



Introdução à Termodinâmica

Prof. Carlos Eduardo Catunda

PARTE - 2/2

Material disponível em:

<http://www.cefet-rj.br/index.php/demec-downloads>

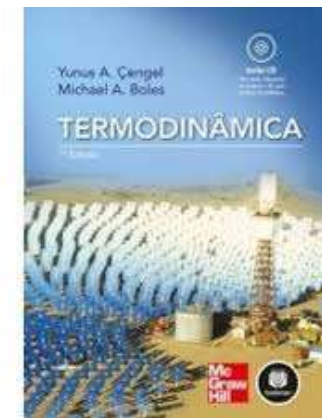
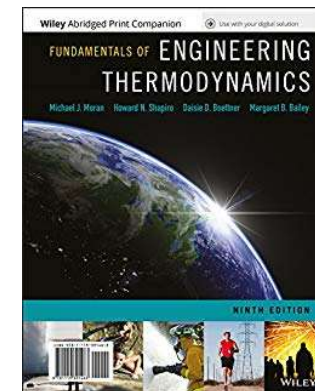


Sumário

1. Introdução e Comentários Preliminares
2. Conceitos e Definições
3. Propriedades de uma Substância Pura
4. Trabalho e Calor
5. Primeira Lei da Termodinâmica
6. Primeira Lei da Termodinâmica em Volumes de Controle
7. Segunda Lei da Termodinâmica
8. Entropia
9. Segunda Lei da Termodinâmica em Volumes de Controle
10. Irreversibilidade e Disponibilidade
11. Introdução a Ciclos Motores e de Refrigeração
12. Relações Termodinâmicas

Bibliografia

1. Van Wylen, Gordon John; Sonntag, Richard Edwin e Bornakke, Claus; **Fundamentos da Termodinâmica** – Editora Edgar Blücher Ltda – 6ªed e 8ªed
2. Shapiro, Morgan; **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**, 1995
3. Cengel; **Termodinâmica** – Editora McGraw-Hill - 5ªed



Capítulo 7 - A Segunda Lei da Termodinâmica

Objetivos:

- ≡ Como os princípios de conservação de massa e de energia nem sempre são suficientes para a análise de sistemas, faz-se necessário introduzir a Segunda Lei da Termodinâmica;
- ≡ Também serão apresentados alguns resultados (Corolários) da Segunda Lei.

Capítulo 7 - A Segunda Lei da Termodinâmica

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de:

- Entender os conceitos de motor térmico, refrigerador e bomba de calor.
- Identificar as peculiaridades dos processos reversíveis.
- Identificar vários processos irreversíveis.
- Identificar um ciclo de Carnot.
- Utilizar a definição de rendimento térmico de um ciclo motor.
- Utilizar a definição de coeficiente de eficácia de um refrigerador ou bomba de calor.
- Utilizar as diferentes escalas de temperatura.
- Aplicar o limite de rendimento térmico imposto pela segunda lei da termodinâmica na análise de um problema.
- Verificar se o rendimento térmico de um motor real é razoável.
- Aplicar o limite de coeficiente de eficácia imposto pela segunda lei da termodinâmica na análise de um problema.
- Verificar se o coeficiente de eficácia de um refrigerador real, ou de uma bomba de calor real, é razoável.

Introdução

A primeira Lei da Termodinâmica estabelece que:

≡ Um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual a integral cíclica do trabalho.

Entretanto, a Primeira Lei não impõe nenhuma restrição quanto às direções dos fluxos de calor e trabalho

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

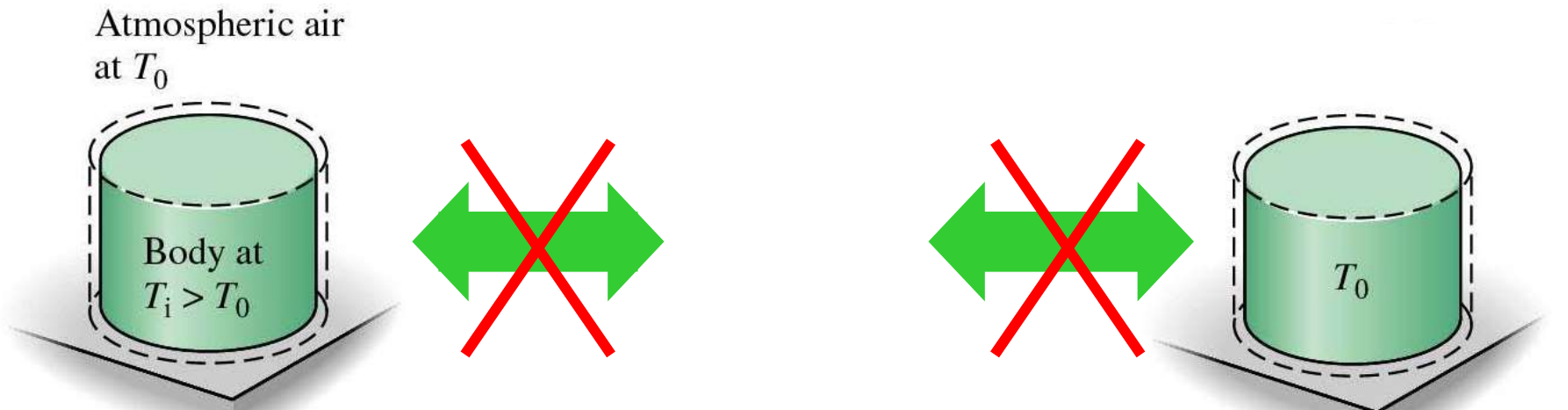
A segunda Lei da Termodinâmica estabelece que:

≡ **Em um sentido amplo, a segunda Lei envolve o fato de que processos ocorrem em um dado sentido e não no oposto... .**

Segunda Lei da Termodinâmica

Processos espontâneos vs não espontâneos

Um objeto a uma temperatura elevada T_i é colocado em contato com o ar atmosférico à $T_o < T_i$;



Com o tempo ele troca calor com a atmosfera

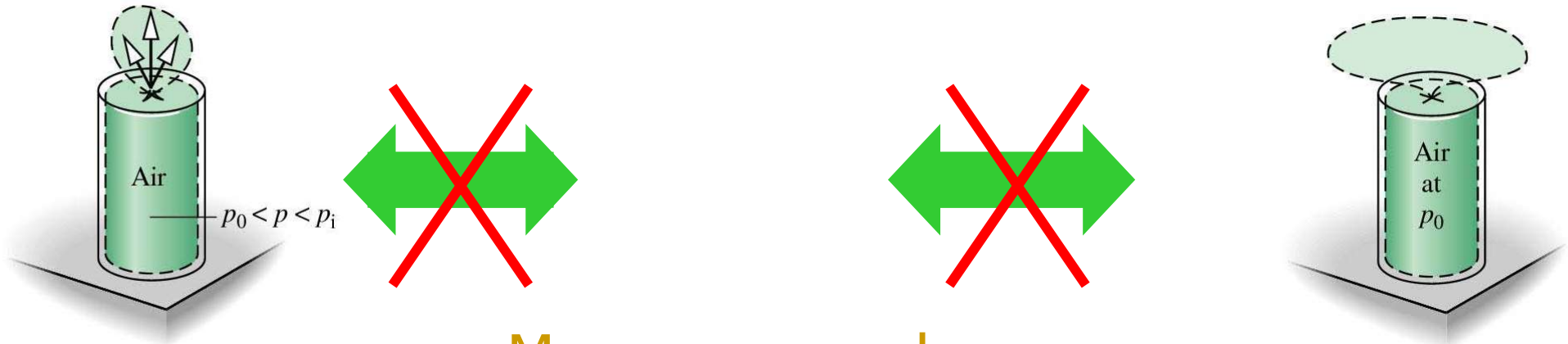
E no final atingirá a temperatura das vizinhanças

Apesar da energia total do sistema ser conservada, o processo inverso não ocorre **espontaneamente**

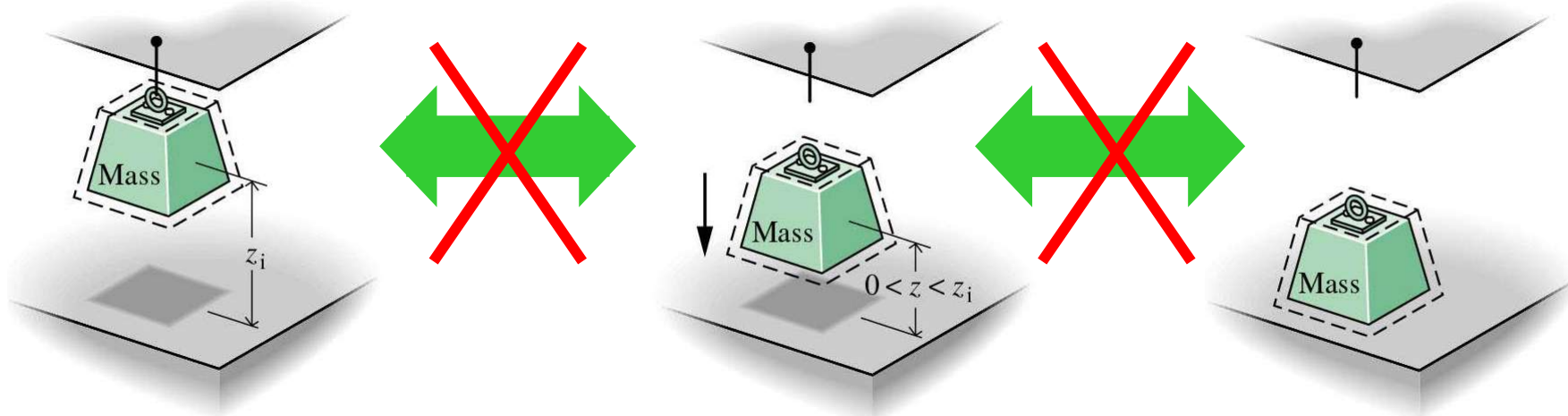
Segunda Lei da Termodinâmica

Processos espontâneos vs não espontâneos

Expansão espontânea



Massa em queda



Segunda Lei da Termodinâmica

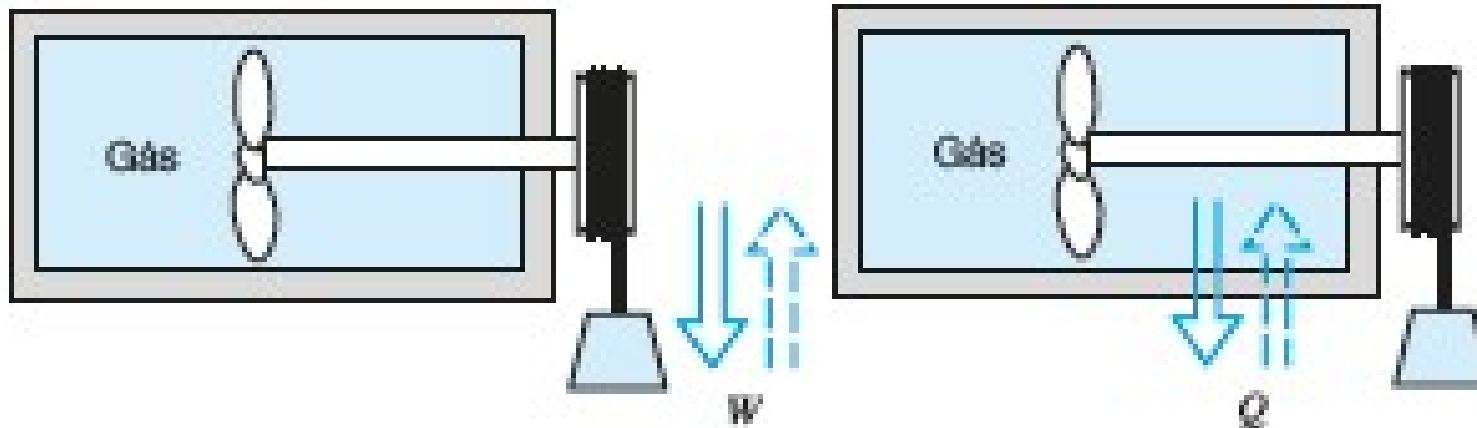
O Processo Irreversível vs Reversível

Um processo é chamado **irreversível** se o sistema e todas as partes que **compõem suas vizinhanças** não puderem ser **restabelecidos** exatamente aos seus respectivos estados **iniciais** após a ocorrência do processo;

Um processo é **reversível** se tanto o sistema quanto suas vizinhanças **puderem retornar** aos seus estados **iniciais**.

Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Irreversível



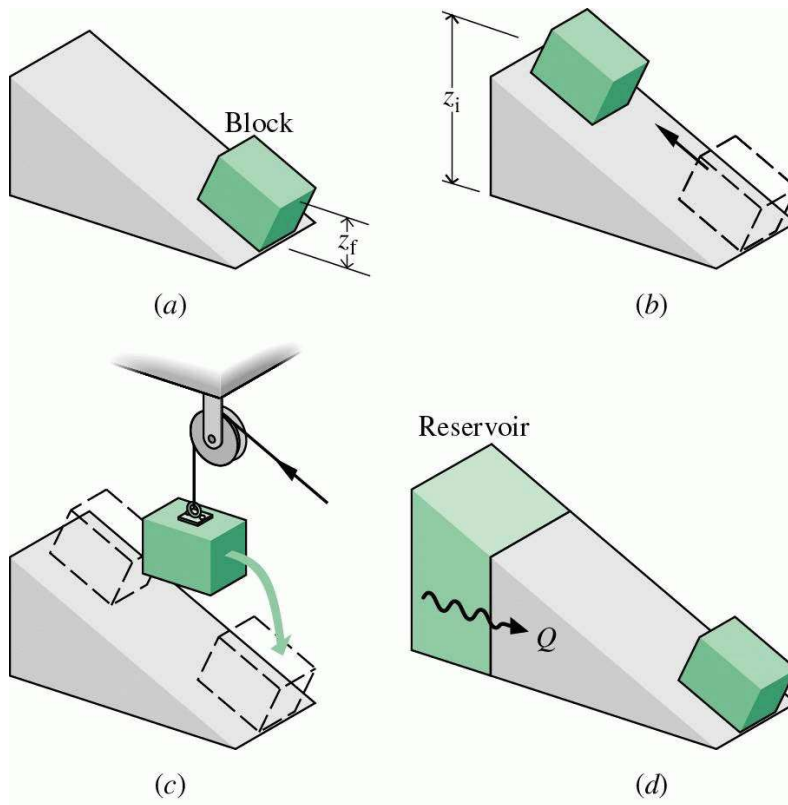
Realiza-se trabalho sobre o sistema mediante o abaixamento do peso e através das pás do agitador. O ciclo se completa com a transferência de calor para o meio.

Entretanto, sabemos que não podemos inverter este ciclo!

O processo inverso não ocorre **espontaneamente**. Se transferirmos calor ao gás, este não fará com que as pás girem e levantem o peso.

Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Irreversível - Demonstração



Processo original,
bloco escorregando
com atrito

Processo b, bloco
retornar espontaneamente

Processo c, usando
cabo-polia

Processo d, usando
reservatório térmico

Como *c* e *d* são **possíveis**, logo *b* é **impossível**;
como *b* é **inverso** do original *a*, logo o original *a* é **irreversível** !!!

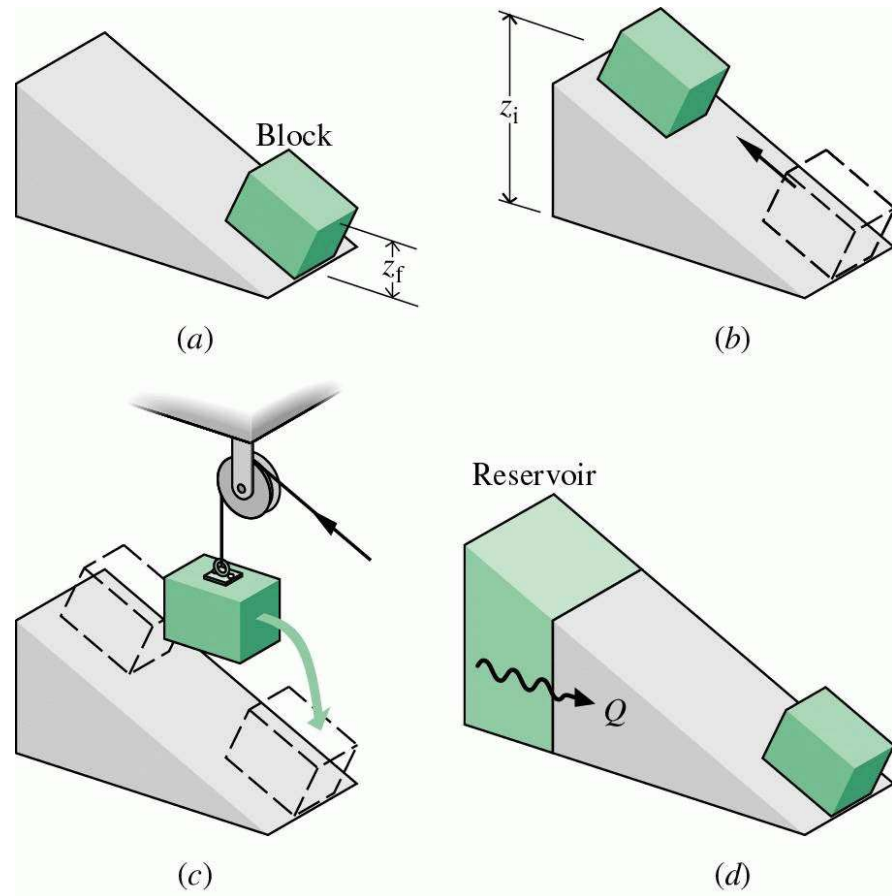
Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Irreversível - Demonstração

Em (a) a queda do bloco converte energia potencial em acréscimo da energia interna do sistema (rampa). Nesse processo $Q = 0$ e $W = 0$, logo as vizinhanças não são perturbadas e o sistema é o único local a se observar, em busca de irreversibilidades.

Imaginemos um ciclo formado pelos processos 1, 2 e 3.

Processo 1 (fig b) o bloco retorna espontaneamente a sua posição inicial na rampa (sua altura volta a z_i e a energia interna da rampa diminui até U_i)



Segunda Lei da Termodinâmica

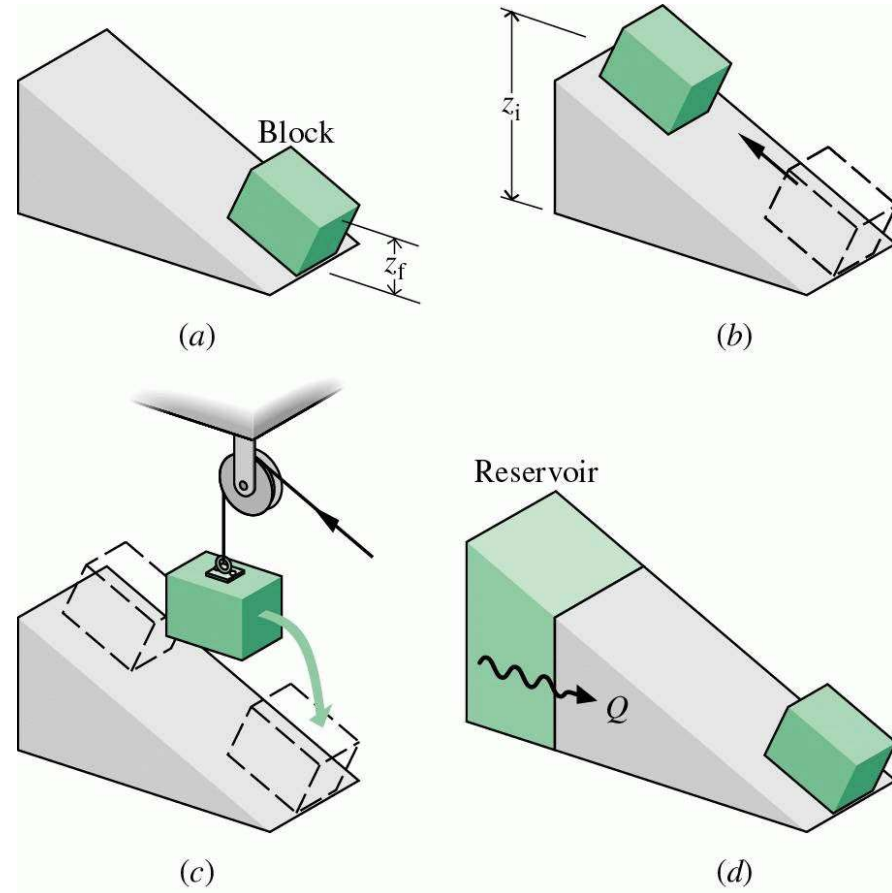
O Processo Irreversível - Demonstração

Processo 2 (fig c) um dispositivo cabo-polia é usado para baixar o bloco ($Z = Z_f$) enquanto há uma elevação de massa nas vizinhanças $\rightarrow W_{\text{sistema}} = mg(Z_i - Z_f)$.

Processo 3 (fig d) um reservatório térmico permite transferência de calor ao sistema até $U = U_f$. $Q_{\text{sistema}} = U_f - U_i$
Ou $Q = mg(Z_i - Z_f)$.

O Resultado desse ciclo é transf calor de um único RT e entregar W às vizinhanças, não existindo outro efeito.

O ciclo viola a definição de Kelvin Planck. Como os processos 2 e 3 são possíveis, 1 é impossível. Logo ele é irreversível.



Segunda Lei da Termodinâmica

Tipos e exemplos de Irreversibilidades

Irreversibilidades **internas** são aquelas que ocorrem **dentro** do sistema;

Irreversibilidades **externas** são aquelas que ocorrem nas vizinhanças (**fora** do sistema);

São **exemplos** de irreversibilidades:

- ≡ Transferência de calor através de uma diferença de temperatura;
- ≡ Expansões não resistidas;
- ≡ Reações químicas espontâneas;
- ≡ Misturas espontâneas;
- ≡ Atrito;
- ≡ Fluxo de corrente elétrica (Efeito Joule);
- ≡ Magnetização ou polarização por histerese;
- ≡ Deformação inelástica.

Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Reversível

A condição de não-equilíbrio é inerente a todos os processos, posto que é o desequilíbrio ao qual é submetido o sistema que provoca a mudança do estado. Por exemplo, as trocas térmicas se manifestam em função do desequilíbrio de temperaturas, a compressão mecânica ocorre devido ao desequilíbrio de pressões, e enfim, em todas as interações observadas entre sistemas algum tipo de desequilíbrio pode ser verificado.

Um processo termodinâmico é reversível se e somente se:

- i. o processo é quase-estático e ocorre na ausência de efeitos dissipativos
OU
- ii. o processo é quase-estático e com trajetória contínua, isto é, a sequência de estados intermediários de equilíbrio é uma sequência contínua.

Um processo reversível, para um sistema, é definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser invertido e, depois de realizada esta inversão, não se notará nenhum vestígio no sistema ou no meio.

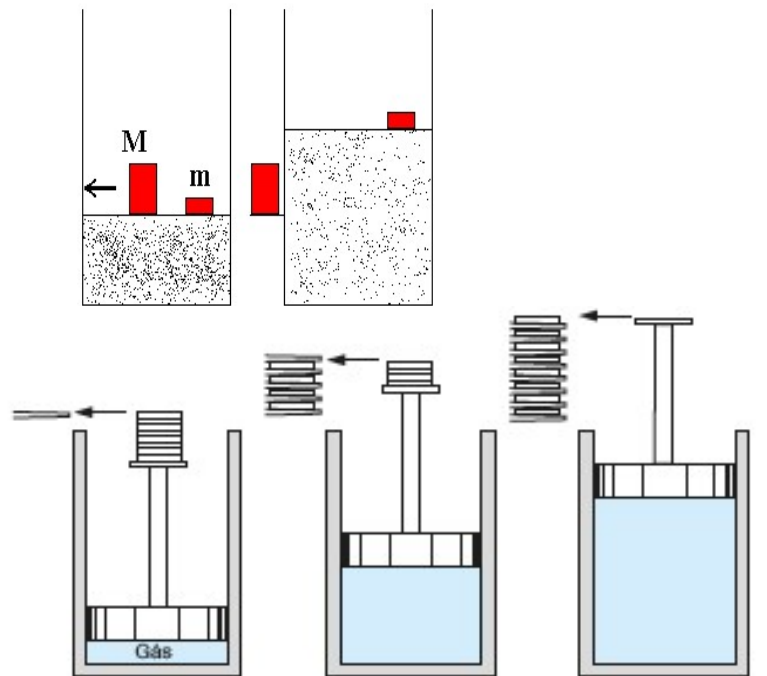
Processo Reversível vs Irreversível

(Processo em Equilíbrio vs Espontâneo)

Processo Irreversível: realizado naturalmente sem esperar que a cada movimento do o conjunto “sistema + vizinhanças” entre em equilíbrio!

Processo Reversível: não existe! Aproximação: **processo quase-estático** (quase-equilíbrio): n etapas

Figura 1



n = 1 etapa!
Quanto menor o número de etapas, mais perto da irreversibilidade

n = 3 etapas!
Quanto maior o valor de n mais próximo do processo quase-estático

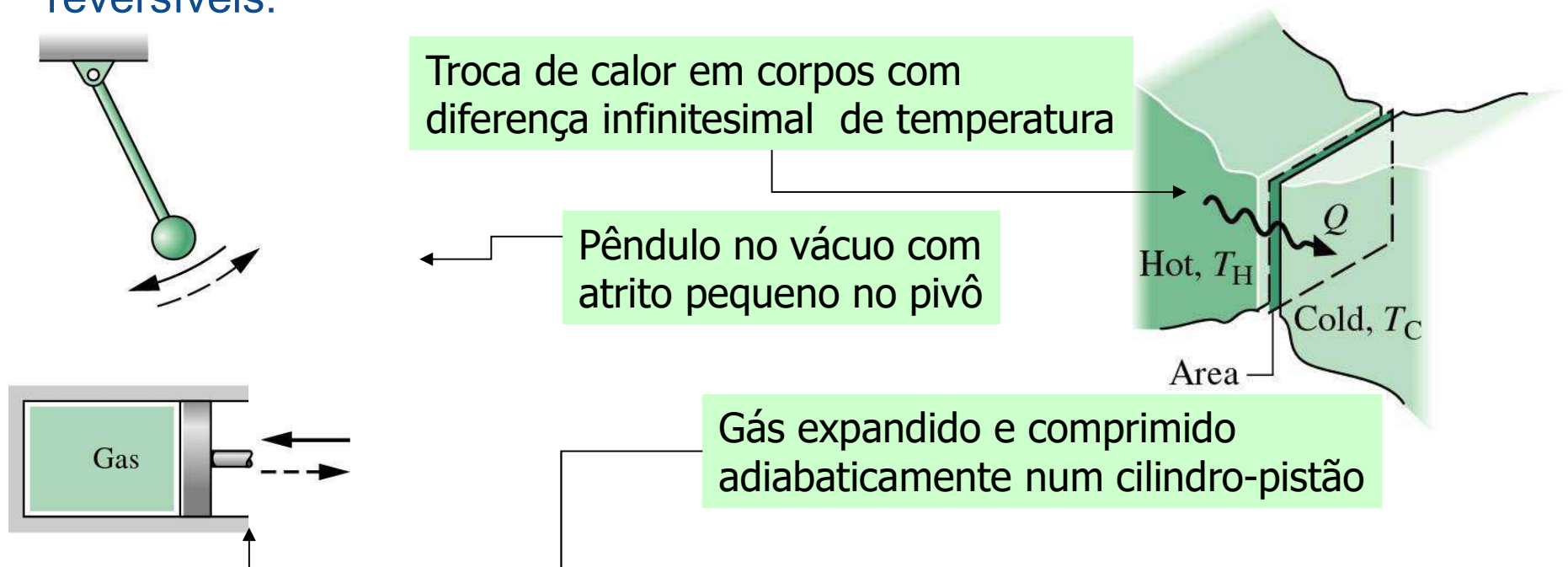
Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Reversível

Processos Reversíveis são aqueles onde

são restabelecidas as **propriedades iniciais**. Porém é um conceito **hipotético e utópico**;

Exemplos de processos que podem ser aproximados por processos reversíveis:



Segunda Lei da Termodinâmica

O Processo Internamente Reversível

Processo internamente Reversível é aquele no qual **não** existem **irreversibilidades** internas;

Porém **ocorrem** irreversibilidades nas suas **vizinhanças**;

Todas as **propriedades** intensivas são **uniformes** ao longo de cada fase presente;

Consiste numa **série** de estados de **equilíbrio**: é um estado de **quase-equilíbrio**;

São bem úteis na determinação do **melhor desempenho** de um sistema;

Todo processo em um **reservatório térmico** é um processo internamente reversível.

Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados

O Estudo da Segunda Lei da Termodinâmica, formalmente, remonta às primeiras décadas do século XIX.

Há várias definições (ou enunciados) da Segunda Lei. Todas elas são equivalentes. São baseadas em observações experimentais. Neste curso estaremos interessados em duas dessas definições (os **enunciado de Clausius e de Kelvin-Planck**).

Rudolph Julius Emmanuel Clausius – Físico e Matemático alemão. Responsável por reformular as Leis da Termodinâmica (1850) e criar o termo **Entropia**.

Lord Kelvin (William Thomson) – Físico Matemático e Engenheiro irlandês. Realizou estudos nas área de Termodinâmica e Eletromagnetismo.

Max Planck – Físico Alemão. Um dos fundadores da teoria quântica. Nobel de Física em 1918.

Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados – Clausius

É **impossível** para qualquer sistema operar de maneira que o **único efeito** seja uma transferência de energia sob a forma de calor de um corpo **mais frio** para um corpo **mais quente**.



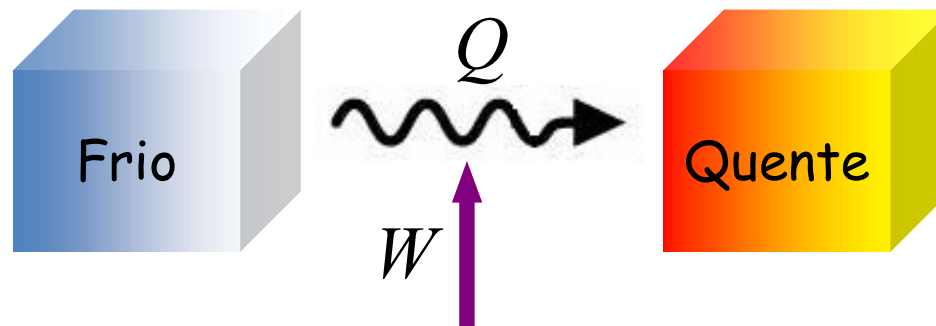
Figura 5.9
Enunciado de Clausius.

Figura 5.2
Exemplo que mostra a impossibilidade de se completar um ciclo por meio da transferência de calor de um corpo a baixa temperatura para outro a alta temperatura.

Analisando o enunciado de Clausius

O enunciado de Clausius **não excluí** a possibilidade da transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente (isso ocorre nos **refrigeradores**).

Entretanto as palavras “**único efeito**” sugerem que isso **possa** ocorrer, desde que seja **fornecida energia (trabalho)** ao sistema.



