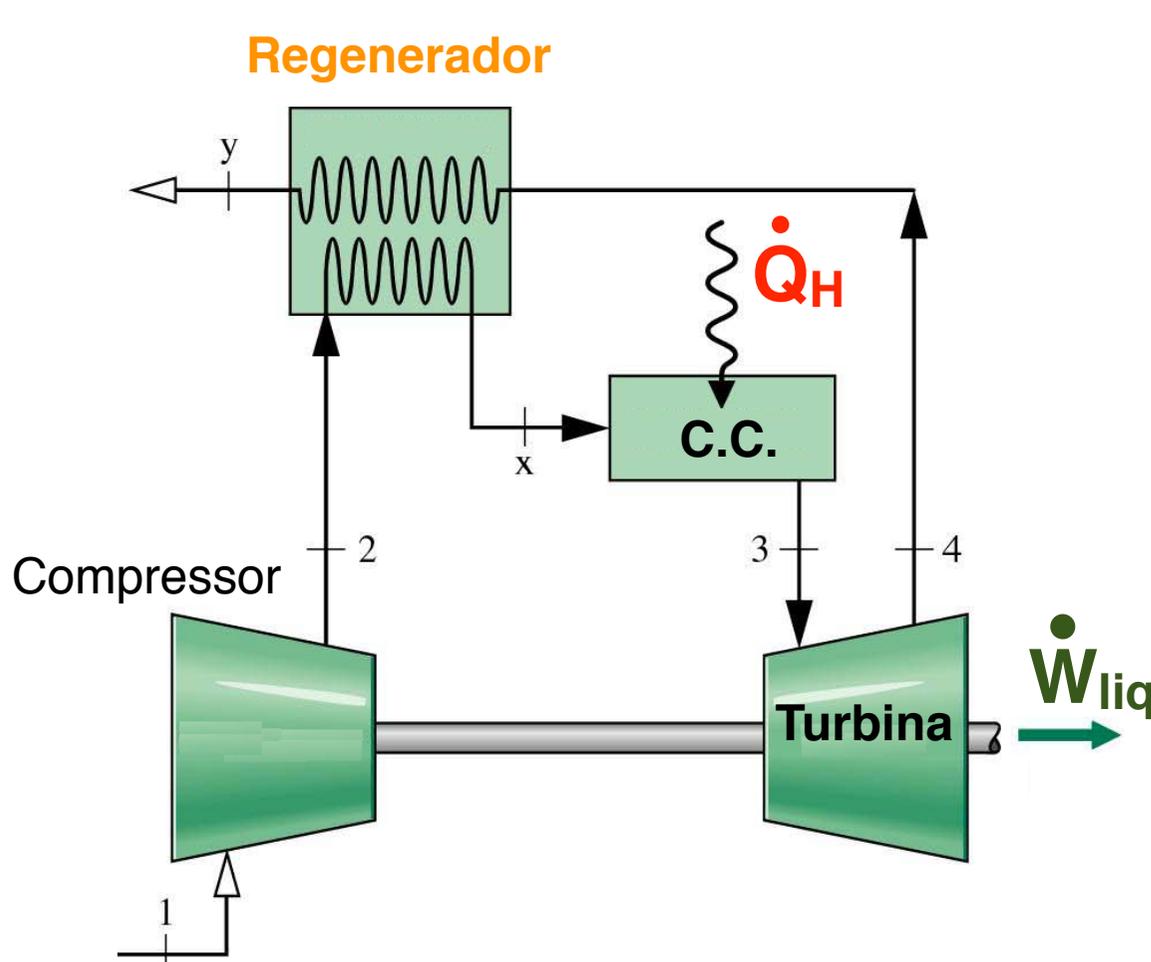
Trocador de calor contracorrente



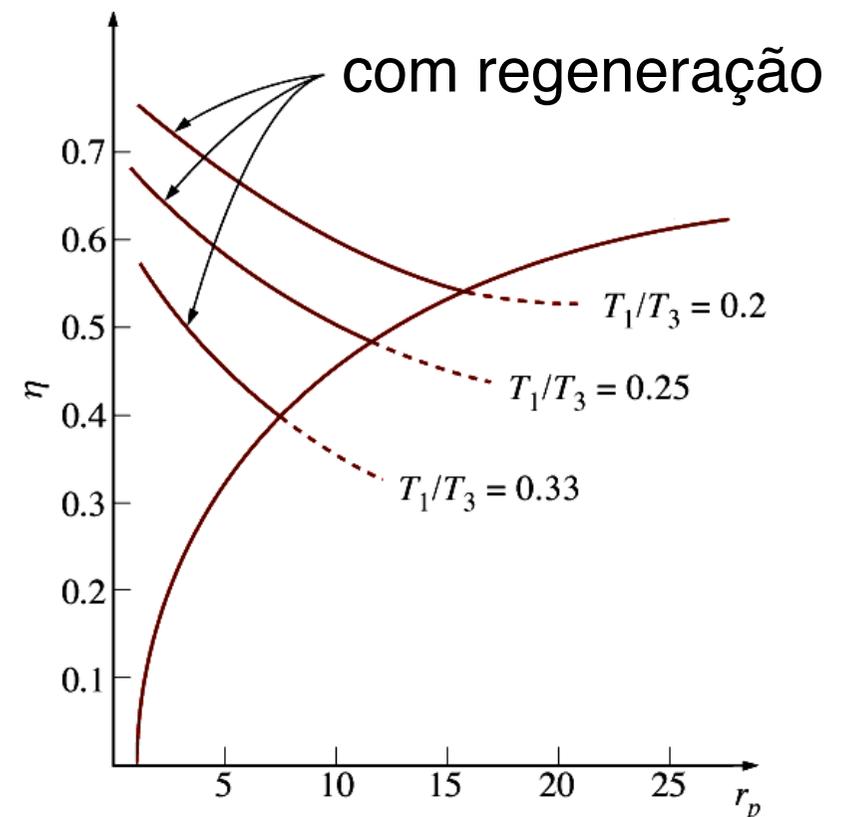
Ciclo Brayton regenerativo



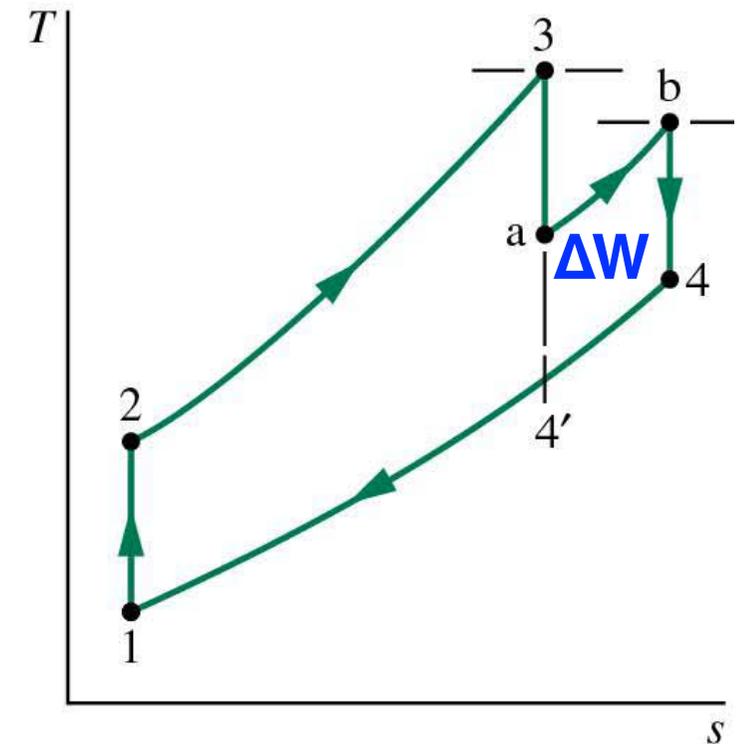
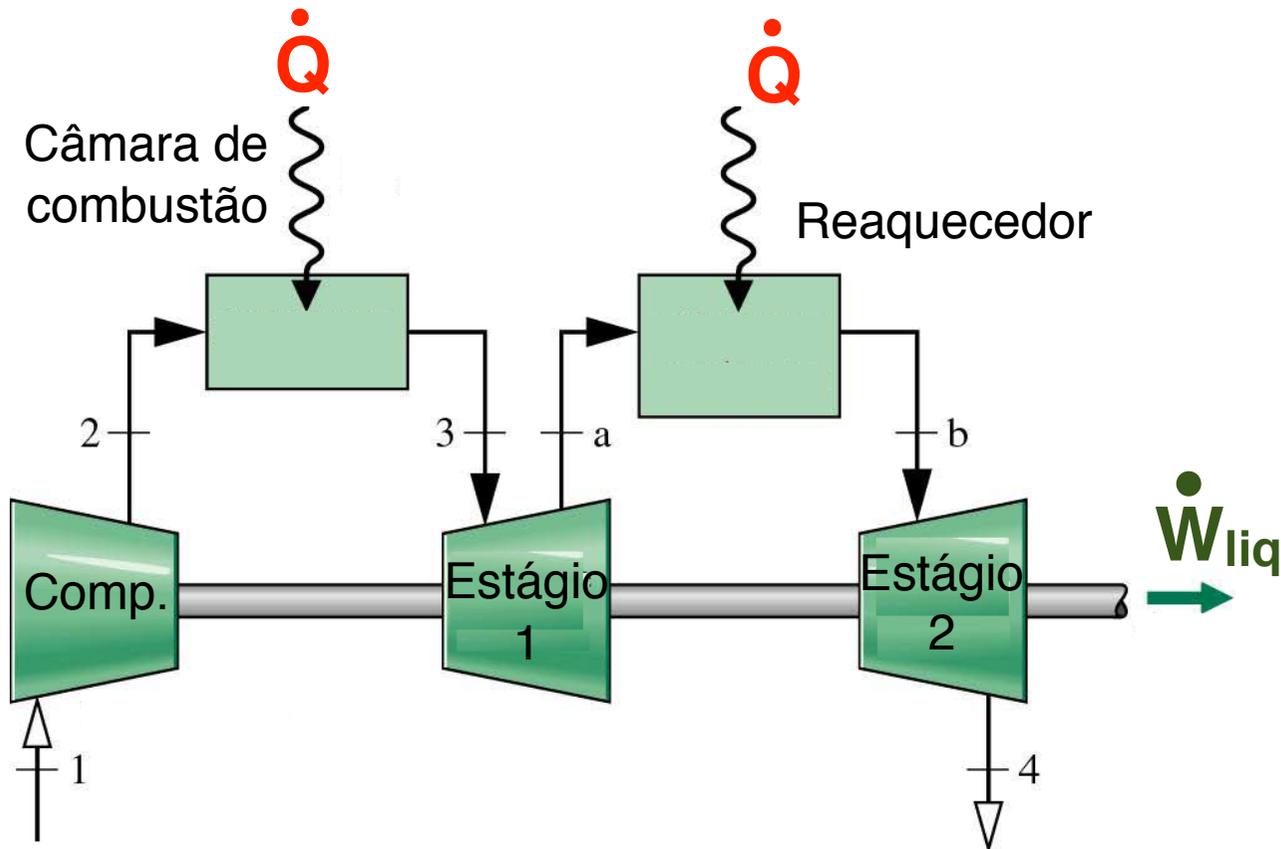
Eficiência com regenerador ideal



$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{\frac{k-1}{k}}$$



Ciclo Brayton com reaquecimento





$$W_{\text{rev,c}} = \int_1^2 v dP - \int_1^2 T \delta S_{\text{ger}}$$

Como podemos minimizar o trabalho?

O que podemos fazer adicionalmente?

Manter v o menor possível diminuindo a temperatura!



$$W_{\text{rev,c}} = \int_1^2 v dP - \int_1^2 T \delta S_{\text{ger}}$$

Como podemos minimizar o trabalho?

O que podemos fazer adicionalmente?

Manter v o menor possível diminuindo a temperatura!



Isentrópico ($Pv^k = \text{cte}$):

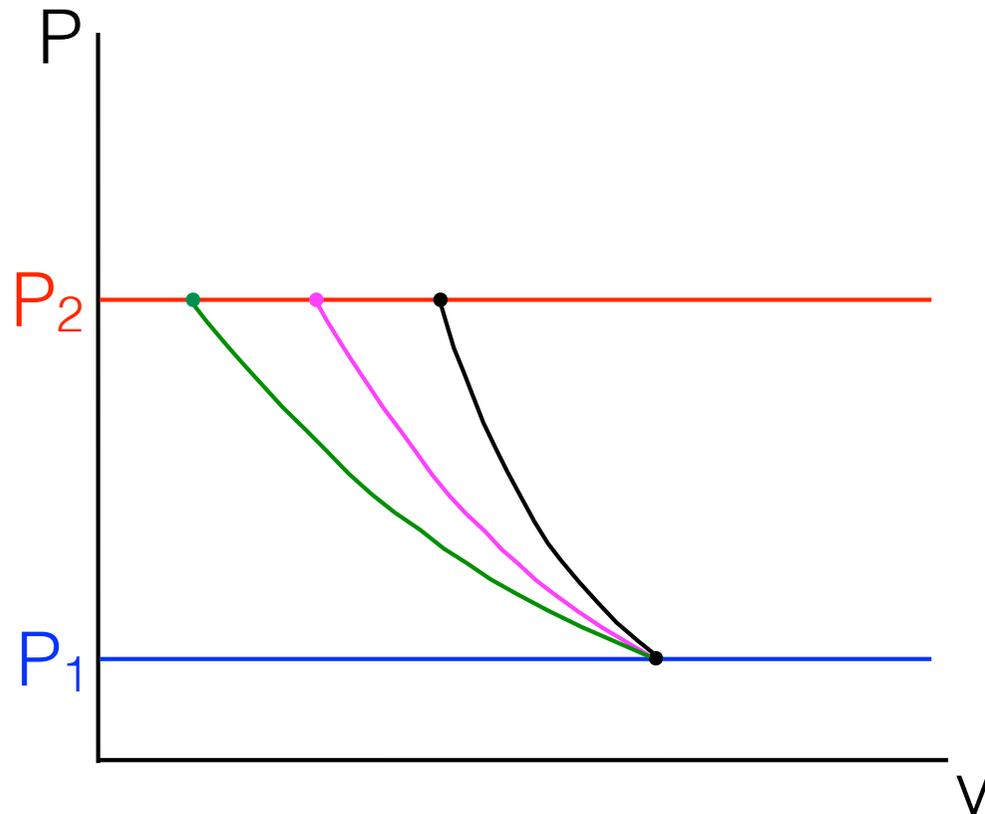
$$w_c = \frac{kRT_1}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Politrópico ($Pv^n = \text{cte}$):

$$w_c = \frac{nRT_1}{n-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Isotérmico ($Pv^k = \text{cte}$):

$$w_c = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$



processo adiabático reversível ($n = k$)

politrópico não-adiabático ($1 < n < k$)

processo isotérmico ($n = 1$)

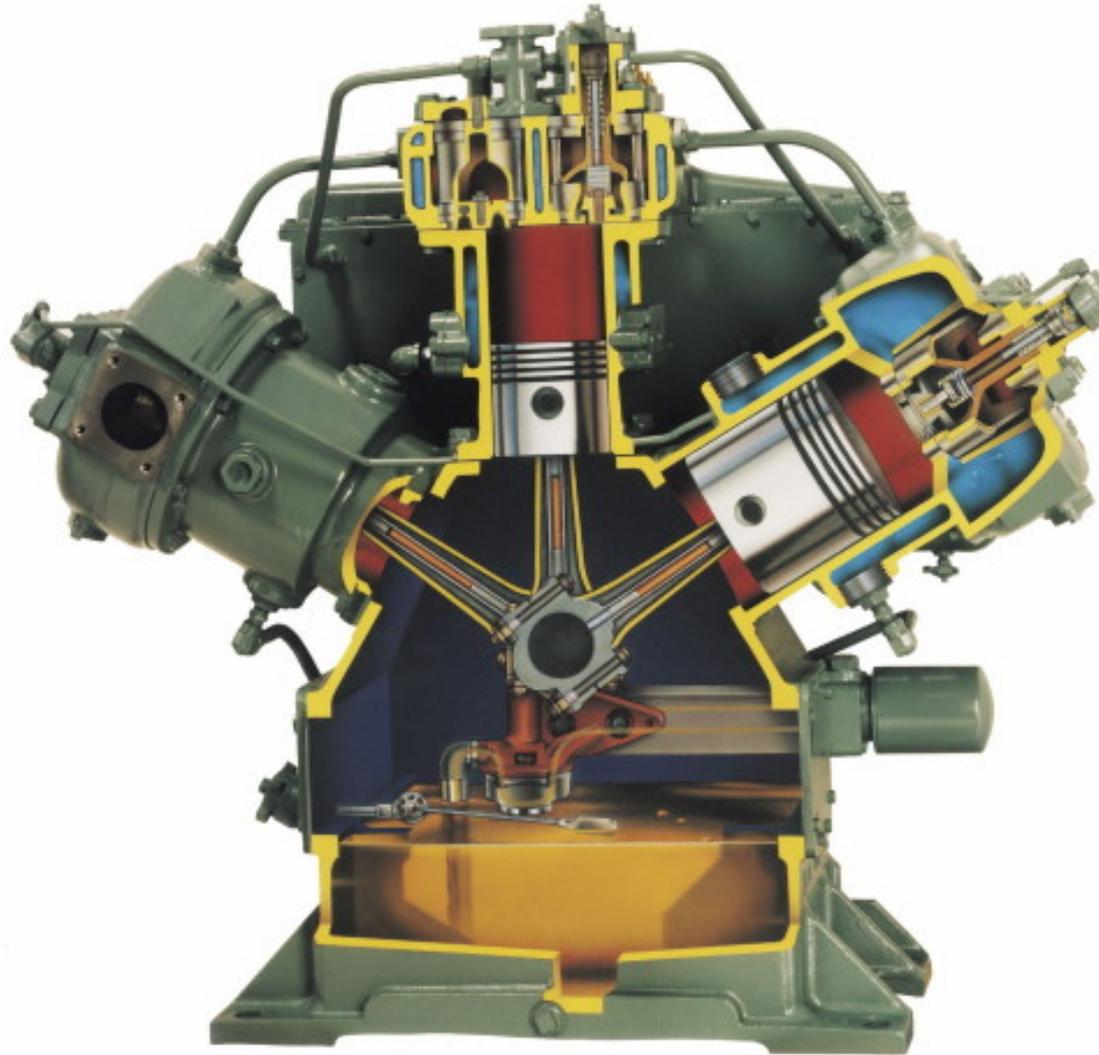
Qual processo conduz ao menor trabalho?

Isotérmico!