Conceito de Reservatório Térmico

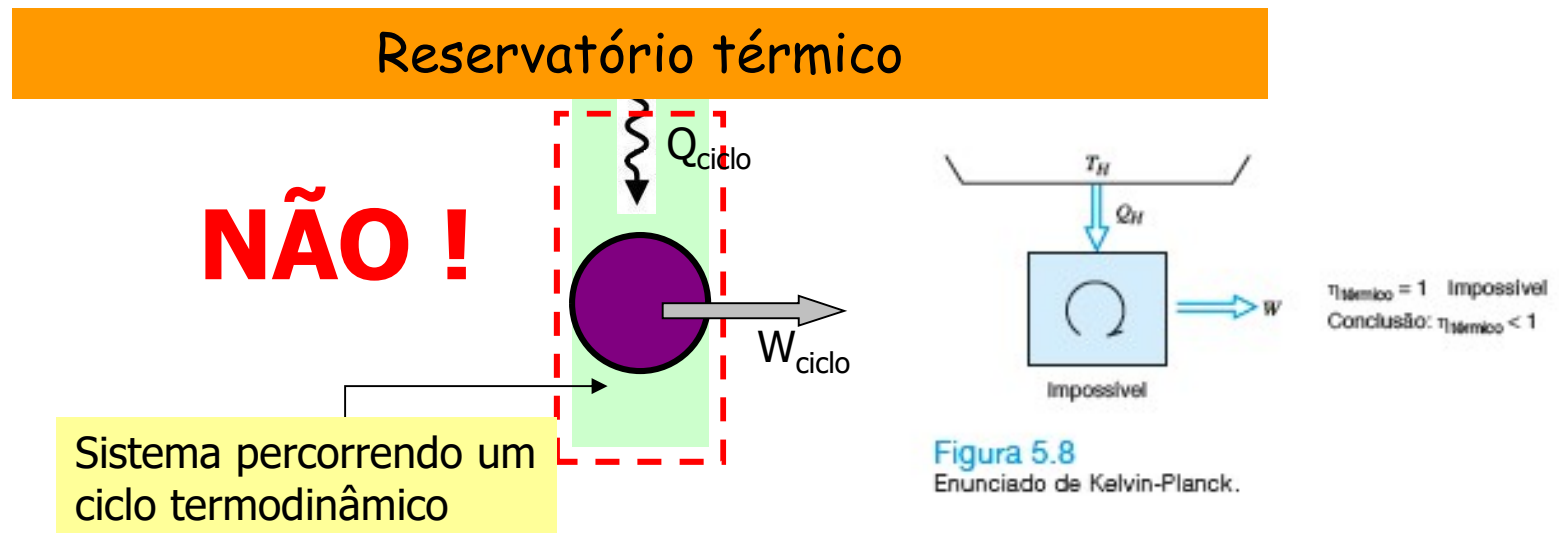
Reservatório Térmico → É um sistema **idealizado**, onde a **temperatura permanece constante** mesmo que energia, na forma de calor, seja **adicionada** ou **removida**;

Exemplos: atmosfera terrestre, oceanos, lagos, substâncias mudando de fase, ...

Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados – Kelvin -Planck

É impossível para qualquer sistema **operar em um ciclo termodinâmico** e fornecer uma quantidade “**líquida**” de **trabalho** para as suas vizinhanças, enquanto recebe energia, por **transferência de calor**, de um **único reservatório térmico**.



Explicando o enunciado de Kelvin-Plank

Pela Primeira Lei:

$$W_{ciclo} = Q_{ciclo}$$

Pelo enunciado de Kelvin-Plank:

$$W_{ciclo} \leq 0$$

Finalmente:

$$Q_{ciclo} \leq 0$$

Equivalência dos Enunciados

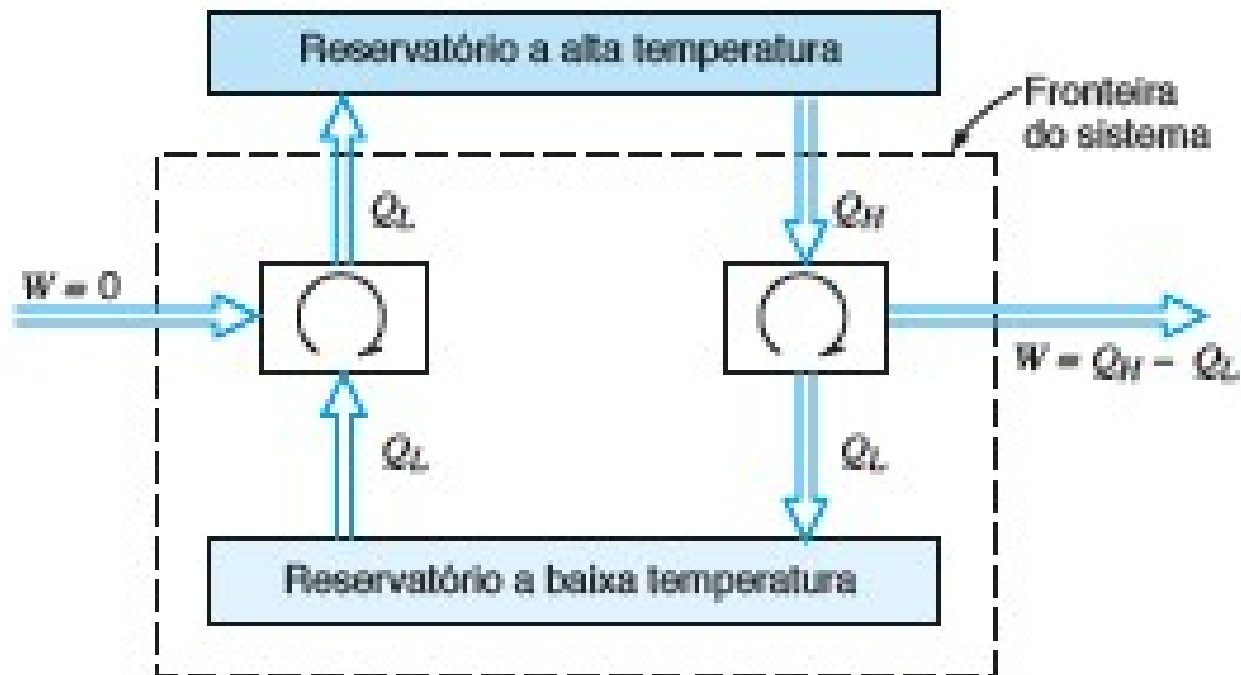


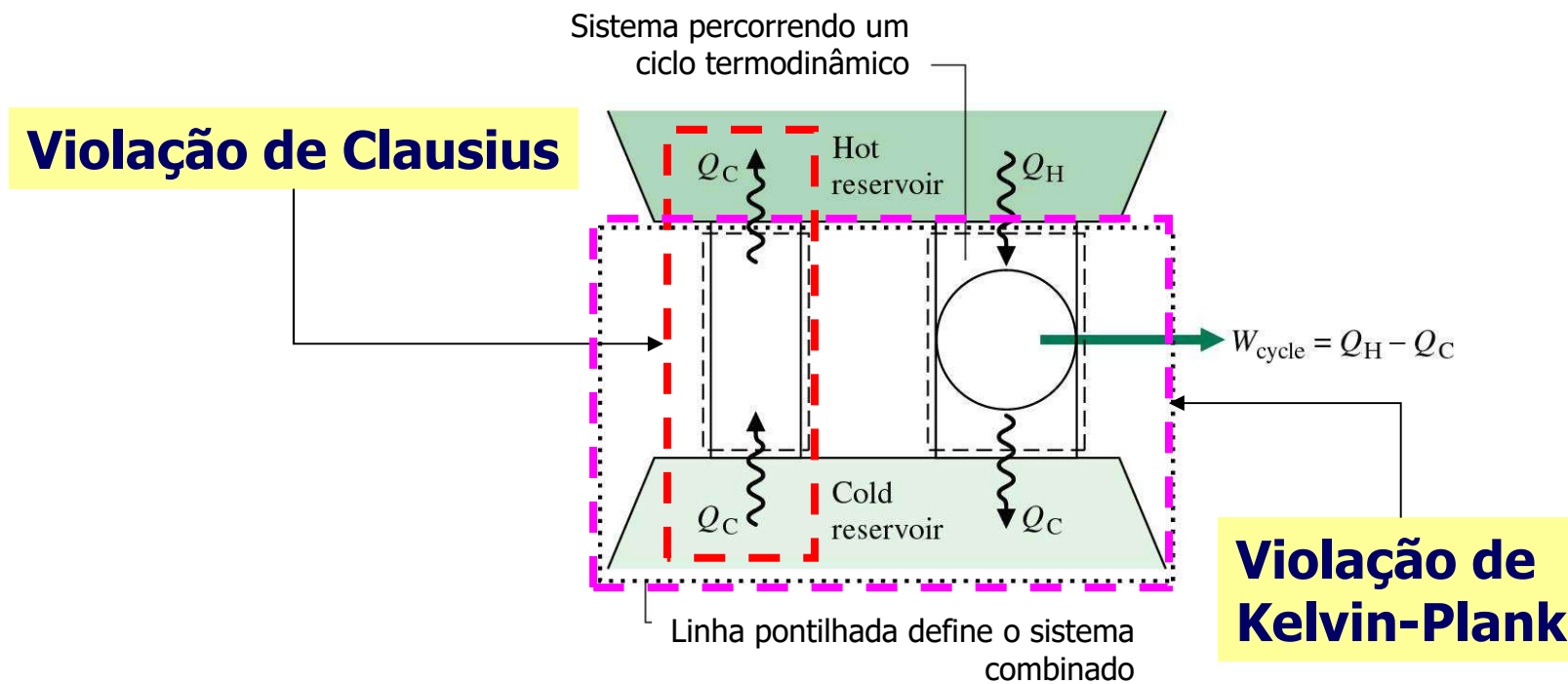
Figura 5.10

Demonstração da equivalência entre os dois enunciados da segunda lei.

Equivalência dos Enunciados

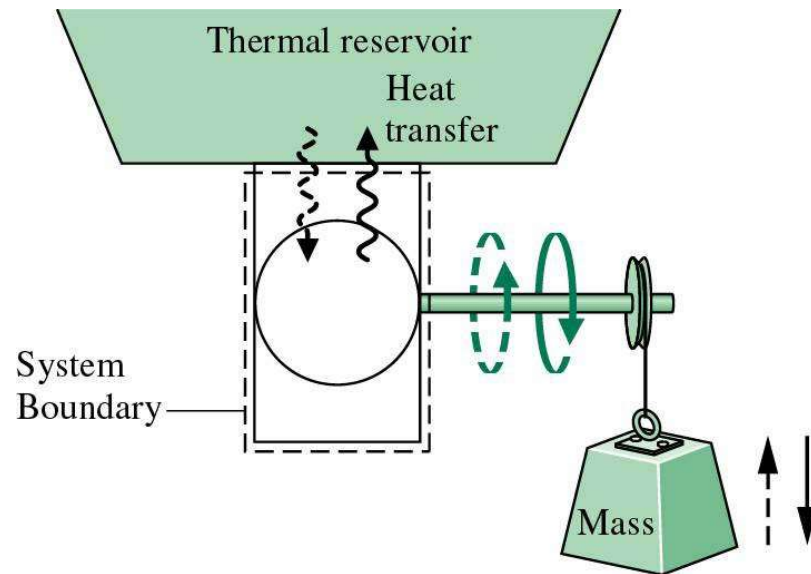
A equivalência é demonstrada pelo fato de que quando se **viola um enunciado**, conseqüentemente o **outro enunciado é violado**.

Imagine um reservatório térmico quente, um reservatório térmico frio e dois sistemas entre os reservatórios.



Interpretação do enunciado de Kelvin-Plank

Considere que no sistema da figura **não existem irreversibilidades**, logo o sistema retorna ao seu estado inicial ao final de um ciclo;



Sistema percorrendo um ciclo enquanto troca energia (calor) com um único RT.

RT é livre de irreversibilidades.

O Sistema massa-polia também.

Já que $W_{\text{ciclo}} = 0$ (para não violar a segunda lei), não **haveria** variação líquida na altura da massa;

Já que $W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}}$, segue-se que $Q_{\text{ciclo}} = 0$, logo não **haveria** variação líquida nas condições do reservatório térmico.

Conclusões do Enunciado de Kelvin-Plank

Para sistemas executando um ciclo, **sem** irreversibilidades:

$$W_{ciclo} = 0$$

Para sistemas executando um ciclo, **com** irreversibilidades:

$$W_{ciclo} < 0$$

Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados – Aspectos da segunda Lei da Termodinâmica

Além de:

- ≡ Prever a **direção** dos processos,
- ≡ Estabelecer as condições de **equilíbrio**,
- ≡ Determinar o **melhor** desempenho teórico de sistemas e
- ≡ Avaliar fatores de **perda de oportunidades**,

A Segunda Lei também é capaz de:

- ≡ Definir uma **escala** de temperatura **universal**,
- ≡ Avaliar propriedades em ensaios experimentais,
- ≡ Desenvolver conceitos de **economia** e **filosofia** e ser usada em muitas outras aplicações.

Motores térmicos e Refrigeradores

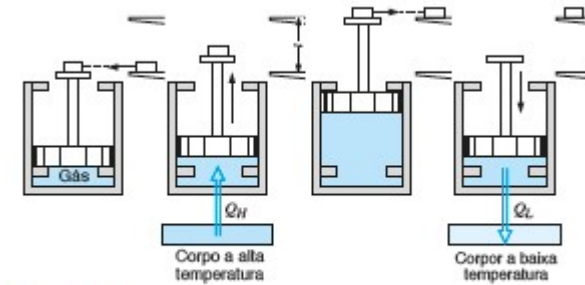


Figura 5.3
Motor térmico elementar.

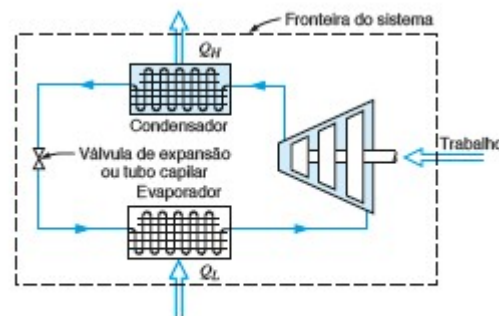


Figura 5.6
Ciclo de refrigeração elementar.

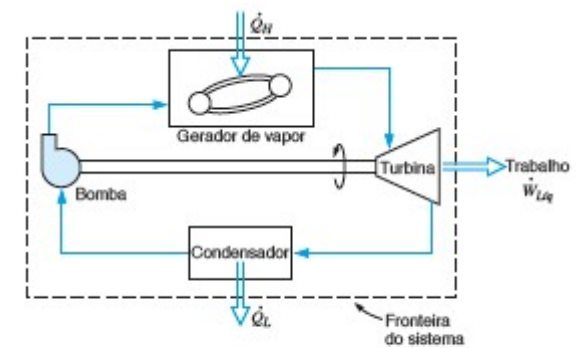


Figura 5.4
Motor térmico constituído por processos em regime permanente.

O Trabalho Máximo que pode ser obtido nessa Oportunidade

Quando existe um **desequilíbrio entre dois sistemas**, existe uma **oportunidade** de realizar trabalho enquanto eles **camminham** para o equilíbrio;

Esse trabalho seria **perdido** caso fosse permitido que os sistemas chegassem ao equilíbrio de forma **descontrolada**;

A segunda lei é capaz de avaliar qual o **máximo trabalho teórico** que seria possível de se obter de sistemas em desequilíbrio;

E como **não existe** um **aproveitamento perfeito**, a Segunda Lei também torna possível a **avaliação** dos fatores de **perda** de oportunidades de realizar trabalho.

Ciclo de Carnot

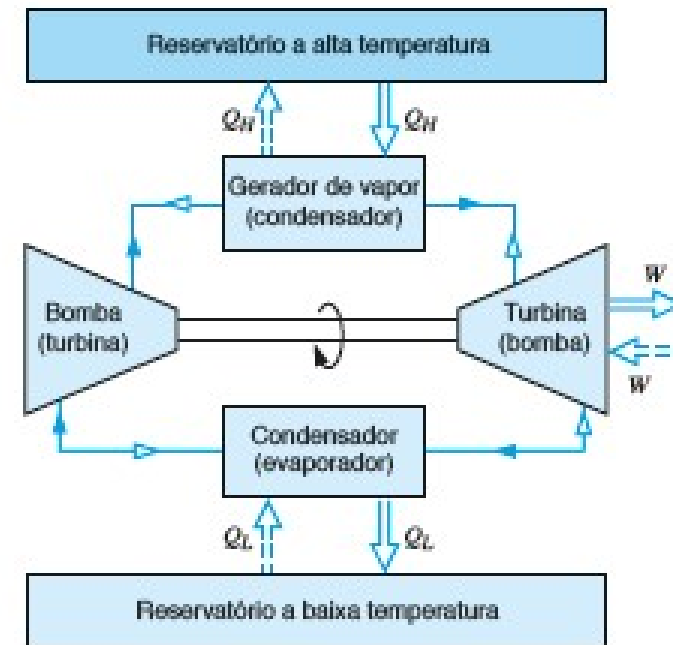


Figura 5.18
Exemplo de um motor que opera segundo um ciclo de Carnot.

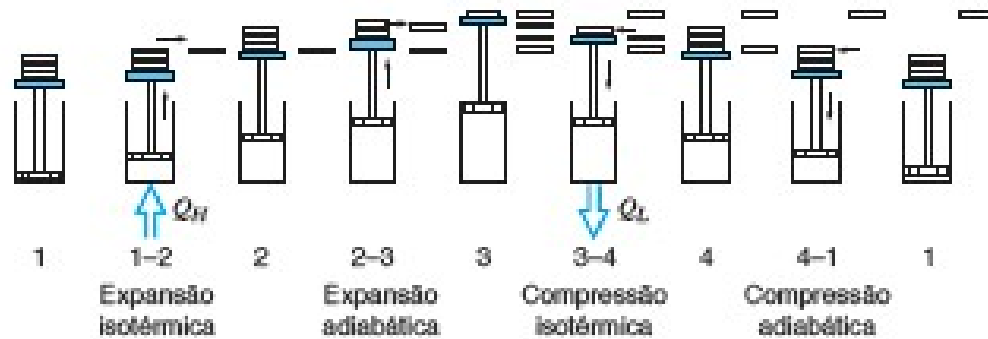


Figura 5.19
Exemplo de um ciclo de Carnot baseado em um sistema gasoso.

Ciclo de Carnot

Primeiro Teorema

Ciclo de Carnot

Segundo Teorema

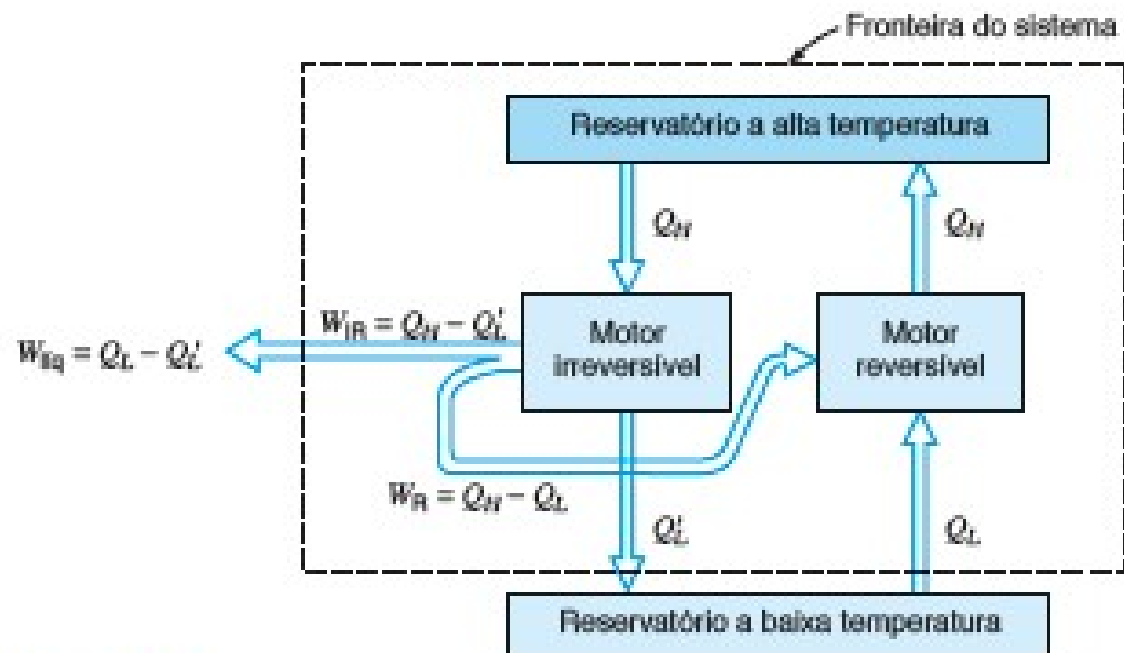


Figura 5.20

Demonstração de que o ciclo de Carnot, operando entre dois reservatórios térmicos, é o que apresenta maior rendimento térmico.

Ciclo de Carnot

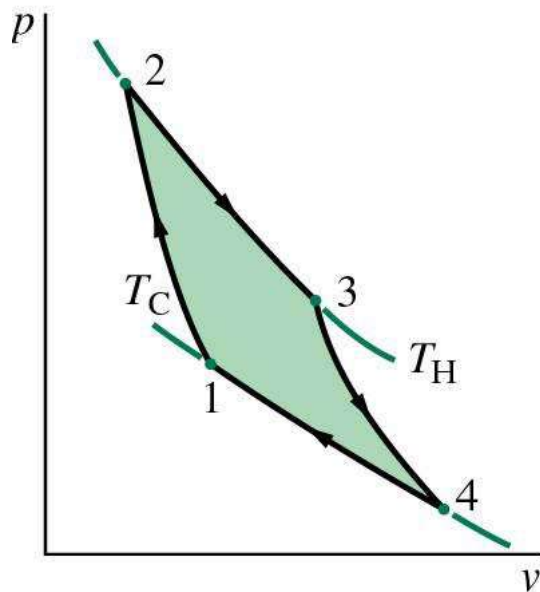
Até o século XIX, muitos acreditavam que seria possível a construção de uma **máquina térmica ideal**, capaz de transformar toda a energia fornecida em trabalho. Ou seja, seu **rendimento seria igual a 100%**.

Com o objetivo de demonstrar a sua inviabilidade, o engenheiro francês Nicolas **Carnot** (1796-1832) propôs uma **máquina térmica teórica**, isenta de irreversibilidades, cujo ciclo termodinâmico lhe conferia as características de uma **máquina de rendimento total**. Mais tarde, passou a se chamar Ciclo de Carnot.

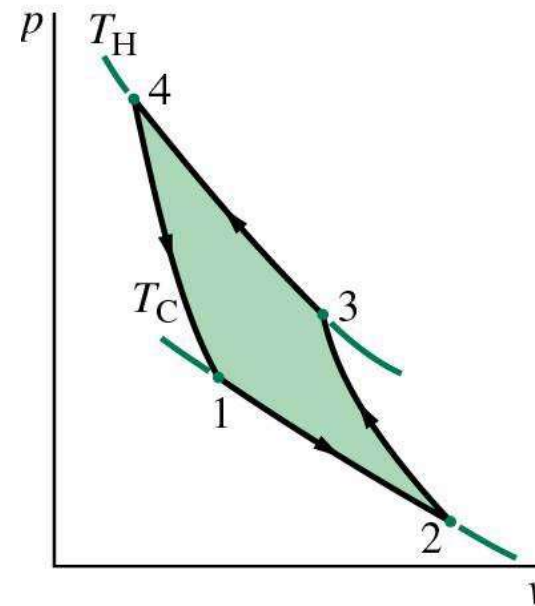
O ciclo de Carnot é composto de quatro processos básicos, **todos reversíveis**. Se cada processo é reversível, o ciclo também é reversível, e se for invertido, o motor térmico passa a funcionar como refrigerador

Ciclo de Carnot (Padrão Ar)

É um sistema que executa um **ciclo** em uma série de **quatro** processos internamente reversíveis: dois processos **adiabáticos** alternados com **dois** processos **isotérmicos**.

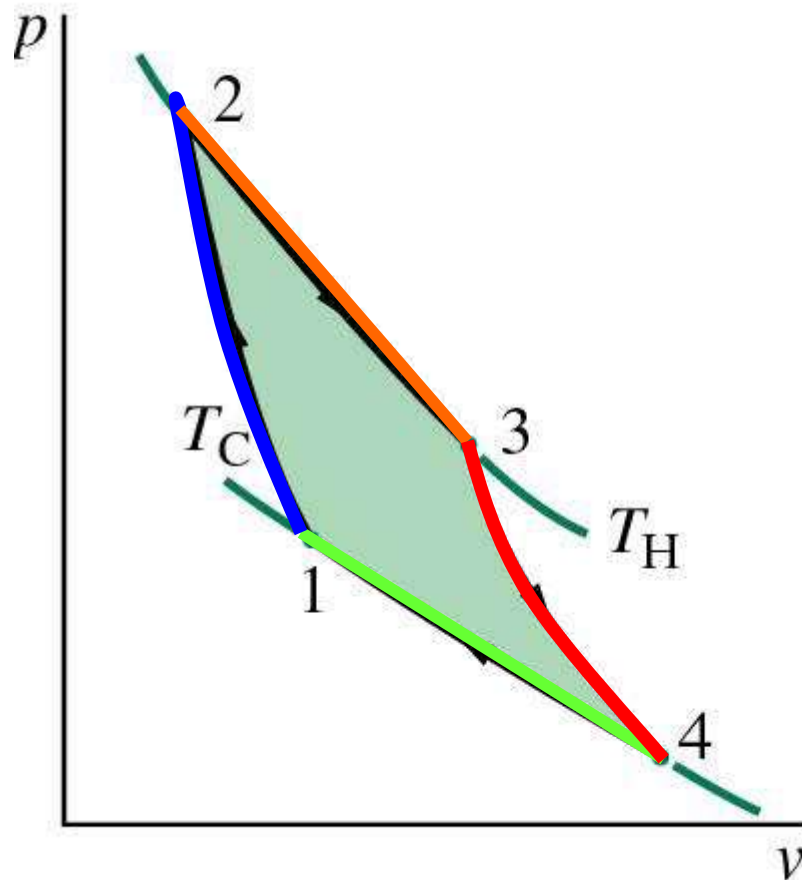


Ciclo de potência Carnot



Ciclo de refrigeração/bomba de calor Carnot

Ciclo de Carnot (Padrão Ar)



1-2: Compressão adiabática até 2, onde temperatura é T_h ;
2-3: Expansão isotérmica, recebendo energia do reservatório quente à T_h ;
3-4: Expansão adiabática até a temperatura cair para T_c ;
4-1: Compressão isotérmica, cedendo energia ao reservatório frio à T_c .

Ciclo de Carnot (Padrão Ar) - Diagrama p-v

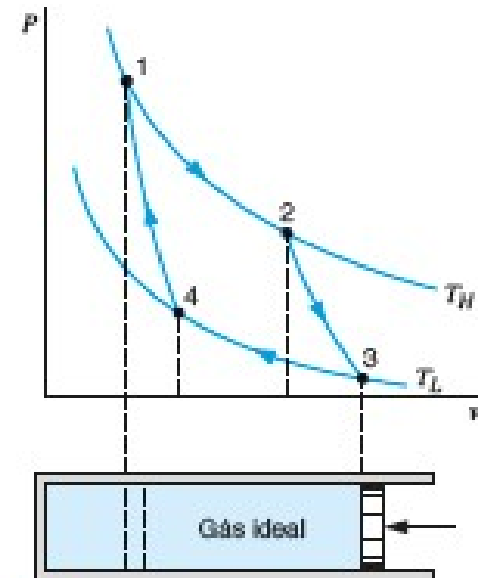
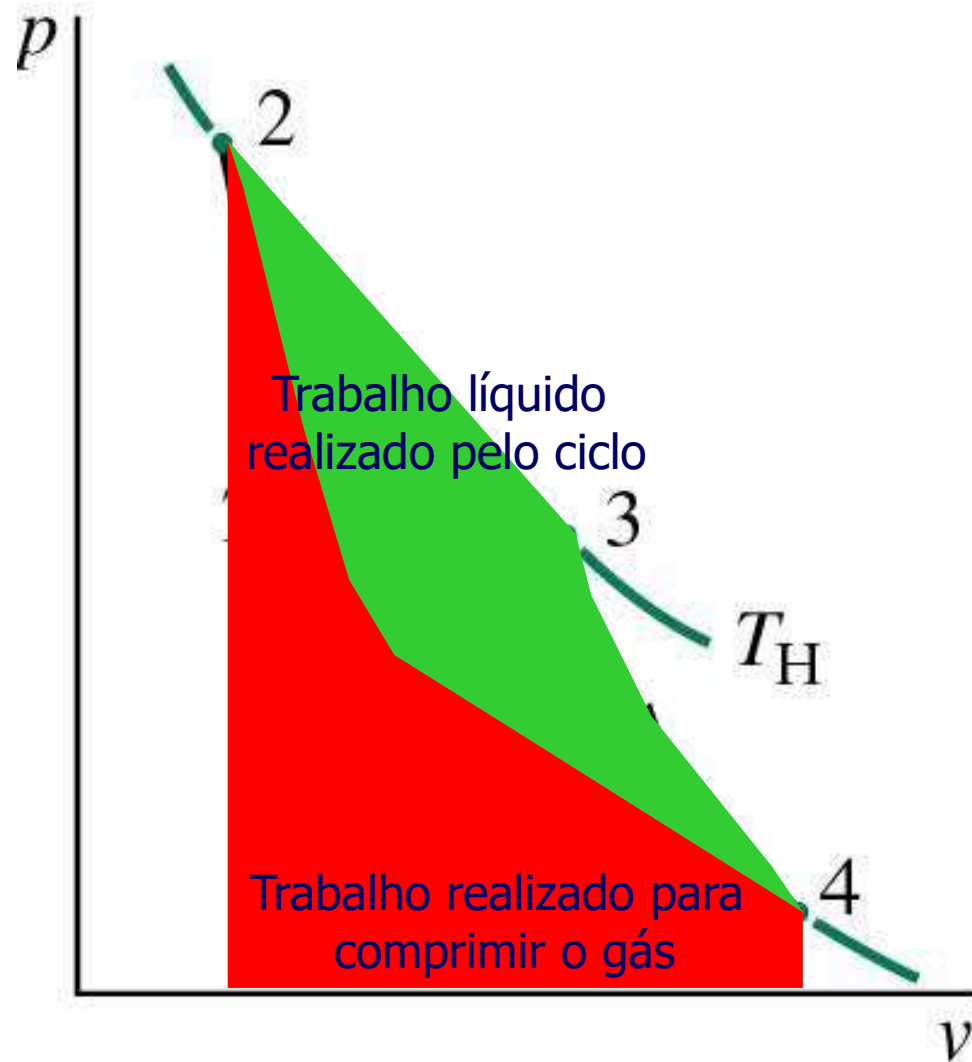


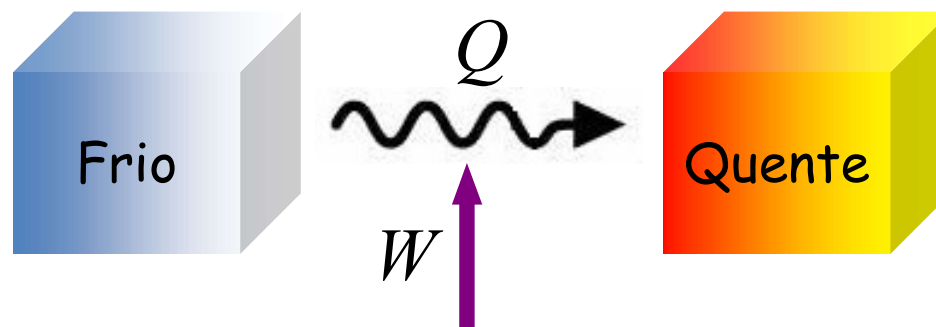
Figura 5.24

Ciclo de Carnot que opera com um gás ideal.

Ciclo de Carnot - Analisando o enunciado de Clausius

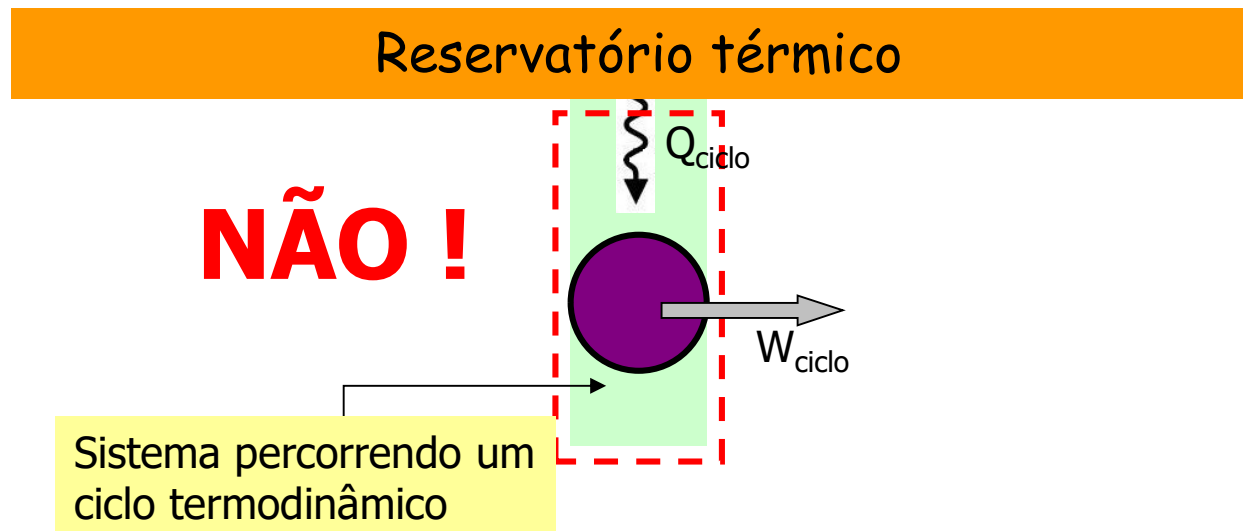
O enunciado de Clausius **não exclui** a possibilidade da transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente (isso ocorre nos **refrigeradores**).

Entretanto as palavras “**único efeito**” sugerem que isso **possa** ocorrer, desde que seja **fornecida energia (trabalho)** ao sistema.



Ciclo de Carnot - Enunciado de Kelvin-Planck da 2º Lei

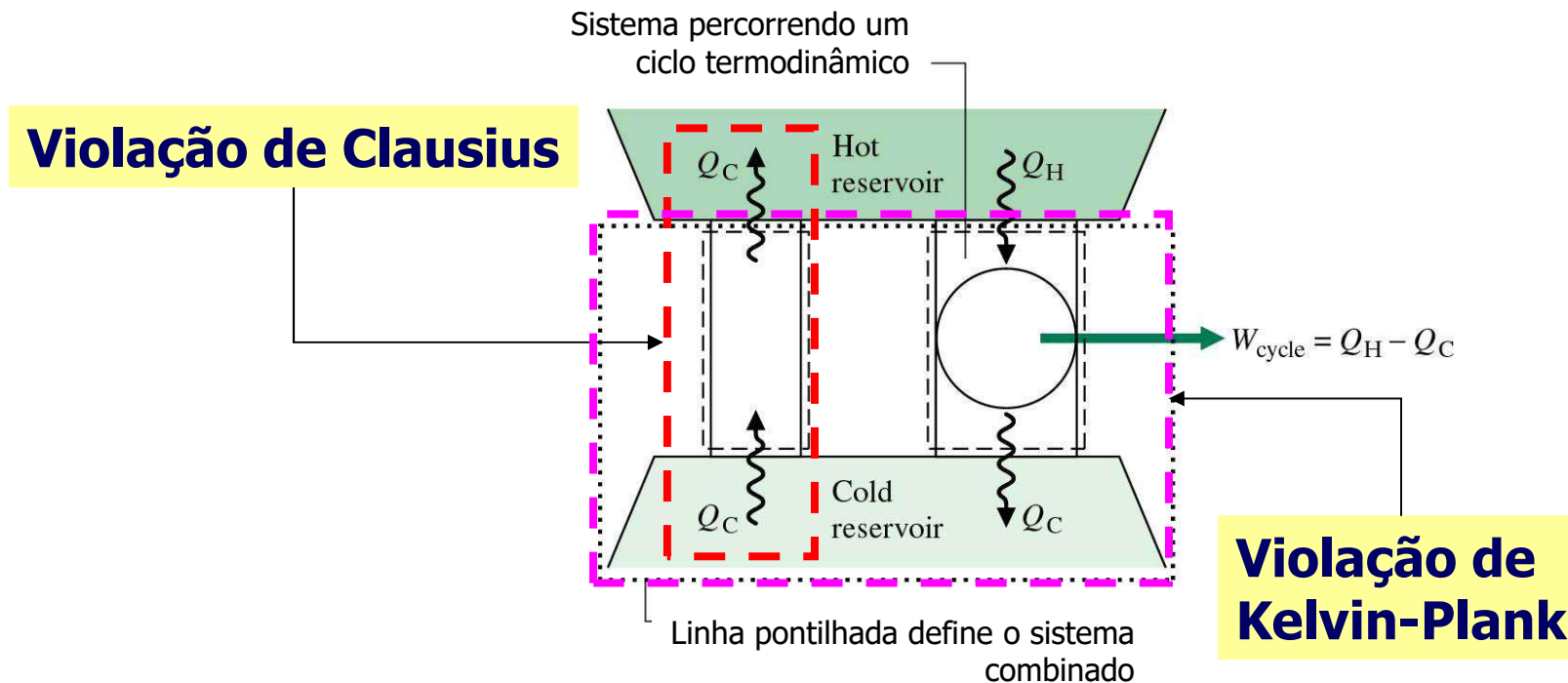
É impossível para qualquer sistema **operar em um ciclo termodinâmico** e fornecer uma quantidade “**líquida**” de trabalho para as suas vizinhanças, enquanto recebe energia, por **transferência de calor**, de um **único reservatório térmico**.



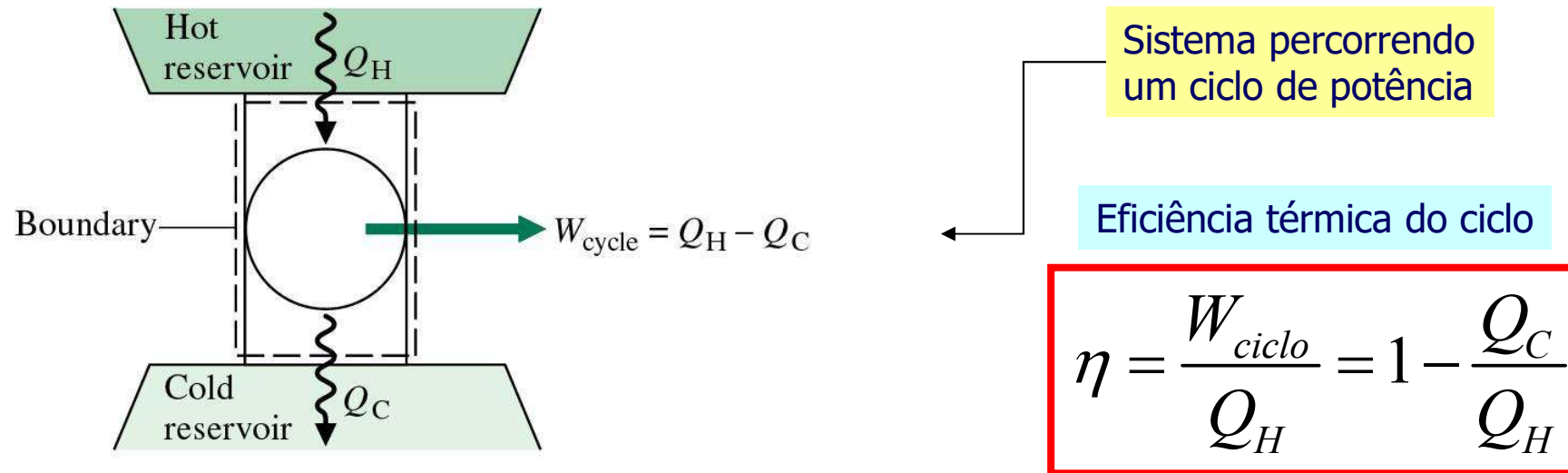
Ciclo de Carnot - Equivalência dos Enunciados

A equivalência é demonstrada pelo fato de que quando se **viola um enunciado**, conseqüentemente o **outro enunciado é violado**.

Imagine um reservatório térmico quente, um reservatório térmico frio e dois sistemas entre os reservatórios.



Ciclo de Carnot - Eficiência de Ciclos de Potência



Se **não houvesse** a transferência de calor para o reservatório frio, a eficiência seria de **100%**;

Porém, sem o reservatório frio **viola-se** o enunciado de Kelvin-Planck;

Decorre daí um **corolário de Carnot**, que diz: **todos** os ciclos de potência têm eficiência **menor** que 100%.

Ciclo de Carnot Padrão-Ar (Corolários de Carnot)



A **eficiência do ciclo de Carnot** depende **somente** da **temperatura dos reservatórios**.

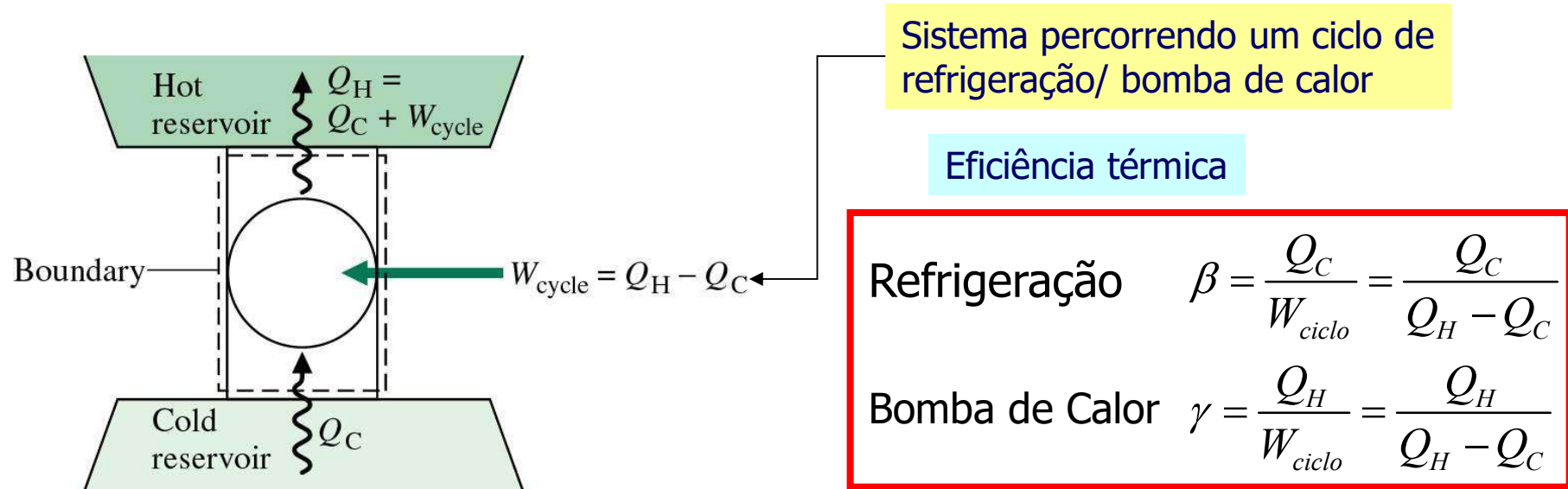


Quanto **maior** for a **temperatura da fonte quente**, **maior** será o **rendimento da máquina térmica** (para uma substância que se comportasse como um gás ideal).



Daí a importância do Ciclo de Carnot. Apesar de **inatingível**, a partir dele teremos a **referência teórica máxima** a partir da qual aprimoram-se outros ciclos.

Eficiência de Refrigeração/ Bomba de Calor



Se **não houvesse** a necessidade do fornecimento de trabalho ao ciclo, os coeficientes de desempenho seriam **infinitos**;

Porém sem o fornecimento de trabalho teríamos a **violação** do enunciado de Clausius;

Segue daí um **Corolário**, que diz: **todos** os ciclos de refrigeração/ bomba de calor tem desempenho **finito**.

Corolários para Refrigeração/ Bomba de calor

O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível é **sempre menor** do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível quando cada um opera **entre os mesmos reservatórios térmicos**;

Todos os ciclos de refrigeração reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos possuem o mesmo coeficiente de desempenho;

O mesmo **vale** substituindo o termo Refrigeração por **Bomba de calor**.

Coeficiente de máximo desempenho

Para ciclos de refrigeração:

$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

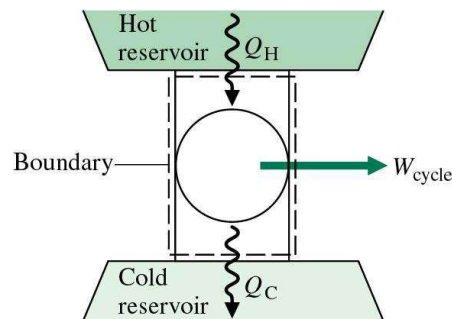
Para bombas de calor:

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$



Exemplo Eficiência de Carnot - Aquecimento

Uma máquina térmica opera entre um reservatório de térmico a 550°C e o ambiente (300K). A taxa de transferência de calor do reservatório a alta temperatura para a máquina é 1MW e a potência da máquina, ou seja, a taxa de realização de trabalho, é 450kW . Calcule a taxa de transferência de calor para o ambiente e determine a eficiência desta máquina térmica. Compare com a eficiência de Carnot



Solução: Considere a máquina térmica como sistema. Aplicando a primeira lei, temos

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 450 = 550 \text{ kW}$$

A definição de eficiência estabelece que

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{450}{1000} = 0,45$$

A eficiência da máquina térmica de Carnot é determinada pelas temperaturas dos reservatórios térmicos. Assim,

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{550 + 273} = 0,635$$

A potência e a taxa de transferência de calor para o ambiente na máquina de Carnot são

$$\dot{W} = \eta_{\text{Carnot}} \dot{Q}_H = 0,635 \times 1000 = 635 \text{ kW}$$

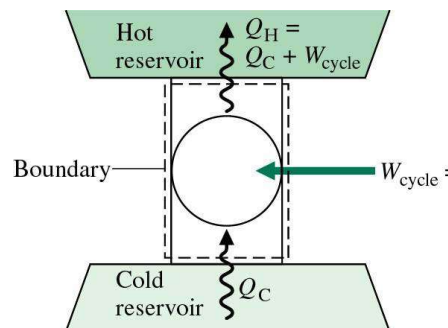
$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 635 = 365 \text{ kW}$$



Exemplo

Eficiência de Carnot - Refrigeração

Uma máquina de condicionamento de ar deve ser utilizada para manter um ambiente a 24°C. A carga térmica a ser removida deste ambiente é igual a 4kW. Sabendo que o ambiente externo está a 35°C, estime a potencia necessária para acionar o equipamento.



Solução Para resolver completamente este problema nós precisamos das informações que estão apresentadas no Cap. 11. Entretanto, neste ponto, nós podemos calcular a potência mínima de acionamento da máquina se admitirmos que o equipamento é um refrigerador que opera segundo um ciclo de Carnot. Deste modo, o coeficiente de desempenho é dado por

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{273 + 24}{35 - 24} = 27$$

e a potência de acionamento do condicionador de ar é

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_L}{\beta} = \frac{4}{27} = 0,15 \text{ kW}$$



Exemplo Motores Térmicos e Refrigeradores

A potência térmica no eixo do motor de um automóvel é 136Hp e a eficiência térmica do motor é igual a 30%. Sabendo que a queima do combustível fornece 35000kJ/kg ao motor, determine a taxa de transferência de calor para o meio e a vazão em massa de combustível consumido em kg/s (Ex 7.1-VW6^{aed})

Solução: A potência no eixo, em kW, é (Tab. A.1)

$$\dot{W} = 136 \text{ Hp} \times 0,7355 \text{ kW/HP} = 100 \text{ kW}$$

Utilizando a definição de eficiência térmica, Eq. 7.1,

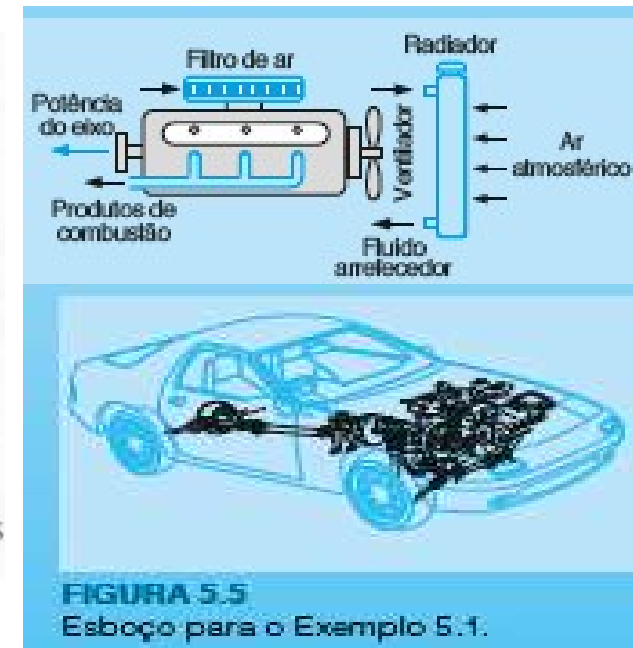
$$\dot{Q}_H = \dot{W} / \eta_{\text{térmico}} = 100 / 0,3 = 333 \text{ kW}$$

A aplicação da primeira lei da termodinâmica fornece

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = (1 - 0,3)\dot{Q}_H = 233 \text{ kW}$$

A vazão em massa de combustível pode ser calculada por

$$\dot{m} = \dot{Q}_H / q_H = \frac{333}{35000} = 9,5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$





Exemplo

Motores Térmicos e Refrigeradores

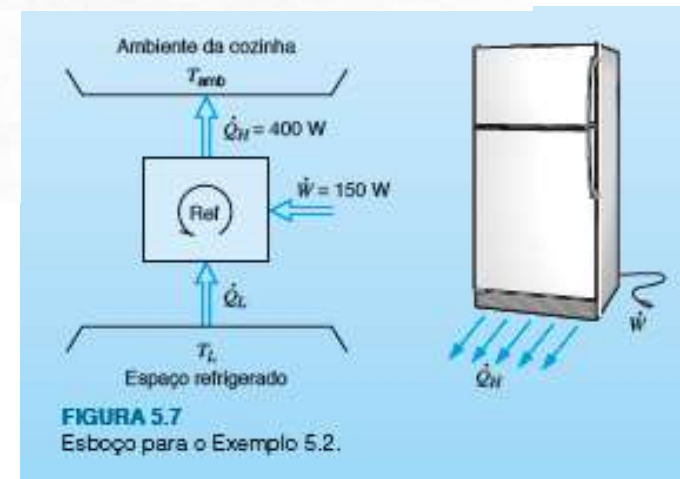
A potência elétrica consumida no acionamento de um refrigerador doméstico é 150W e o equipamento transfere 400W para o ambiente. Determine a taxa de transferência de calor no espaço refrigerado e o coeficiente de desempenho do refrigerador (Ex 7.2-VW6ªed)

Solução: Nós vamos admitir que o sistema é composto pelo refrigerador e que este opera com a porta fechada e em regime permanente. A primeira lei da termodinâmica aplicada ao sistema fornece

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 400 - 150 = 250 \text{ W}$$

Utilizando a definição do coeficiente de desempenho,

$$\beta_{\text{refrigerador}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{250}{150} = 1,67$$





Exemplo

Máquinas Térmicas Reais e Ideais

A Figura abaixo mostra o esquema de uma máquina térmica que opera entre um reservatório térmico a 550°C e o ambiente (300K). A taxa de transferência de calor do reservatório a alta temperatura para a máquina é 1MW e a potência da máquina, ou seja, a taxa de realização de trabalho, é 450kW . Calcule o valor da taxa de transferência de calor desta máquina térmica. (Ex 7.3-VW6^{aed})

Solução: Considere a máquina térmica como sistema. Aplicando a primeira lei, temos

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 450 = 550 \text{ kW}$$

A definição de eficiência estabelece que

$$\eta_{\text{termico}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{450}{1000} = 0,45$$

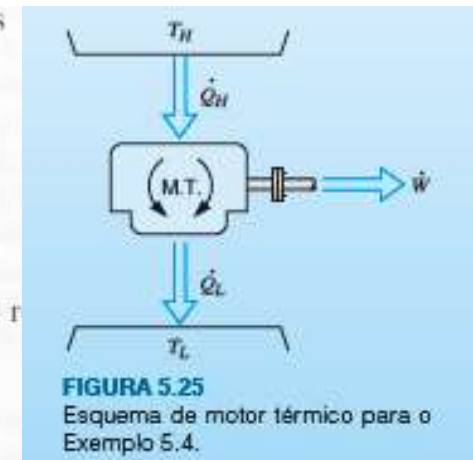
A eficiência da máquina térmica de Carnot é determinada pelas temperaturas dos reservatórios térmicos. Assim,

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{550 + 273} = 0,635$$

A potência e a taxa de transferência de calor para o ambiente na máquina de Carnot são

$$\dot{W} = \eta_{\text{Carnot}} \dot{Q}_H = 0,635 \times 1000 = 635 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 635 = 365 \text{ kW}$$





Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

7.22 Um fazendeiro deseja utilizar uma bomba de calor, acionada com um motor de 2 kW, para manter a temperatura de um galinheiro igual a 30 °C. A taxa de transferência de calor do galinheiro para o ambiente, que está a uma temperatura T_{amb} , é igual a 10 kW. Qual é o coeficiente de eficácia mínimo da bomba de calor para que o sistema de aquecimento opere adequadamente?

7.48 Propõe-se aquecer uma residência durante o inverno usando uma bomba de calor. A temperatura da residência deve ser sempre mantida igual a 20 °C. Estima-se que, quando a temperatura do meio externo cai a -10 °C, a taxa de transferência de calor da residência para o meio é igual a 25 kW. Qual é a mínima potência elétrica necessária para acionar essa bomba de calor?





Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed								
Capítulo 7								
Motores Térmicos e Refrigeradores	7.22	7.23	7.24	7.27	7.30			
Processos e 2ª Lei da Termodinâmica	7.35	7.37	7.38					
Ciclos de Carnot e Temperatura Absoluta	7.42	7.45	7.48	7.54	7.57	7.60	7.64	7.65
Transferencia de calor AT infinito	7.67	7.68	7.71					
Ciclos de Carnot com gases perfeitos	7.77	7.78	7.79					

Capítulo 8 – Entropia

Objetivos:

≡ Aplicar quantitativamente a 2ª Lei da Termodinâmica em Processos

Capítulo 8 – Entropia

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de :

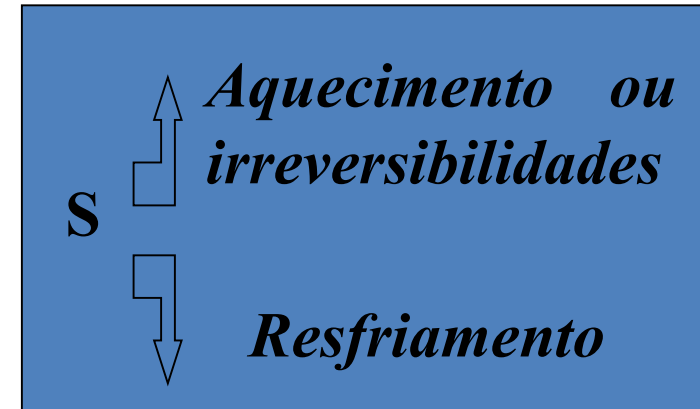
- Reconhecer que a desigualdade de Clausius é uma das formas da segunda lei da termodinâmica.
- Reconhecer a relação que existe entre a variação de entropia e a transferência de calor reversível.
- Localizar um estado termodinâmico nas tabelas a partir dos valores da entropia e de outra propriedade independente.
- Elaborar o diagrama $T - s$ referente a um ciclo de Carnot.
- Reconhecer a forma das curvas de processos simples no diagrama $T - s$.
- Aplicar a segunda lei da termodinâmica num sistema que realiza, ou sofre, um processo.
- Identificar os processos que geram entropia num sistema.
- Avaliar as variações de entropia em sólidos, líquidos e gases.
- Reconhecer as várias relações entre propriedades dedicadas a descrever os processos politrópicos em gases perfeitos.
- Aplicar a segunda lei da termodinâmica a um processo transitório que ocorre num sistema e identificar os significados da taxa de geração de entropia e do fluxo de entropia.

Entropia

Existe uma propriedade termodinâmica denominada entropia (S) cujo valor aumenta sempre que o sistema recebe calor ou passa por um processo irreversível e diminui apenas quando o sistema rejeita calor.

Como consequência, essa propriedade se mostra especialmente eficaz na caracterização da irreversibilidades ocorridas ao longo de processos adiabáticos (se $Q=0$, ΔS fornece uma boa medida da intensidade dos efeitos dissipativos).

A entropia tem dimensões de energia/temperatura (mais frequentemente se emprega a entropia específica, medida por exemplo em kJ/kg.K). O valor dessa propriedade pode ser tirado de diagramas e tabelas ou ainda calculado por expressões analíticas



Transferência de Energia e Entropia

Se um **processo irreversível** ocorre em um sistema **fechado**, a entropia S do sistema **sempre aumenta**

$$\Delta E = E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

Variação de Energia
Transferência de Energia via calor
Transferência de Energia via Trabalho

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + {}_1S_{ger,2}$$

Variação de entropia
Transferência de entropia via calor
Geração de entropia

Em que ${}_1S_{ger} \geq 0$ e depende do processo

Nota: trabalho não transfere entropia!

A segunda Lei na forma integrada

Interpretação dos termos da segunda lei para um processo executado por uma massa de controle desde o estado inicial 1 até o estado final 2.

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + {}_1S_{ger,2}$$

Variação de entropia Transferência de entropia via calor Geração de entropia

${}_1S_{ger,2} \geq 0$ e depende do processo

Processos reversíveis: a igualdade se aplica.

Processos irreversíveis: a desigualdade se aplica.

**Nota: trabalho não transfere entropia!
Calor transfere entropia.**

Processos irreversíveis

- A reversibilidade não viola o princípio de conservação da energia.
- A **Entropia, S** , é uma propriedade nova que determina se algum processo é reversível ou não.
- **S é uma propriedade de estado** e não depende do caminho de mudança de um estado inicial a um estado final.
- S não obedece uma lei de conservação.

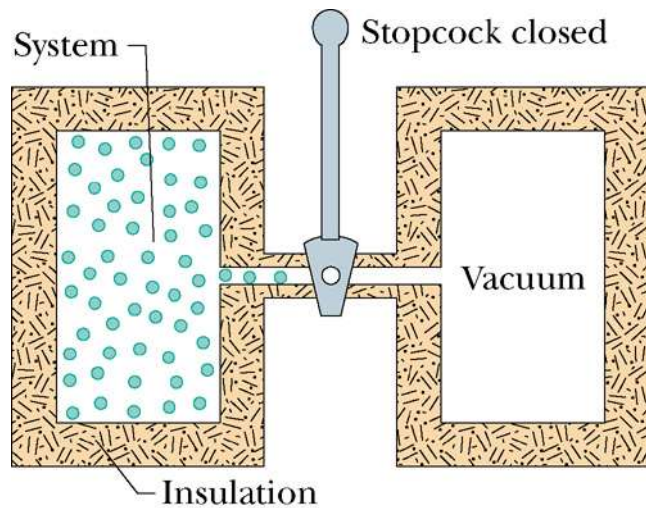
Postulado da Entropia

Se um **processo irreversível** ocorre em um sistema **fechado**, a entropia **S** do sistema sempre **aumenta**

Definição da variação da entropia

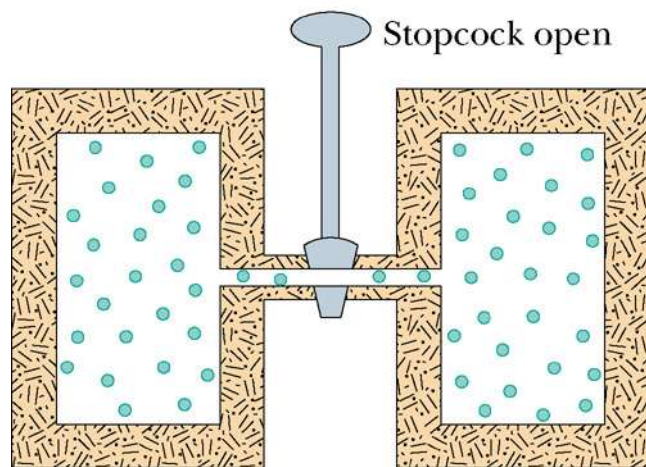
- Macroscópico: depende da transferência de calor e da temperatura.
- Microscópico: Contando as diferentes partes de um sistema (como as moléculas do gás ideal) e a forma como a energia é distribuída entre essas partes.