Compressor resfriado a água

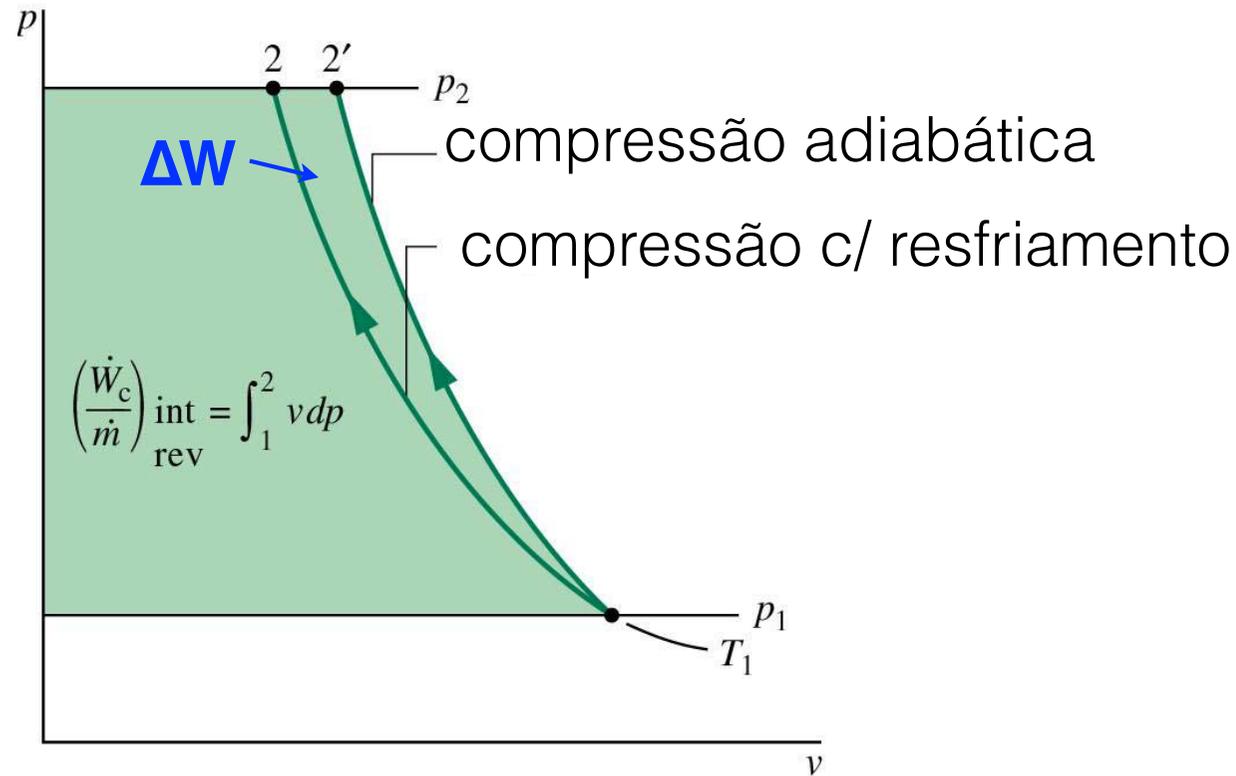


Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

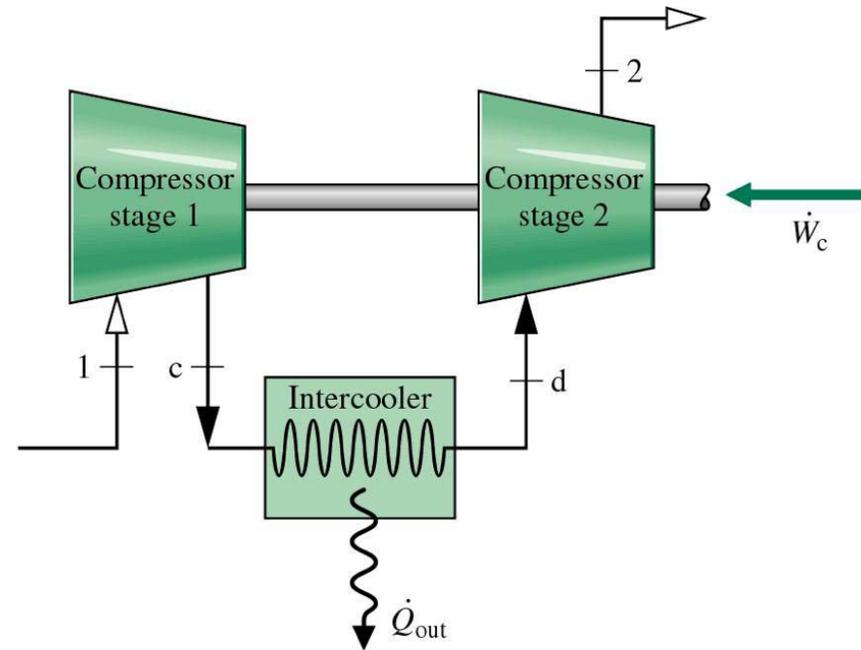


<http://www.epowerrail.com/Product%20pages/air%20compressors.htm>

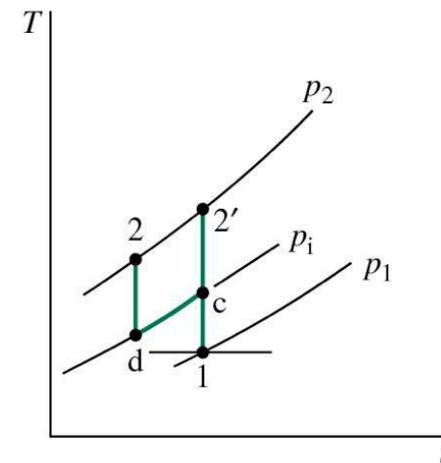
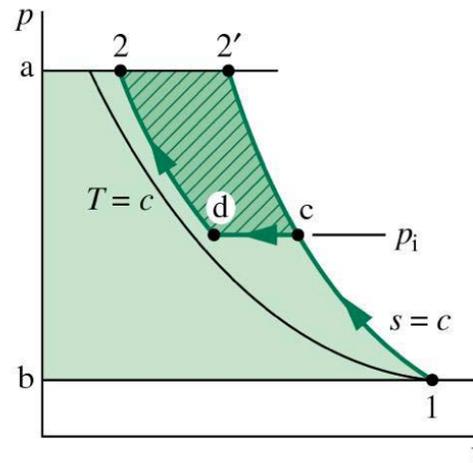
Compressão com “intercooler”



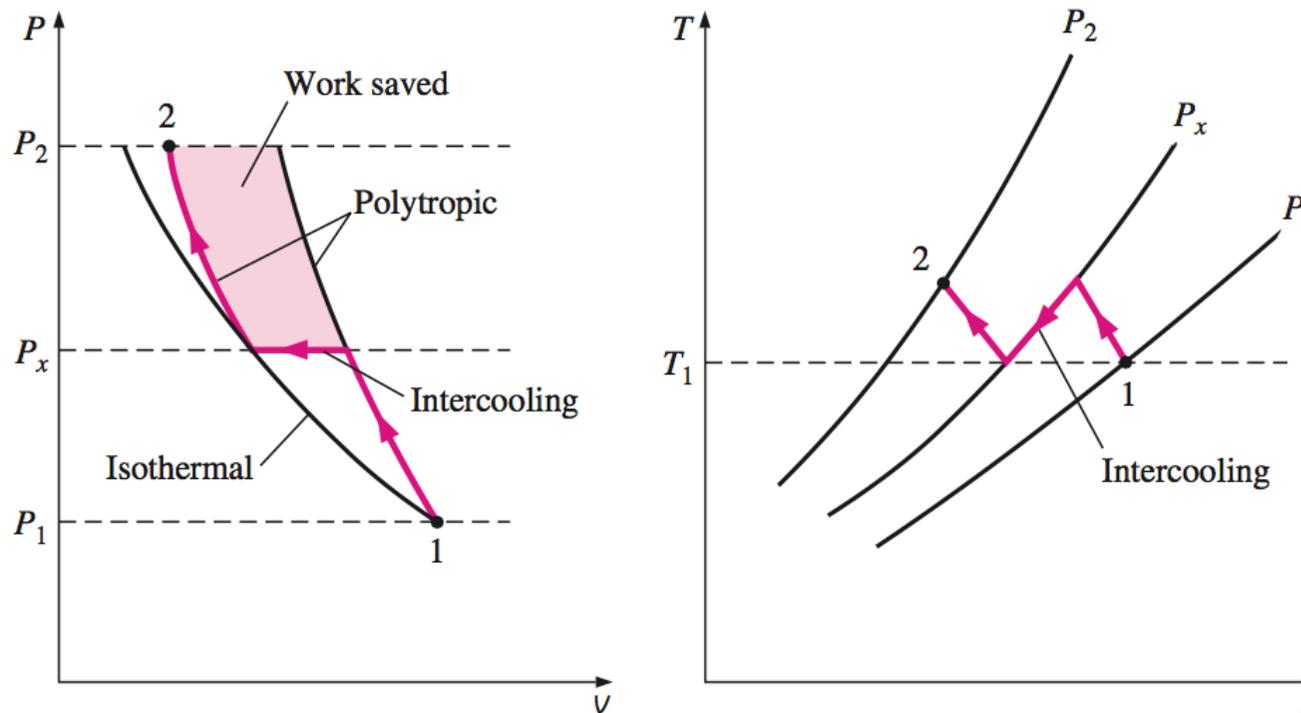
Compressão com “intercooler”



Menor T_2



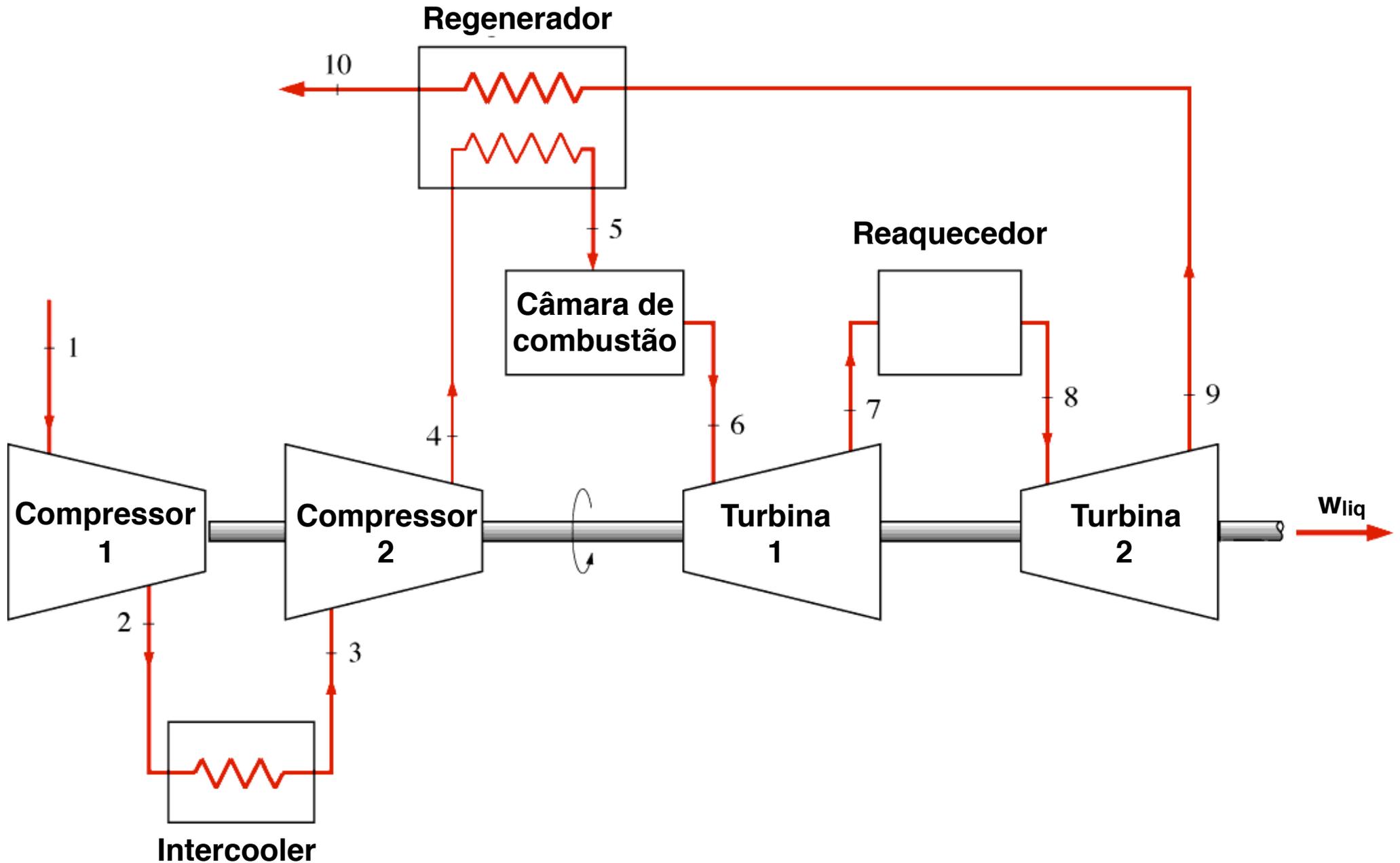
Compressão com “intercooler”



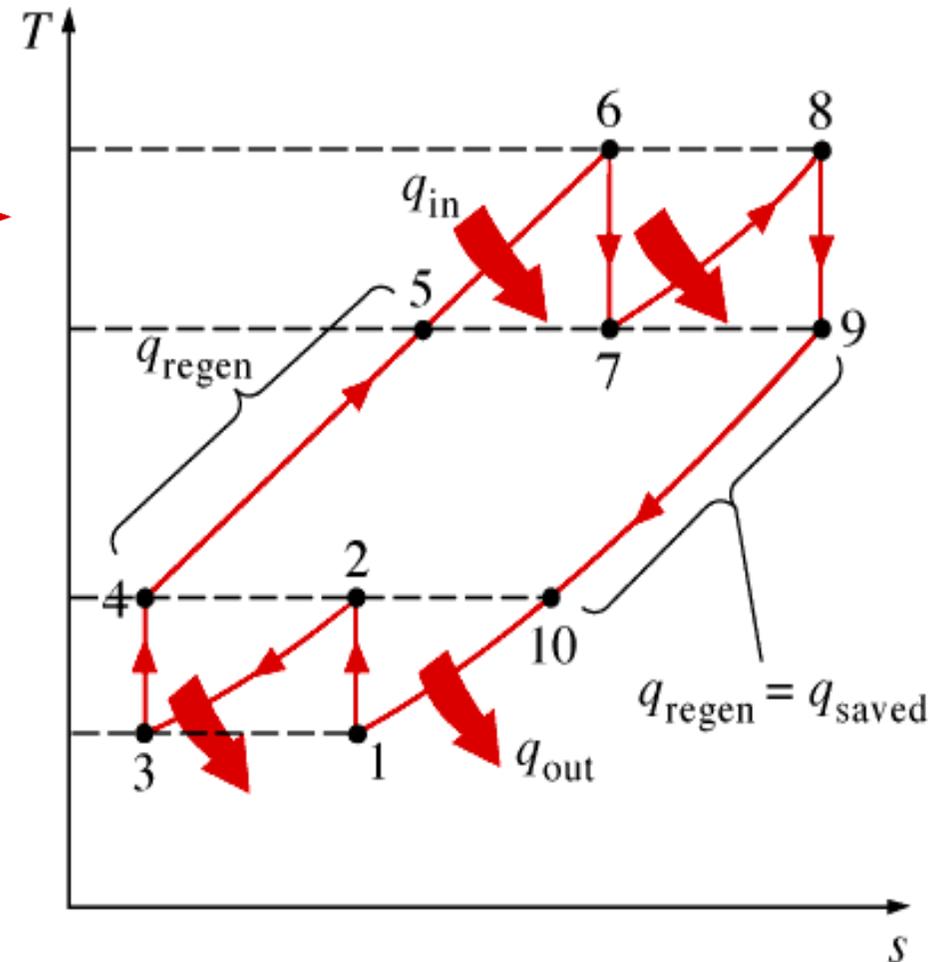
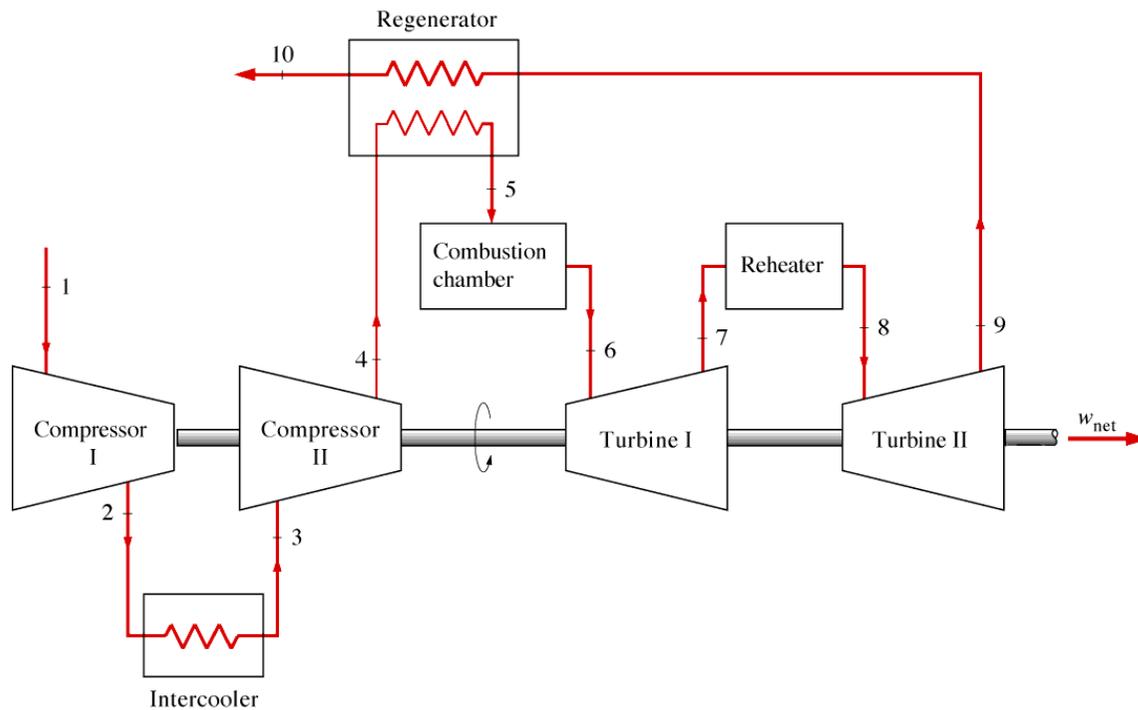
$$W_{c,1} + W_{c,2} = \frac{nRT_1}{n-1} \left[\left(\frac{P_x}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{nRT_1}{n-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_x} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Minimizando $\frac{P_x}{P_1} = \frac{P_2}{P_x}$ $W_{c,1} = W_{c,2}$

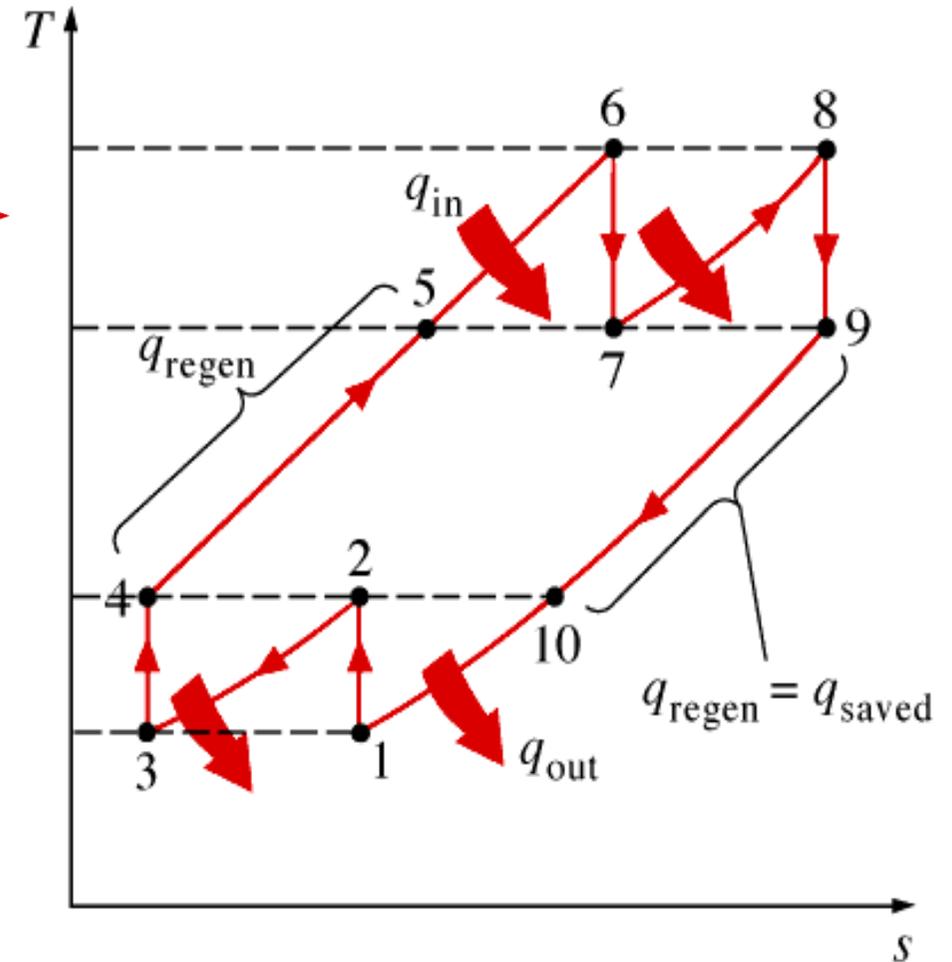
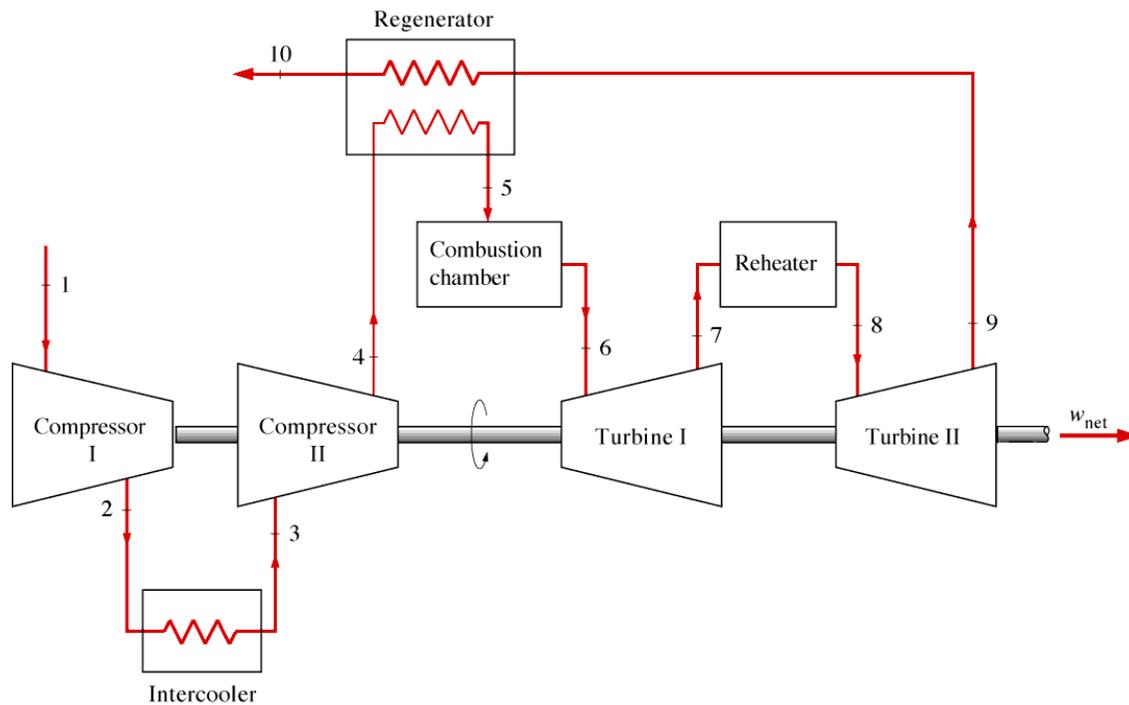
Brayton com intercooler, regenerador e reaquecedor