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

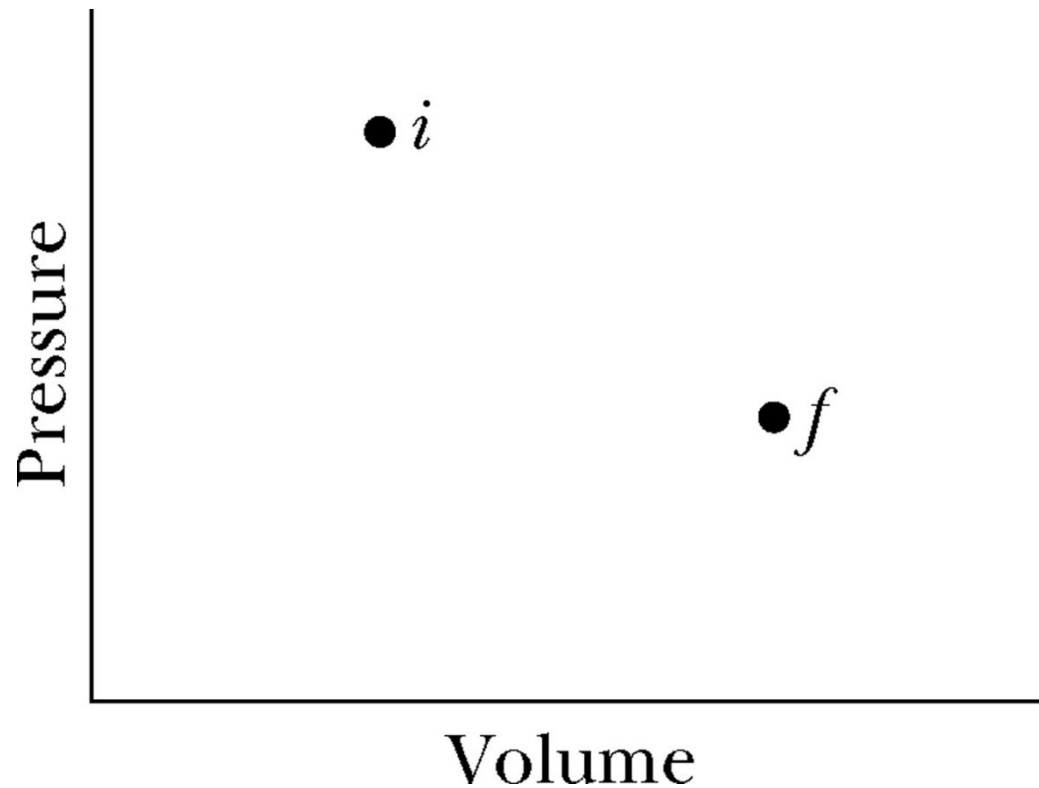


(a) Initial state i

Irreversible process

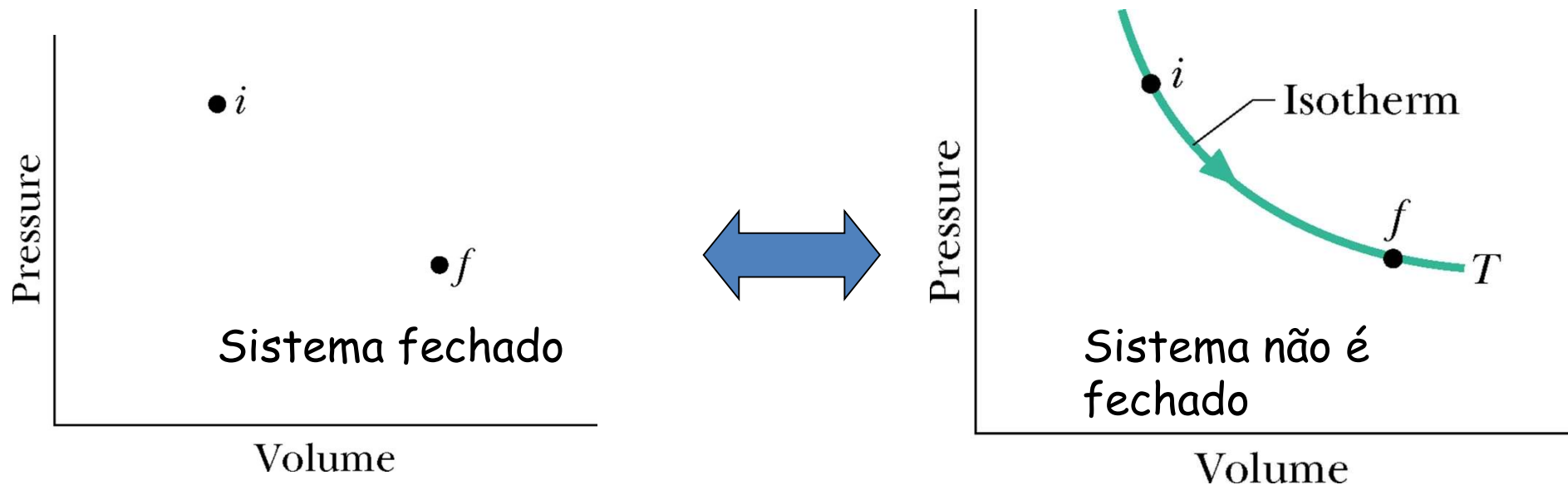


(b) Final state f



Não temos informações sobre como p e V flutuam entre estes dois estados.

- Como a entropia é uma outra variável de estado, a diferença de entropia deve depender apenas dos estados i e f e não do caminho seguido no espaço de parâmetros.
- Na expansão livre $T_i = T_f$
- Analisamos S no sistema através da expansão isotérmica. Eles são processos diferentes mas tem a mesma variação da entropia

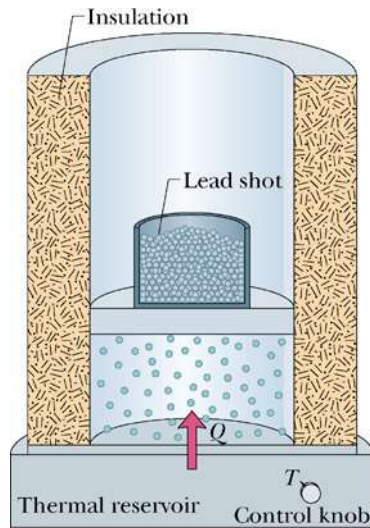


$$\Delta S_{irre} = \Delta S_{rev}$$

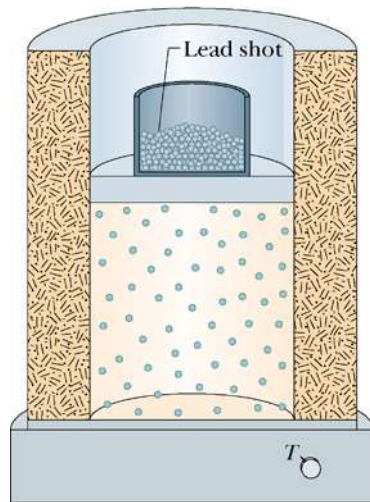
Em resumo (na hora de fazer contas...)

Para determinar a variação da entropia em um processo irreversível que ocorre em um sistema fechado substituímos esse processo por qualquer outro processo reversível que ligue os mesmos estados inicial e final e calculamos a variação da entropia para esse processo reversível usando a equação abaixo

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$



(a) Initial state i



(b) Final state f

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{Q}{T} > 0$$

A entropia aumenta durante ambos os processos: expansão livre e expansão isotérmica.

Se a variação de T é pequena

$$\Delta S = S_f - S_i \approx \frac{Q}{T_{\text{avg}}}$$

Entropia como função de estado

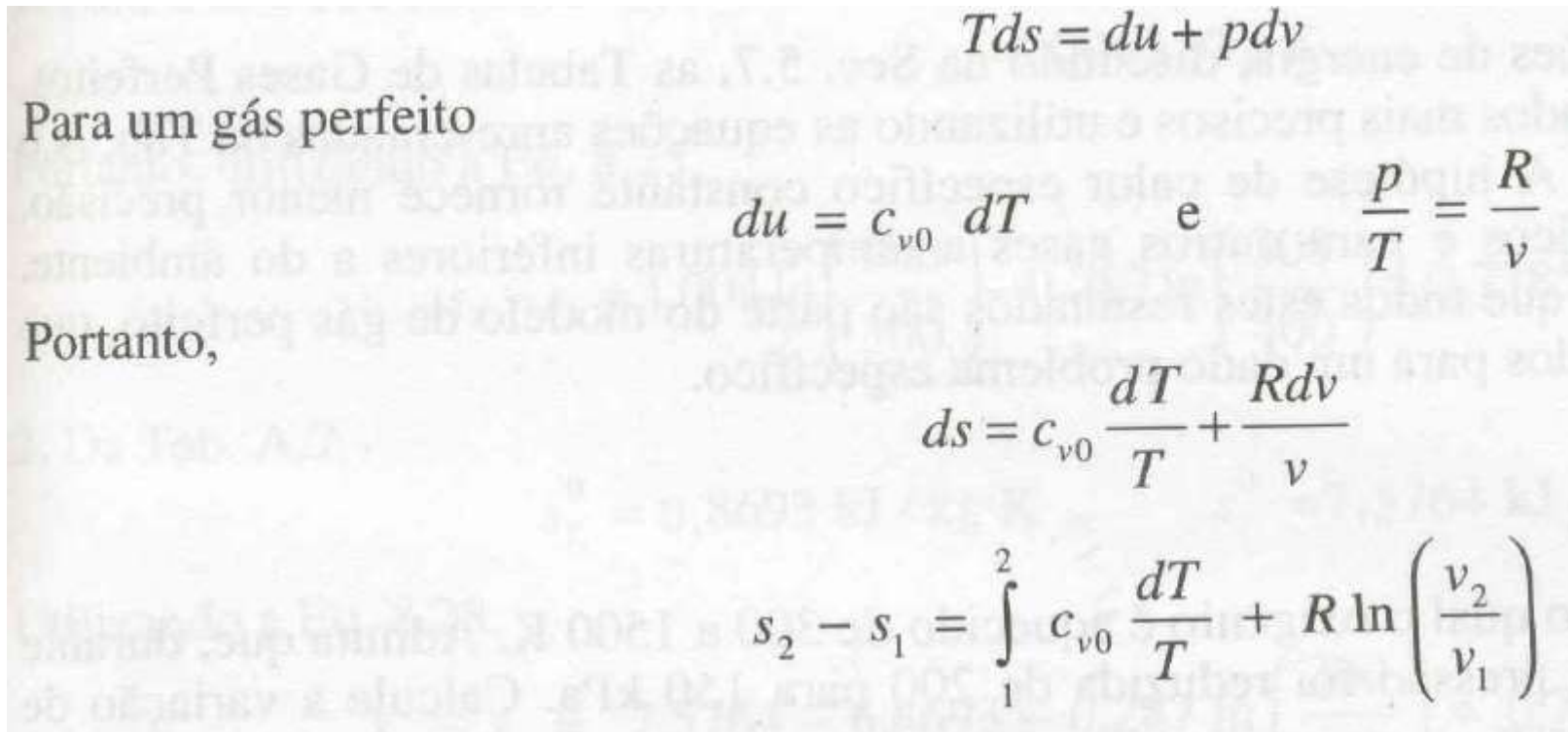
Calculemos a variação da entropia no caso de um **gás ideal** passando por um processo reversível

$$\left. \begin{aligned} dE_{\text{int}} = dQ - dW &\rightarrow dQ = dE_{\text{int}} + dW \\ &= nC_V dT + pdV \\ &= nC_V dT + \frac{nRT}{V} dV \end{aligned} \right\} \frac{dQ}{T} = nC_V \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_V \ln \frac{T_f}{T_i}$$

Entropia como função de estado

Calculemos a variação da entropia no caso de um **gás ideal** passando por um processo reversível



The image shows a handwritten derivation of the entropy change for an ideal gas. It starts with the fundamental thermodynamic relation $Tds = du + pdv$. For a perfect gas, it uses $du = c_{v0} dT$ and the ideal gas law $\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$. This leads to the differential equation $ds = c_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$. Finally, it integrates from state 1 to state 2 to get $s_2 - s_1 = \int_1^2 c_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$.

$$Tds = du + pdv$$

Para um gás perfeito

$$du = c_{v0} dT \quad \text{e} \quad \frac{p}{T} = \frac{R}{v}$$

Portanto,

$$ds = c_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$
$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

Entropia como função de estado

Calculemos a variação da entropia no caso de um **gás ideal** passando por um processo reversível

Analogamente

$$Tds = dh - vdp$$

Para um gás perfeito

$$dh = c_{p0} dT$$

e

$$\frac{v}{T} = \frac{R}{p}$$

Portanto,

$$ds = c_{p0} \frac{dT}{T} - \frac{Rdp}{p}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

A segunda lei

- O nosso postulado sobre a entropia só se aplica a processos irreversíveis em sistemas fechados. Mas na hora de calcular a variação da entropia usamos um processo reversível de um sistema (gás) em contato com um reservatório térmico.
- Ao considerar o sistema maior de gás + reservatório a variação de entropia é nula num sistema fechado durante um processo reversível.

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{gás}} + \Delta S_{\text{res}} = \frac{|Q|}{T} - \frac{|Q|}{T} = 0$$

A segunda lei da termodinâmica

$$\Delta S \geq 0$$

Se um processo ocorre num sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis.

A entropia nunca diminui.



Exemplo

Varição de Entropia em Processos Reversíveis

Um conjunto cilindro-pistão contém 1 litro de líquido saturado de R-12 a 20°C. A posição do pistão é alternada vagarosamente até que a pressão interna se torne igual a 400kPa. Admitindo que o processo de expansão é isotérmico e reversível, determine o trabalho realizado e a transferência de calor nesse processo. (Ex 8.2-VW6^{aed})

Sistema: R-12.

Estado inicial: T_1 , líquido saturado; estado determinado.

Estado final: p_2 conhecido.

Processo: Isotérmico e reversível.

Primeira lei: $m(u_2 - u_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$

Segunda lei: $m(s_2 - s_1) = \int \delta Q/T$ (a igualdade foi utilizada

Estado 1 $u_1 = 54,45 \text{ kJ/kg}$ $s_1 = 0,2078 \text{ kJ/kgK}$ (Tab. B.3.1)

$$m = V / v_1 = 0,001 / 0,000752 = 1,33 \text{ kg}$$

Estado 2 $u_2 = 180,57 \text{ kJ/kg}$ $s_2 = 0,7204 \text{ kJ/kgK}$ (Tab. B.3.2)

Lembrando que a temperatura permanece constante no processo,

$${}_1Q_2 = mT(s_2 - s_1) = 1,33 \times 293,15 \times (0,7204 - 0,2078) = 200,0 \text{ kJ}$$

O trabalho realizado pode ser determinado com a primeira lei da termodinâmica,

$${}_1W_2 = m(u_1 - u_2) + {}_1Q_2 = 1,33 \times (54,45 - 180,57) + 200,0 = 32,3 \text{ kJ}$$

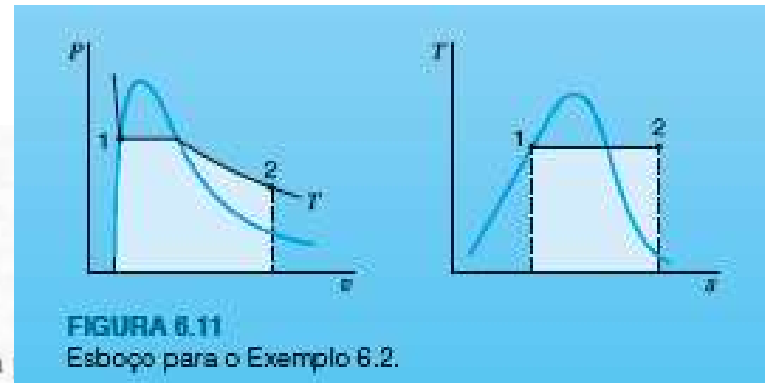


FIGURA 8.11
Esboço para o Exemplo 8.2.



Exemplo

Varição de Entropia em um Sólido ou Líquido

Um quilograma de água líquida é aquecido de 20°C a 90°C. Calcule a variação de entropia, admitindo que o calor específico é constante e compare este resultado com o obtido utilizando as tabelas de vapor. (Ex 8.4-VW6^{aed})

Solução: Utilizamos a Eq. 8.20 para os casos onde o calor específico é constante. Assim,

$$s_2 - s_1 = 4,184 \ln \left(\frac{363,2}{293,2} \right) = 0,8958 \text{ kJ/kg K}$$

O resultado obtido através das tabelas de vapor é :

$$s_2 - s_1 = s_{1,90^\circ\text{C}} - s_{1,20^\circ\text{C}} = 1,1925 - 0,2966 = 0,8959 \text{ kJ/kg K}$$



Exemplo

Varição de Entropia em um Gás Perfeito

Calcule a variação de entropia específica para o ar quando este é aquecido de 300K a 600K e a pressão diminui de 400kPa para 300kPa, admitindo: (Ex 8.6-VW6^aed)

1. Calor específico constante;
2. Calor específico variável.

Solução:

1. Para o ar a 300 K (Tab. A.5):

$$c_{p0} = 1,004 \text{ kJ/kg K}$$

Portanto, utilizando a Eq. 8.25,

$$s_2 - s_1 = 1,004 \ln \left(\frac{600}{300} \right) - 0,287 \ln \left(\frac{300}{400} \right) = 0,7785 \text{ kJ/kg K}$$

2. Da Tab. A.7,

$$s_{T_1}^0 = 6,8693 \text{ kJ / kg K} \quad s_{T_2}^0 = 7,5764 \text{ kJ / kg K}$$

Utilizando a Eq. 8.28,

$$s_2 - s_1 = 7,5764 - 6,8693 - 0,287 \ln \left(\frac{300}{400} \right) = 0,7897 \text{ kJ/kg K}$$



Exemplo

Varição de Entropia em Processos Reversíveis

Um gás ideal sofre uma expansão isobárica REVERSÍVEL que dobra o seu volume inicial. Qual a variação de entropia do sistema e do universo durante o processo? Qual é T_i/T_f ?

$$\Delta S_{Universo} = \Delta S_{Sistema} + \Delta S_{RC} \geq 0 \text{ (2ª Lei)}$$

Processo Reversível $\rightarrow \Delta S_{Universo} = 0$

Logo: $\Delta S_{Sist} = -\Delta S_{RC}$

$$dS = \frac{c_p dT}{T} \therefore \Delta S = \int_{T_i}^{T_f} c_p \frac{dT}{T} \Big|_p \rightarrow \Delta S = c_p \ln \frac{T_f}{T_i} \rightarrow c_p \ln 2$$

Condição: $(PV = nRT)$

$$V_f = 2 V_i$$
$$\frac{T_f}{T_i} = 2$$



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

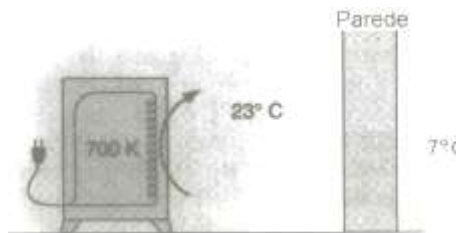
8.26 Considere a água como fluido de trabalho. Determine o valor da entropia específica para cada um dos estados fornecidos e indique a posição desses estados no diagrama $T - s$.

- $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 2000 \text{ kPa}$
- $T = -2 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 100 \text{ kPa}$
- $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 100 \text{ kPa}$
- $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 10 \text{ MPa}$

8.36 Água a 200 kPa e com título igual a 1 é comprimida, num arranjo cilindro – pistão, até o estado onde a pressão e a temperatura são iguais a 1 MPa e $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Admitindo que o processo seja reversível, determine os sinais do trabalho e da transferência de calor presentes neste processo.

8.100 A temperatura e a pressão no argônio presente no bulbo de uma lâmpada são iguais a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e 90 kPa quando a lâmpada está desligada. A lâmpada é então ligada e o gás é aquecido até $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Desprezando os efeitos da radiação emitida pela lâmpada e o aquecimento do bulbo, determine a geração global de entropia no processo por unidade de massa de argônio.

8.122 Um aquecedor elétrico de ambiente, com potência de 2000 W , mantém o ar confinado numa sala a $23 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura do elemento resistivo do aquecedor é igual a 700 K . O ar da sala transfere calor, em regime permanente, para o ambiente externo que se encontra a $7 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine as taxas de geração de entropia no aquecedor e em todos os processos de transferência de calor indicados.





Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed						
Capítulo 8						
Desigualdade de Clausius	8.21	8.22	8.24			
Entropia de uma substância Pura	8.26	8.28	8.30			
Processos Reversíveis	8.31	8.32	8.36	8.49	8.54	8.59
Geração de Entropia	8.61	8.64	8.74			
Entropia de Líquidos e Sólidos	8.76	8.78	8.80	8.84		
Entropia de Gases Perfeitos	8.89	8.90	8.93	8.99	8.100	
Taxas ou Fluxos de Entropia	8.121	8.122	8.123			

Capítulo 9 – Segunda Lei da Termodinâmica em Volumes de Controle

Objetivos:

- ≡ Desenvolver a forma da Segunda Lei da Termodinâmica adequada para análises de fenômenos com volume de controle
- ≡ Definir rendimentos termodinâmicos de Processos

Capítulo 9 – Segunda Lei da Termodinâmica em Volumes de Controle

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de :

- Aplicar a segunda lei em volumes de controle gerais.
- Analisar a operação, reversível ou irreversível, de turbinas, bombas, compressores e bocais que operam em regime permanente.
- Analisar um processo em regime uniforme num volume de controle.
- Analisar a operação de um sistema térmico como um todo e, depois, particularizar a análise.
- Analisar a operação das câmaras de mistura, trocadores de calor e turbinas que apresentam múltiplas seções de alimentação e descarga.
- Identificar se um escoamento pode ser modelado como incompressível.
- Saber aplicar corretamente a equação de Bernoulli.
- Saber avaliar o trabalho de eixo nos processos politrópicos.
- Identificar a máquina ideal, ou dispositivo ideal, de modo que a comparação entre as operações real e ideal faça sentido.
- Utilizar corretamente as várias definições de eficiência.
- Saber diferenciar a eficiência de um ciclo térmico da eficiência de uma máquina ou dispositivo.



Exemplo Processo em Regime Permanente - Turbina

Vapor d'água entra numa turbina a 300°C, pressão de 1MPa e com velocidade de 50m/s. O vapor sai da turbina a pressão de 150kPa e com uma velocidade de 200m/s. Determine o trabalho específico realizado pelo vapor que escoa na turbina, admitindo que o processo é reversível. (Ex 9.1-VW6^{aed})

Análise: Equação da continuidade: $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

Primeira lei da termodinâmica: $h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_i + \frac{V_i^2}{2} + w$

Segunda lei da termodinâmica: $s_i = s_e$

Solução: Das tabelas de vapor d' água

$$h_e = 3051,2 \text{ kJ/kg e } s_e = 7,1228 \text{ kJ/kg K}$$

As duas propriedades conhecidas do estado final são a pressão e a entropia:

$$p_e = 0,15 \text{ MPa e } s_e = s_i = 7,1228 \text{ kJ/kg K}$$

Portanto, o título e a entalpia do vapor d'água que sai da turbina podem ser determinados.

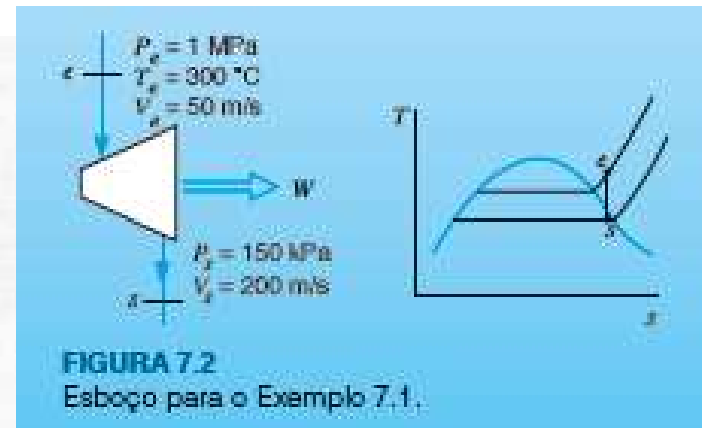
$$s_e = 7,1228 = s_i + x_e s_{iv} = 1,4335 + x_e 5,7897$$

$$x_e = 0,9827$$

$$h_e = h_i + x_e h_{iv} = 467,1 + 0,9827(2226,5) = 2655,0 \text{ kJ/kg}$$

Portanto, o trabalho específico realizado pelo vapor no processo isoentrópico pode ser determinado utilizando-se a equação da primeira lei da termodinâmica.

$$w = 3051,2 + \frac{50 \times 50}{2 \times 1000} - 2655,0 - \frac{200 \times 200}{2 \times 1000} = 377,5 \text{ kJ / kg}$$





Exemplo Processo em Regime Permanente - Bocal

Considere o escoamento de vapor d'água num bocal. O vapor entra no bocal a 1MPa, 300°C e com velocidade de 30m/s. A pressão do vapor na saída do bocal é 0,3MPa. Admitindo que o escoamento seja adiabático, reversível e em regime permanente, determine a velocidade do vapor na seção de saída do bocal. (Ex 9.2-VW6^{aed})

Análise: Como esse processo ocorre em regime permanente, no qual o trabalho, a transferência de calor e a variação de energia potencial são nulos, podemos escrever

Equação da continuidade: $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$

Primeira lei da termodinâmica: $h_e + \frac{\mathbf{V}_e^2}{2} = h_s + \frac{\mathbf{V}_s^2}{2}$

Segunda lei da termodinâmica: $s_s = s_e$

Solução: Das tabelas de vapor d'água,

$$h_e = 3051,2 \text{ kJ/kg e } s_e = 7,1228 \text{ kJ/kg K}$$

As duas propriedades conhecidas no estado final são

$$p_s = 0,3 \text{ MPa e } s_s = s_e = 7,1228 \text{ kJ/kg K}$$

Portanto

$$T_s = 159,1^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad h_s = 2780,2 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo estes valores na equação da primeira lei da termodinâmica, temos

$$\frac{\mathbf{V}_s^2}{2} = h_e - h_s + \frac{\mathbf{V}_e^2}{2} = 3051,2 - 2780,2 + \frac{30 \times 30}{2 \times 1000} = 271,5 \text{ kJ/kg}$$
$$\mathbf{V}_s = 737 \text{ m/s}$$

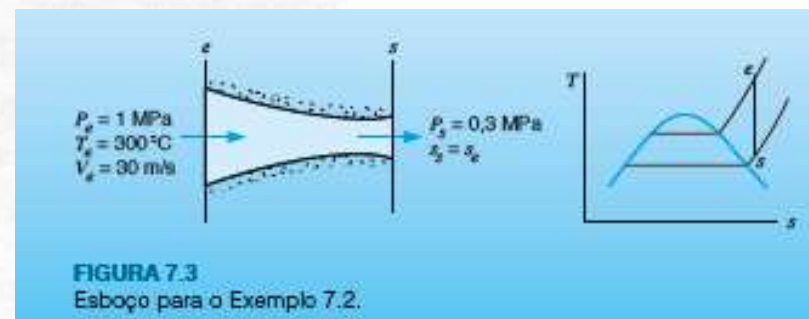


FIGURA 7.3
Esboço para o Exemplo 7.2.



Exemplo

Processo em Regime Permanente - Desuperaquecedores

Os desuperaquecedores são utilizados para produzir vapor saturado a partir da mistura de vapor superaquecido com água no estado líquido. A Figura abaixo mostra esse equipamento alimentado com 2kg/s de vapor d'água a 200°C e 300kPa e com água líquida a 20°C. Determine a vazão em massa de água líquida para que o equipamento descarregue vapor saturado a 300kPa. Calcule também, a taxa de geração de entropia nesse processo de mistura. (Ex 9.5-VW6^{aed})

Equação da continuidade: $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Primeira lei da termodinâmica: $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$

Segunda lei da termodinâmica: $\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_{ger} = \dot{m}_3 s_3$

Solução: A entalpia e a entropia do Estado 2 vão ser consideradas iguais àquelas do líquido saturado a 20 °C. Utilizando as Tabs. B.1.3 e B.1.2, obtemos:

$$\begin{aligned} h_1 &= 2865,54 \text{ kJ/kg} & s_1 &= 7,3115 \text{ kJ/kg K} & h_3 &= 2725,30 \text{ kJ/kg} & s_3 &= 6,9918 \text{ kJ/kg K} \\ h_2 &= 83,94 \text{ kJ/kg} & s_2 &= 0,2966 \text{ kJ/kg K} \end{aligned}$$

A vazão em massa de líquido pode ser calculada com a primeira lei da termodinâmica, ou seja,

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{h_1 - h_3}{h_3 - h_2} = 2 \frac{2865,54 - 2725,30}{2725,30 - 83,94} = 0,106 \text{ kg/s}$$

e
$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 2,106 \text{ kg/s}$$

A taxa de geração de entropia no processo pode ser calculada com a segunda lei da termodinâmica,

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ger} &= \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 \\ &= 2,106 \times 6,9918 - 2 \times 7,3115 - 0,106 \times 0,2966 = 0,072 \text{ kW/K} \end{aligned}$$

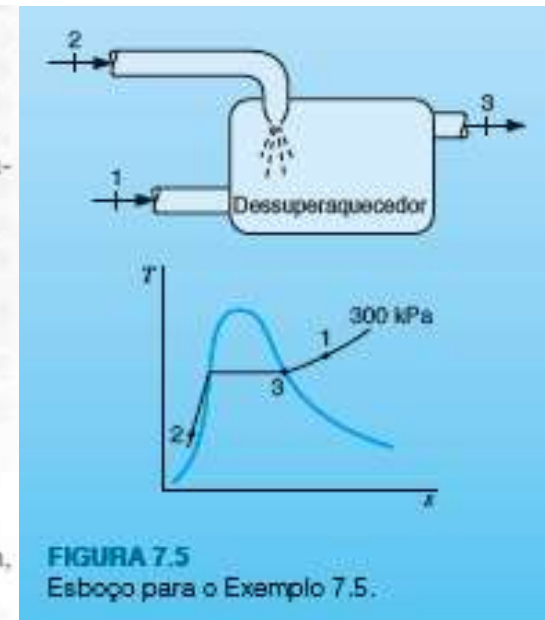


FIGURA 7.5
Esboço para o Exemplo 7.5.



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

9.21 O primeiro estágio de uma turbina é alimentado com vapor a 10 MPa e 800 °C. A pressão de descarga do primeiro estágio da turbina é 800 kPa. Considerando que o estágio da turbina opera de modo adiabático e que a variação de energia cinética do vapor é pequena, determine o temperatura na seção de descarga do primeiro estágio da turbina e o trabalho específico no processo.

9.38 Uma turbina com potência de 150 kW opera de modo adiabático e reversível. A turbina é alimentada com vapor d'água a 700 °C e 2 MPa e a exaustão da turbina é encaminhada para um trocador de calor que opera a 10 kPa. A água sai deste equipamento como líquido saturado. Determine o trabalho específico na turbina e o calor transferido no trocador de calor.





Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed							
Capítulo 9							
Processos Reversíveis em Regime Permanente	9.21	9.22	9.23	9.26	9.28	9.30	9.34
Ciclos e Processos Múltiplos	9.38	9.39	9.45	9.46			
Processos Irreversíveis em Regime Permanente	9.48	9.51	9.54	9.58	9.61		
Processos em Regime Transitório							
Trabalho Reversível e Equação de Bernouilli	9.76	9.77	9.78	9.91	9.93		
Eficiência de Equipamentos	9.96	9.100	9.101	9.105	9.108		

Capítulo 10 – Irreversibilidade e Disponibilidade

Objetivos:

- ≡ Apresentar os conceitos de Irreversibilidade e Disponibilidade utilizados nas análises termodinâmicas de sistemas e processos complexos.
- ≡ Apresentar simulações numéricas para o projeto e determinação das condições ótimas de operação de sistemas e processos

Capítulo 10 – Irreversibilidade e Disponibilidade

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de :

- Reconhecer a importância do conceito de energia disponível.
- Diferenciar a energia da disponibilidade.
- Escolher o processo ideal que corresponde ao processo real que você está analisando e calcular o trabalho reversível e a transferência de calor no processo ideal.
- Reconhecer a diferença entre as eficiências baseadas na primeira lei daquelas baseadas na segunda lei da termodinâmica.
- Relacionar a transferência e a destruição de disponibilidade com a eficiência baseada na segunda lei da termodinâmica.
- Analisar os fluxos de exergia em diferentes processos.
- Reconhecer que a exergia é destruída pelas irreversibilidades.
- Reconhecer que a destruição exergia é uma consequência da geração de entropia.
- Reconhecer que as transferências de exergia não provocam mudanças na exergia total.
- Reconhecer que a equação de balanço de exergia é baseada na primeira e na segunda lei da termodinâmica. Deste modo, ela não é uma lei independente e sim uma consequência.