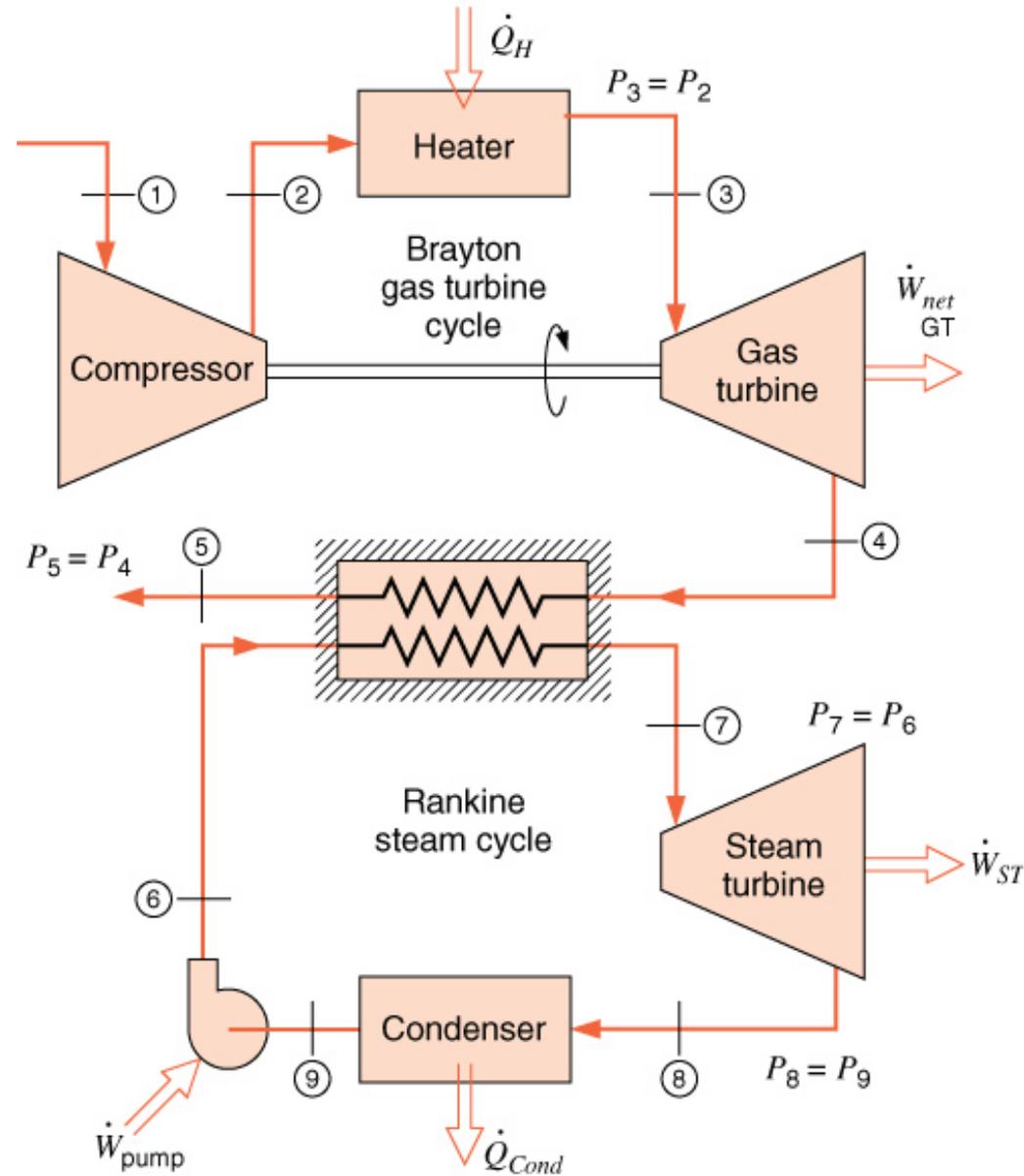
Brayton com intercooler, regenerador e reaquecedor

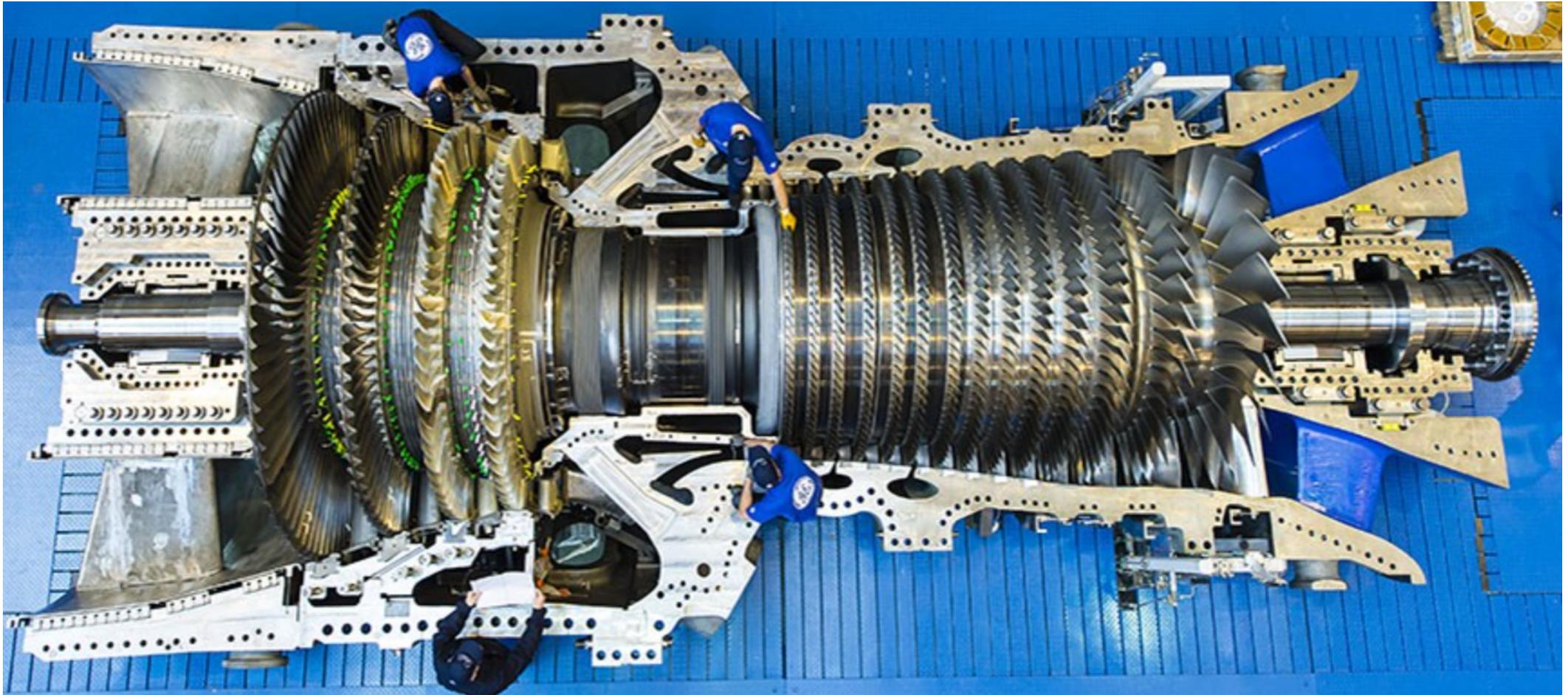


Brayton com intercooler, regenerador e reaquecedor



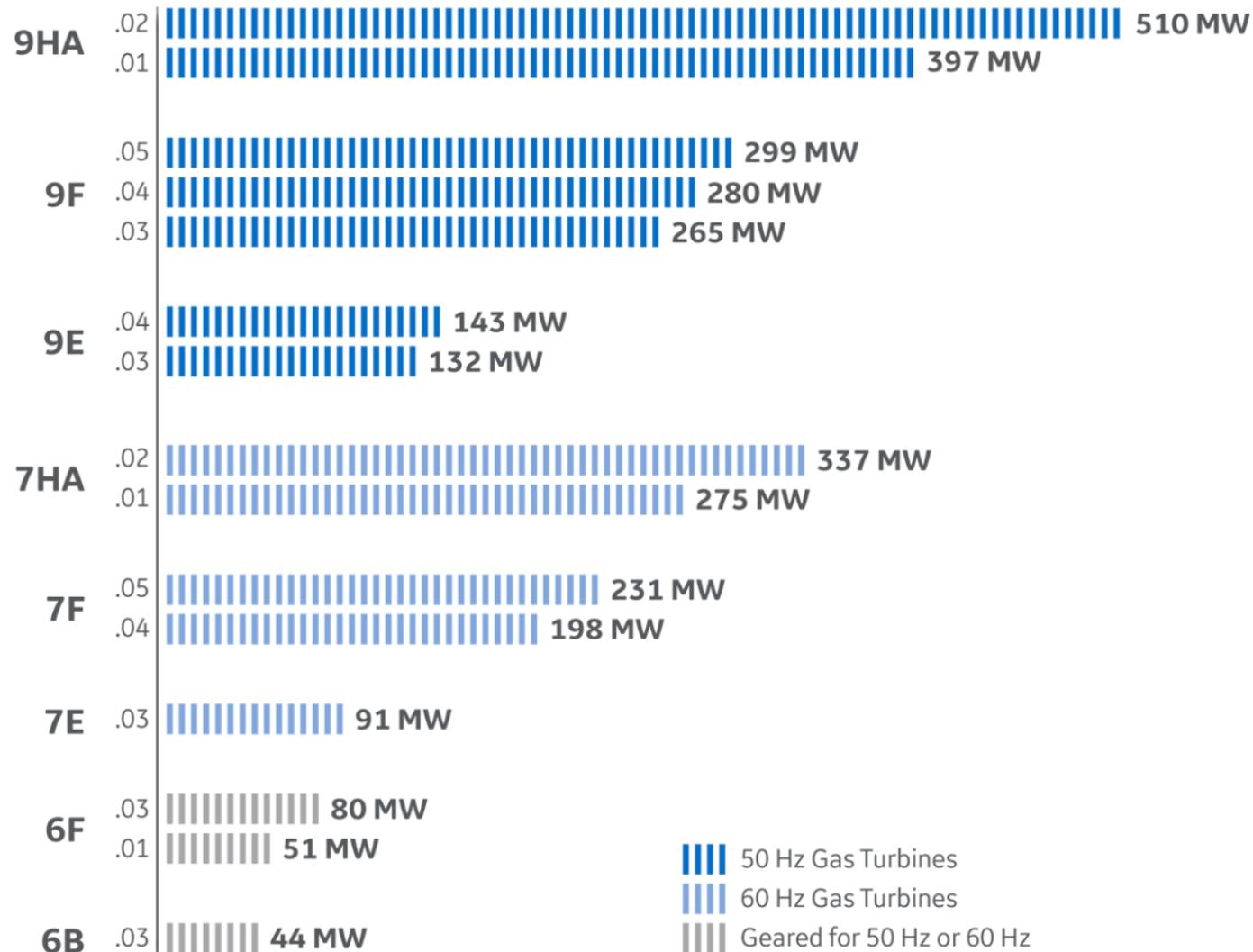
Ciclo combinado







GE's Heavy Duty Gas Turbine Portfolio





América latina

Gas Turbines	Steam Turbines
255 units	296 units
27 GW	13 GW

América do norte

Gas Turbines	Steam Turbines
1,397 units	3,408 units
170 GW	360 GW



9HA.02 – Ciclo simples

Potência / MW	510
Eficiência / %	41,8
Razão de pressão	23,5
Temperatura / °C	1427
T na exaustão / °C	652
Emissão NOx / ppm	25
Emissão CO / ppm	9

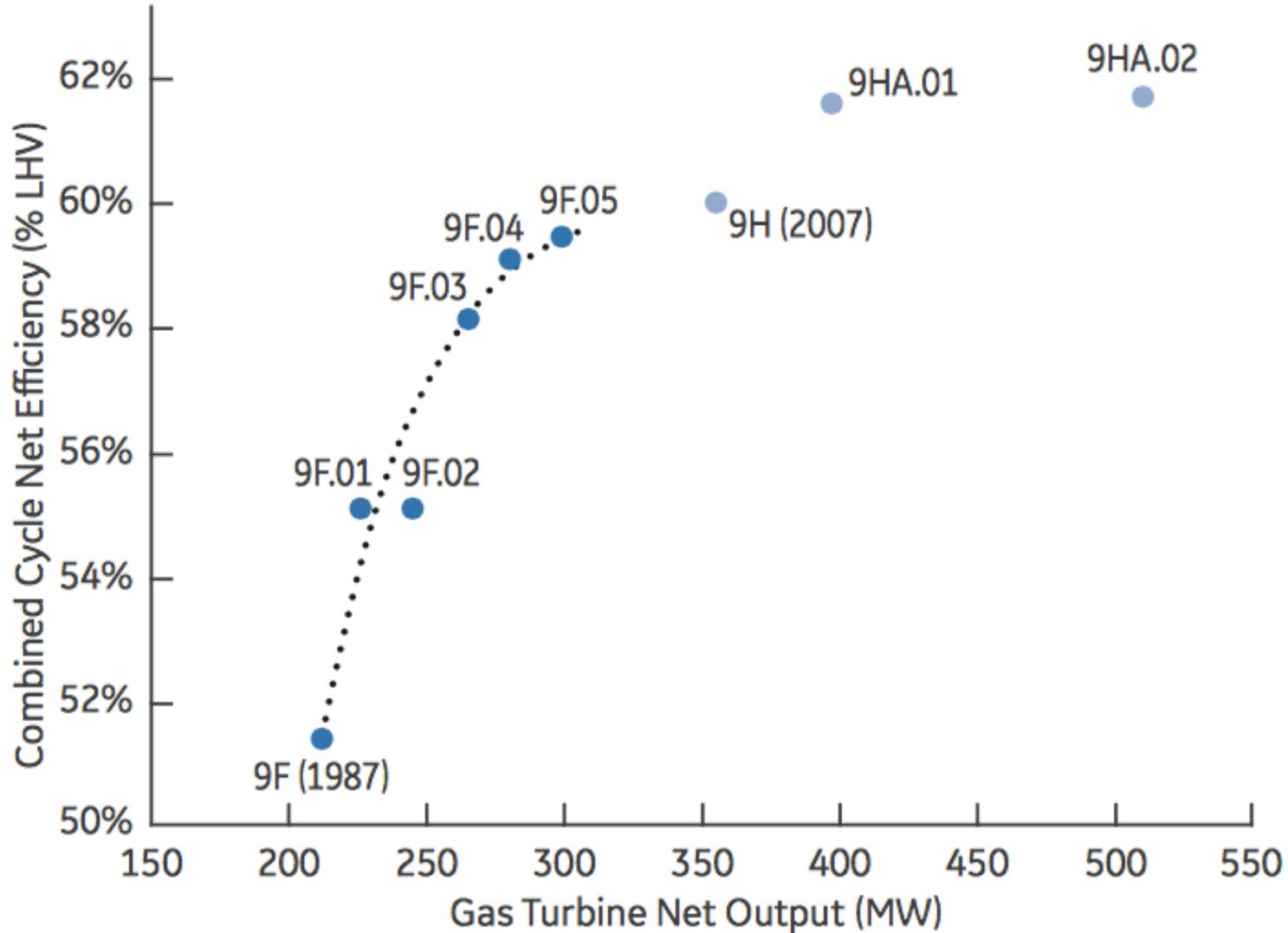
9HA.02 – Ciclo combinado

Potência / MW	755
Eficiência / %	61,8
Reaquecimento / °C	600

Ciclo combinado (2015)



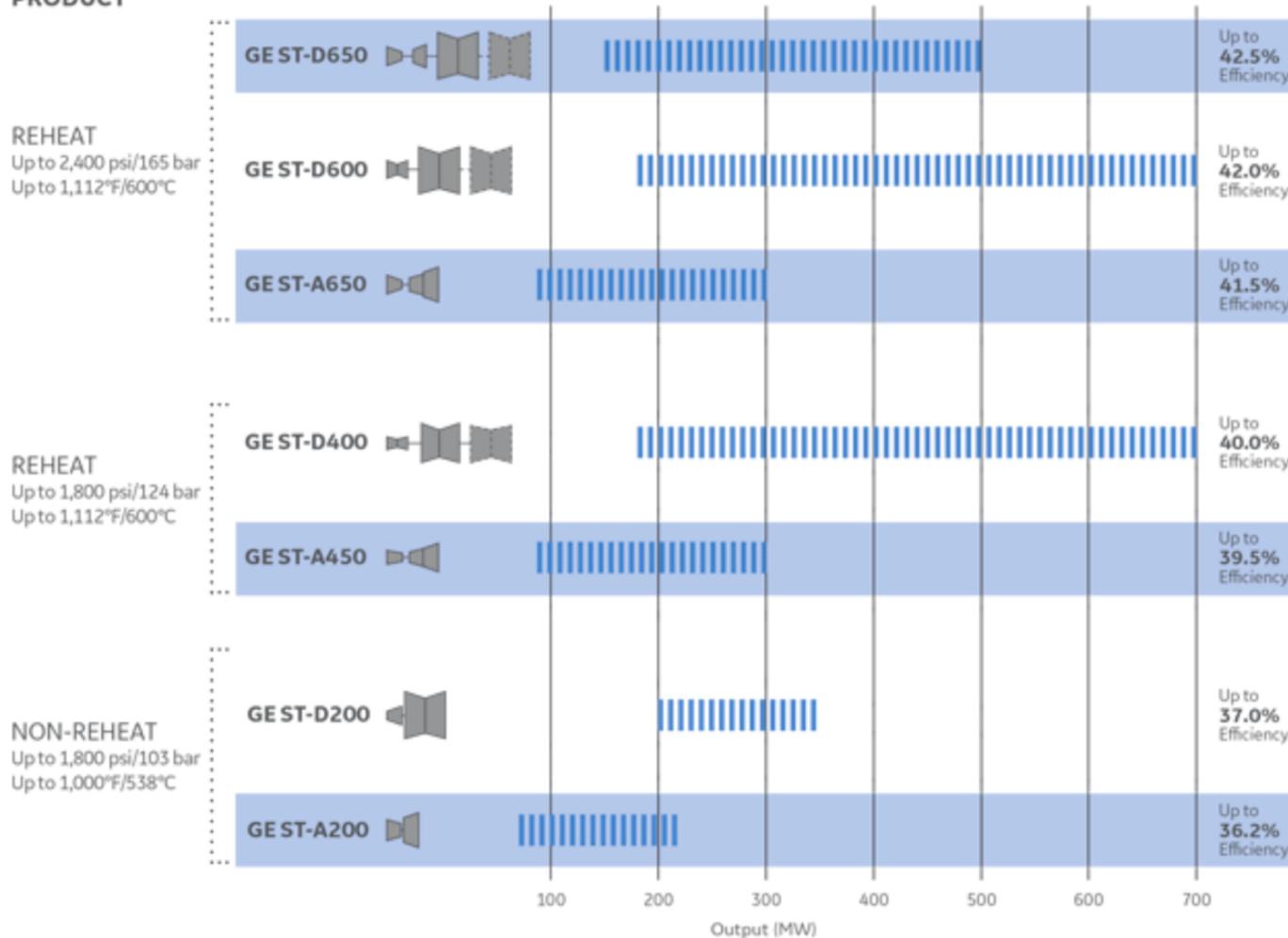
50 Hz





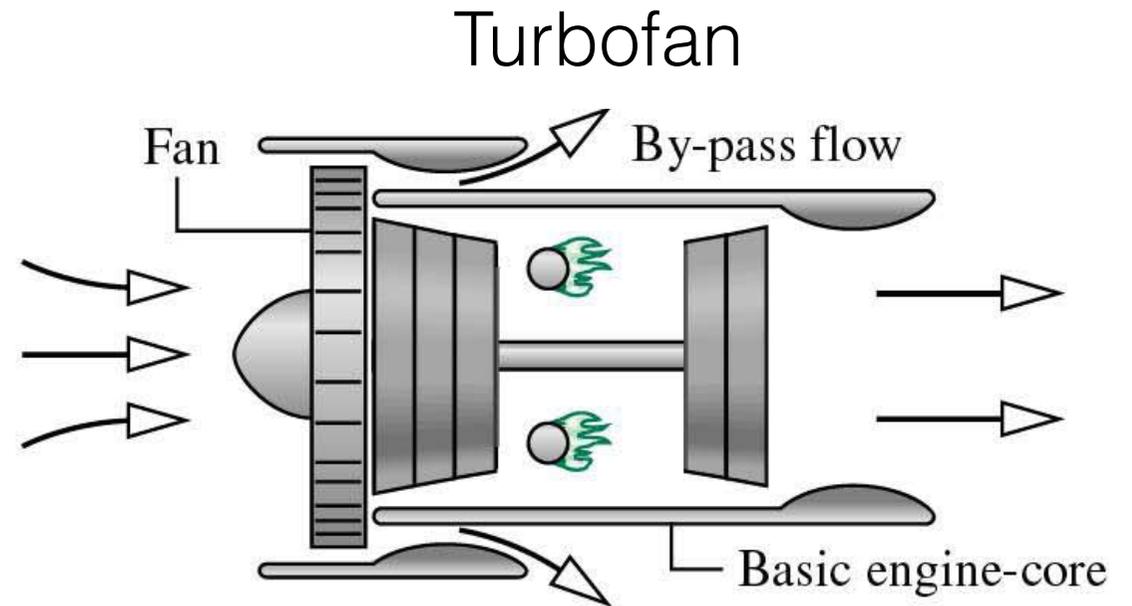
Combined Cycle Steam Turbines

PRODUCT





~ 500 kN de empuxo!





1) Considere um ciclo de turbina a gás ideal com dois estágios de compressão e dois estágios de expansão. A razão de pressão em cada estágio do compressor e da turbina é de 3. O ar entra em cada estágio do compressor a 300K e em cada estágio da turbina a 1200K. Considerando calores específicos variáveis, pede-se: **(a)** o esquema da instalação com e sem regenerador, **(b)** a representação do ciclo com e sem regenerador em um diagrama T-s, **(c)** a relação entre a potência necessária para acionar o compressor e a potência desenvolvida pela turbina, assim como o rendimento térmico do ciclo para o caso em que não há um regenerador, e **(d)** a relação entre a potência necessária para acionar o compressor e a potência desenvolvida pela turbina, assim como o rendimento térmico para o caso em que há um regenerador com eficiência de 75%.

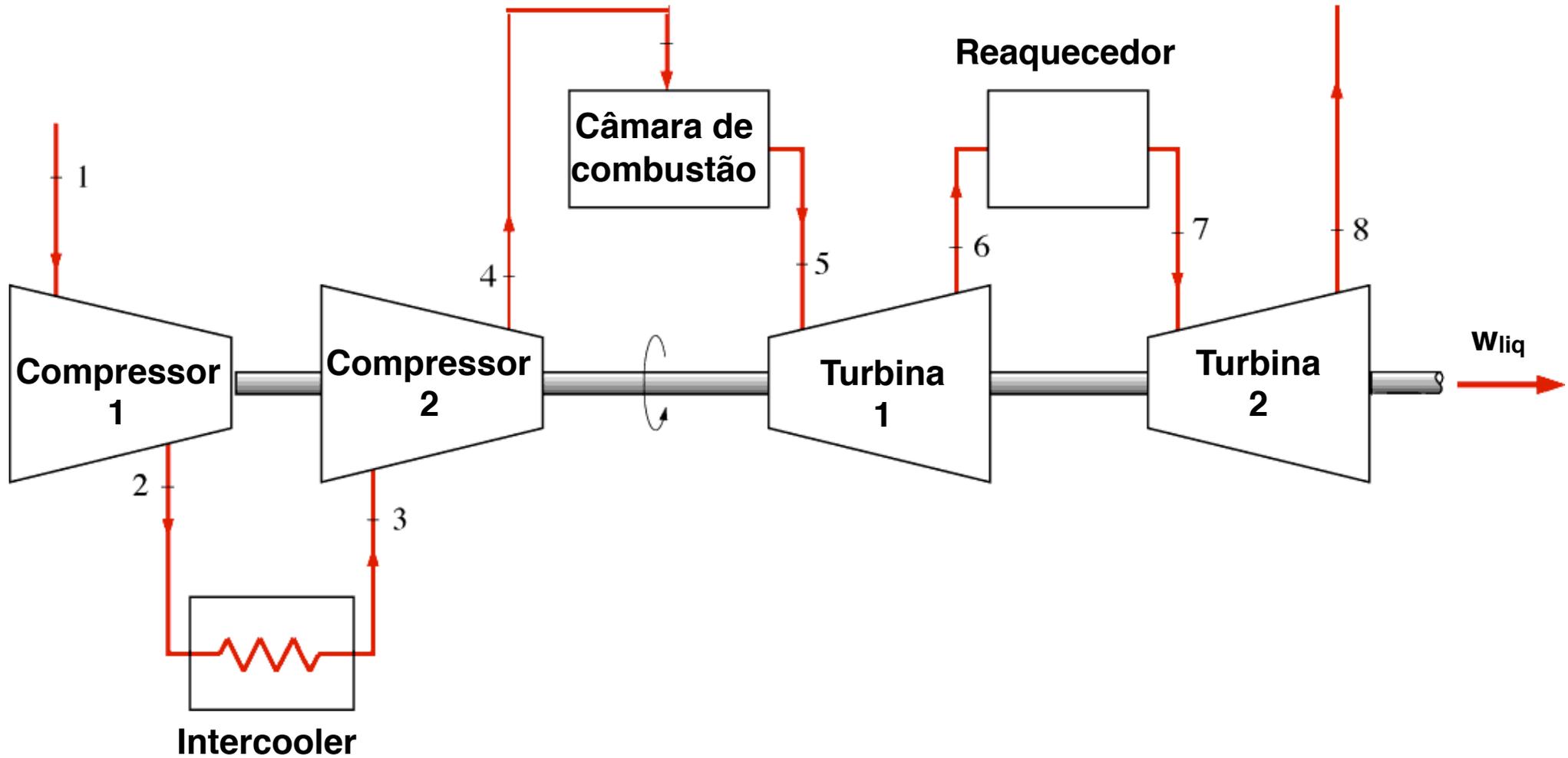


Solução

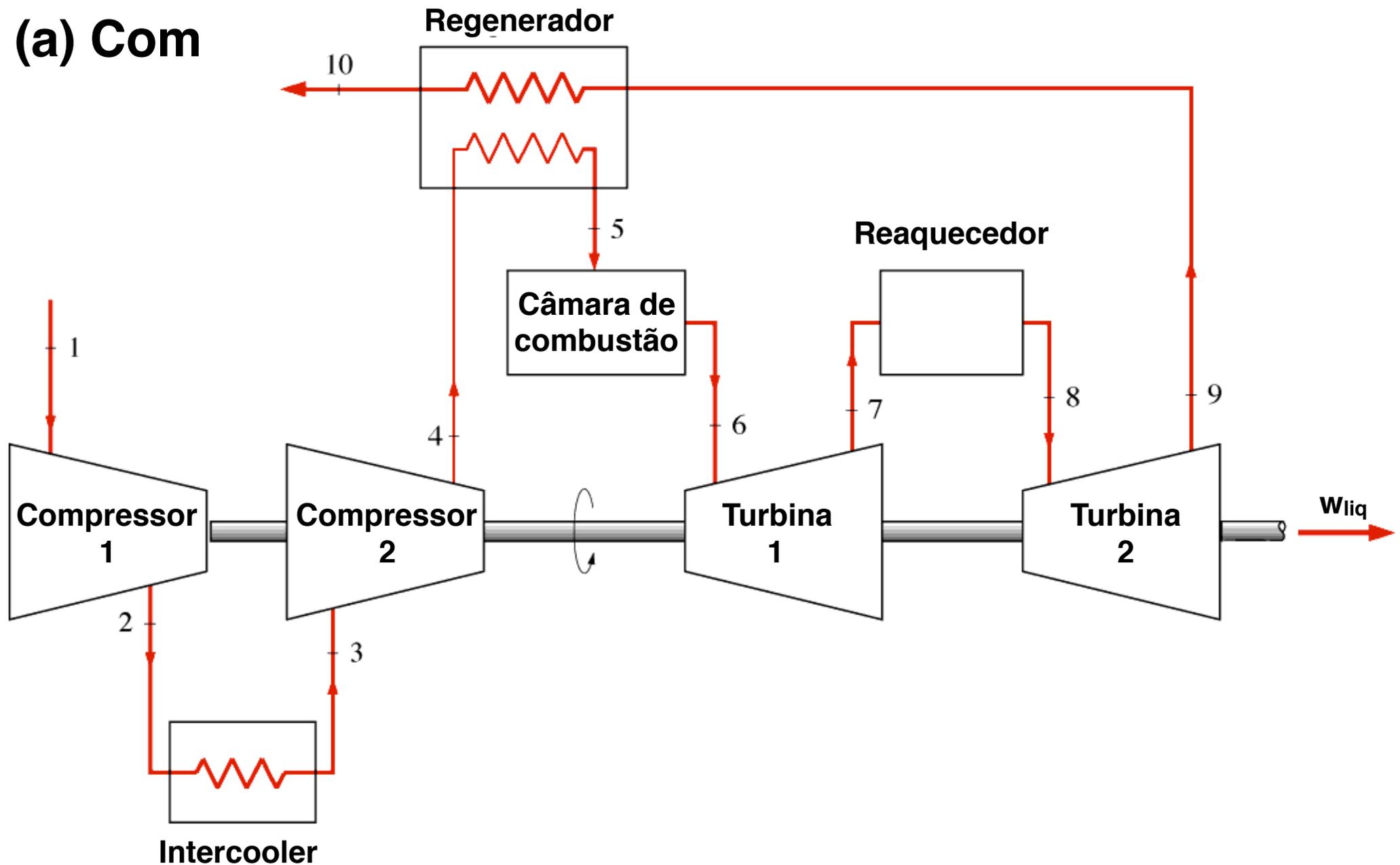
Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Ciclo padrão a ar;
5. Gás ideal com calores específicos variáveis.

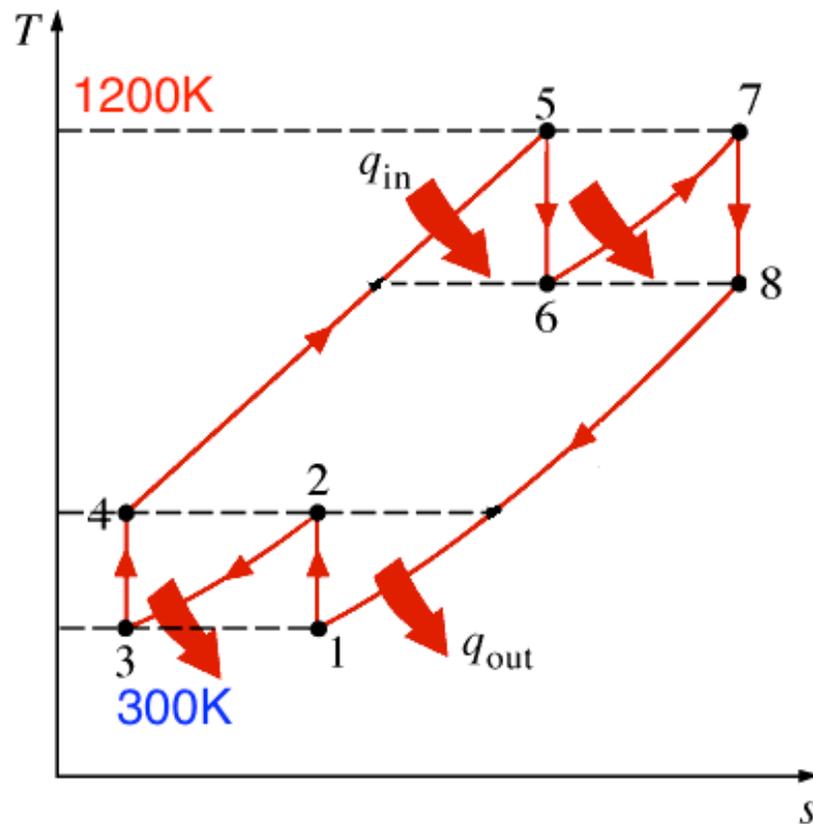
(a) Sem regenerador



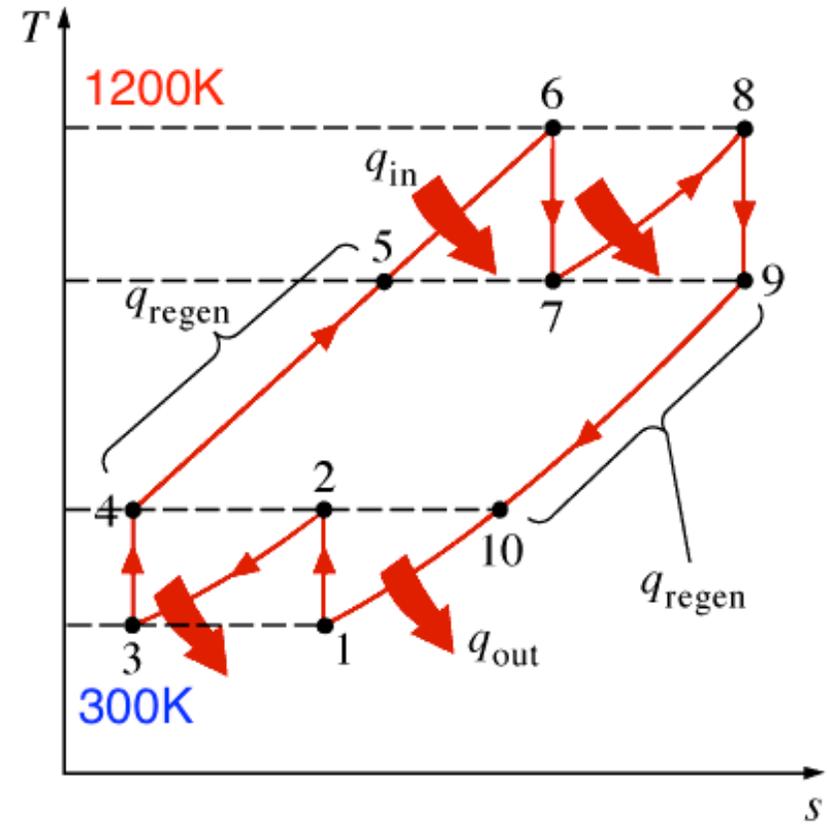
(a) Com



(b) Sem regenerador



(b) Com regenerador



(c) Sem regenerador

◆ **Estado 1:** $T_1 = 300\text{K}$

$$h_1 = h_3 = 300,47\text{kJ/kg}$$

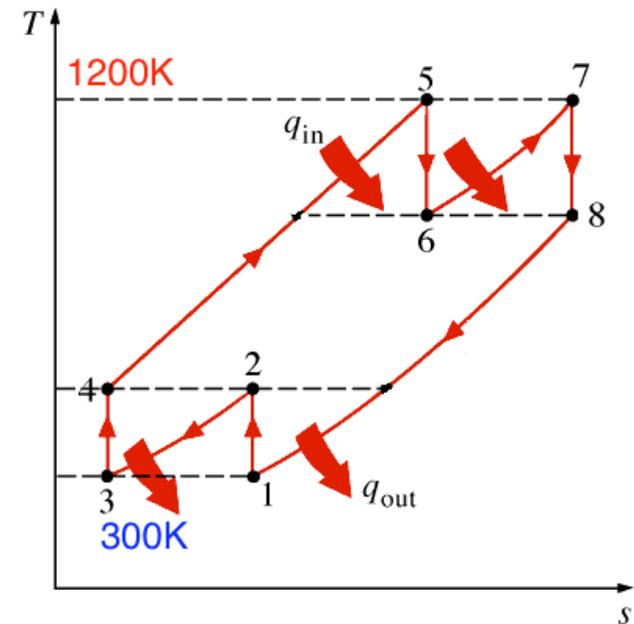
$$s_1^T = 6,86926\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estado 2:** $s_2 = s_1$

$$\therefore s_2 - s_1 = s_2^T - s_1^T - R \ln P_2/P_1 = 0$$

$$s_2^T = s_1^T + R \ln P_2/P_1 = 6,86926 + 0,287 \cdot \ln 3$$

$$s_2^T = 7,18\text{kJ/kgK}$$



Interpolando, $T_2 = 410\text{K}$ e $h_2 = 412\text{kJ/kg}$

Note que, $T_4 = T_2$ e $h_4 = h_2$

Propriedades do ar (gás ideal)

T / (K)	h / (kJ/kg)	s_0^T / (kJ/kgK)
400	401,3	7,15926
420	421,59	7,20875

(c) Sem regenerador

◆ **Estado 5:** $T_5 = 1200\text{K}$

$$h_5 = h_7 = 1277,81\text{kJ/kg}$$

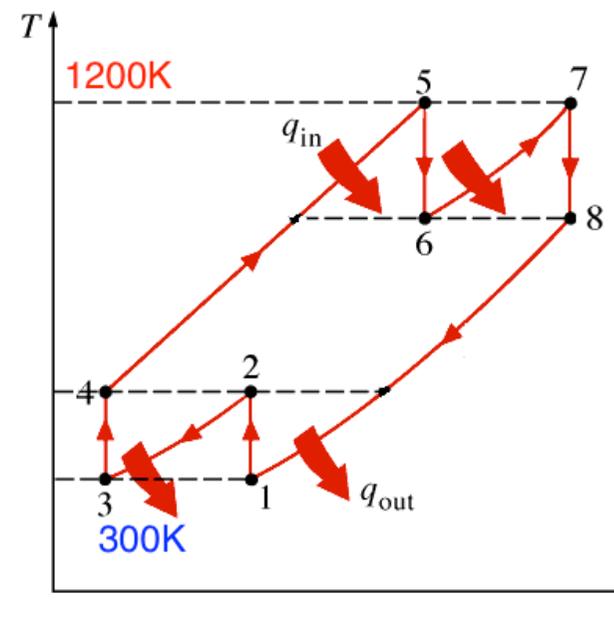
$$s_5^T = 8,34596\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estado 6:** $s_6 = s_5$

$$\therefore s_6 - s_5 = s_6^T - s_5^T - R \ln P_6/P_5 = 0$$

$$s_6^T = s_5^T + R \ln P_6/P_5 = 8,34596 + 0,287 \cdot \ln(1/3)$$

$$s_6^T = 8,03\text{kJ/kgK}$$



Propriedades do ar (gás ideal)