Exemplo

Trabalho Reversível e Irreversibilidade

Um aquecedor de água é alimentado a 5kg/s, o estado termodinâmico na seção de entrada do equipamento é 40°C e 5MPa, o estado na seção de saída é 180°C e 5MPa e são utilizados dois reservatórios térmicos, o primeiro a 100°C e o segundo a 200°C, para aquecer a água. Sabendo que o primeiro transfere 900kW de calor para a água, determine, o trabalho reversível e a irreversibilidade associada a este processo por kg de água (Ex 10.1-VW6ªed)

Análise: O volume de controle apresenta uma seção de entrada e uma de saída. O calor é transferido para a água de alimentação a partir de dois reservatórios térmicos cujas temperaturas são diferentes da do meio. O processo não realiza trabalho e a transferência de calor para o meio, que está a 25 °C, é nula. Neste caso, a aplicação da primeira lei fornece:

$$h_e + q_1 + q_2 = h_s$$

O trabalho reversível, por unidade de massa que escoar no volume de controle e para a variação de estado fornecida, pode ser calculado com a Eq. 10.9. Observe que a transferência de calor q_1 ocorre com um reservatório que apresenta temperatura T_1 e que a transferência de calor q_2 ocorre com um reservatório térmico a T_2 . Assim,

$$w^{\text{rev}} = T_0(s_s - s_e) - (h_s - h_e) + q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) + q_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right)$$

A Eq. 10.10 mostra que, neste caso, a irreversibilidade é igual ao trabalho reversível porque o trabalho real é nulo, ou seja,

$$i = w^{\text{rev}} - w = w^{\text{rev}}$$



Exemplo Trabalho Reversível e Irreversibilidade

Solução: Nós podemos determinar a entalpia e a entropia nas seções de entrada e saída do equipamento utilizando as Tabelas de vapor d'água. Assim,

$$\begin{aligned}h_e &= 171,95 \text{ kJ/kg} & s_e &= 0,5705 \text{ kJ/kgK} \\h_s &= 765,24 \text{ kJ/kg} & s_s &= 2,1341 \text{ kJ/kgK}\end{aligned}$$

A transferência de calor no segundo reservatório é:

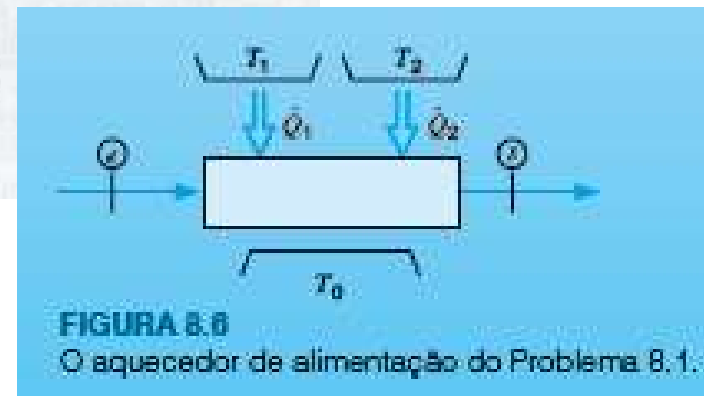
$$q_2 = h_s - h_e - q_1 = 765,24 - 171,95 - 900/5 = 413,29 \text{ kJ/kg}$$

O trabalho reversível é

$$\begin{aligned}w^{\text{rev}} &= T_0(s_s - s_e) - (h_s - h_e) + q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) + q_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \\&= 298,2(2,1341 - 0,5705) - (765,24 - 171,95) \\&\quad + 180 \left(1 - \frac{298,2}{373,2}\right) + 413,29 \left(1 - \frac{298,2}{473,2}\right) \\&= 466,27 - 593,29 + 36,17 + 152,84 = 62,0 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

e a irreversibilidade é igual a

$$i = w^{\text{rev}} = 62,0 \text{ kJ/kg}$$





Exemplo Disponibilidade - Exergia

Analise os fluxos de Exergia no aquecedor de água do ex. anterior (Ex 10.7-VW6^aed)

O aquecedor apresenta apenas um escoamento (uma seção de alimentação e uma de descarga), duas transferências de calor e não existe interação trabalho. Nós precisamos das propriedades da água no estado de referência (25 °C e 100 kPa) para que seja possível avaliar as exergias dos escoamentos, Eq. 10.37, e realizar o seu balanço, Eq. 10.39. Considerando que as propriedades termodinâmicas da água no estado de referência são próximas daquelas do líquido saturado a 25°C, temos (Tab. B.1.1),

$$h_0 = 104,87 \text{ kJ/kg} \quad \text{e} \quad s_0 = 0,3673 \text{ kJ/kg K}$$

As exergias associadas aos escoamentos no aquecedor são:

$$\psi_e = h_{\text{tot},e} - h_0 - T_0(s_e - s_0) = 171,97 - 104,87 - 298,2 \times (0,5705 - 0,3687) = 6,92 \text{ kJ/kg}$$

$$\psi_s = h_{\text{tot},s} - h_0 - T_0(s_s - s_0) = 765,25 - 104,87 - 298,2 \times (2,1341 - 0,3687) = 133,94 \text{ kJ/kg}$$

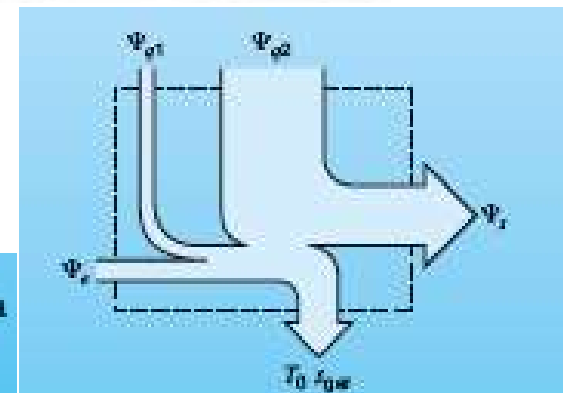


FIGURA 8.14

Fluxos, vazões e destruição de exergia no aquecedor de água.



Exemplo Disponibilidade - Exergia

(Os fluxos de exergia associados as transferências de calor são iguais a

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) q_1 = \left(1 - \frac{298,2}{373,2}\right) 180 = 36,17 \text{ kJ/kg}$$

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) q_2 = \left(1 - \frac{298,2}{473,2}\right) 413,28 = 152,84 \text{ kJ/kg}$$

A destruição de exergia pode ser calculada com a equação do balanço de exergia (Eq. 10.39). Lembrando que o trabalho é nulo,

$$\begin{aligned} T_0 s_{\text{ger}} &= \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) q_{\text{vc}} + \psi_c - \psi_s \\ &= 36,17 + 152,84 + 6,92 - 133,94 = 62,0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nós podemos expressar a eficiência do aquecedor baseada na segunda lei da termodinâmica do seguinte modo:

$$\eta_{\text{seg. lei}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{fonte}} - \dot{I}_{\text{vc}}}{\dot{\Phi}_{\text{fonte}}} = \frac{36,17 + 152,84 - 62,0}{36,17 + 152,84} = 0,67$$



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

10.22 Um sistema fornece 10 kJ de energia na forma de:

- a. Trabalho elétrico numa bateria.
- c. Trabalho mecânico numa mola.
- b. Transferência de calor a 500 °C.

Determine a variação de disponibilidade para o sistema em cada um destes casos.

10.39 A lavanderia de um hospital necessita de 15 kg/s de vapor d' água a 100 kPa e 150 °C. Este vapor pode ser produzido, num processo em regime permanente, misturando-se vapor gerado numa caldeira a 150 kPa e 250 °C com água a 100 kPa e 15 °C proveniente de uma tubulação. Determine a taxa de geração de irreversibilidade neste processo de mistura.

10.51 Um coletor solar é alimentado, em regime permanente, com R-22 a 10 °C e 750 kPa. Sabendo que o refrigerante sai do coletor a 80 °C e 700 kPa, determine a variação de disponibilidade que ocorre no processo.





Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed						
Capítulo 10						
Energia disponível e Trabalho Reversível	10.22	10.23	10.24	10.25	10.26	10.27
Irreversibilidade	10.37	10.39	10.45			
Disponibilidade (Exergia)	10.51	10.52	10.53	10.55		
Eficiência baseada na 2ª Lei	10.69	10.71				
Balanço de Exergia	10.85	10.86				

Capítulo 11 – Ciclos Motores e de Refrigeração

Objetivos:

- ≡ Analisar o desempenho de ciclos abertos e fechados
- ≡ Verificar a influência de certas variáveis no desempenho dos equipamentos
- ≡ Analisar os motivos que levam os ciclos reais a se desviarem dos reais
- ≡ Estudar aplicações especiais de ciclos motores e de refrigeração

Capítulo 11 – Ciclos Motores Termodinâmicos

- ≡ CICLO RANKINE, RANKINE SUPERCRÍTICO, RANKINE REGENERATIVO
- ≡ MÉTODOS DE AUMENTO DO RENDIMENTO DO CICLO
- ≡ AFASTAMENTO DOS CICLOS IDEAIS EM RELAÇÃO AOS REAIS
- ≡ CICLOS DE REFRIGERÇÃO PADRÃO VAPOR
- ≡ CICLO DE CARNOT (PADRÃO –AR)
- ≡ CICLO OTTO
- ≡ CICLO DIESEL
- ≡ CICLO STIRLING
- ≡ CICLO BRAYTON
- ≡ CICLO ERICSSON
- ≡ CICLO COMBINADO, REGENERATIVO, JATO-PROPULSÃO
- ≡ CICLOS DE REFRIGERÇÃO PADRÃO AR

Padrão Vapor

Padrão Ar
(MCI's)

Padrão Ar

Padrão Ar
(Turbinas)

Capítulo 11 – Ciclos Motores e de Refrigeração

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de :

- Analisar o funcionamento dos vários equipamentos, e dispositivos, que compõem os ciclos de geração de potência e de refrigeração com as leis da termodinâmica.
- Conhecer os fundamentos da operação dos equipamentos e dispositivos utilizados nos ciclos de potência.
- Entender como os refrigeradores e bombas de calor simples operam.
- Reconhecer que a maioria dos componentes dos ciclos não operam de modo ideal.
- Reconhecer que os rendimentos e os coeficientes de eficácia dos ciclos reais são menores do que os equivalentes reversíveis.
- Conhecer quais são os parâmetros importantes de cada ciclo.
- Conhecer qual é o impacto da eficiência do componente na eficiência ou no coeficiente de eficácia do ciclo global.
- Reconhecer que o arranjo da maioria dos ciclos reais não é o básico.
- Saber como a operação dos ciclos afeta o meio ambiente.
- Identificar quais ciclos podem ser combinados para atingir um objetivo.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

(REVISÃO TERMODINÂMICA)

Máquinas Térmicas e Rendimento

As máquinas térmicas são equipamentos que **convertem o calor em trabalho**. Elas trabalham em **ciclos** que se utilizam de **duas fontes de temperaturas distintas**. Uma **fonte quente** através da qual se recebe o calor e outra **fria** para a qual, o calor rejeitado é direcionado.

O **rendimento** dessas máquinas é estabelecido pela razão entre a potência útil, decorrente de todo trabalho produzido pelo equipamento, e a potência total, constituída pela taxa de calor fornecida pela fonte quente. As máquinas térmicas não são capazes de transformar todo o calor em trabalho. Seu rendimento nunca alcança 100%.

$$\eta_{\text{termico}} = \frac{\text{Energia pretendida}}{\text{Energia gasta}}$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão Vapor

CICLO RANKINE, RANKINE SUPERCRÍTICO, RANKINE REGENERATIVO

O ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico teórico cujo nome foi dado em razão do matemático escocês William John Macquorn Rankine. Nesse ciclo ocorrem quatro processos que modificam as propriedades do fluido de trabalho com o objetivo de produzir trabalho útil, conforme demonstra o diagrama a seguir.

O ciclo Rankine é um ciclo ideal. Os trabalhos de bombeamento e expansão ocorrem de maneira isoentrópica e não há perdas de carga no processo. O fluido de trabalho num ciclo Rankine segue um ciclo fechado, e é constantemente reutilizado.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

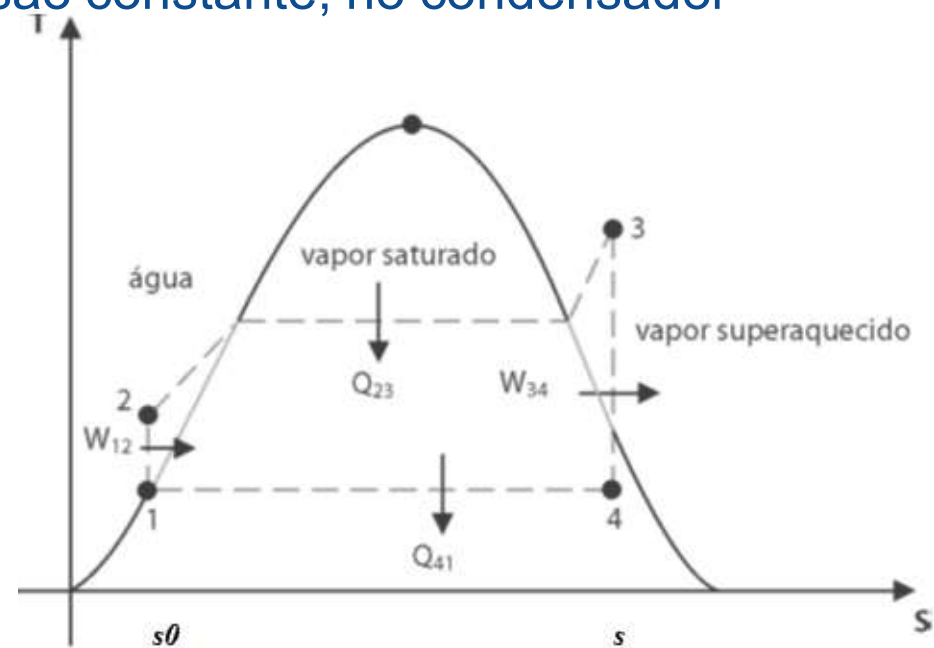
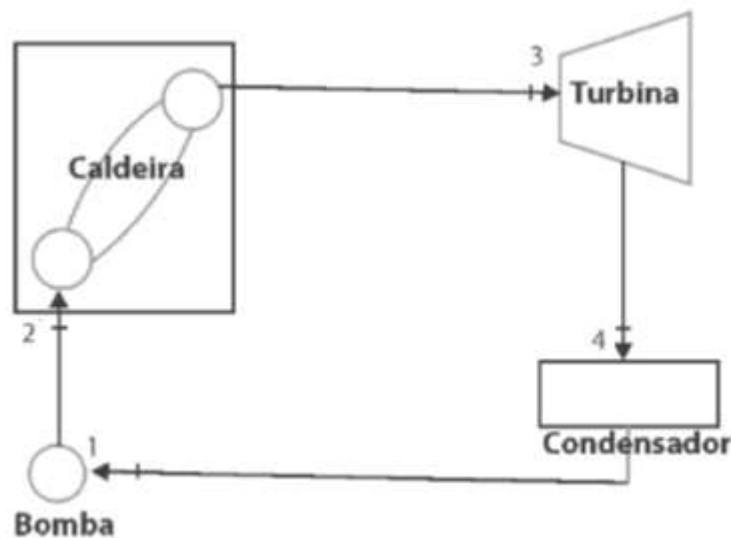
Ciclos padrão Vapor – Ciclo Rankine

1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível

2-3: Transferência de calor a pressão constante, na caldeira

3-4: Expansão adiabática reversível

4-1: Transferência de calor a pressão constante, no condensador



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão Vapor – Ciclo Rankine (IDEAL)

Processo 1-2: Nesse processo, é fornecido trabalho ao ciclo para a elevação da pressão do fluido por meio de bombeamento, de forma isoentrópica.

Processo 2-3: Nesse processo, é fornecido calor ao ciclo, aquecendo-se o fluido pressurizado a pressão constante em uma caldeira até o estado de vapor superaquecido.

Processo 3-4: O vapor superaquecido expande isoentropicamente através de uma turbina realizando trabalho. Tanto a pressão quanto a temperatura se reduzem no processo de expansão.

Processo 4.1: O vapor é resfriado em um condensador até a condição de líquido saturado. Este líquido então retorna à bomba e o ciclo se repete.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão Vapor – Ciclo Rankine (IDEAL)

Na prática, em centrais termelétricas cuja operação baseia-se neste ciclo, ocorrem irreversibilidades em todos os processos, gerando-se entropia.

Há perdas de carga nas caldeiras e demais tubulações que interligam os principais componentes apresentados.

Isto faz com que a energia requerida pela bomba seja maior, e que o trabalho produzido pela turbina seja menor do que o produzido em uma condição ideal.

Além disso, ocorrem perdas mássicas de água, com necessidade de reposição (*make-up*) e perdas de temperatura em todo o ciclo.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão Vapor – Ciclo Rankine (REAL)

Contudo, o ciclo Rankine vem sendo usado para gerar trabalho útil desde o século XIX, utilizando água como fluido de trabalho, em sua grande maioria.

A indústria de geração termelétrica, por sua vez, vem desenvolvendo soluções inovadoras para a elevação de sua eficiência, aproximando-a de um ciclo ideal.

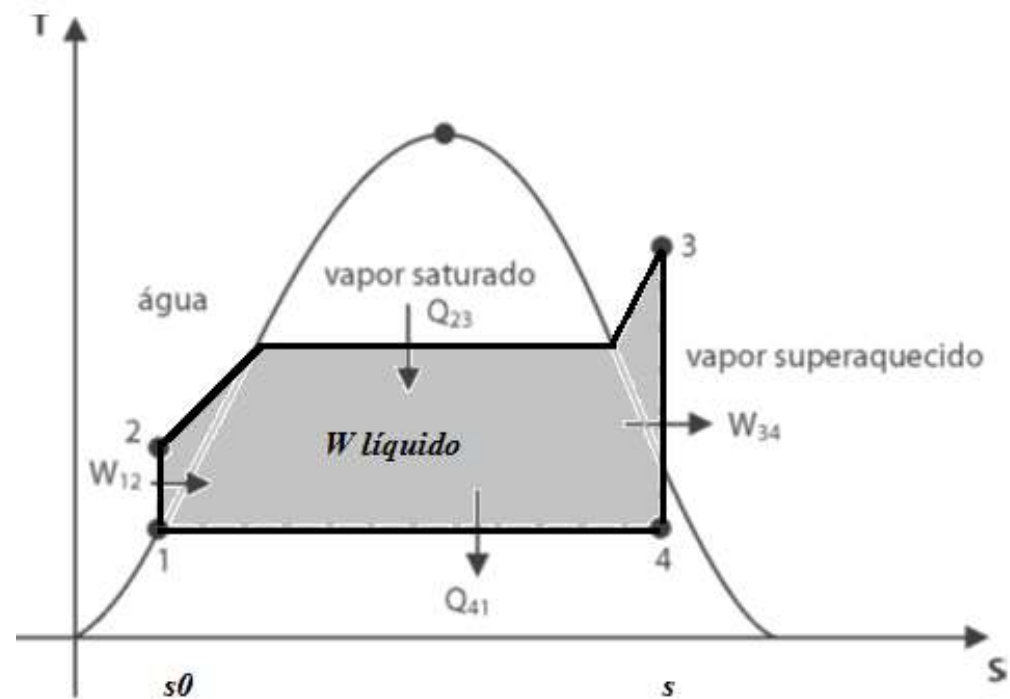
Com o desenvolvimento de ligas metálicas especiais, o ciclo Rankine atingiu pressões supercríticas e eficiências maiores que 40 %. Essas plantas podem trabalhar com pressões e temperaturas superiores a 240 bar e 550°C, respectivamente, como veremos adiante.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Eficiência do ciclo Rankine

Analogamente ao ciclo Carnot, no ciclo de Rankine teórico, a sua eficiência da primeira lei é dada pela razão entre o trabalho líquido realizado pelo ciclo (diferença entre o trabalho da turbina W_{34} e o trabalho da bomba W_{12}) e o calor fornecido ao ciclo na caldeira Q_{23} .

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{W}_{34} - \dot{W}_{12}}{\dot{Q}_{23}}$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Outras referências

Vídeo sobre ciclo Rankine

<https://www.youtube.com/watch?v=4-9ZE1rI73I&t=45s>

Tabelas de propriedades do vapor (plugins Excel, matlab etc)

<http://www.iapws.org/edu.html>

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Cálculo ciclo Rankine

O balanço de massa e energia do ciclo nos fornece os fluxos energéticos

que cruzam o seu volume de controle.

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$\dot{W}_{34} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4)$$

$$\dot{W}_{12} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1)$$

Onde:

\dot{Q}_{23}

– taxa de entrada de calor (energia por unidade de tempo);

\dot{m}

– fluxo mássico (massa por unidade de tempo);

\dot{W}_{12} e \dot{W}_{34}

– trabalho mecânico usado e gerado pelo sistema, respectivamente (energia por unidade de tempo);

h_1, h_2, h_3, h_4

– são os valores de entalpia específica especificados no diagrama T-s;

\dot{Q}_{41}

– taxa de rejeição de calor para o meio ambiente.

➤ Quanto maior o trabalho líquido, maior será a eficiência do ciclo.



Exemplo Ciclo de Potência por compressão de vapor Rankine

Determine o rendimento de um ciclo Rankine que utiliza água como fluido de trabalho. A pressão no condensador do ciclo é igual a 10kPa e a caldeira opera a 2MPa. O vapor deixa a caldeira como vapor saturado. (Ex 11.1-VW6^{aed})

Análise: Primeira lei da termodinâmica: $|w_b| = h_2 - h_1$
Segunda Lei da termodinâmica: $s_2 = s_1$
Como $s_2 = s_1$,

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v dp$$

Solução: Admitindo que o líquido seja incompressível,

$$|w_b| = v(p_2 - p_1) = 0,00101(2000 - 10) = 2,0 \text{ kJ/kg}$$
$$h_2 = h_1 + |w_b| = 191,8 + 2,0 = 193,8 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Caldeira.

Estado de entrada: p_2, h_2 conhecidas; estado determinado.

Estado de saída: p_3 conhecida, vapor saturado; estado determinado.

Análise: Primeira lei: $q_H = h_3 - h_2$

Solução:

$$q_H = h_3 - h_2 = 2799,5 - 193,8 = 2605,7 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Turbina.

Estado de entrada: Estado 3 conhecido (acima).

Estado de saída: p_4 conhecida.

Análise: Primeira lei: $w_T = h_3 - h_4$

Segunda lei: $s_3 = s_4$

Solução: Nós podemos determinar o título no estado 4 a partir da entropia

$$s_3 = s_4 = 6,3409 = 0,6493 + x_4 7,5009 \Rightarrow x_4 = 0,7588$$

$$h_4 = 191,8 + 0,7588(2392,8) = 2007,5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_T = 2799,5 - 2007,5 = 792,0 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Condensador.

Estado de entrada: Estado 4, conhecido (acima).

Estado de saída: Estado 1, conhecido.

Análise: Primeira lei: $|q_L| = h_4 - h_1$

Solução:

$$|q_L| = h_4 - h_1 = 2007,5 - 191,8 = 1815,7 \text{ kJ/kg}$$



Exemplo

Ciclo de Potência por compressão de vapor Rankine

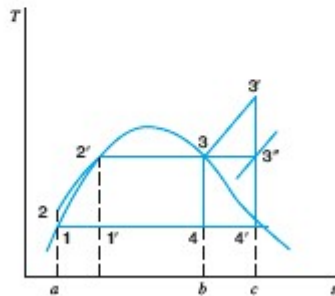
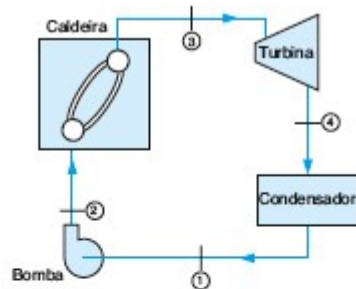


Figura 9.3
Instalação motora simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine.

Podemos agora calcular o rendimento térmico,

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{líq}}}{q_H} = \frac{q_H - |q_L|}{q_H} = \frac{w_t - |w_b|}{q_H} = \frac{792,0 - 2,0}{2605,7} = 30,3\%$$

Podemos também escrever uma expressão para o rendimento térmico em função das propriedades nos vários pontos do ciclo. Assim,

$$\begin{aligned} \eta_{\text{térmico}} &= \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_3 - h_2} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \\ &= \frac{2605,7 - 1815,7}{2605,7} = \frac{792,0 - 2,0}{2605,7} = 30,3\% \end{aligned}$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Ciclo Rankine Supercrítico

O ciclo Rankine supercrítico é um caso especial do ciclo Rankine, no qual o vapor é gerado em pressão e temperatura superiores aos valores no ponto crítico (221 bar e 374 °C para a água).

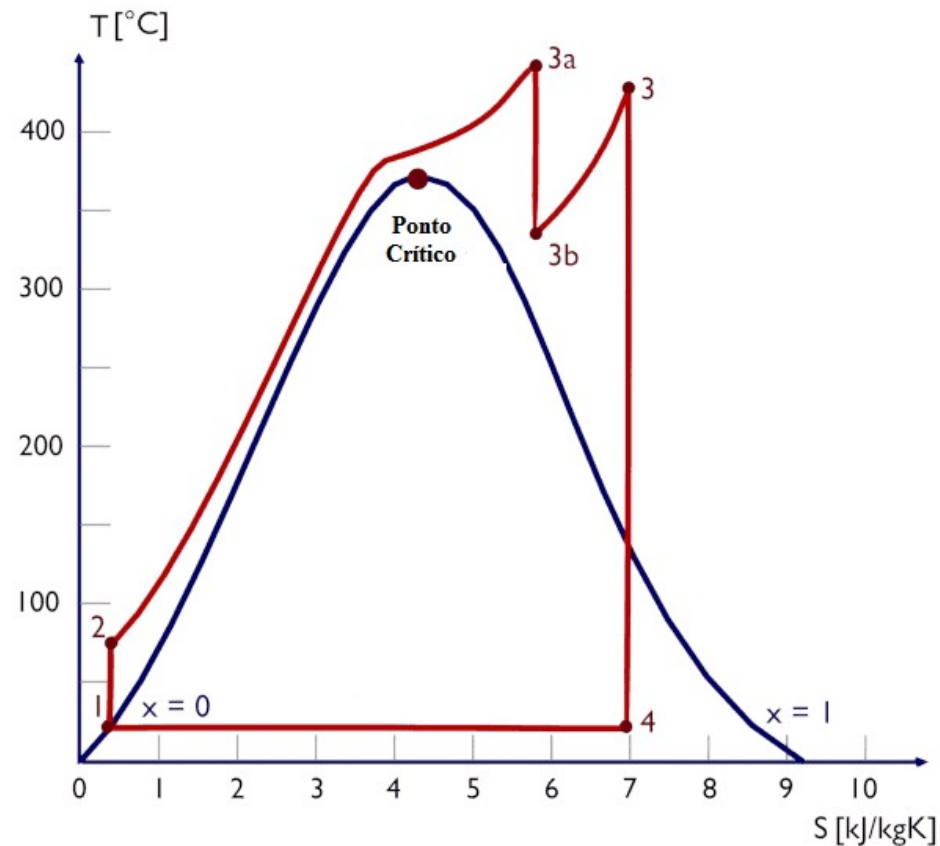
Com isso, as diferenças de temperatura se reduzem entre a água na caldeira e os gases de combustão, elevando-se o rendimento energético do ciclo.

Atualmente, as plantas supercríticas de geração de eletricidade têm alcançado valores de pressão da ordem de 300 bar, chegando a temperaturas de superaquecimento de 600 °C.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Ciclo Rankine Supercrítico

Ao aquecermos a água nesta faixa de pressão, a sua mudança de fase não ocorre a uma temperatura constante, mas a temperaturas superiores ao ponto crítico do domo de vapor



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

Vimos que quanto maior o trabalho líquido, maior será a eficiência do ciclo. Por isso, os esforços da indústria têm se concentrado nas seguintes ações:

- ≡ **Elevação do par pressão/temperatura na entrada de calor no ciclo;**
- ≡ **Redução do par pressão/temperatura na saída de calor do ciclo.**

O primeiro é limitado pelos materiais de tubulação e primeiros estágios da turbina.

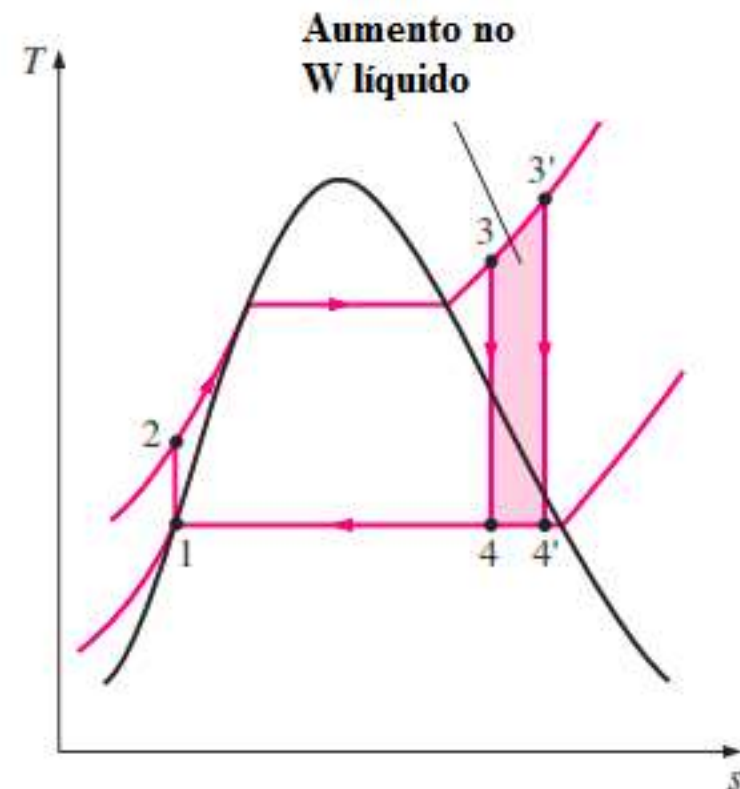
Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

No diagrama $T \times S$, as áreas relativas ao trabalho líquido e ao calor fornecido na caldeira aumentam proporcionalmente, quanto maior o superaquecimento do vapor.

Entretanto, a relação entre o trabalho líquido e ao calor fornecido na caldeira (eficiência da primeira lei) torna-se maior.