T / (K)	h / (kJ/kg)	s_0^T / (kJ/kgK)
900	933,15	8,01581
950	989,44	8,07667

Interpolando, $T_6 = 912\text{K}$ e $h_6 = 947\text{kJ/kg}$

Note que, $T_8 = T_6$ e $h_8 = h_6$

(c) Sem regenerador

◆ **Trabalho específico para acionar os compressores:**

$$w_c = 2(h_2 - h_1) = 2(412 - 300,47) = 223 \text{kJ/kg}$$

◆ **Trabalho específico nas turbinas:**

$$w_T = 2(h_5 - h_6) = 2(1277,81 - 947) = 662 \text{kJ/kg}$$

◆ **Calor fornecido ao ciclo:**

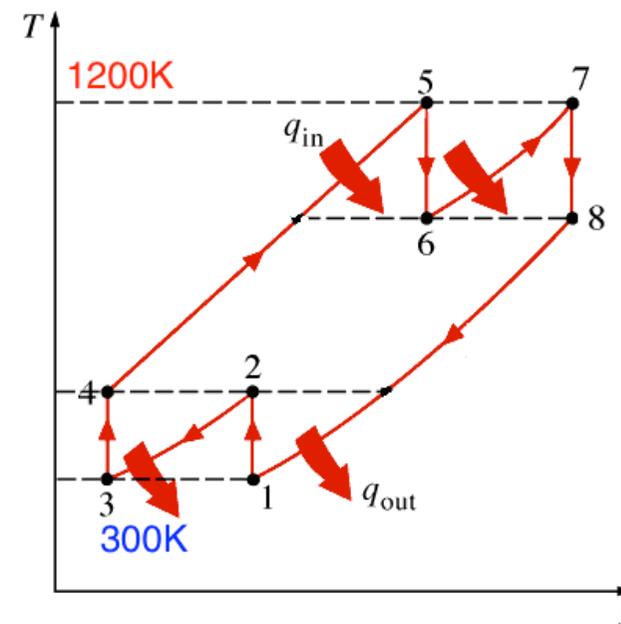
$$q_{in} = (h_5 - h_4) + (h_7 - h_6) = 1277,81 - 412 + 1277,81 - 947 = 1197 \text{kJ/kg}$$

◆ **Back work:**

$$r_{bw} = w_c / w_T = 223 / 662 = 0,337$$

◆ **Rendimento térmico:**

$$\eta_t = (w_T - w_c) / q_{in} = (662 - 223) / 1197 = 0,367$$



(c) Com regenerador

◆ Os trabalhos específicos nos compressores e turbinas permanecem iguais, logo:

$$r_{bw} = 0,337$$

◆ Calor no regenerador:

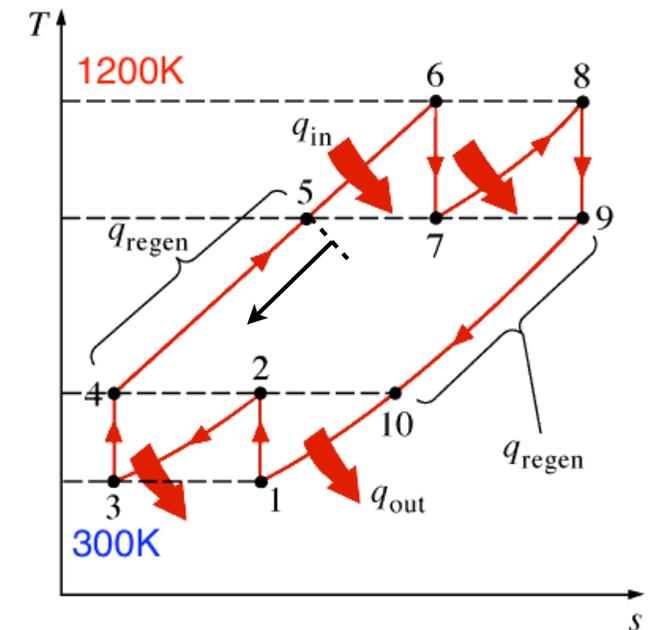
$$\eta_{reg} = \frac{q_{reg}}{(h_9 - h_4)} \longrightarrow q_{reg} = \eta_{reg} (h_9 - h_4) = 0,75 (947 - 412) = 401 \text{ kJ/kg}$$

◆ Calor na câmara de combustão:

$$q_{in} = q_{in,anterior} - q_{reg} = 1197 - 401 = 796 \text{ kJ/kg}$$

◆ Rendimento térmico:

$$\eta_t = (w_T - w_c) / q_{in} = (662 - 223) / 796 = 0,552$$



Vamos repetir os cálculos considerando calores específicos constantes ($c_{p0} = 1,004$ e $c_{v0} = 0,717\text{kJ/kgK}$, 300K)...

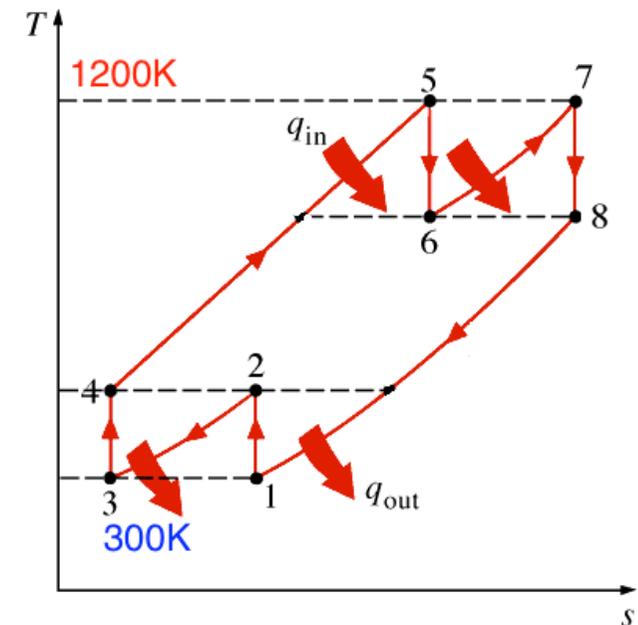
(c) Sem regenerador

◆ Estado 1: $T_1 = 300\text{K}$

◆ Estado 2: $s_2 = s_1$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\rightarrow \frac{T_2}{T_1} = 3^{\frac{1,4-1}{1,4}} \rightarrow T_2 = 411\text{K}$$



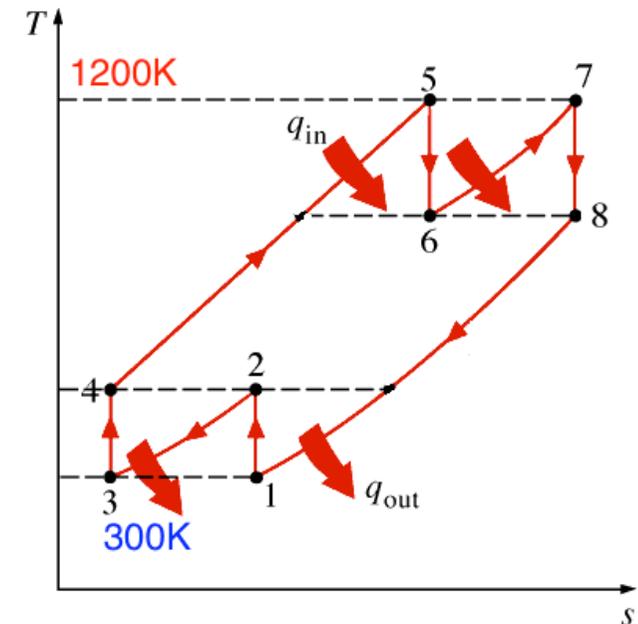
(c) Sem regenerador

◆ Estado 5: $T_5 = 1200\text{K}$

◆ Estado 6: $s_6 = s_5$

$$\frac{T_6}{T_5} = \left(\frac{P_6}{P_5}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\rightarrow \frac{T_6}{T_5} = 1/3 \frac{1,4-1}{1,4} \rightarrow T_6 = 877\text{K}$$



(c) Sem regenerador

◆ **Trabalho específico para acionar os compressores:**

$$W_c = 2(h_2 - h_1) = 2c_{p0}(T_2 - T_1) = 223\text{kJ/kg}$$

◆ **Trabalho específico nas turbinas:**

$$W_T = 2(h_5 - h_6) = 2c_{p0}(T_5 - T_6) = 649\text{kJ/kg}$$

◆ **Calor fornecido ao ciclo:**

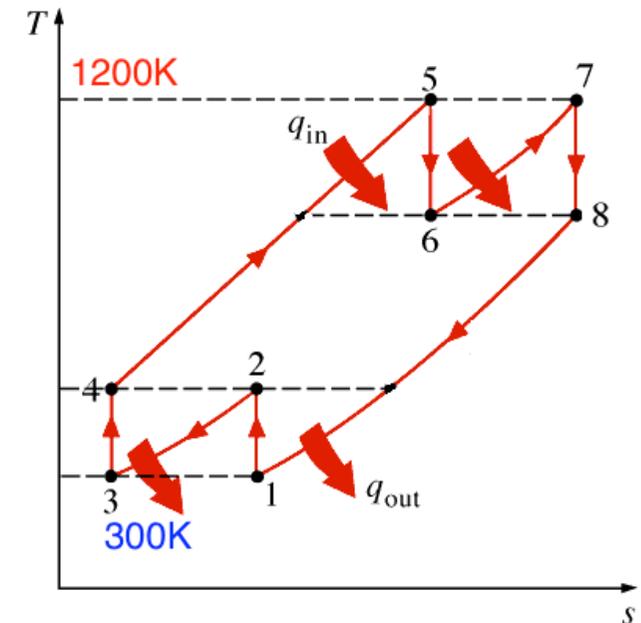
$$q_{in} = (h_5 - h_4) + (h_7 - h_6) = c_{p0}(T_5 - T_4 + T_7 - T_6) = 1116\text{kJ/kg}$$

◆ **Back work:**

$$r_{bw} = W_c / W_T = 223 / 649 = 0,343$$

◆ **Rendimento térmico:**

$$\eta_t = (W_T - W_c) / q_{in} = (649 - 223) / 1116 = 0,382$$



Pequena diferença!

(c) Com regenerador

◆ Calor no regenerador:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{q_{\text{reg}}}{(h_9 - h_4)}$$

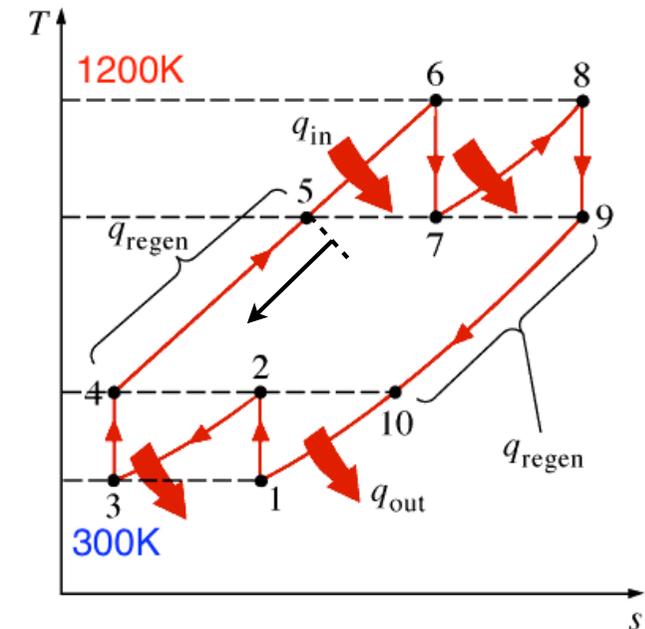
➔ $q_{\text{reg}} = \eta_{\text{reg}} c_{p0}(T_9 - T_4) = 351 \text{ kJ/kg}$

◆ Calor na câmara de combustão:

$$q_{\text{in}} = q_{\text{in,anterior}} - q_{\text{reg}} = 1116 - 351 = 765 \text{ kJ/kg}$$

◆ Rendimento térmico:

$$\eta_t = (w_T - w_c) / q_{\text{in}} = (649 - 223) / 796 = 0,557$$

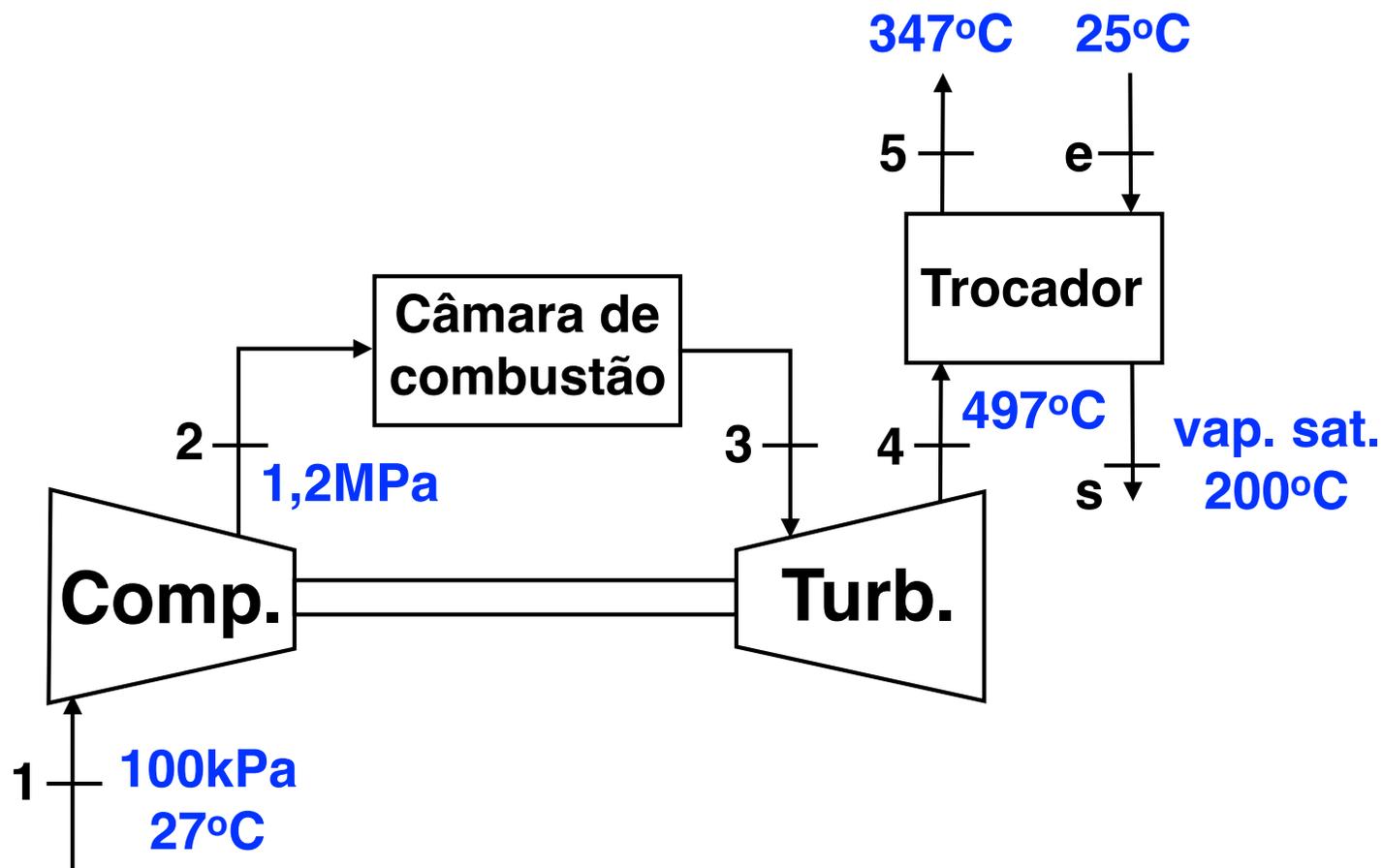




2) Uma planta de cogeração é composta basicamente por uma turbina a gás e um trocador de calor para produção de vapor. A planta opera segundo um ciclo simples de Brayton entre as pressões de 100kPa e 1200kPa. Ar entra no compressor a 27°C. Os gases de combustão deixam a turbina a 497°C e o trocador de calor a 347°C. Água líquida entra no trocador a 25°C deixando-o como vapor saturado a 200°C. A potência líquida produzida no ciclo é de 800kW. Assumindo uma eficiência isentrópica de 82% para o compressor e para a turbina e considerando calores específicos variáveis, determine:

- (a) temperatura do ar na entrada da turbina;
- (b) a relação entre a potência do compressor e da turbina e o rendimento térmico do ciclo não considerando o calor trocado como energia útil;
- (c) a vazão mássica de ar;
- (d) a taxa de produção de vapor no trocador de calor.

Esquema:





Solução

Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Ciclo padrão a ar;
4. Gás ideal com calores específicos variáveis.

Solução (a)

◆ **Estado 1:** $T_1 = 27^\circ\text{C}$ (300K) e $P_1 = 100\text{kPa}$

$$h_1 = 300,47\text{kJ/kg}$$

$$s_1 = s_1^T = 6,86926\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estado 2:** $P_2 = 1200\text{kPa}$ e $s_{2s} = s_1$

$$\therefore s_{2s} - s_1 = s_{2s}^T - s_1^T - R \ln P_2/P_1 = 0$$

$$s_{2s}^T = s_1^T + R \ln P_2/P_1 = 6,86926 + 0,287 \cdot \ln 12$$

$$s_{2s}^T = 7,58\text{kJ/kgK}$$

Propriedades do ar (gás ideal)		
T / (K)	h / (kJ/kg)	s_0^T / (kJ/kgK)
600	607,32	7,57638
620	628,38	7,6109

$$T_{2s} \approx 603\text{K} \text{ e } h_{2s} \approx 611\text{kJ/kg}$$

$$\eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad h_2 = 679\text{kJ/kg}$$

Solução (a)

◆ **Estados 3 e 4:** $T_4 = 497^\circ\text{C}$ (770K) e $P_4 = 100\text{kPa}$

$h_4 = 789,37\text{kJ/kg}$ e $s_4 = s_4^T = 7,8432\text{kJ/kgK}$

$$\eta_{s,T} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad 0,82 = \frac{h_3 - 789,37}{h_3 - h_{4s}} \quad \text{Eq. 1}$$

Problema iterativo!

$$s_3 = s_{4s} = s_{4s}^T - R \ln P_4 / P_{\text{ref}} = s_{4s}^T \quad \text{Eq. 2}$$

$$s_3 = s_3^T - R \ln P_3 / P_{\text{ref}} \Rightarrow s_3^T = s_3 + 0,287 \ln 12 \quad \text{Eq. 3}$$

Processo iterativo					
<i>palpite</i>	<i>tabela</i>	<i>Eq. 1</i>	<i>tabela</i>	<i>Eq. 2 e 3</i>	<i>Tabela</i>
$T_3 / (\text{K})$	$h_3 / (\text{kJ/kg})$	$h_{4s} / (\text{kJ/kg})$	$s_{4s}^T / (\text{kJ/kgK})$	$s_3^T / (\text{kJ/kgK})$	$T_3 / (\text{K})$
1200	1277,81	682,2	7,69	8,4	1256
1256	1344	667,6	7,67	8,38	1235
1246	1332	670,3	7,68	8,39	1246

Solução (b)

◆ **Trabalho específico para acionar o compressor:**

$$w_c = (h_2 - h_1) = 679 - 300,47 = 378 \text{ kJ/kg}$$

◆ **Trabalho específico nas turbinas:**

$$w_T = (h_3 - h_4) = 1332 - 789,37 = 543 \text{ kJ/kg}$$

◆ **Back work:**

$$r_{bw} = w_c / w_T = 378 / 543 = 0,696$$

◆ **Calor fornecido ao ciclo:**

$$q_{in} = (h_3 - h_2) = 1332 - 679 = 653 \text{ kJ/kg}$$

◆ **Rendimento térmico:**

$$\eta_t = (w_T - w_c) / q_{in} = (543 - 378) / 653 = 0,277$$



Solução (c)

◆ Potência líquida e vazão mássica

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{W}}{(W_T - W_C)} \quad \dot{m}_{ar} = \frac{800}{(543 - 378)} \quad \dot{m}_{ar} = 4,84 \text{ kg/s}$$

Solução (d)

◆ **balanço de energia no trocador de calor:**

$$\dot{m}_{\text{ar}}(h_4 - h_5) = \dot{m}_{\text{água}}(h_s - h_e)$$

◆ **Estado 5:** $T_5 = 620\text{K}$, assim $h_5 = 628,38\text{kJ/kg}$

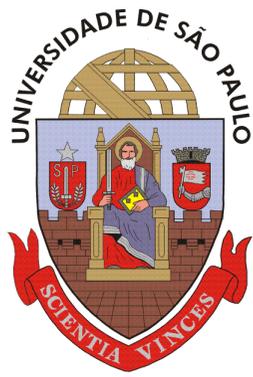
◆ **Estado s:** $T_s = 200^\circ\text{C}$ e $P_{\text{sat}} = 1553,8\text{kPa}$, assim $h_v = 2793,18\text{kJ/kg}$

◆ **Estado e:** $T_e = 25^\circ\text{C}$ e $P_e = 1553,8\text{kPa}$, $h_e = u_l(T_e) + P_e v_e$

$$h_e = 104,86 + 1553,8 \cdot 0,001003 = 106,4\text{kJ/kg}$$

$$4,84(789,37 - 628,38) = \dot{m}_{\text{água}}(2793,18 - 106,4)$$

$$\dot{m}_{\text{água}} = 0,27\text{kg/s}$$



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

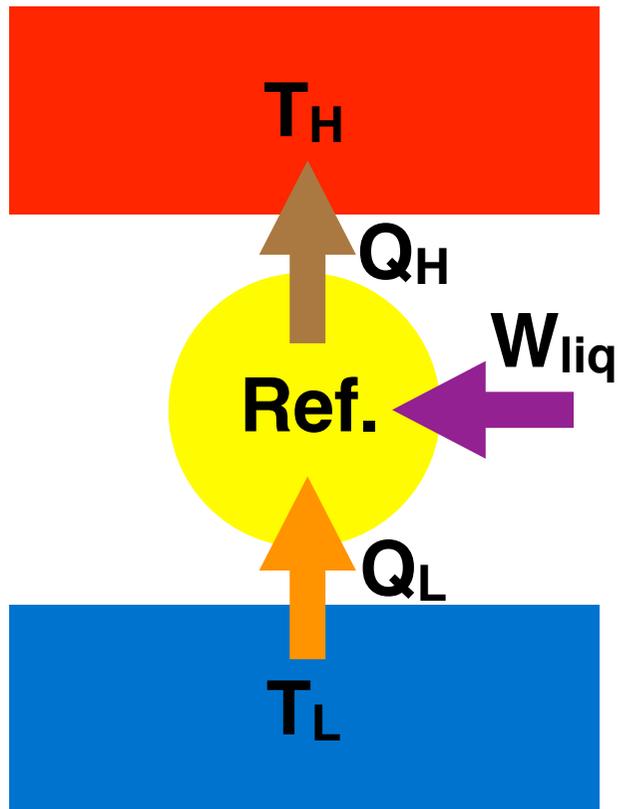
12) Ciclos de Refrigeração



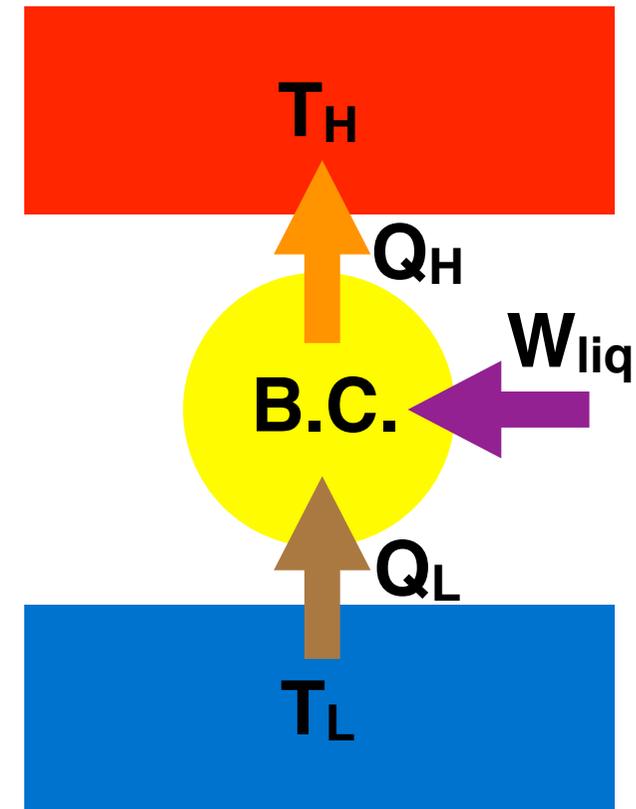
- *A transferência de calor de compartimentos de baixa temperatura para outros a temperaturas maiores é chamada de refrigeração;
- *Equipamentos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores, que operam segundo um ciclo frigorífico;
- *O fluido de trabalho dos refrigeradores são os refrigerantes;
- *Os refrigeradores utilizados com o propósito de aquecer um espaço fazendo uso do calor de um reservatório mais frio, são denominados bombas de calor.



Refrigerador:



Bomba de calor:





Ciclo de refrigeração:

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Bomba de calor:

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

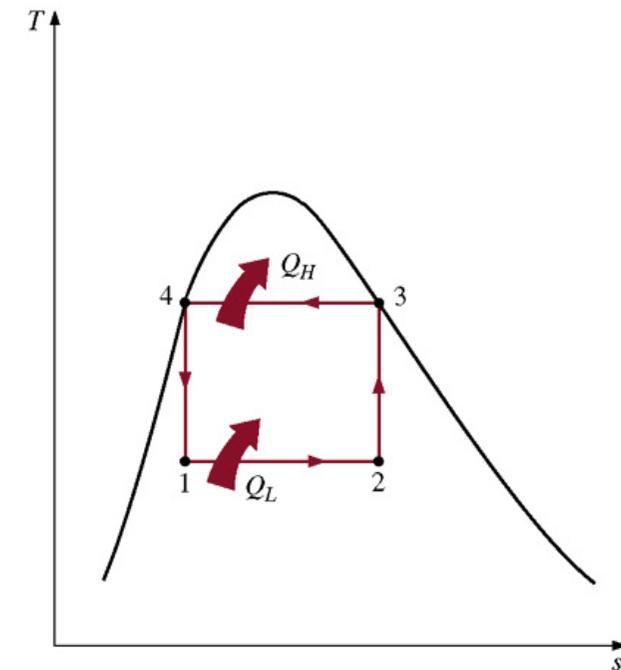
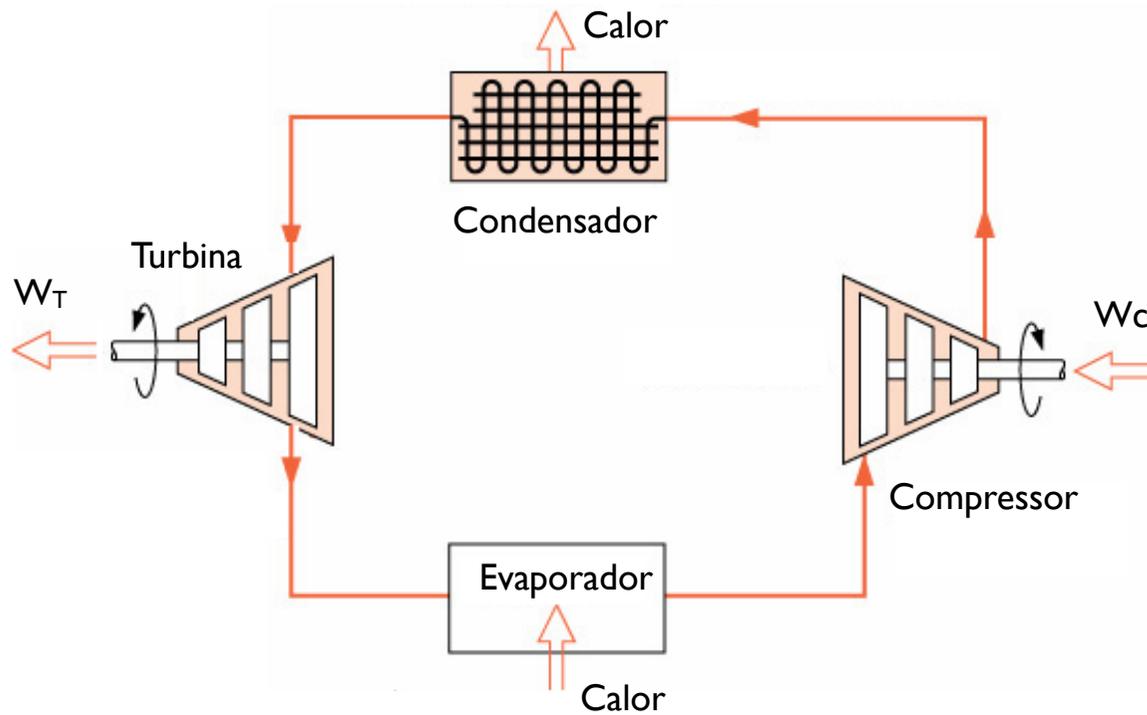
Ciclo de refrigeração (Carnot):

$$\beta = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

Bomba de calor (Carnot):

$$\beta' = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

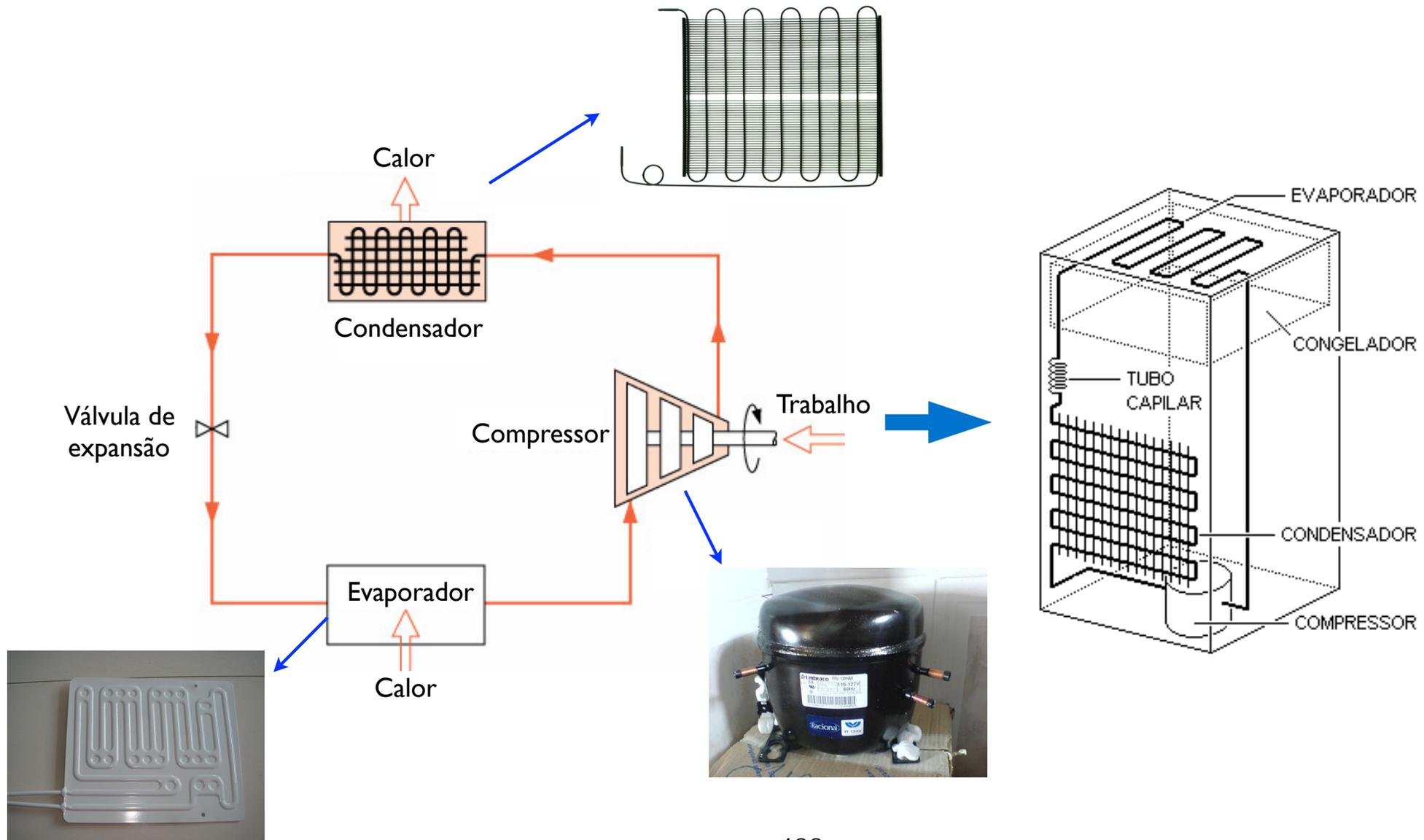
Ciclo de refrigeração por compressão: Carnot



Ciclo de refrigeração por compressão



Fluido de trabalho: fluido refrigerante





**CFC: clorofluorcarbonos, R11 e R12
(diclorodifluormetano CCl_2F_2).**

HCFC: hidrocloreofluorcarbonos, R22.

HFC: Hidrofluorcarbonos (efeito estufa), R134a.



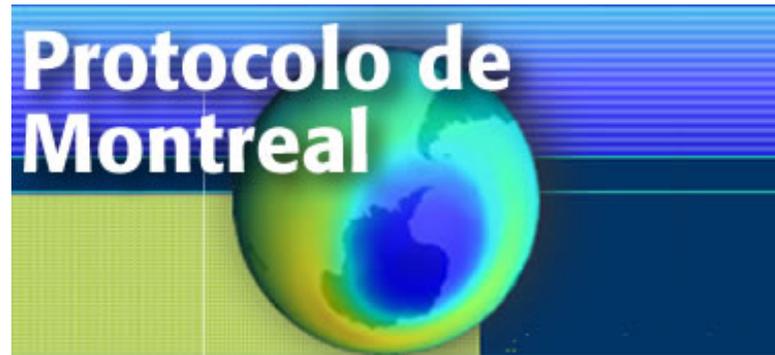
Vida
média

Blends de HCFCs e HFCs: R401a.

Blends de HFCs: R404A e R410A.

Alguns fluidos: R410A, R290(propano), R610a(isobutano),
R744(CO_2), R117(amônia) e R729(ar).

Protocolo de Montreal



O **Protocolo de Montreal sobre substâncias que empobrecem a camada de ozônio** é um tratado internacional em que os países signatários comprometem-se a substituir as substâncias que demonstrarem estar reagindo com o ozônio (O_3) na parte superior da **estratosfera**. O tratado esteve aberto para adesões a partir de **16 de Setembro de 1987** e entrou em vigor em 1 de Janeiro de 1989. Ele teve adesão de 150 países e foi revisado em 1990, 1992, 1995, 1997 e 1999. Devido à essa grande adesão mundial, **Kofi Annan** disse sobre ele: "Talvez seja o mais bem sucedido acordo internacional de todos os tempos..." Em comemoração, a **ONU** declarou a data de 16 de Setembro como o **Dia Internacional para a Preservação da Camada de Ozônio**.

Fluidos refrigerantes



Fluido	ODP	GWP
R-12 Dichlorodifluoromethane	1.0	2400
R-22 Chlorodifluoromethane	0.05	1700
R-134a Tetrafluoroethane	0	1300
R-404A (44% R-125, 52% R-143a, R-134a)	0	3300
R-717 Ammonia - NH3	0	0
R-744 Carbon Dioxide - CO2		1*

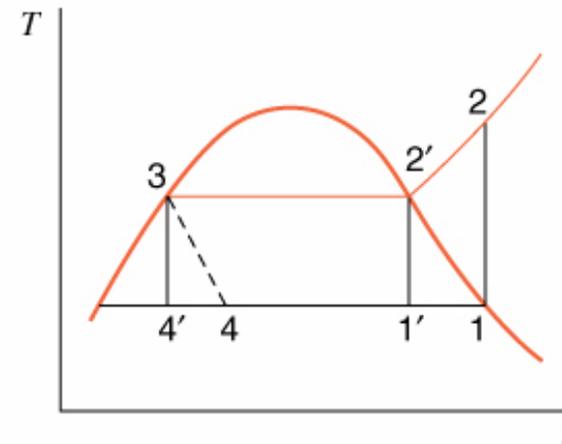
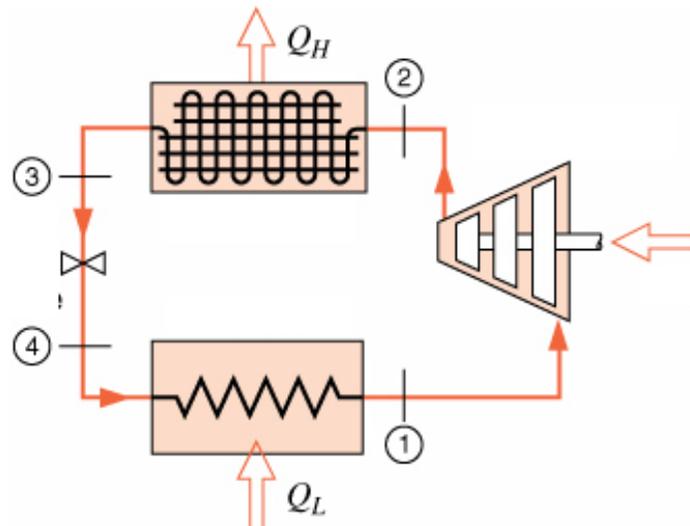
ODP = Ozone Depletion Potential

GWP = Global Warming Potential

* padrão para GWP



http://www.equipecas.com.br/s_produto.asp?id=11



Processo 1-2: compressão isentrópica do fluido refrigerante.

Processo 2-3: transferência de calor a pressão constante para o reservatório H.

Processo 3-4: expansão isentálpica.

Processo 4-1: transferência de calor a pressão constante do reservatório L.

Diagrama T-s: isentálpicas (H₂O)