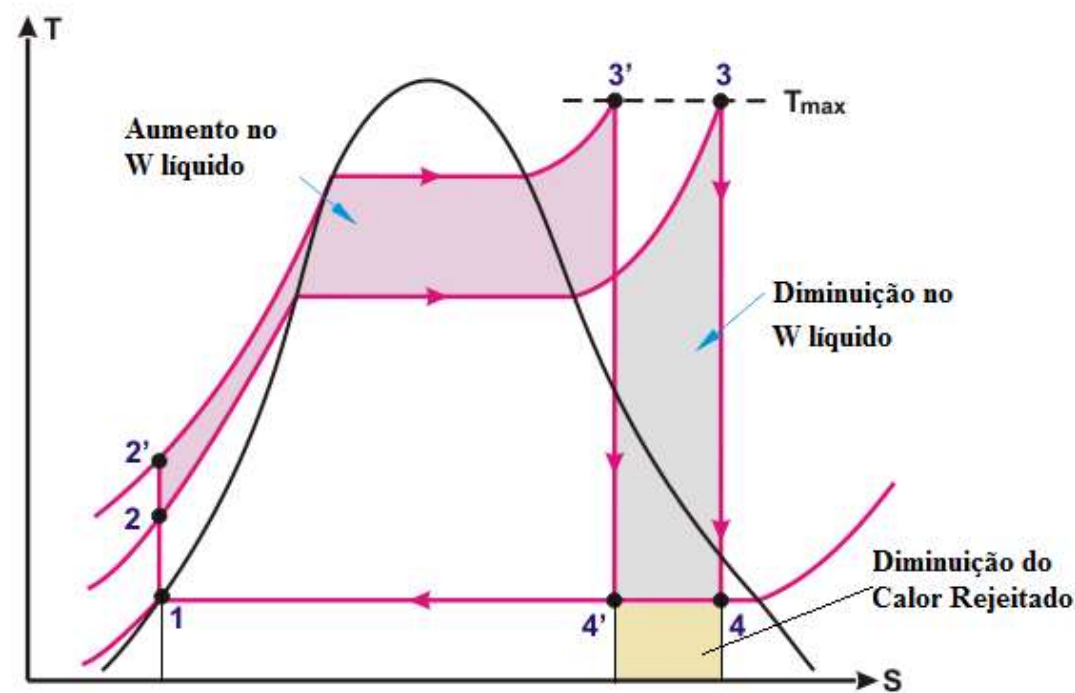
Em usinas termelétricas de grande porte que operam com vapor d'água, a admissão da turbina se dá normalmente entre 520 e 565 °C.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

Em relação ao aumento de pressão máxima, para um mesmo superaquecimento, observa-se que, para pressões maiores, a área de rejeição de calor (abaixo da linha de condensação) diminui, embora a área relativa ao trabalho líquido tenda a permanecer a mesma.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

Redução do par pressão/temperatura na saída de calor do ciclo

≡ Limitada pela temperatura da água de resfriamento do condensador do turbogerador a vapor – TGV (turbina + condensador + gerador).

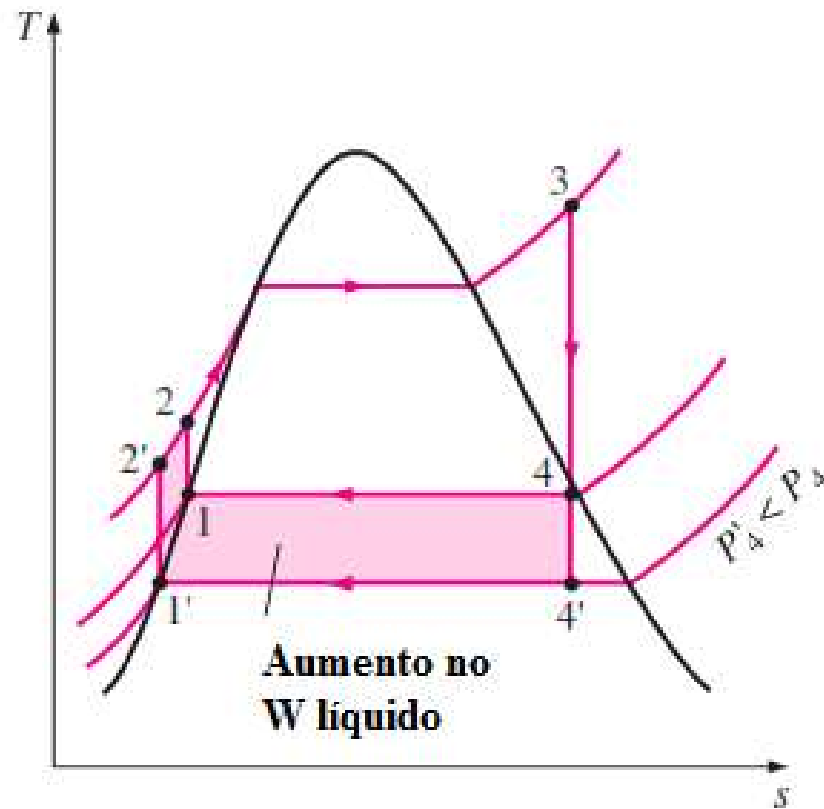
≡ Ao se reduzir a pressão e temperatura na qual o ciclo cede calor, o vapor realiza mais trabalho até o final de sua expansão.

≡ Com a condensação ocorrendo a uma pressão mais baixa, a área relativa ao descarte de calor ao ambiente também diminui, aumentando, assim, a eficiência do ciclo.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

A temperatura da água de resfriamento para o condensador se dá em torno de 30°C (tipicamente no Brasil), dependendo das condições ambientais.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

O condensador do TGV opera a vácuo, com pressões normais de operação que variam de 0,07 bar a 0,12 bar, dependendo da temperatura e vazão da água de resfriamento.

Os motivos pela adoção de água como fluido de trabalho em usinas de ciclo Rankine são vários:

- ≡ suas propriedades termodinâmicas tornam o trabalho energeticamente viável,
- ≡ não é tóxica,
- ≡ não é reativa quimicamente e
- ≡ é abundante, o que a torna mais acessível para aplicações em escala industrial.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

Dentre outros aspectos, a eficiência da turbina a vapor é limitada pela formação de gotículas de água em seus últimos estágios. Essas gotículas se chocam contra as palhetas da turbina, causando a sua erosão (*pitting*) e reduzindo gradualmente a vida útil das palhetas e a eficiência da turbina.

Se o vapor for suficientemente superaquecido, ao término de sua expansão na turbina, o título do vapor estará elevado o bastante para garantir a operação da turbina com mínimo desgaste das palhetas.

Esse efeito é análogo para outros fluidos de trabalho além da água. As temperaturas em que ocorrem suas mudanças de fase serão limitadores da eficiência do ciclo, conforme a pressão em que estejam. Ou seja, a eficiência do ciclo Rankine depende também do fluido utilizado.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Rankine – Métodos de aumento da eficiência

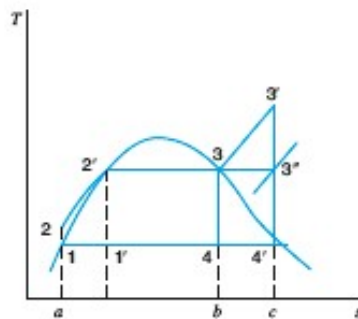
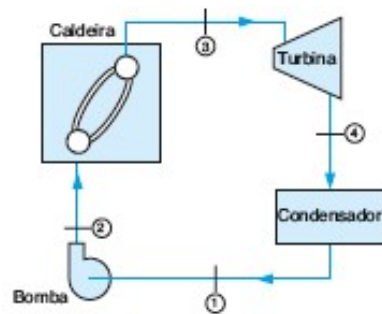


Figura 9.3
Instalação motora simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine.

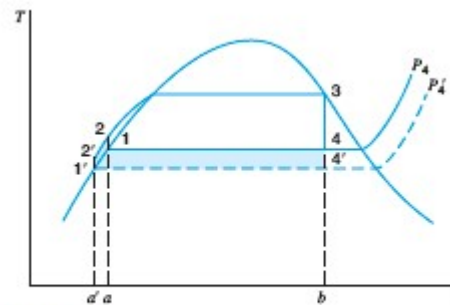


Figura 9.4
Efeito da pressão de descarga da turbina sobre o rendimento do ciclo Rankine.

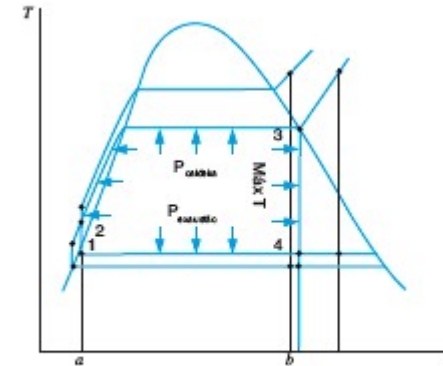


Figura 9.8
Efeito da pressão e da temperatura na eficiência do ciclo Rankine.

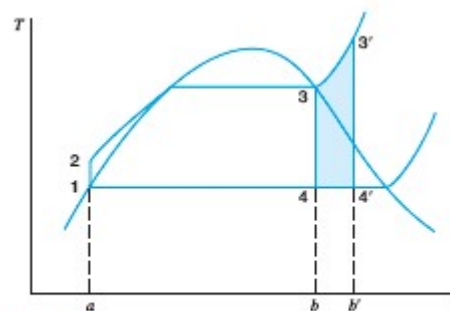


Figura 9.5
Efeito do superaquecimento sobre o rendimento do ciclo Rankine.

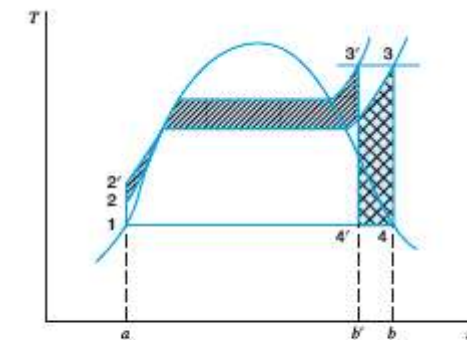


Figura 9.6
Efeito da pressão na caldeira sobre o rendimento do ciclo Rankine.



Exemplo

Ciclo de Potência por compressão de vapor

Efeito da Variação da Temperatura e Pressão - Rankine

Num ciclo de Rankine, o vapor d'água deixa a caldeira e entra na turbina a 4MPa e 400°C. A pressão no condensador é igual a 10kPa. Determine o rendimento do ciclo. (Ex 11.2-VW6^{aed})

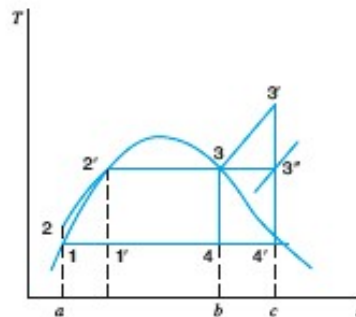
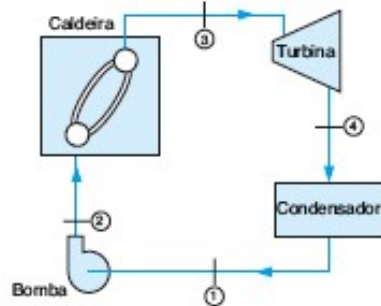


Figura 9.3
Instalação motora simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine.

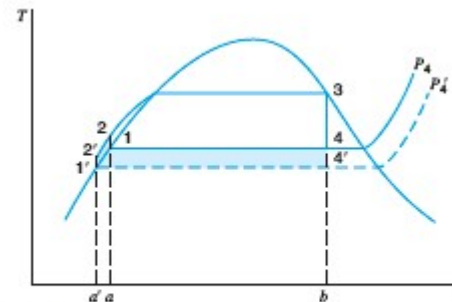


Figura 9.4
Efeito da pressão de descarga da turbina sobre o rendimento do ciclo Rankine.

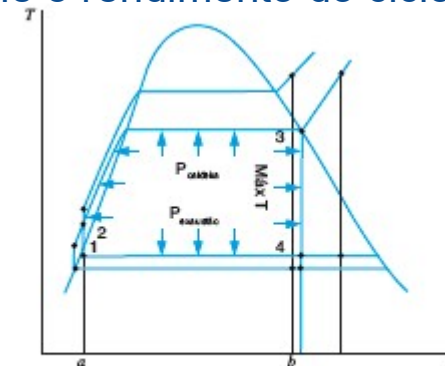


Figura 9.8
Efeito da pressão e da temperatura na eficiência do ciclo Rankine.

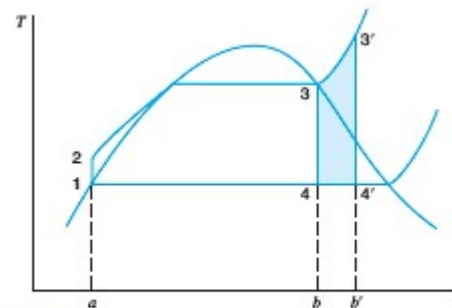


Figura 9.5
Efeito do superaquecimento sobre o rendimento do ciclo Rankine.

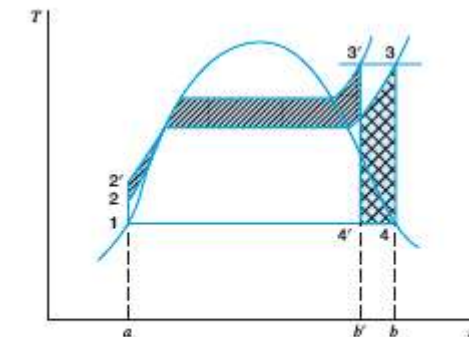


Figura 9.6
Efeito da pressão na caldeira sobre o rendimento do ciclo Rankine.



Exemplo

Ciclo de Potência por compressão de vapor Efeito da Variação da Temperatura e Pressão - Rankine

Volume de controle: Bomba.

Estado de entrada: p_1 conhecida, líquido saturado; estado determinado.

Estado de saída: p_2 conhecida.

Análise: Primeira lei: $|w_b| = h_2 - h_1$

Segunda lei: $s_2 = s_1$

Como $s_2 = s_1$,

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v dp = v(p_2 - p_1)$$

Solução:

$$|w_b| = v(p_2 - p_1) = 0,00101(4000 - 10) = 4,0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 191,8 \text{ kJ/kg} \quad \text{e} \quad h_2 = 191,8 + 4,0 = 195,8 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Turbina

Estado de entrada: p_3, T_3 conhecidas; estado determinado.

Estado de saída: p_4 conhecida.

Análise: Primeira lei: $w_t = h_3 - h_4$

Segunda lei: $s_3 = s_4$

Solução:

$$h_3 = 3213,6 \text{ kJ/kg} \quad \text{e} \quad s_3 = 6,7690 \text{ kJ/kg K}$$

$$s_3 = s_4 = 6,7690 = 0,6493 + x_4 7,5009 \Rightarrow x_4 = 0,8159$$

$$h_4 = 191,8 + 0,8159(2392,8) = 2144,1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 3213,6 - 2144,1 = 1069,5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{liq}} = w_t - |w_b| = 1069,5 - 4,0 = 1065,5 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Caldeira.

Estado de entrada: p_2, h_2 conhecidas; estado determinado.

Estado de saída: Estado 3 determinado (dado).

Análise: Primeira lei: $q_H = h_3 - h_2$

Solução:

$$q_H = h_3 - h_2 = 3213,6 - 195,8 = 3017,8 \text{ kJ/kg}$$

$$|q_L| = h_4 - h_1 = 2144,1 - 191,8 = 1952,3 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{liq}} = q_H - |q_L| = 3017,8 - 1952,3 = 1065,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{1065,5}{3017,8} = 35,3\%$$



Exemplo

Ciclo de Potência por compressão de vapor Com Reaquecimento - Rankine

Em um ciclo com reaquecimento que utiliza água como fluido de trabalho, o vapor deixa a caldeira e entra na turbina a 4MPa e 400°C. O vapor expande até 400kPa na turbina de alta pressão, é reaquecido até 400°C e então expande novamente na turbina de baixa pressão até 10kPa. Determine o rendimento do ciclo. (Ex 11.3-VW6^{aed})

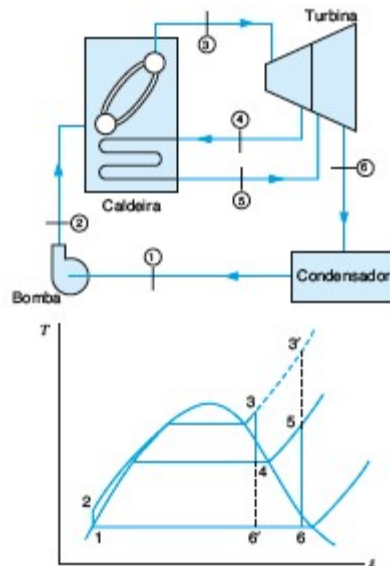


Figura 9.9
Ciclo ideal Rankine com reaquecimento.

Volume de controle: Turbina de alta pressão.
 Estado de entrada: p_3, T_3 conhecidas; estado determinado.
 Estado de saída: p_4 conhecida.

Análise: Primeira lei: $w_{t-a} = h_3 - h_4$
 Segunda lei: $s_3 = s_4$

Solução:

$$h_3 = 3213,6 \quad \text{e} \quad s_3 = 6,7690$$

$$s_3 = s_4 = 6,7690 = 1,7766 + x_4 5,1193 \quad \Rightarrow \quad x_4 = 0,9752$$

$$h_4 = 604,7 + 0,9752(2133,8) = 2685,6$$

Volume de controle: Turbina de baixa pressão.
 Análise: Primeira lei: $w_{t-b} = h_5 - h_6$
 Segunda lei: $s_5 = s_6$

Solução:

$$h_5 = 3273,4 \quad \text{e} \quad s_5 = 7,8985$$

$$s_5 = s_6 = 7,8985 = 0,6493 + x_6 7,5009 \quad \Rightarrow \quad x_6 = 0,9664$$

$$h_6 = 191,8 + 0,9664(2392,8) = 2504,3$$

Para toda a turbina, o trabalho total produzido, w_t , é a soma de w_{t-a} e w_{t-b} . Assim,

$$w_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) = (3213,6 - 2685,6) + (3273,4 - 2504,3) = 1297,1 \text{ kJ/kg}$$



Exemplo Ciclo de Potência por compressão de vapor Com Reaquecimento - Rankine

Volume de controle: bomba

Estado de entrada: p_1 conhecida, líquido saturado; estado determinado.

Estado de saída: p_2 conhecida.

Análise: Primeira lei: $|w_b| = h_2 - h_1$

Segunda lei: $s_2 = s_1$

Como $s_2 = s_1$,

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dp = v(p_2 - p_1)$$

Solução:

$$\begin{aligned} |w_b| &= v(p_2 - p_1) = 0,00101(4000 - 10) = 4,0 \text{ kJ/kg} \\ h_2 &= 191,8 + 4,0 = 195,8 \end{aligned}$$

Volume de controle: Caldeira.

Estados de entrada: Estados 2 e 4, estados conhecidos.

Estados de saída: Estados 3 e 5, estados conhecidos.

Análise: Primeira lei: $q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$

Solução:

$$q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = (3213,6 - 195,8) + (3273,4 - 2685,6) = 3605,6 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{liq}} = w_t - |w_r| = 1297,1 - 4,0 = 1293,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{1293,1}{3605,6} = 35,9\%$$



Exemplo

Ciclo Frigorífico por compressão de vapor Rankine Invertido

Em um ciclo frigorífico ideal que utiliza R-134a como fluido de trabalho, a temperatura do refrigerante no evaporador é -20°C e no condensador é 40°C . Sabendo que a vazão de refrigerante no ciclo é $0,03\text{kg/s}$, determine o coeficiente de eficácia e a capacidade de refrigeração desta (Ex 11.13-VW6^{aed})

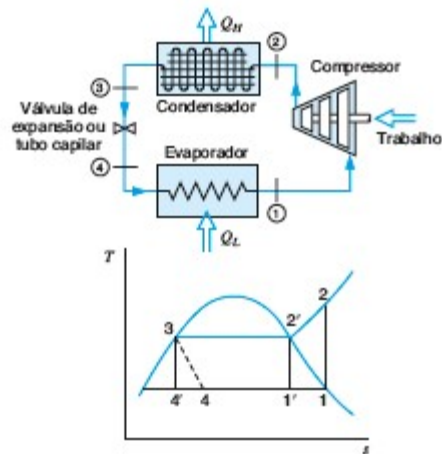


Figura 9.23
Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.

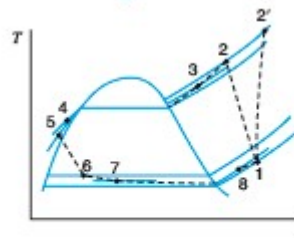


Figura 9.24
Ciclo real de refrigeração por compressão de vapor.

Tabela 9.1
Refrigerantes e suas alternativas

Refrigerante antigo	R-11	R-12	R-22	R-502
Refrigerante alternativo	R-123 R-245fa	R-134a R-600a (isobutano) R-401a R-409a	R-404a R-717 (amônia) R-744 (CO ₂) R-290 (propano) R-410a R-407c	R-404a R-717 (amônia) R-744 (CO ₂)



Exemplo Ciclo Frigorífico por compressão de vapor Rankine Invertido

Volume de controle: Compressor.

Estado de entrada: T_1 conhecida, vapor saturado; estado determinado.

Estado de saída: p_2 conhecida (pressão de saturação correspondente a T_3).

Análise: Primeira lei da termodinâmica: $|w_c| = h_2 - h_1$

Segunda lei da termodinâmica: $s_2 = s_1$

Solução: A $T_3 = 40^\circ\text{C}$,

$$p_{\text{sat}} = p_2 = 1017 \text{ kPa}$$

Das tabelas de R-134a,

$$h_1 = 386,1 \text{ kJ/kg} \quad \text{e} \quad s_1 = 1,7395 \text{ kJ/kg K}$$

Portanto,

$$s_2 = s_1 = 1,7395 \text{ kJ/kg K}$$

Assim,

$$T_2 = 47,7^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad h_2 = 428,4 \text{ kJ/kg}$$
$$|w_c| = h_2 - h_1 = 428,4 - 386,1 = 42,3 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Válvula de expansão

Estado de entrada: T_3 conhecida, líquido saturado; estado determinado.

Estado de saída: T_4 conhecida.

Análise: Primeira lei: $h_3 = h_4$

Solução:

$$h_3 = h_4 = 256,5 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Evaporador.

Estado de entrada: Estado 4 conhecido (acima).

Estado de saída: Estado 1 conhecido (acima).

Análise: Primeira lei: $q_L = h_1 - h_4$

Solução:

$$q_L = h_1 - h_4 = 386,1 - 256,5 = 129,6 \text{ kJ/kg}$$

Portanto,

$$\beta = \frac{q_L}{|w_c|} = \frac{129,6}{42,3} = 3,064$$

$$\text{Capacidade de Refrigeração} = 129,6 \times 0,03 = 3,89 \text{ kW}$$



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

11.22 Considere um ciclo de Rankine ideal movido a energia solar que utiliza água como o fluido de trabalho. Vapor saturado sai do coletor solar a 175 °C e a pressão do condensador é 10 kPa . Determine o rendimento térmico deste ciclo.

11.119 Um ciclo de refrigeração, que utiliza R-12 como fluido de trabalho, opera numa condição onde a temperatura mínima é -10 °C e pressão máxima é 1 MPa . Admita que o ciclo seja ideal como o da Fig. 9.32. Determine as transferências de calor específicas no condensador e no evaporador. Calcule, também, o coeficiente de eficácia do ciclo.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar

Os ciclos padrão a ar **utilizam um gás como fluido de trabalho**, e são os ciclos usados para a modelagem de, e.g., **turbinas a gás e motores automotivos**

Esses equipamentos são chamados de **motores de combustão interna**, pois há mudança na composição do fluido de trabalho. Operam na realidade segundo um **ciclo aberto**, mas **são modelados segundo ciclos fechados** que se aproximam do ciclo aberto real. Obedecem as seguintes hipóteses:

- ≡ O fluido é uma massa fixa de ar e um gás perfeito;
- ≡ O processo de combustão é substituído pela transferência de calor de uma fonte externa
- ≡ O ciclo se completa a partir da transferência de calor ao meio envolvente;
- ≡ Todos os processos são internamente reversíveis e o ar apresenta calor específico constante.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar

O principal mérito do ciclo-padrão ar consiste em nos permitir examinar qualitativamente a influência de várias variáveis no desempenho.



Os ciclos padrão a ar utilizam um **gás** como **fluido de trabalho**

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar

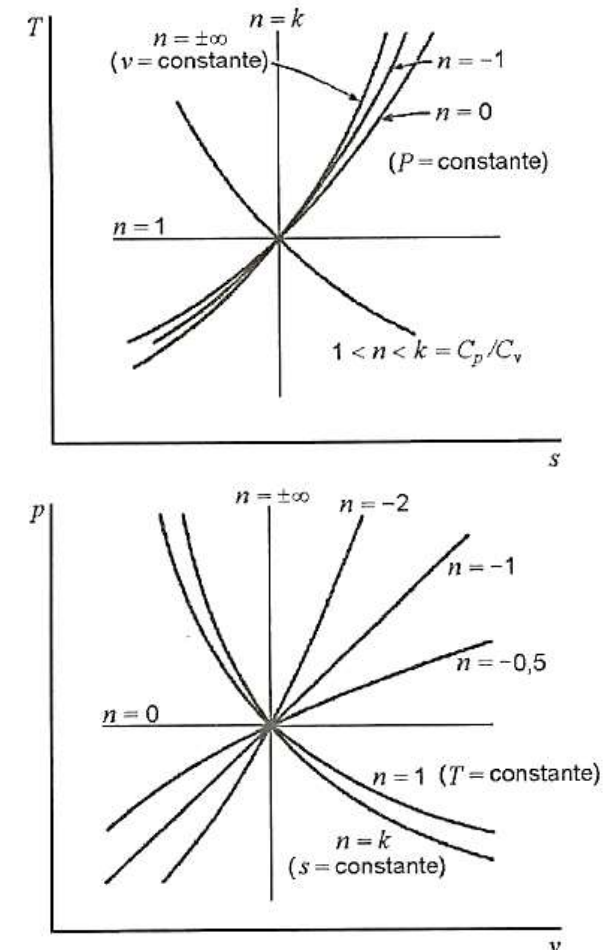
Processos Politrópicos (REVISÃO)

$$pV^n = \text{constante} = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$$

Essa equação nos permite escrever as seguintes expressões para o processo politrópico:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

Processo isobárico	$n = 0,$	$p = \text{constante}$
Processo isotérmico	$n = 1,$	$T = \text{constante}$
Processo isoentrópico	$n = k,$	$s = \text{constante}$
Processo isocórico	$n = \infty,$	$v = \text{constante}$

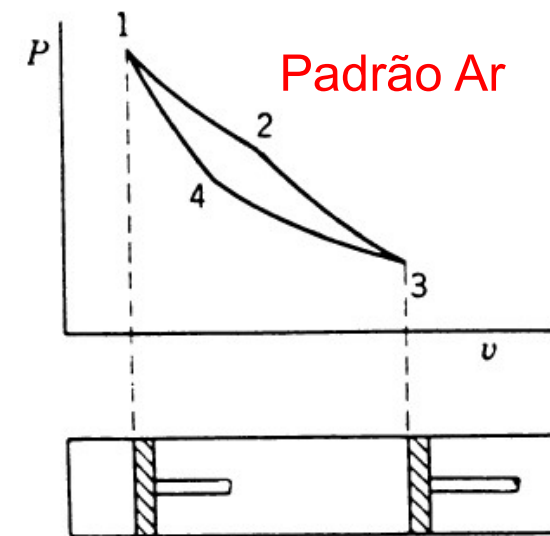


Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar

$$\eta_t = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2}$$

O rendimento também pode ser expresso pela relação de pressão ou taxa de compressão, durante os processos isoentrópicos:



❑ taxa de pressão isoentrópica $r_{ps} = \frac{P_1}{P_4} = \frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{k/(1-k)}$

❑ taxa de compressão isoentrópica $r_{vs} = \frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{1/(1-k)}$

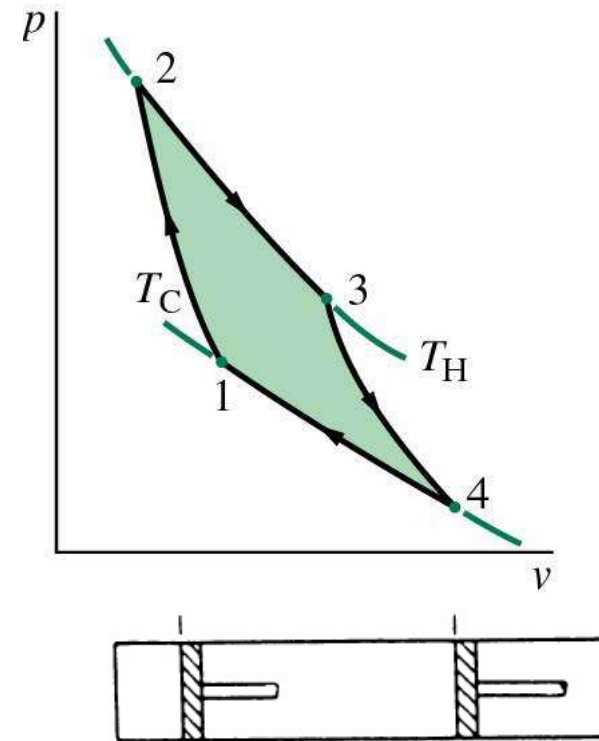
Portanto: $\eta_t = 1 - r_{ps}^{(1-k)/k} = 1 - r_{vs}^{1-k}$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo de Carnot

O Ciclo de Carnot demonstra que o maior rendimento teórico para uma máquina térmica operando entre dois reservatórios térmicos se realizaria em um ciclo de **duas transformações adiabáticas reversíveis e duas transformações isotérmicas reversíveis**:

1. Processo isotérmico reversível . O sistema recebe calor da fonte quente (2-3);
2. Uma expansão adiabática reversível. O sistema não troca calor com as fontes térmicas (3-4);
3. Processo isotérmico reversível. O sistema cede calor para a fonte fria(4-1);
4. Uma compressão adiabática reversível. O sistema não troca calor com as fontes térmicas (1-2).



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo de Carnot Padrão-Ar (Corolários de Carnot)

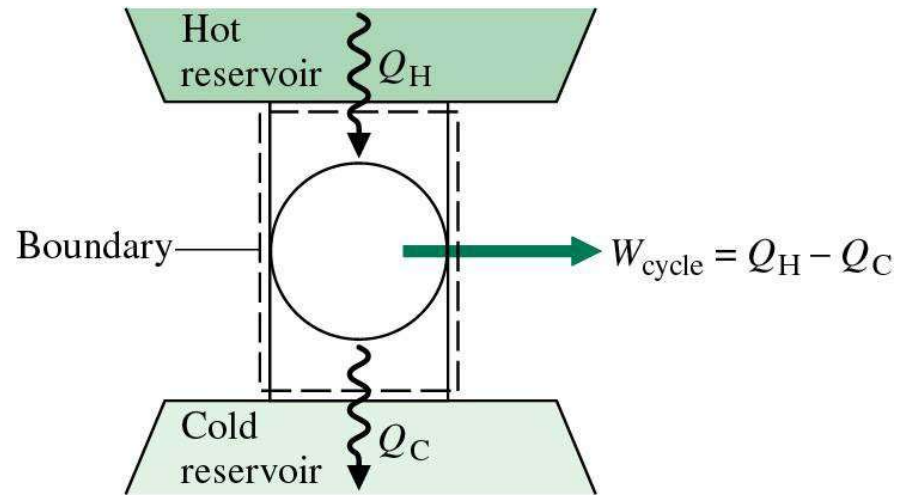
Há dois teoremas relativos ao rendimento térmico do ciclo de Carnot:

- I. A máquina de Carnot tem rendimento maior do que qualquer outro equipamento do tipo, operando entre as mesmas fontes (mesmas temperaturas);
- II. Todas as máquinas deste modelo teórico têm o mesmo rendimento, desde que também operem com as mesmas fontes. Ou seja, mesmas temperaturas.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

(REVISÃO TERMODINÂMICA)

Ciclo de Carnot - Eficiência de Ciclos de Potência



Sistema percorrendo um ciclo de potência

Eficiência térmica do ciclo

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

Se **não houvesse** a transferência de calor para o reservatório frio, a eficiência seria de **100%**;

Porém, sem o reservatório frio **viola-se** o enunciado de Kelvin-Planck;

Decorre daí um **corolário de Carnot**, que diz: **todos** os ciclos de potência têm eficiência **menor** que 100%.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo de Carnot Padrão-Ar (Corolários de Carnot)



A **eficiência do ciclo de Carnot** depende **somente** da **temperatura dos reservatórios**.