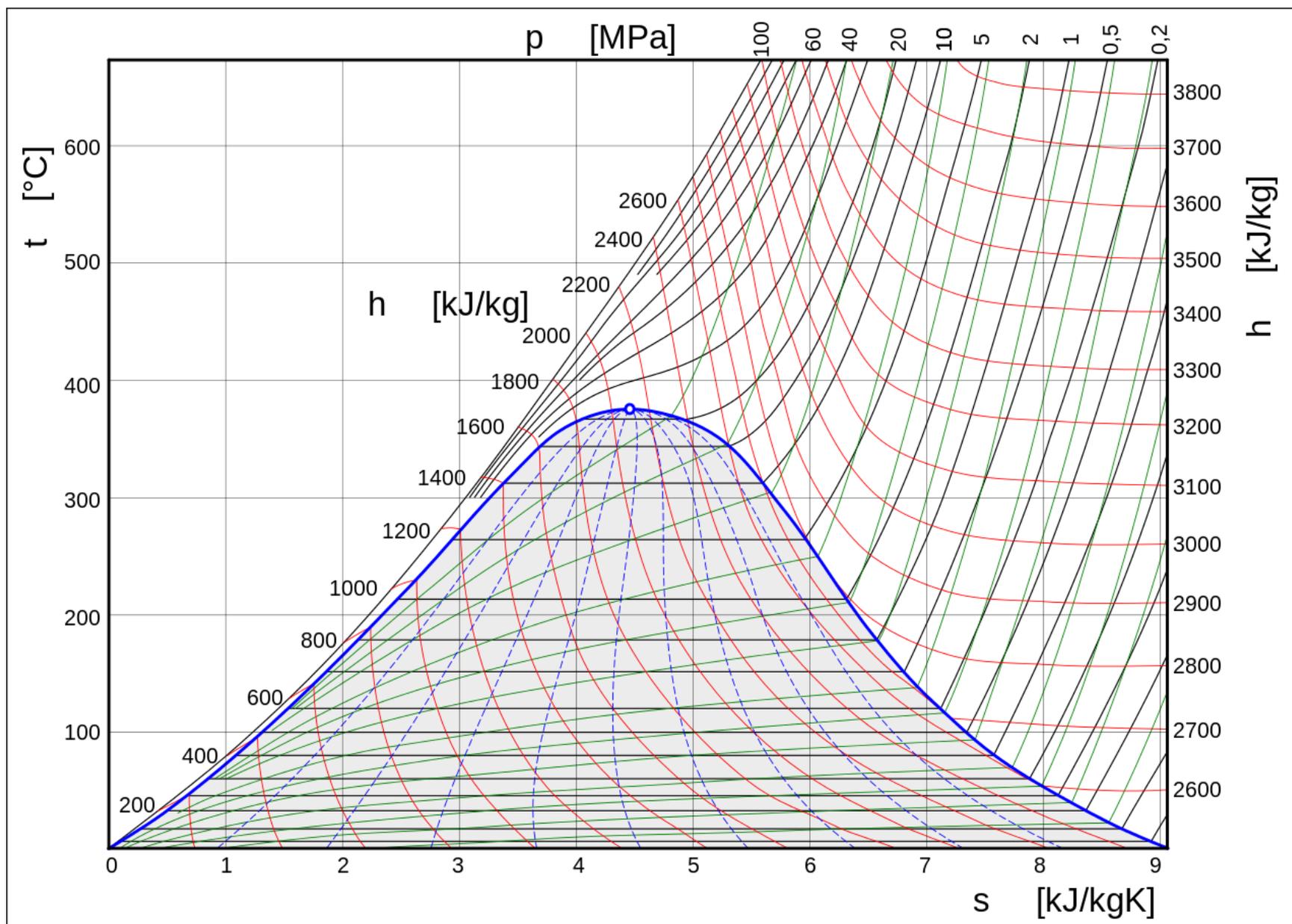
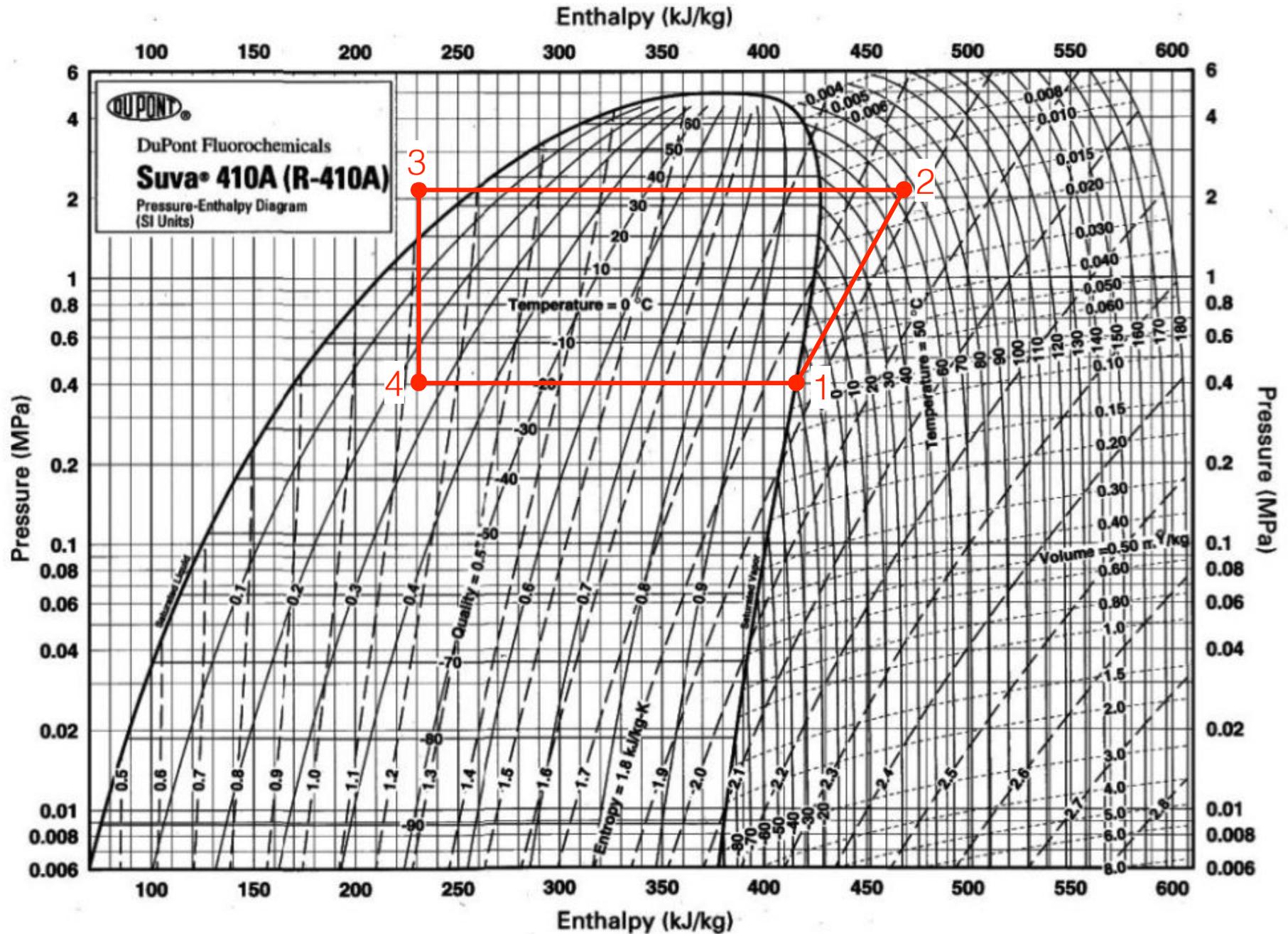
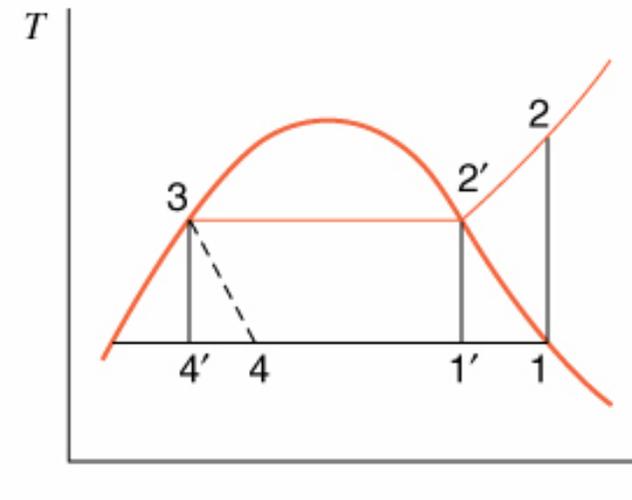
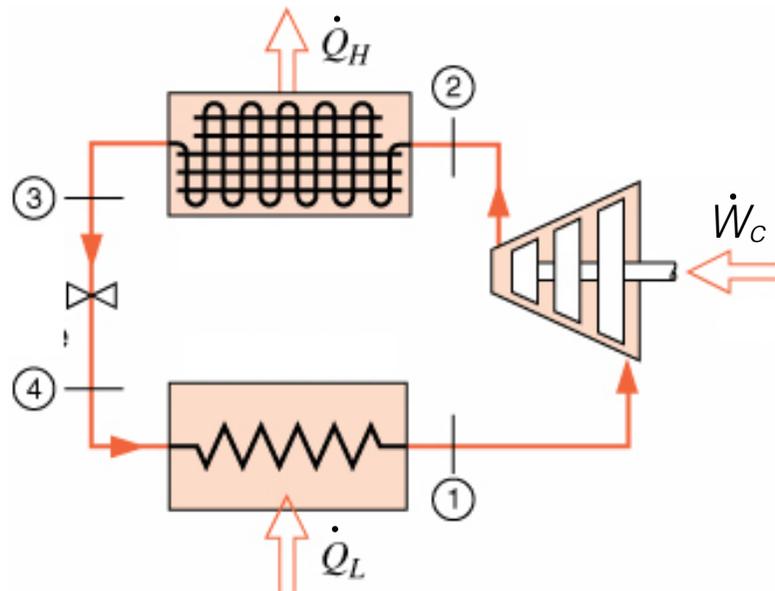


Diagrama P-h: Mollier





1ª Lei

Compressor:

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

Condensador:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Válvula de expansão:

$$h_3 = h_4$$

Trocador de calor:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

Processo

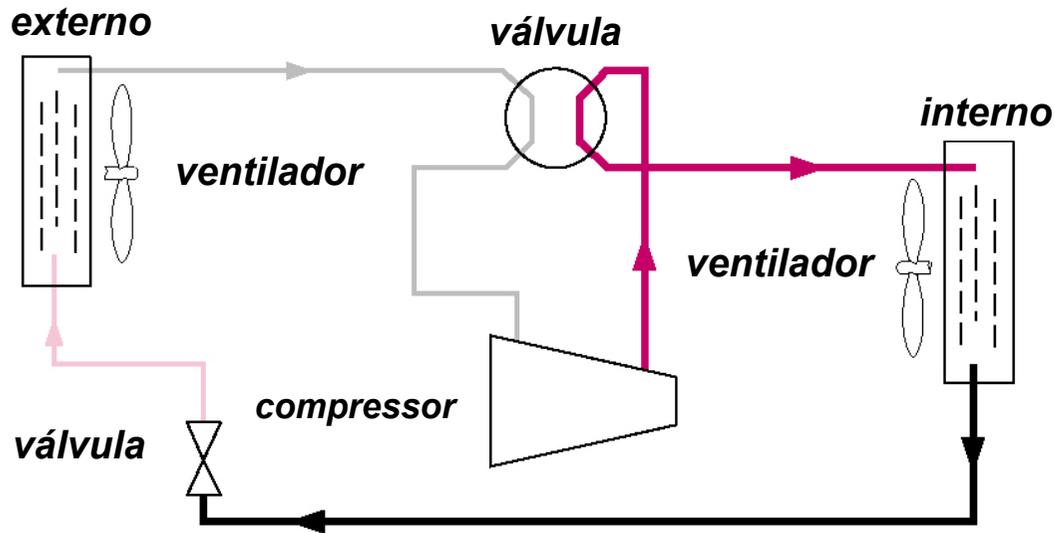
s constante

P constante

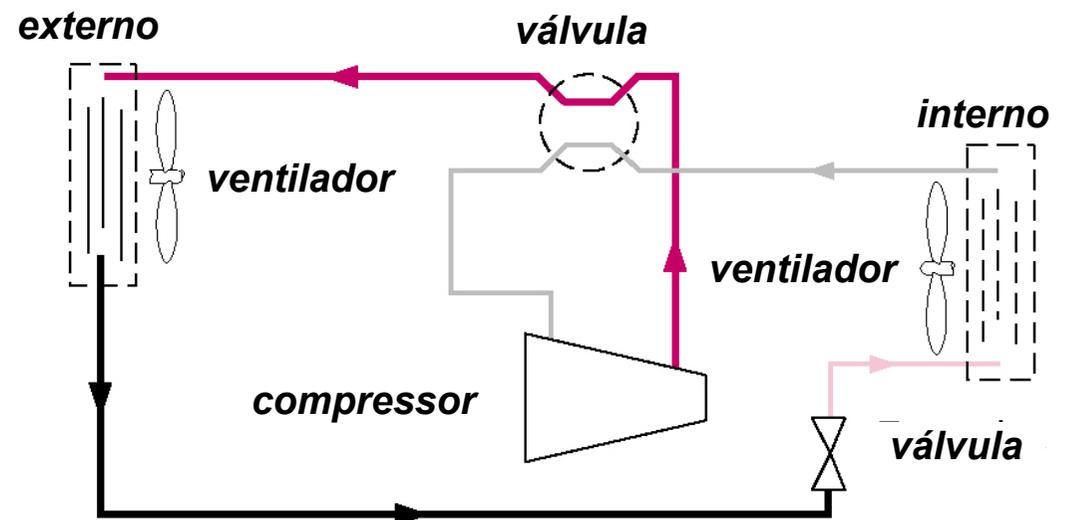
$\Delta s > 0$

P constante

Aquecimento



Resfriamento

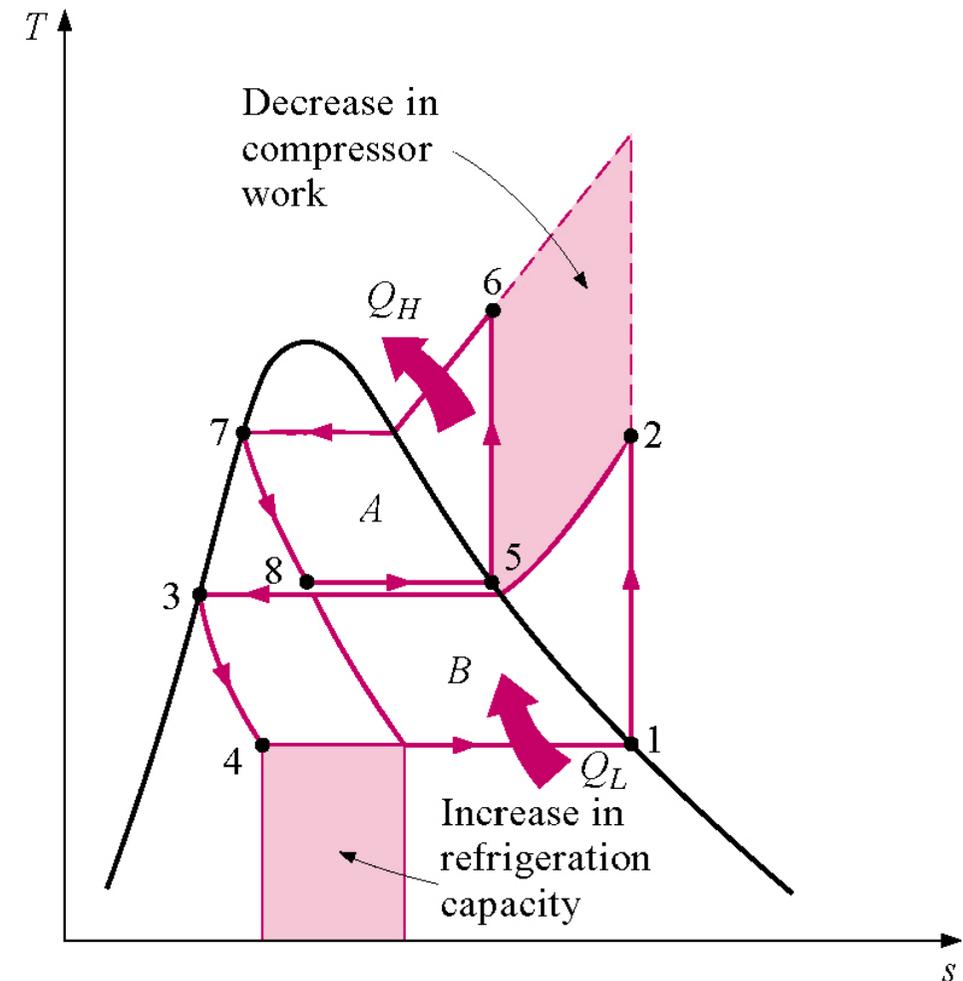
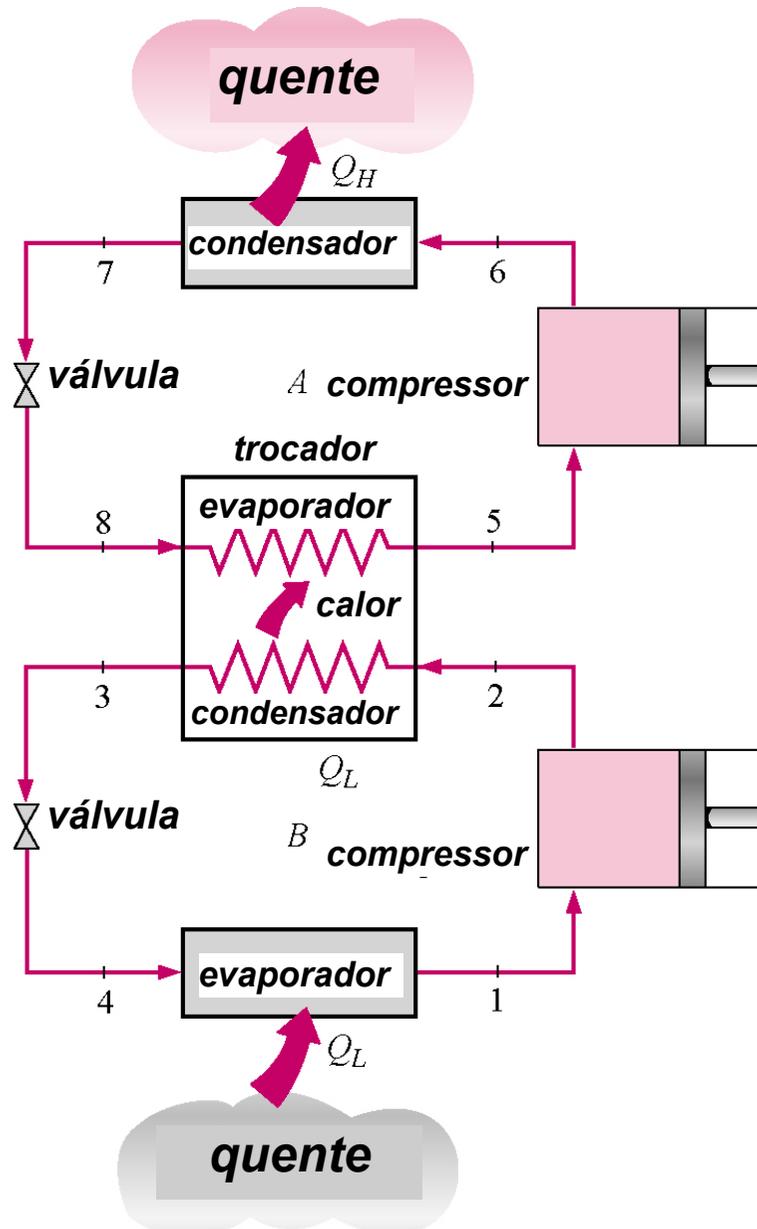


- líquido a alta pressão
- líq.+vapor a baixa pressão
- vapor a baixa pressão
- vapor a alta pressão

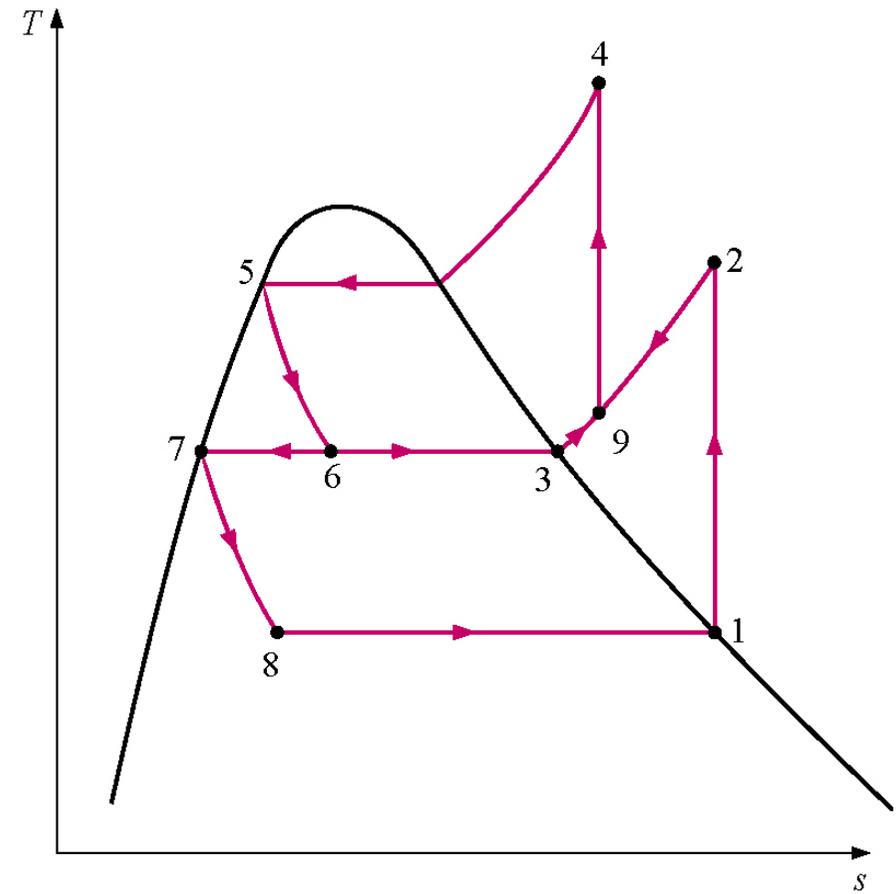
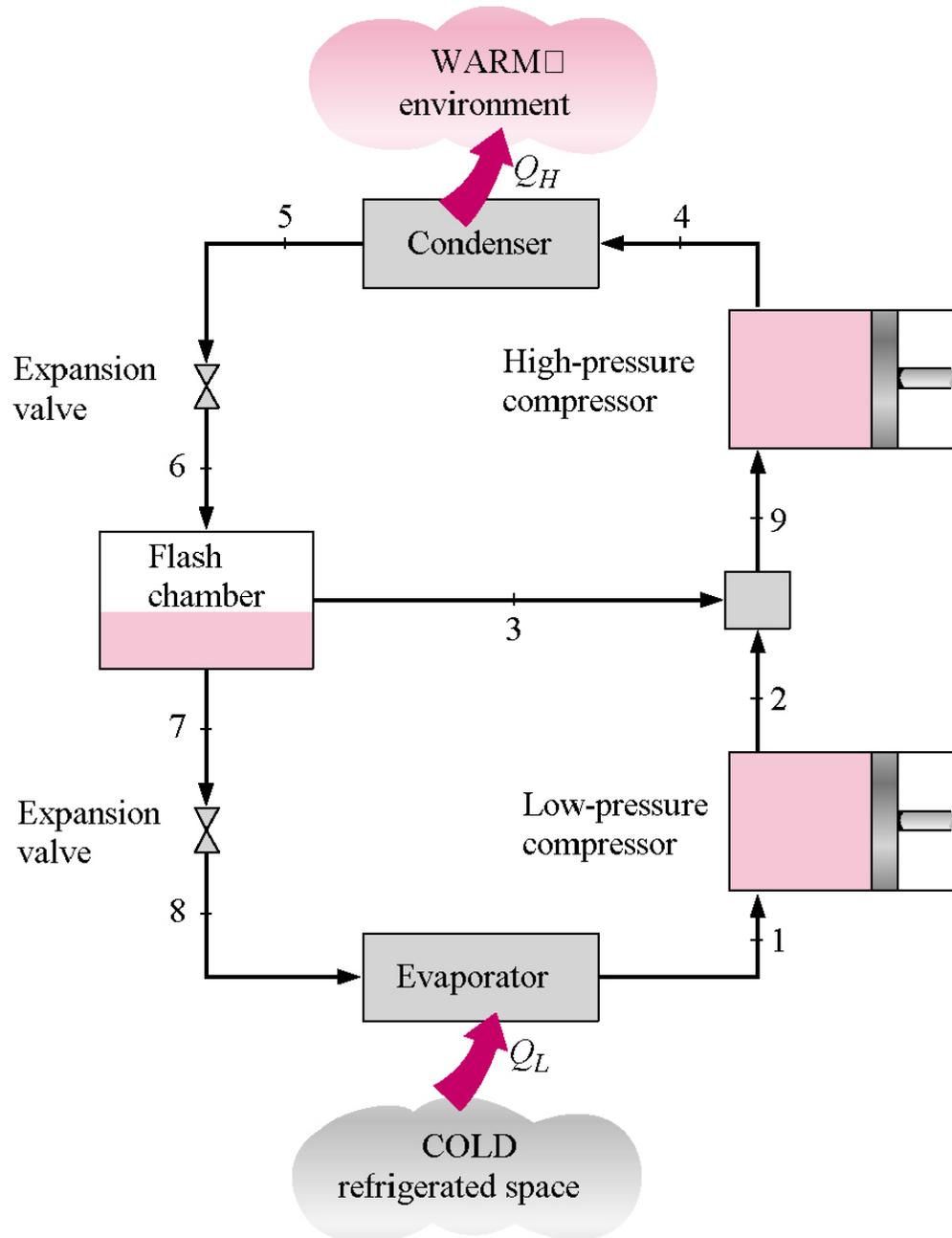
Sistemas de refrigeração em cascata



Menores temperaturas, maiores coeficientes de desempenho.



Sistema de refrigeração com multi-compressão





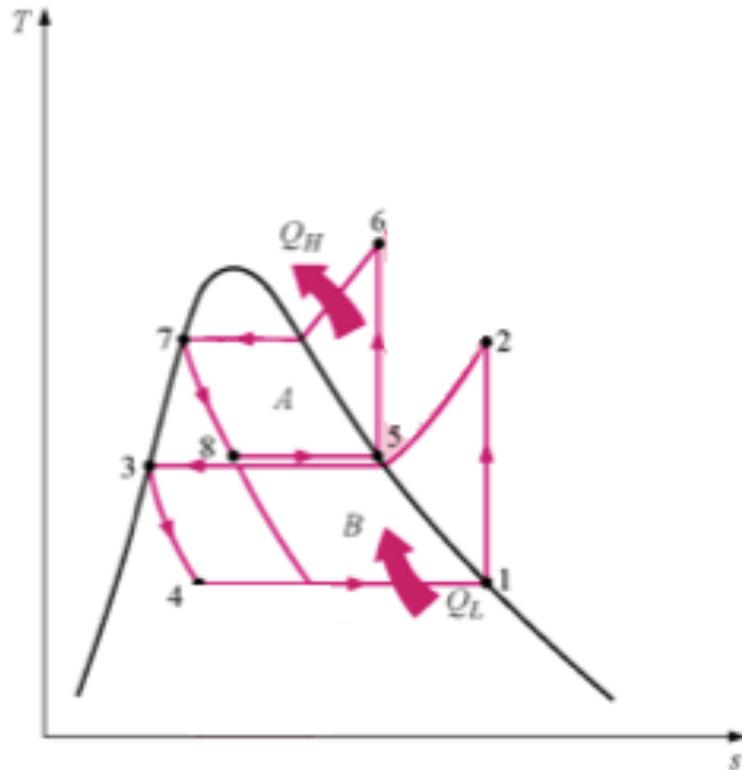
1) Considere um ciclo de refrigeração operando entre os limites de pressão de 0,8 e 0,14MPa. Cada estágio opera segundo um ciclo de refrigeração por compressão ideal com R134a como fluido de trabalho. A rejeição de calor do ciclo inferior ocorre em um trocador de calor contracorrente em que ambas as correntes entram a 0,32MPa (na prática o fluido do ciclo inferior entra no trocador de calor a uma pressão e temperatura maiores para uma efetiva transferência de calor). Se a vazão mássica no ciclo superior é de 0,05kg/s, determine (a) a vazão mássica no ciclo inferior, (b) a taxa de transferência de calor do espaço refrigerado e a potência fornecida aos compressores e (c) o coeficiente de desempenho do ciclo em cascata.



Solução

Hipóteses:

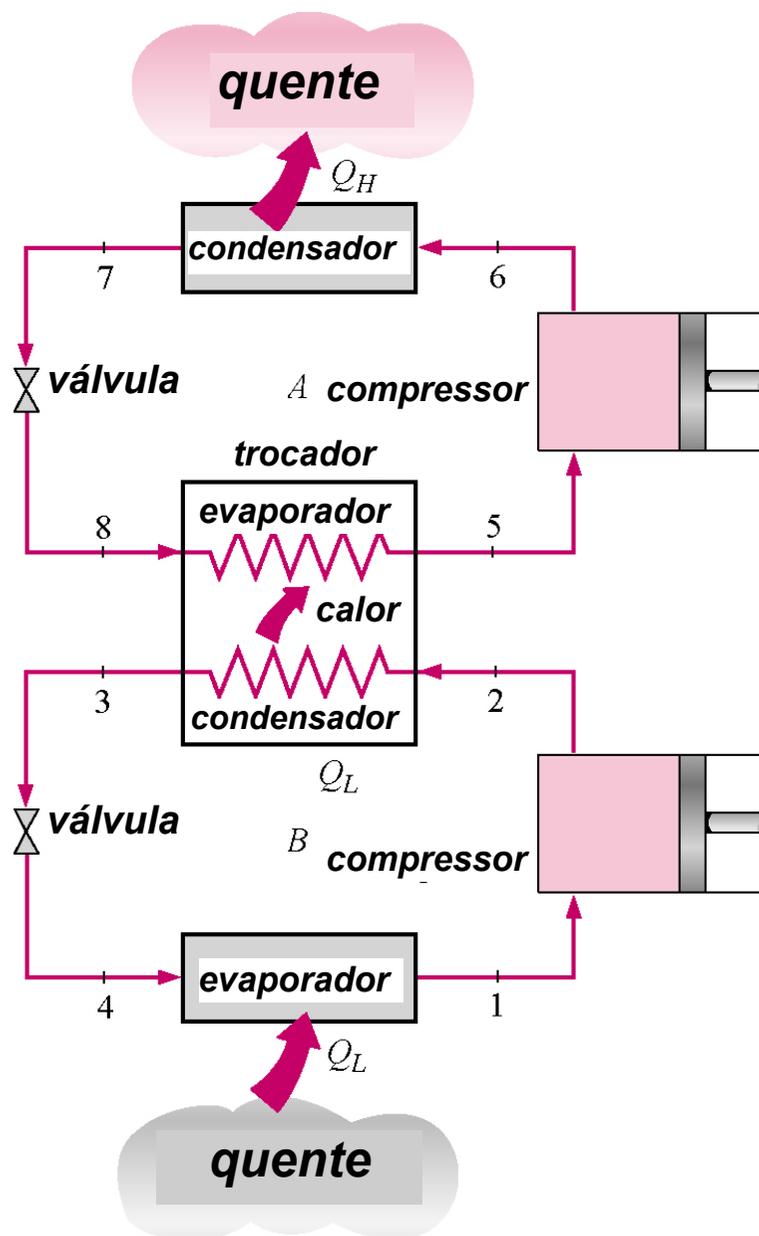
1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Trocador de calor adiabático (ambiente);
5. Válvulas de expansão isentálpica;
5. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).



Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	x
1	239,16		
2	255,93		
3	55,16		
4	55,16		
5	251,88		
6	270,92		
7	95,47		
8	95,47		

Preencha os demais campos a título de exercício!

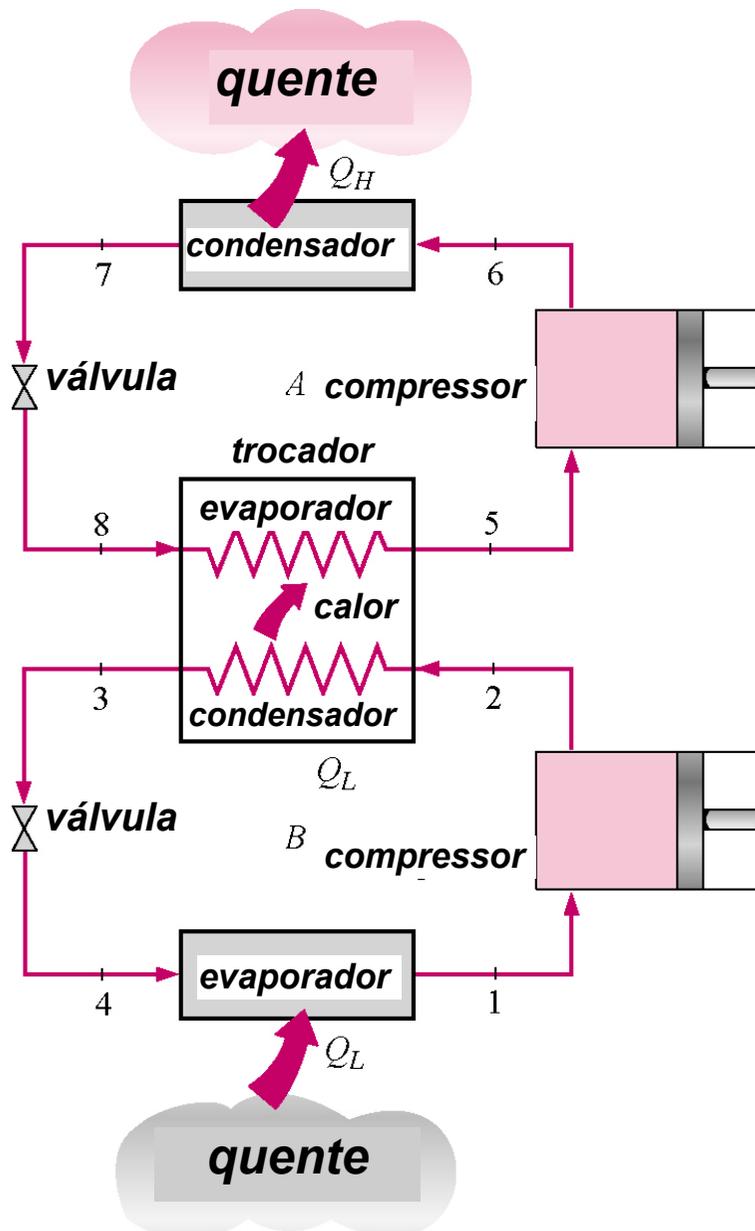
(a) 1ª Lei para o trocador de calor:



$$\dot{m}_A h_8 + \dot{m}_B h_2 = \dot{m}_A h_5 + \dot{m}_B h_3$$

$$\dot{m}_B = 0,039 \text{ kg/s}$$

(b) 1ª Lei para o evaporador B e para os compressores:



$$\dot{Q}_L = \dot{m}_B(h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = 7,18 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_c = \dot{W}_{c,A} + \dot{W}_{c,B} = \dot{m}_A(h_5 - h_6) + \dot{m}_B(h_1 - h_2)$$

$$\dot{W}_c = -1,61 \text{ kW}$$



(c) Coeficiente de desempenho

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{|\dot{W}_c|} = 4,47$$

Considerando um único ciclo (sem a cascata) o coeficiente de desempenho seria de 3,97!



2) Considere um ciclo de refrigeração operando entre os limites de pressão de 0,8 e 0,14MPa. O fluido refrigerante R134a deixa o condensador como líquido saturado, passa pela válvula e entra na câmara a 0,32MPa. Parte evapora durante o processo e esse vapor é misturado com o refrigerante que deixa o compressor de baixa pressão. A mistura é comprimida no compressor de alta. O líquido da câmara passa por uma válvula e entra no evaporador, deixando-o como vapor saturado. Determine (a) a fração de refrigerante que evapora na câmara (b) o calor removido do espaço refrigerado e o trabalho fornecido aos compressores por unidade de massa e (c) o coeficiente de desempenho do ciclo.

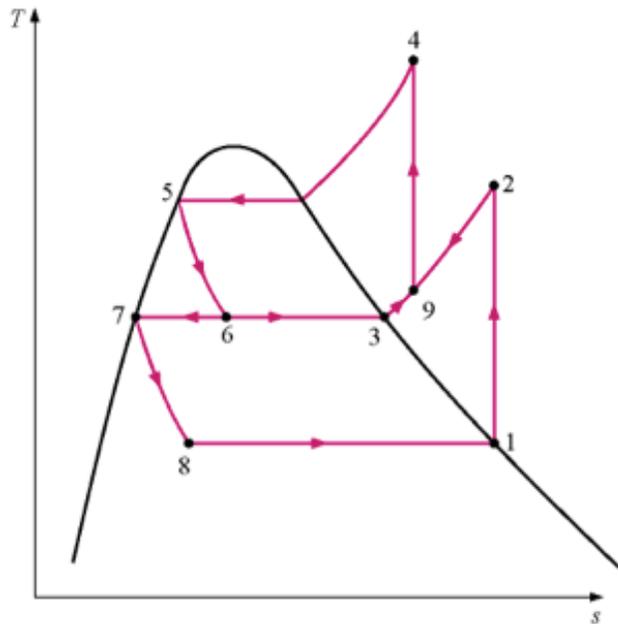


Solução

Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Câmara adiabática;
5. Válvulas de expansão isentálpica;
5. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

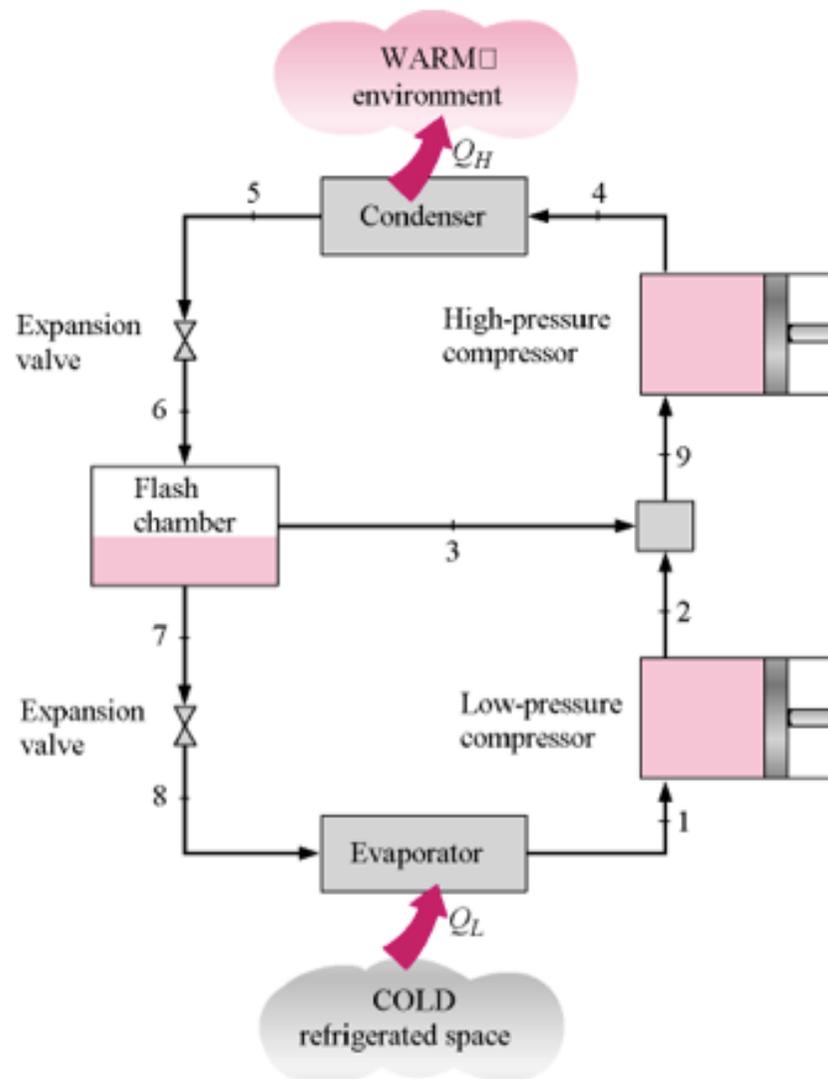
Exercícios



Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	x
1	239,16		
2	255,93		
3	255,88		
4	274,48		
5	95,47		
6	95,47		
7	55,16		
8	55,16		
9	255,1		

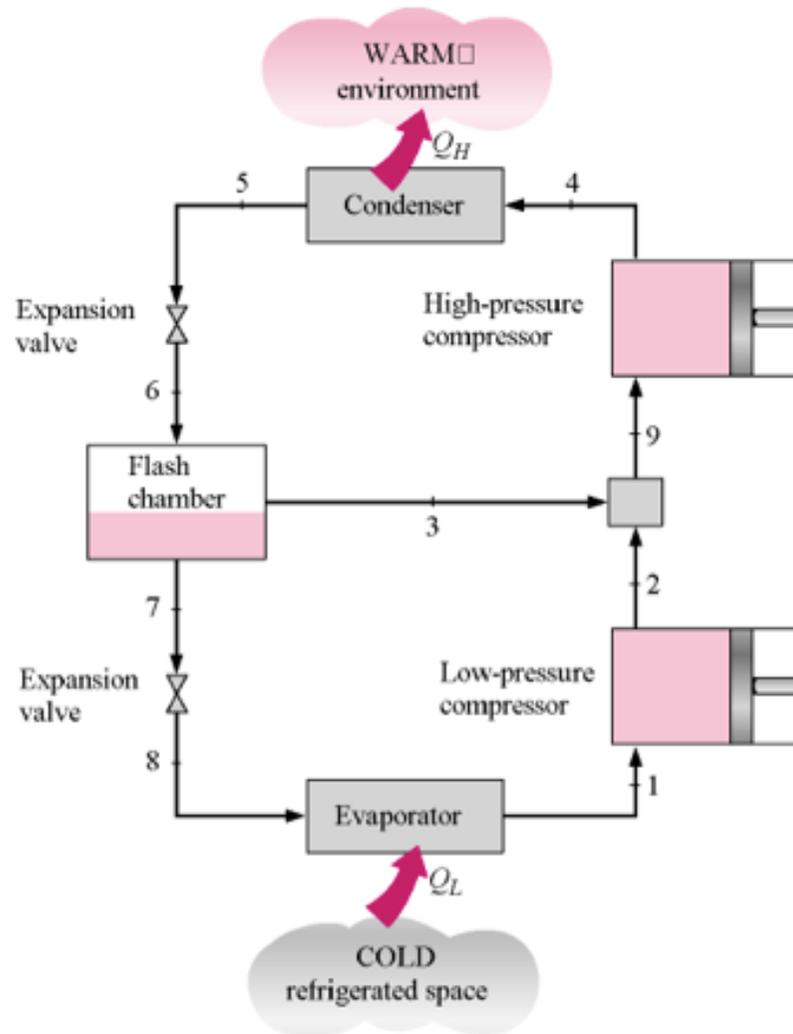
Preencha os demais campos a título de exercício!

(a) A fração é igual ao título na câmara, determinado a partir de h_6



$$x_6 = 0,2049$$

(b) Determinados pela aplicação da 1ª Lei



$$q_L = (1 - x_6) (h_1 - h_8)$$

$$q_L = 146,3 \text{ kJ/kg}$$

$$w_c = (1 - x_6) (h_1 - h_2) + (h_9 - h_4)$$

$$c / h_9 = (1 - x_6) h_2 + x_6 h_3$$

$$w_c = -32,7 \text{ kJ/kg}$$



(c) Coeficiente de desempenho

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{|\dot{W}_c|} = 4,46$$

Compare com o valor do ciclo anterior, 4,46!