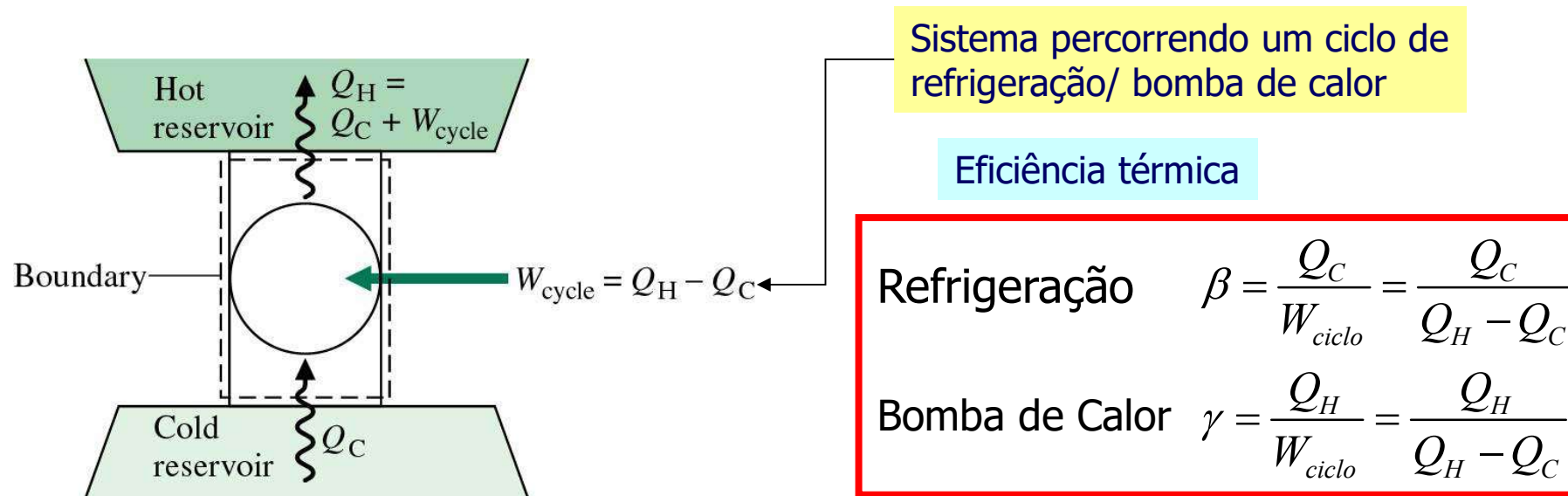


Quanto **maior** for a **temperatura da fonte quente**, **maior** será o **rendimento da máquina térmica** (para uma substância que se comportasse como um gás ideal).



Daí a importância do Ciclo de Carnot. Apesar de **inatingível**, a partir dele teremos a **referência teórica máxima** a partir da qual aprimoram-se outros ciclos.

Eficiência de Refrigeração/ Bomba de Calor



Se **não houvesse** a necessidade do fornecimento de trabalho ao ciclo, os coeficientes de desempenho seriam **infinitos**;

Porém sem o fornecimento de trabalho teríamos a **violação** do enunciado de Clausius;

Segue daí um **Corolário**, que diz: **todos** os ciclos de refrigeração/ bomba de calor tem desempenho **finito**.

Corolários para Refrigeração/ Bomba de calor

O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível é **sempre menor** do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível quando cada um opera **entre os mesmos reservatórios térmicos**;

Todos os ciclos de refrigeração reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos possuem o mesmo coeficiente de desempenho;

O mesmo **vale** substituindo o termo Refrigeração por **Bomba de calor**.

Coeficiente de máximo desempenho

Para ciclos de refrigeração:

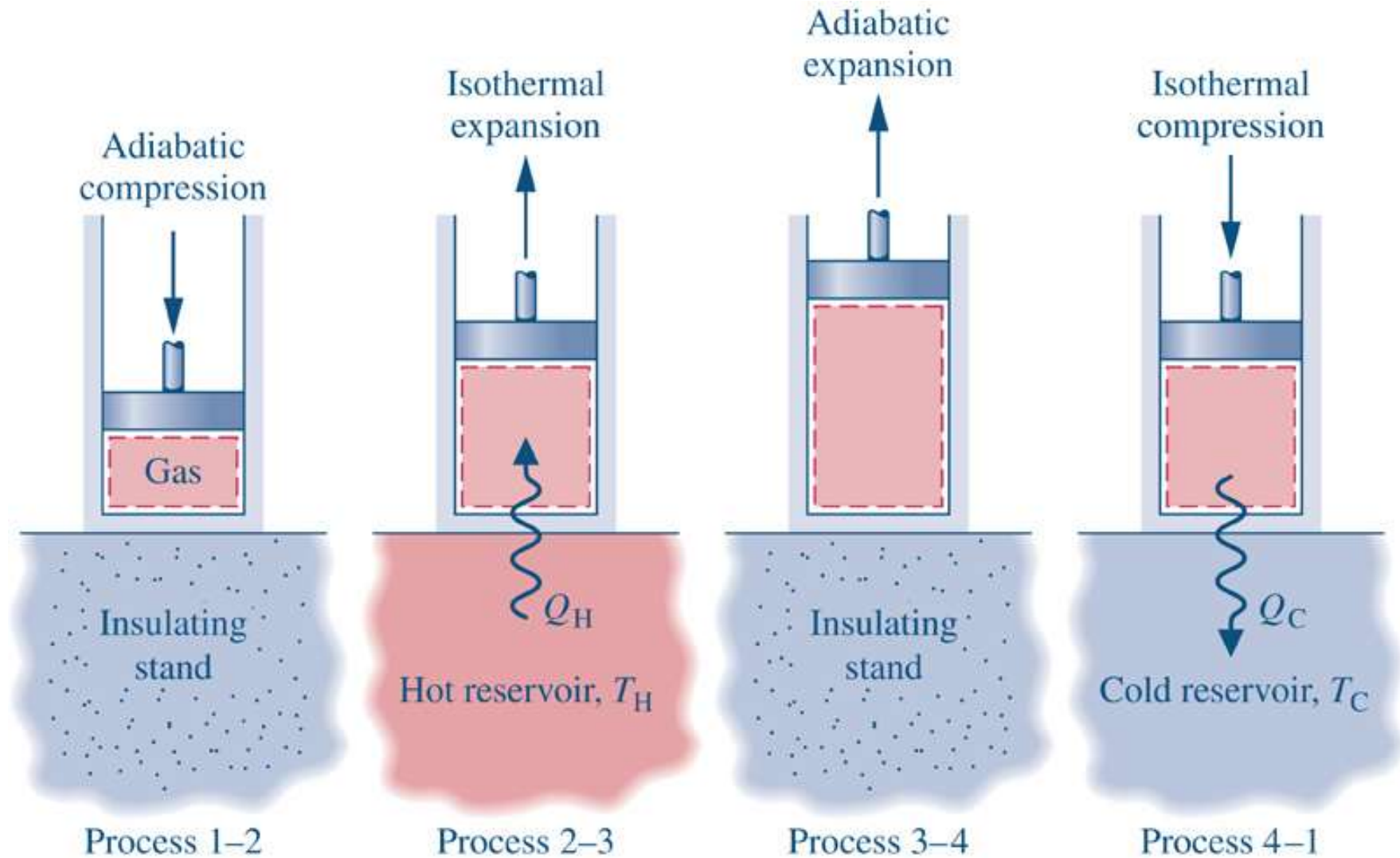
$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Para bombas de calor:

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo de Potência em Cilindro-Pistão



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo de Carnot (Padrão Ar)

Uma dificuldade prática no ciclo de Carnot Padrão-ar é a **troca de calor durante os processos isotérmicos de expansão e compressão**. É **virtualmente impossível** aproximar-se desta condição. Desse modo, o ciclo Carnot Padrão-ar **não é prático**.



Daí a importância do Ciclo de Carnot. Apesar de **inatingível**, a partir dele teremos a **referência teórica máxima** a partir da qual aprimoram-se outros ciclos.



Exemplo 11.3

Eficiência de Carnot – Padrão Ar

Construa um diagrama T-s para o ciclo de Carnot admitindo que a temperatura mínima deste ciclo CO_2 seja 280K, que a eficiência térmica seja 60% e que as pressões, antes da compressão e depois do processo de rejeição de calor, sejam iguais a 100kPa. Determine a temperatura máxima do ciclo e a pressão no início do processo de transferência de calor para o ciclo. .

Eficiência de Carnot $\eta = 0.6 = 1 - T_H/T_L$
 $\Rightarrow T_H = T_L/0.4 = \mathbf{700 \text{ K}}$

Antes da adição de calor (estado 2)

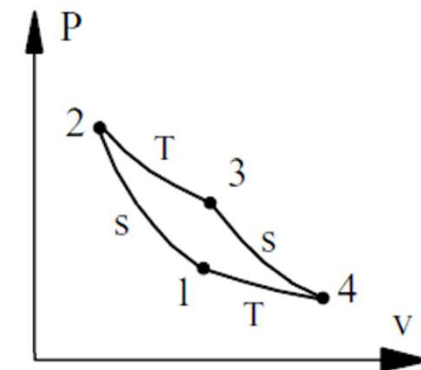
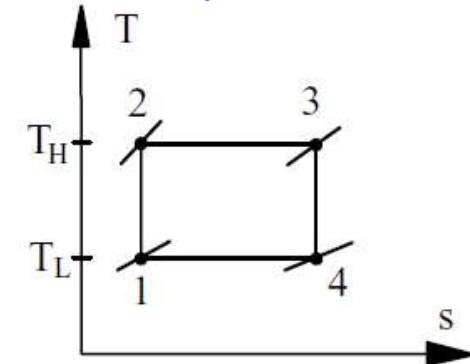
e após a rejeição de calor (estado 1).

Então $P_1=100\text{kPa}$ e a compressão isentrópica é:

$k=1,2857$

$$P_2 = P_1(T_H/T_L)^{\frac{1}{k-1}} = \mathbf{2.47 \text{ MPa}}$$

[Tabela A.5](#)





Exemplo 11.4

Eficiência de Carnot – Padrão Ar

O ar contido num cilindro-pistão executa um ciclo de Carnot, que apresenta rendimento térmico de 66,7% e temperatura mínima de T_L igual a $26,8^\circ\text{C}$. Determine a temperatura máxima no ciclo, o trabalho específico e a relação volumétrica no processo de expansão adiabática. Admita que os calores específicos do ar são constantes.

Eficiência de Carnot

$$\eta = 1 - T_L/T_H = 2/3 \Rightarrow T_H = 3 \times T_L = 3 \times 300 = \mathbf{900 \text{ K}}$$

Expansão adiabática 3-4: $Pv^k = \text{const}$ ($n=k$)

$$\begin{aligned} {}_3w_4 &= (P_4v_4 - P_3v_3)/(1 - k) = \frac{R}{1 - k}(T_4 - T_3) = u_3 - u_4 \\ &= C_v(T_3 - T_4) = 0.717(900 - 300) = \mathbf{429.9 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

$$v_4/v_3 = (T_3/T_4)^{1/(k-1)} = 3^{2.5} = \mathbf{15.6}$$

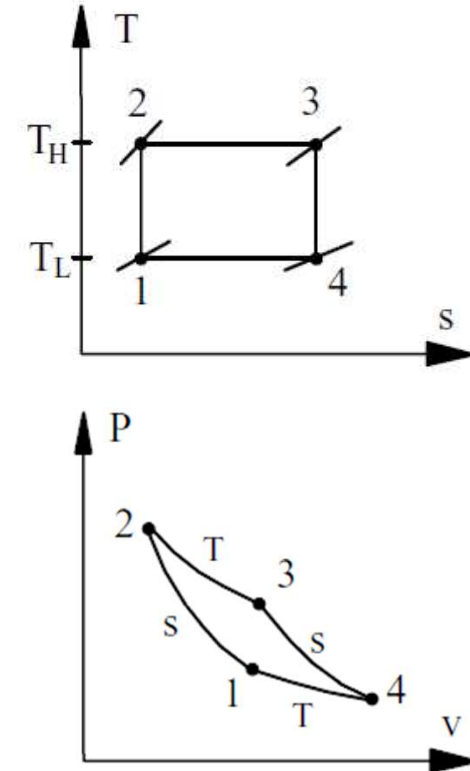


Tabela A.5

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

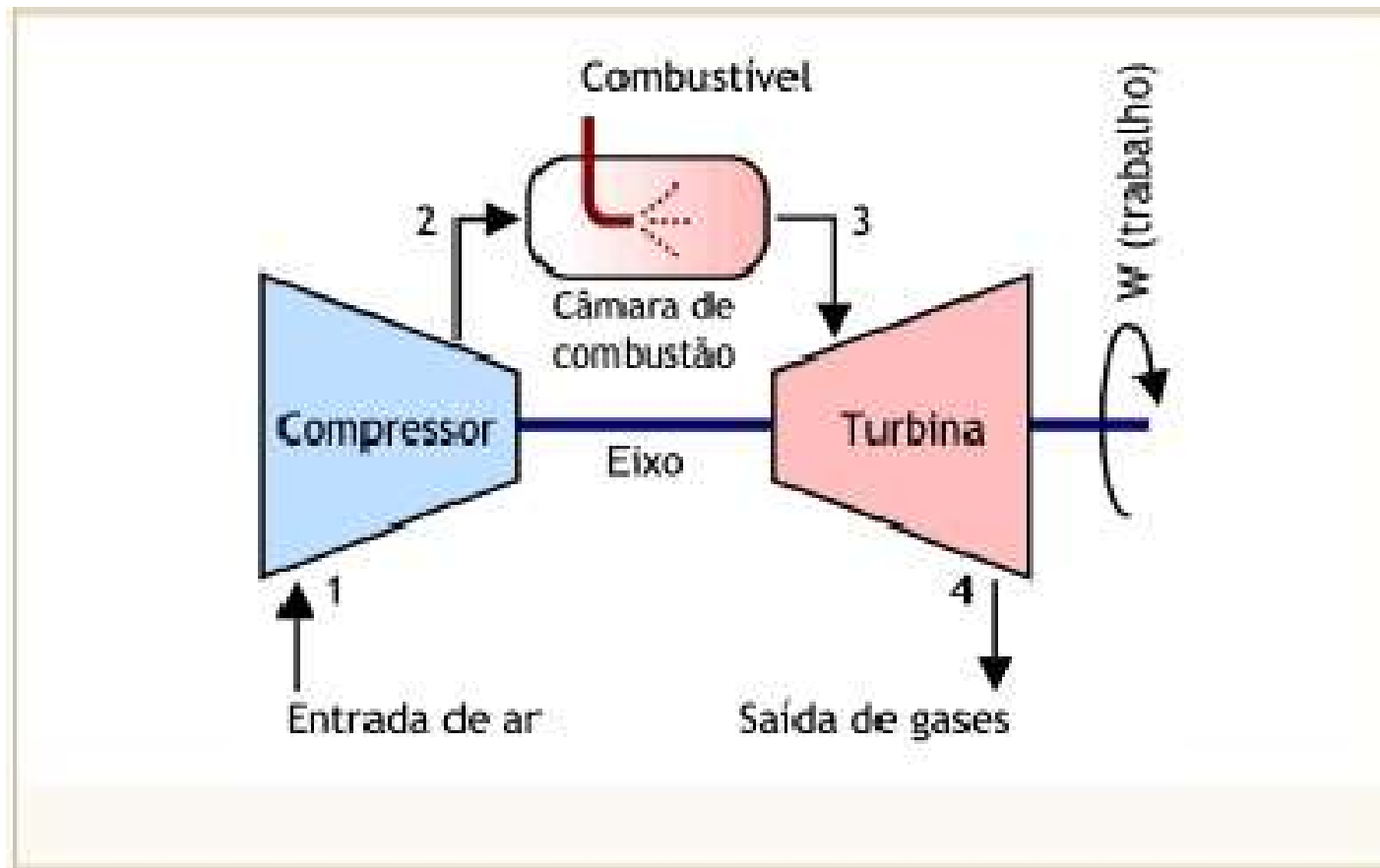
O **ciclo Brayton**, nomeado por George Brayton (1830-1892), é um ciclo termodinâmico no qual a **adição de calor ocorre a pressão constante**. É um ciclo ideal. Uma aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas **turbinas a gás**, descrevendo variações de estado (pressão e temperatura) dos gases.



O ciclo **Brayton** é o equivalente do ciclo **Rankine**, para um fluido de trabalho que **não apresenta mudança de fase**

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

A modelagem termodinâmica deste ciclo tem as seguintes condições de contorno e hipóteses simplificadoras:

- ≡ Fluido de trabalho é o mesmo em todo o ciclo;
- ≡ Os processos em todo o ciclo são ideais (compressão e expansão isoentrópicas);
- ≡ O regime é permanente;
- ≡ Os calores específicos são constantes;
- ≡ Desprezadas as perdas de carga nos dutos de sucção , descarga e câmara de combustão;
- ≡ Não há perdas de calor pelas paredes da turbina;
- ≡ Gás perfeito;
- ≡ Fluxo unidimensional.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

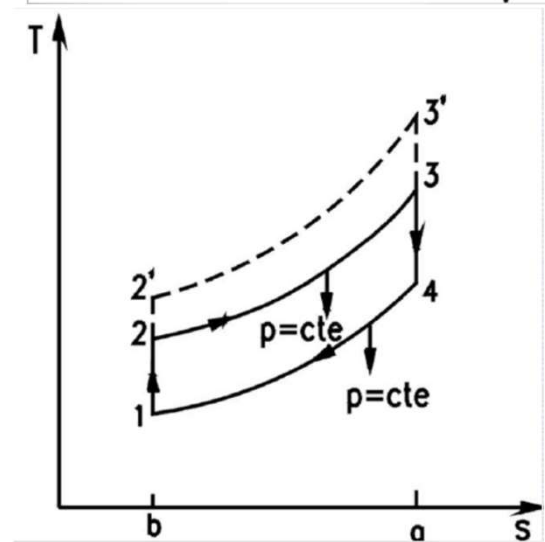
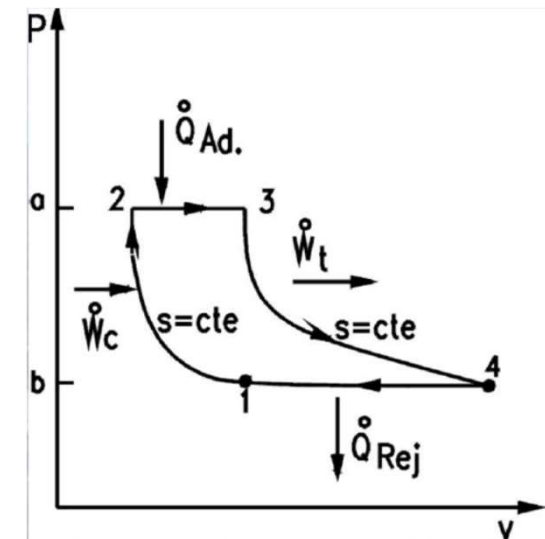
Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

1→2: Transformação adiabática. Nesse estágio, o gás é comprimido adiabaticamente.

2→3: Transformação isobárica. Nesse estágio, o gás expande com mesma pressão, ao mesmo tempo em que recebe calor do meio.

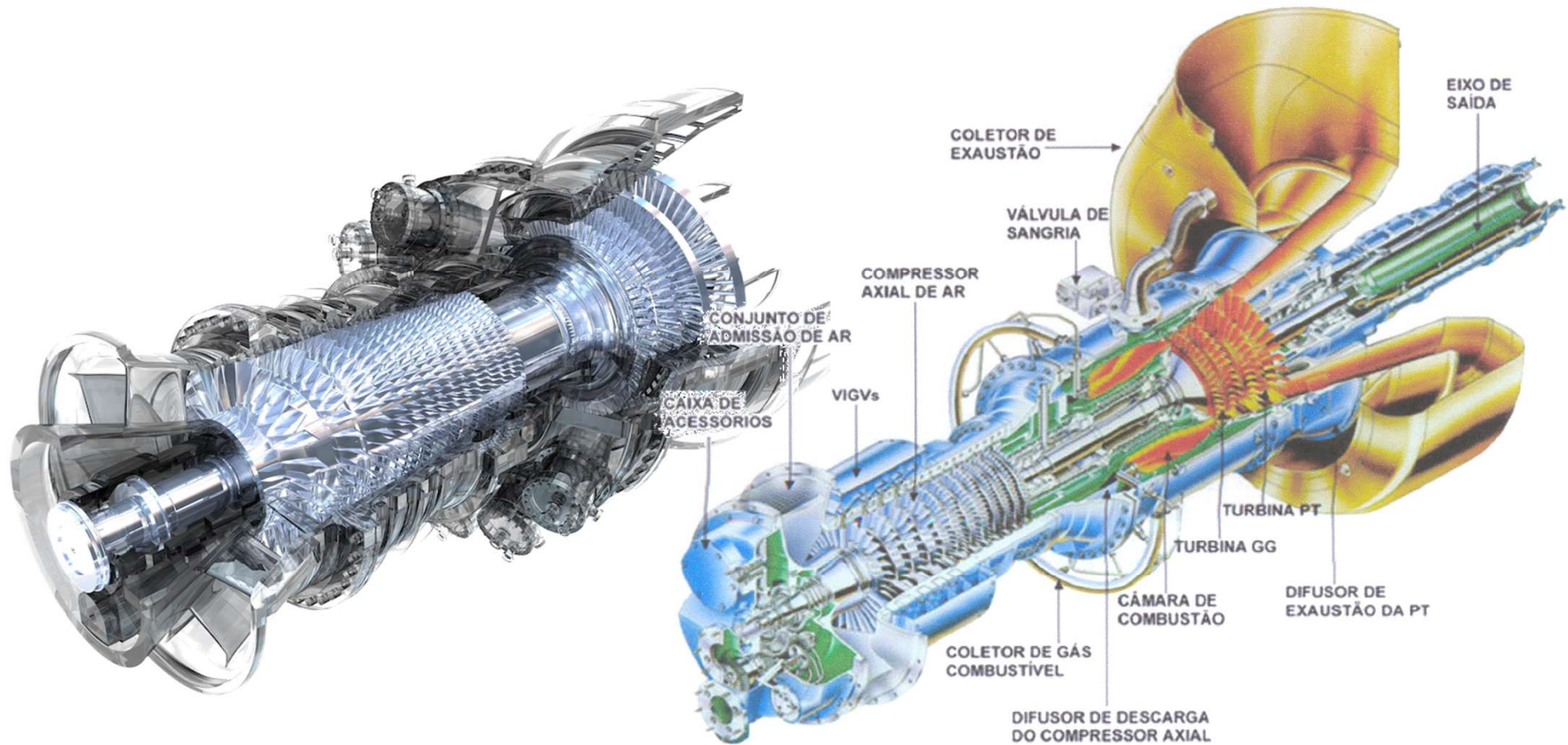
3→4: Transformação adiabática. Nesse estágio, ocorre uma expansão adiabática. A partir da primeira lei, a energia é igual ao trabalho adiabático.

4→1: Transformação isobárica. Nesse estágio, o gás expande com mesma pressão, ao mesmo tempo em que perde calor para o meio.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

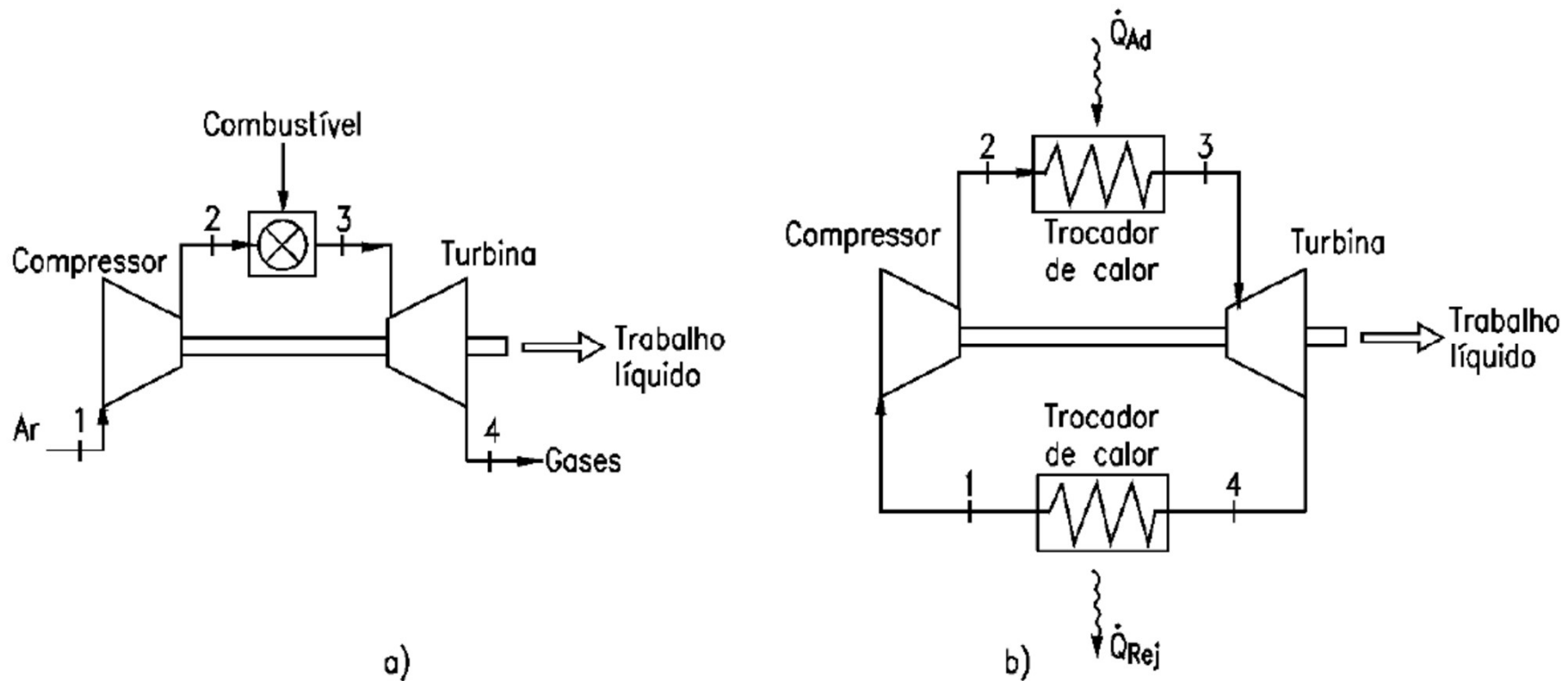


TURBINA SOLAR TAURUS

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

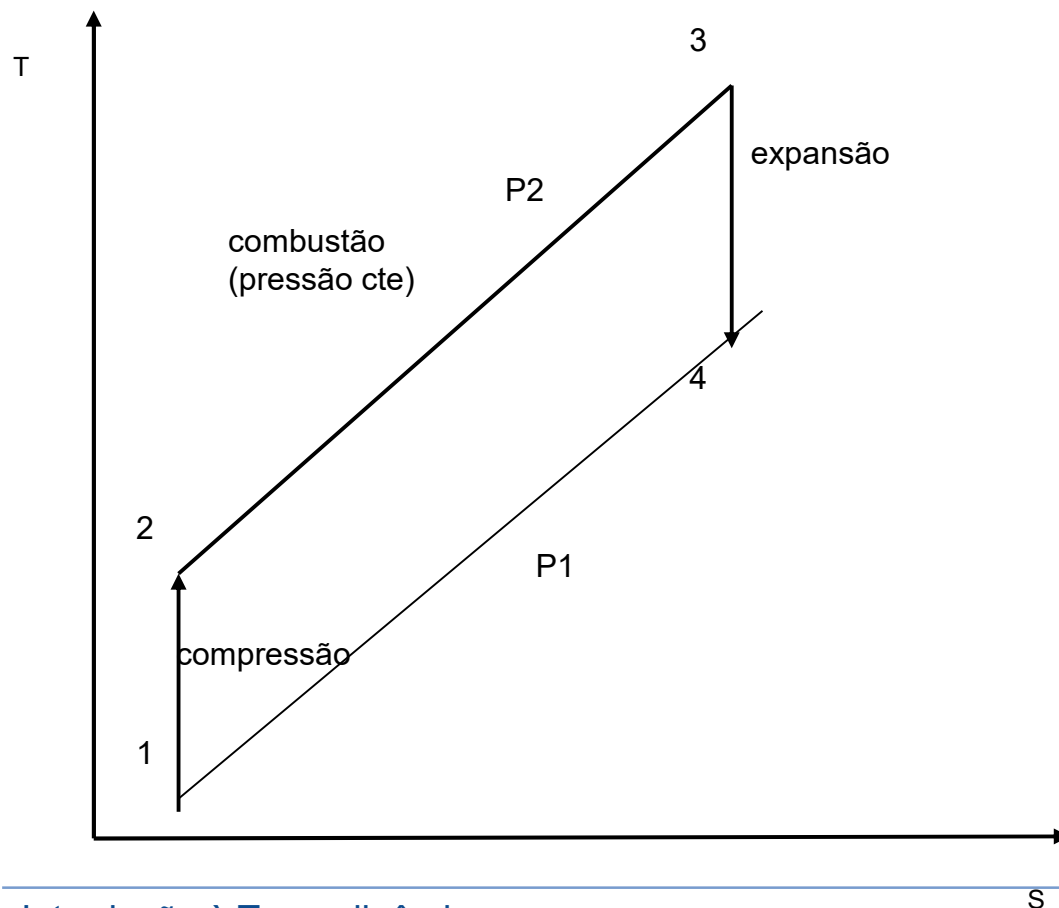
Há dois tipos de ciclos de Brayton, abertos à atmosfera (a) e usando a câmara de combustão interna ou fechado (b) e usando trocador de calor.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

CICLO ABERTO TEÓRICO DA TURBINA A GÁS (Brayton)



$$W_c = c_p \cdot (t_2 - t_1)$$

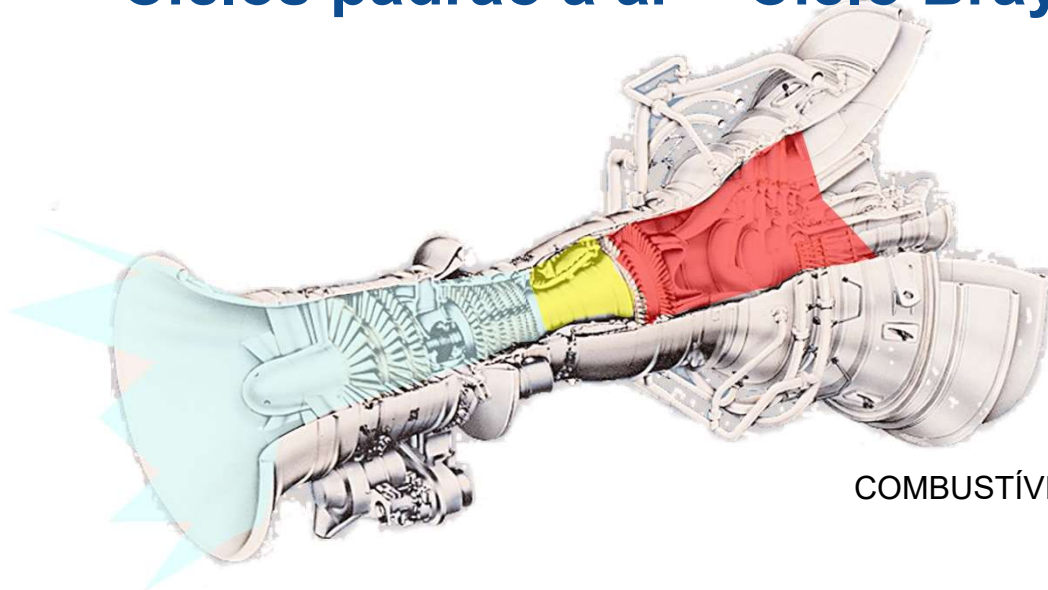
$$Q_1 = c_p \cdot (t_3 - t_2)$$

$$W_t = c_p \cdot (t_3 - t_4)$$

$$Q_2 = c_p \cdot (t_4 - t_1)$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Ciclo Brayton

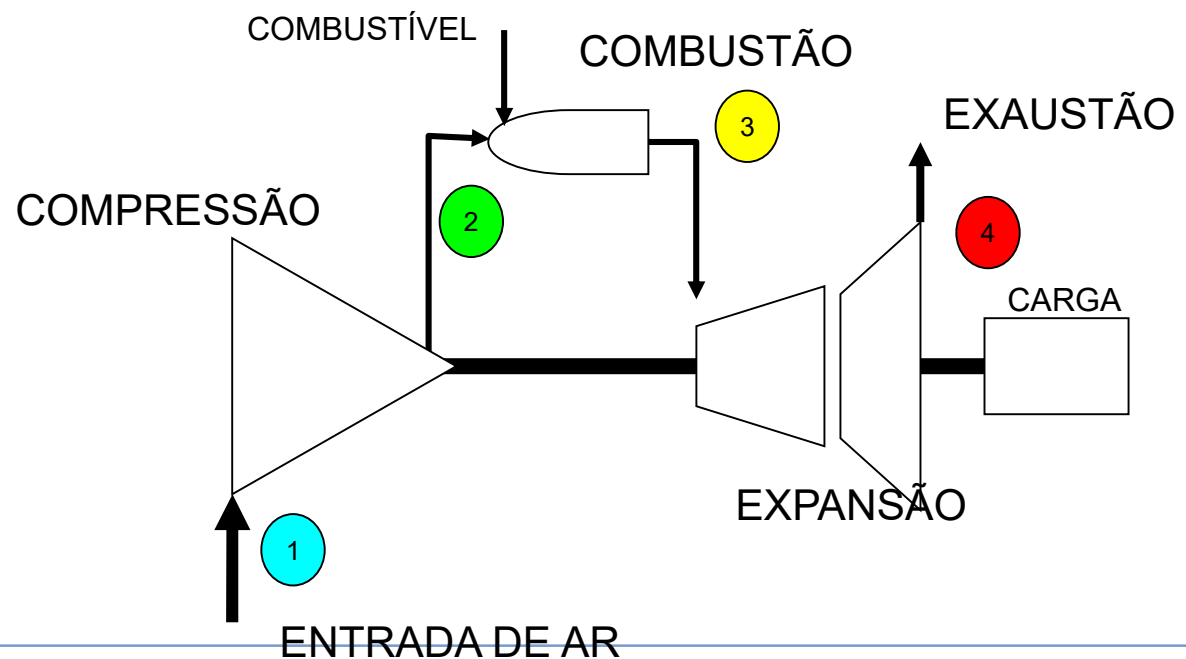


$$W_c = c_p \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_1 = c_p \cdot (t_3 - t_2)$$

$$W_t = c_p \cdot (t_3 - t_4)$$

$$Q_2 = c_p \cdot (t_4 - t_1)$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton - referências

- ❑ Vídeo sobre Ciclo Brayton – How a Gas Turbine works

<https://www.youtube.com/watch?v=-7D0DjoN9jl&t=3s>



<https://www.youtube.com/watch?v=2DGcgymw1U>



<https://www.youtube.com/watch?v=zcWkEKNvqCA>



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Eficiência e Potência

- Eficiência máxima do ciclo:

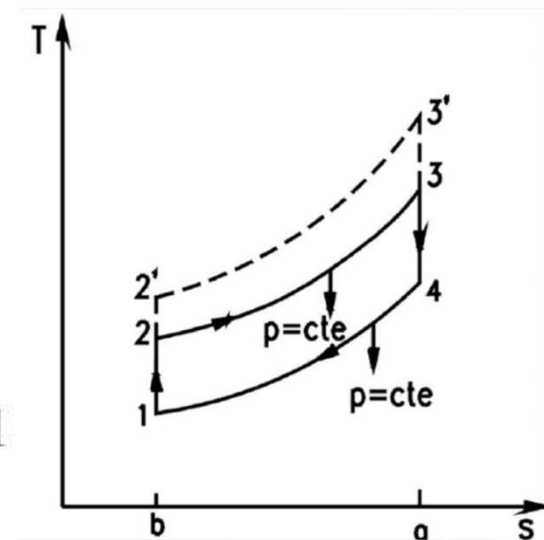
$$\eta_t = \frac{W_{util}}{Q_1} = \frac{W_t - W_c}{Q_1} = \frac{c_p \cdot (T_3 - T_4) - c_p \cdot (T_2 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

- Observamos entretanto que: $1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$

- Utilizando a relação dos gases perfeito:

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \therefore \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{e} \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Eficiência e Potência

- Eficiência máxima do ciclo:

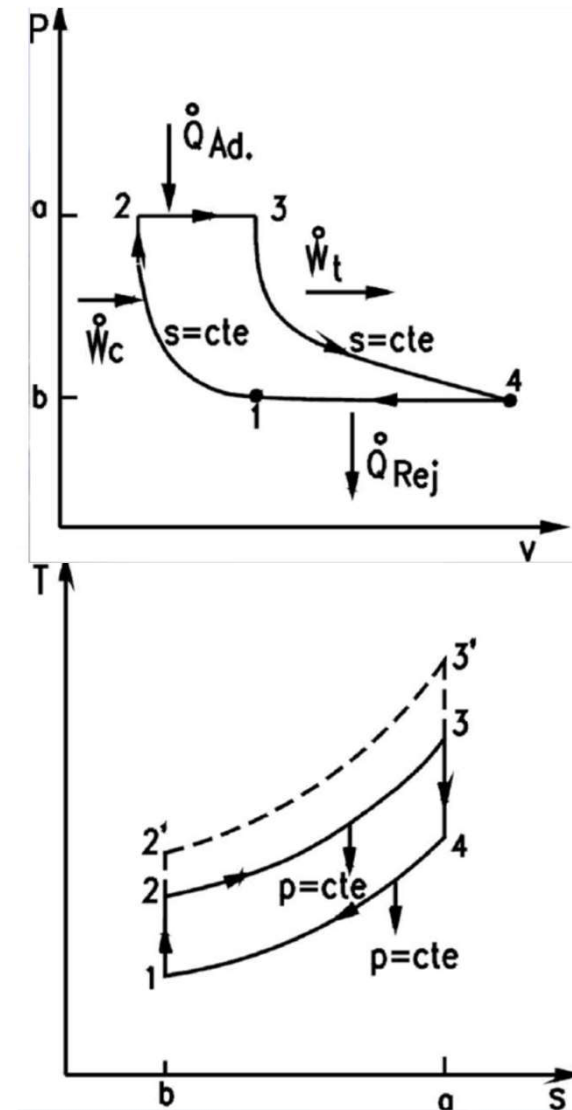
$$\eta_{tm\acute{a}x} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

- Utilizando a relação dos gases perfeito:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\left(\frac{k}{k-1} \right)}$$

- A eficiência máxima do ciclo será:

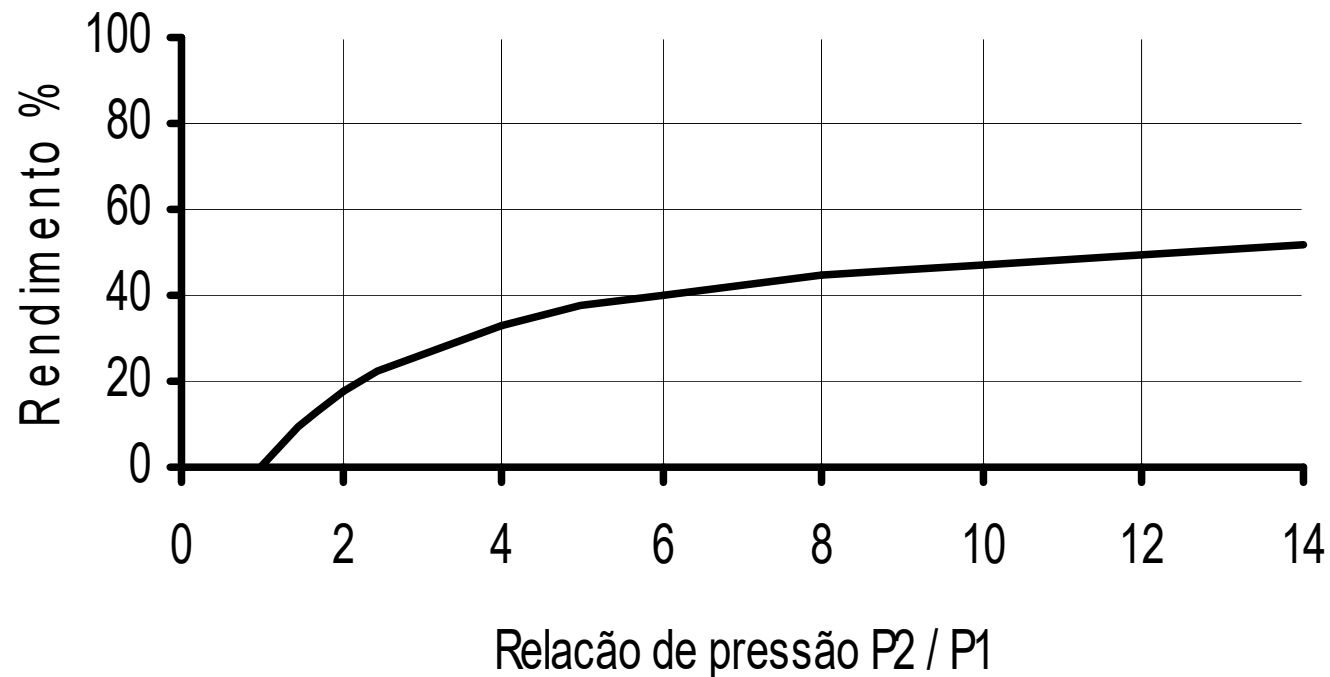
$$\eta_{tm\acute{a}x} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)}}$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Eficiência e Potência

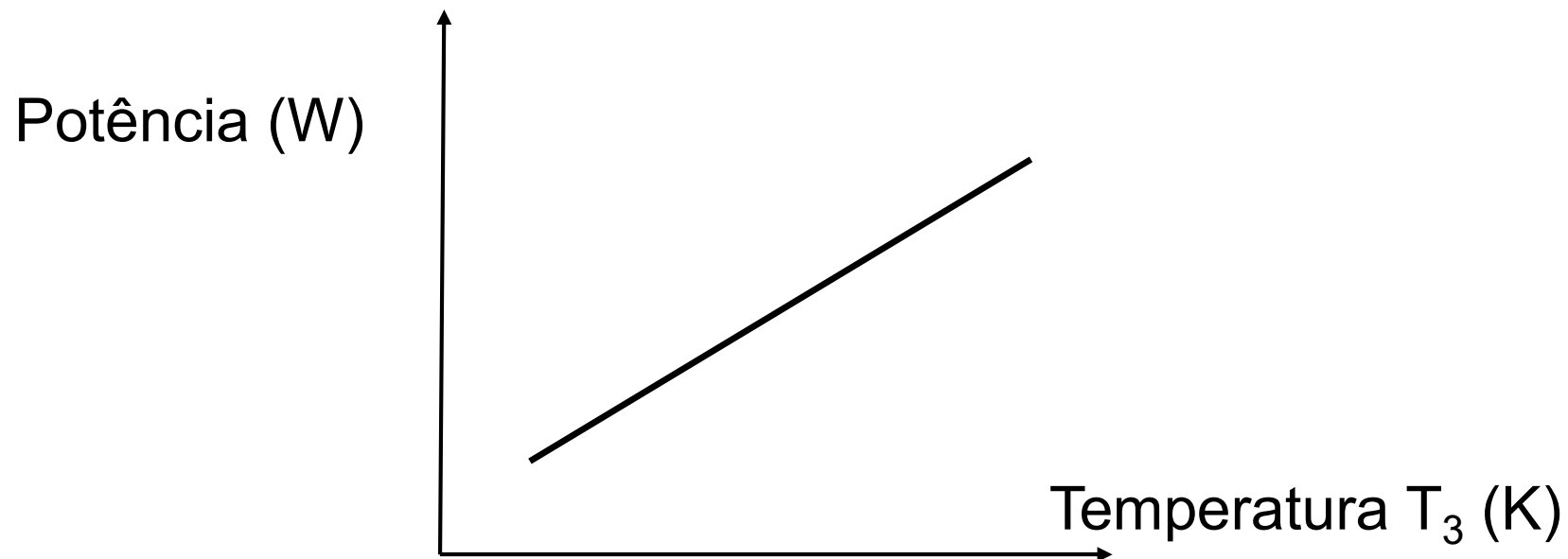
Rendimento do ciclo de Brayton em função de P_2 / P_1 .



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Eficiência e Potência

A adição de calor na câmara de combustão, tem uma proporcionalidade direta com o trabalho útil produzido. desta forma, quanto maior for a temperatura na câmara de combustão (T_3), para uma mesma vazão mássica de ar, maior será a potência disponível na ponta do eixo da turbina.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Eficiência e Potência

A eficiência do ciclo de uma turbina a gás é fortemente influenciada pela razão de compressão (P_2/P_1) no compressor de ar . Desta forma, aumentando a relação de compressão o rendimento global da turbina irá aumentar.

A potência útil fornecida pela turbina é proporcional à temperatura de saída da câmara de combustão (T_3). Assim aumentando esta temperatura a potência disponível irá aumentar. Existem, porém, aspectos metalúrgicos dos materiais das partes quentes da turbina que limitam a temperatura de queima



Exemplo 11.5

Cálculo ciclo Brayton

Exemplo 11.6

Ar entra no compressor, de um ciclo-padrão a ar Brayton (fechado), a 0,1 MPa e 15 °C. A pressão na saída do compressor é de 1,0 MPa e a temperatura máxima no ciclo é 1100 °C. Determine:

1. A pressão e a temperatura em cada ponto do ciclo.
2. O trabalho no compressor, o trabalho na turbina e o rendimento do ciclo.

Admitiremos, para cada um dos volumes de controle analisados, que o ar se comporta como gás perfeito, que o ar apresenta calor específico constante (avaliado a 300 K), que cada processo ocorre em regime permanente e que as variações de energia cinética e potencial nos processos são desprezíveis. O diagrama desse está mostrado na Fig. 11.19.

Volume de controle: Compressor.

Estado de entrada: p_1, T_1 conhecidas; estado determinado

Estado de saída: p_2 conhecida.

Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição



Exemplo 11.5 Cálculo ciclo Brayton

Volume de controle: Compressor.

Estado de entrada: p_1, T_1 conhecidas; estado determinado

Estado de saída: p_2 conhecida.

Análise: Primeira lei da termodinâmica: $|w_c| = h_2 - h_1$

Segunda lei da termodinâmica: $s_2 = s_1$

Portanto,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

Solução:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = 10^{0,286} = 1,932 \quad \therefore \quad T_2 = 556,8 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} |w_c| &= h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 1,0035 (556,8 - 288,2) \\ &= 269,5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Volume de controle: Turbina.

Estado de entrada: $p_3 (= p_2)$ conhecida, T_3 conhecida; estado determinado.

Estado de saída: $p_4 (= p_1)$ conhecida.

Análise: Primeira lei: $w_t = h_3 - h_4$

Segunda lei: $s_3 = s_4$

Assim,

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

Solução:

$$\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = 10^{0,286} = 1,932 \quad \therefore \quad T_4 = 710,8 \text{ K}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) = 1,0035 (1373,2 - 710,8) = 664,7 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{líq}} = w_t - |w_c| = 664,7 - 269,5 = 395,2 \text{ kJ/kg}$$

[Tabela A.5](#)

Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição



Exemplo 11.5 Cálculo ciclo Brayton

Volume de controle: Trocador de calor a alta temperatura.

Estado de entrada: Estado 2 determinado.

Estado de saída: Estado 3 determinado.

Análise: Primeira lei: $q_H = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$

Solução:

$$q_H = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) = 1,0035 (1373,2 - 556,8) = 819,3 \text{ kJ/kg}$$

Volume de controle: Trocador de calor de baixa temperatura.

Estado de entrada: Estado 4 determinado.

Estado de saída: Estado 1 determinado.

Análise: Primeira lei: $|q_L| = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1)$

Solução:

$$|q_L| = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1) = 1,0035 (710,8 - 288,2) = 424,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{395,2}{819,3} = 48,2 \%$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{(p_2/p_1)^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{1}{10^{0,286}} = 48,2 \%$$

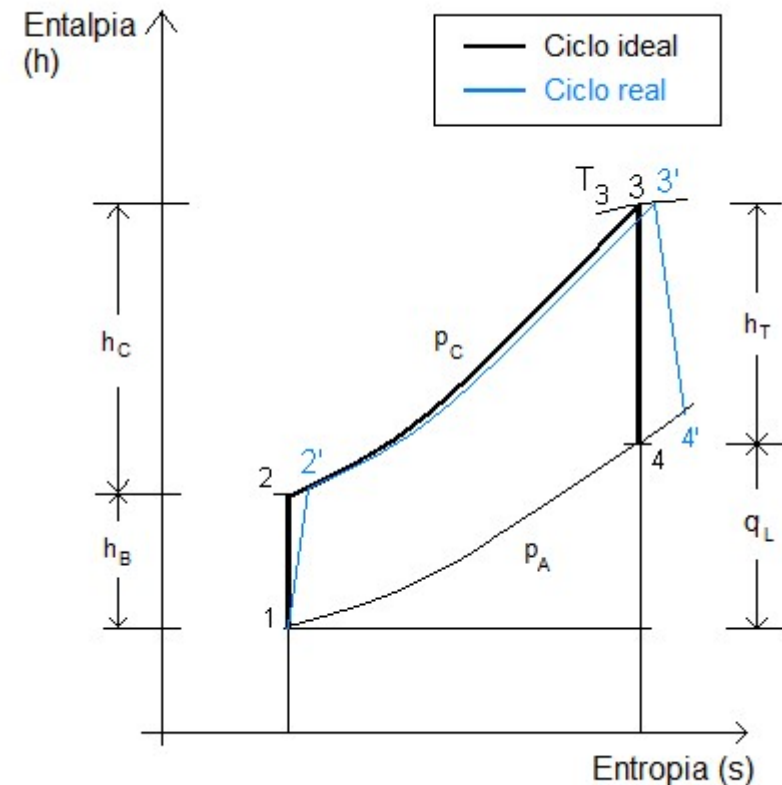
Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Comparação entre ciclo Ideal & Real

Denominamos ciclo real, aquele em que a **compressão** e a **expansão** são considerados como transformações **irreversíveis**.

Nas transformações reais ocorre **aumento de entropia**, mesmo sem que haja intercâmbio de calor entre o sistema e o exterior.

O desempenho dos ciclos reais diferem consideravelmente do desempenho dos ciclos ideais



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Comparação entre ciclo Ideal & Real

Os processos de compressão e expansão são irreversíveis, envolvendo, portanto, aumento de entropia;

Há perdas de pressão devido ao atrito de fluido nas câmaras de combustão e dutos de admissão e exaustão;

Há necessidade de incremento no trabalho de compressão a fim de compensar o atrito nos mancais e acionamento de equipamentos auxiliares (offtakes);

Os valores de c_p e k do ar variam ao longo do ciclo devido às variações de temperatura e, no caso de combustão, devido a alterações na composição química;

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – Comparação entre ciclo Ideal & Real

À primeira vista pode parecer que a vazão mássica através da turbina é maior do que a do compressor devido a injeção de combustível. Na prática, até 10% do ar comprimido pode ser retirado com o propósito de refrigerar os discos e as palhetas das partes quentes.

Cumpra observar que turbinas aeronáuticas de última geração, operam com temperaturas na turbina de alta pressão (hp) elevadas, o que demanda maior quantidade de ar para refrigeração

A relação combustível/ar é da ordem de 0,01 a 0,02.

Desta forma, a aproximação de vazão constante ao longo da turbina não é correta em caso de avaliação precisa.



Exemplo 11.6

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Brayton

Exemplo 11.7

Considere uma turbina a gás em que o ar entra no compressor nas mesmas condições do Ex. 11.6 e o deixa a pressão de 1,0 MPa. A temperatura máxima no ciclo é de 1100 °C. Admita que as eficiências do compressor e da turbina são, respectivamente, iguais a 80 % e 85 %. Sabendo que a perda de carga no escoamento de ar entre o compressor e a turbina é igual a 15 kPa, determine o trabalho no compressor, o trabalho da turbina e o rendimento do ciclo.

Admitiremos, novamente, para cada um dos volumes de controle analisados, que o ar se comporta como gás perfeito, que o ar apresenta calor específico constante (avaliado a 300 K), que cada processo ocorre em regime permanente e que as variações de energia cinética e potencial nos processos são desprezíveis. O diagrama desse está mostrado na Fig. 11.21.

Volume de controle: Compressor.

Estado de entrada: p_1, T_1 conhecidas; estado determinado.

Estado de saída: p_2 conhecida.

Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição



Exemplo 11.6

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Brayton

Compressor:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

O rendimento do compressor é dado por

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

Solução:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{T_{2s}}{T_1} = 10^{0,286} = 1,932 \quad \therefore \quad T_{2s} = 556,8 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{556,8 - 288,2}{T_2 - T_1} = 0,80$$

$$T_2 - T_1 = \frac{556,8 - 288,2}{0,80} = 335,8 \quad \therefore \quad T_2 = 624,0 \text{ K}$$

$$|w_c| = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 1,0035 (624,0 - 288,2) = 337,0 \text{ kJ/kg}$$

Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.6

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Brayton

Turbina

$$\frac{T_3}{T_{4s}} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

O rendimento da turbina é dado por

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

Solução:

Ex 11.6

$$p_3 = p_2 - \text{perda de carga} = 1,0 - 0,015 = 0,985 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{T_3}{T_{4s}} = 9,85^{0,286} = 1,9236 \quad \therefore \quad T_{4s} = 713,9 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} = 0,85$$

$$T_3 - T_4 = 0,85 (1373,2 - 713,9) = 560,4 \quad \therefore \quad T_4 = 812,8 \text{ K}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) = 1,0035 (1373,2 - 812,8) = 562,4 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{liq}} = w_t - |w_c| = 562,4 - 337,0 = 225,4 \text{ kJ/kg}$$



Exemplo 11.6

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Brayton

Câmara de combustão:

Análise: Primeira lei: $q_H = h_3 - h_2$

Solução:

$$q_H = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) = 1,0035 (1373,2 - 624,0) = 751,8 \text{ kJ/kg}$$

Rendimento térmico:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{líq}}}{q_H} = \frac{225,4}{751,8} = 30,0\%$$

Comparativo ciclo ideal & ciclo real:

	w_c	w_t	$w_{\text{líq}}$	q_H	$\eta_{\text{térmico}}$
Ex. 11.6 (ideal)	269,5	664,7	395,2	819,3	48,2
Ex. 11.7 (real)	337,0	562,4	225,4	751,8	30,0

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Ericsson

Variação do ciclo Brayton, onde turbina e compressor operam de modo **reversível e isotérmico**, ao invés de adiabático reversível;

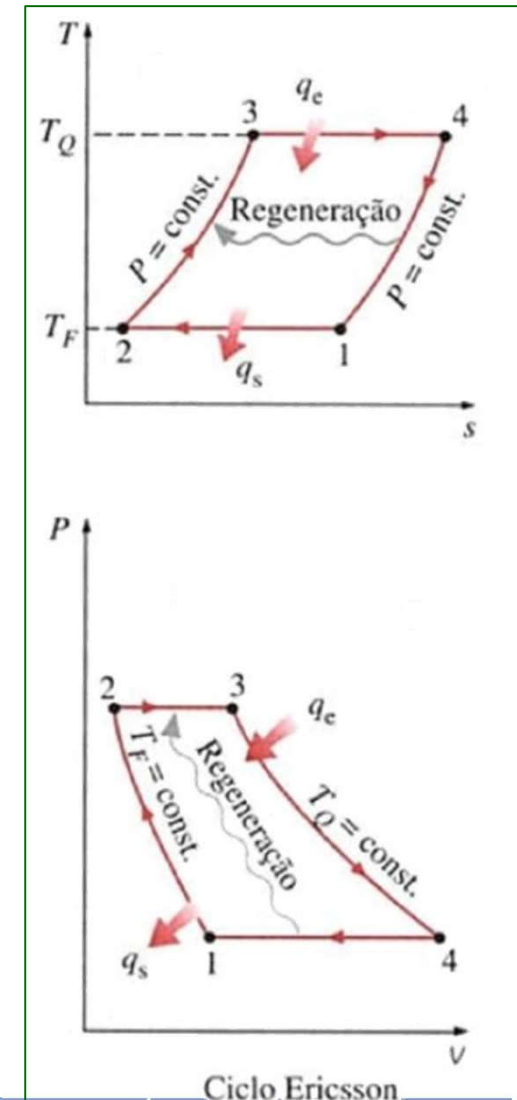
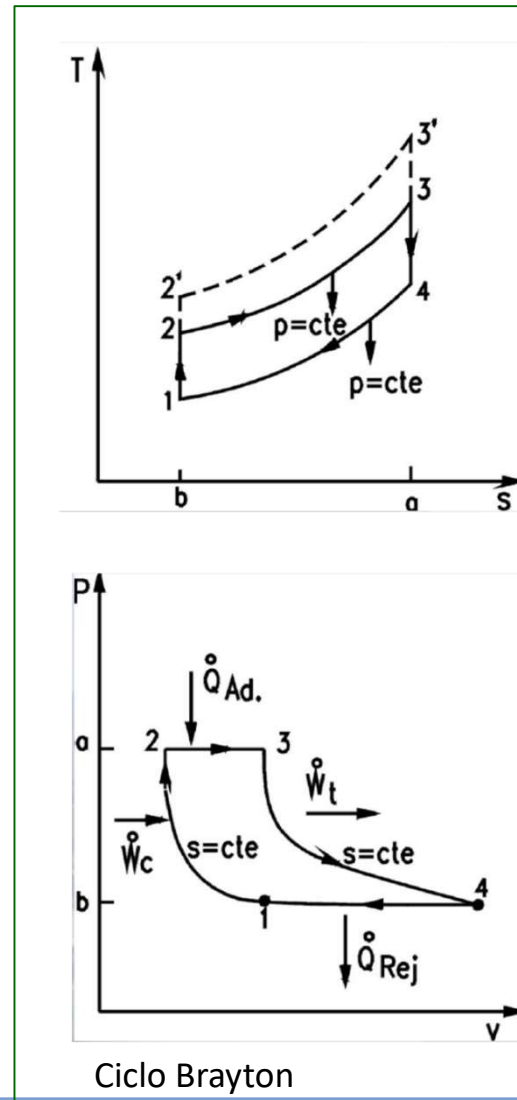
Os processos então são:

≡ Compressão isotérmica;

≡ Adição de calor isobárica

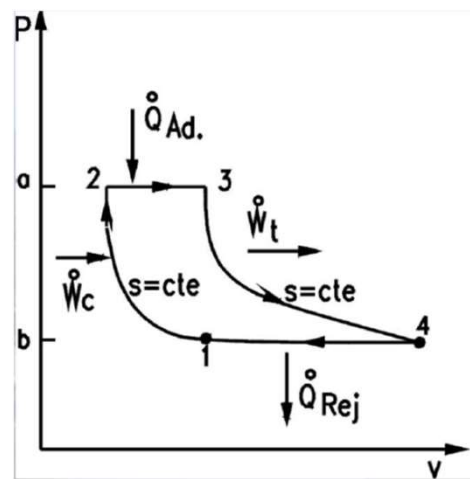
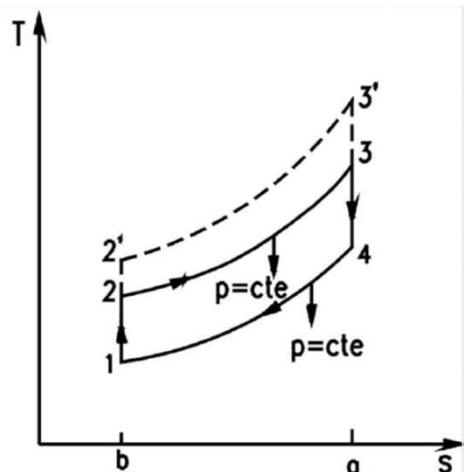
≡ Expansão isotérmica

≡ Remoção de calor isobárica

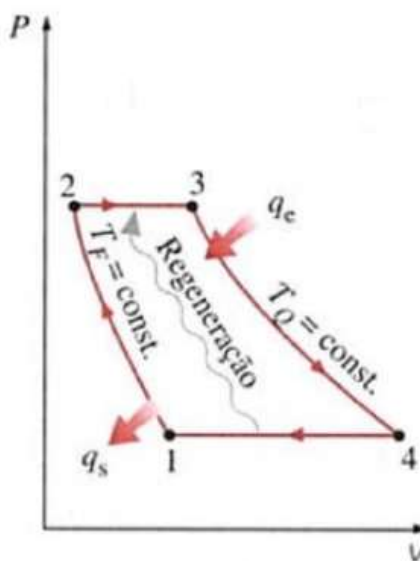
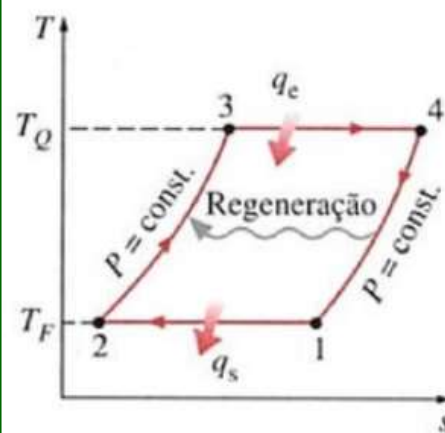


Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

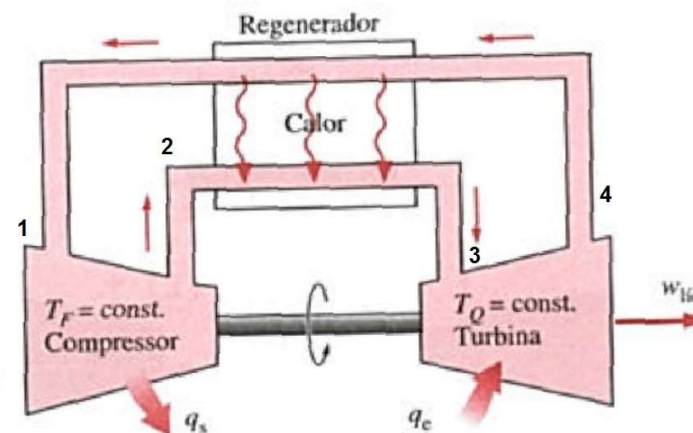
Ciclo Ericsson & Ciclo Brayton



Ciclo Brayton



Ciclo Ericsson



Trabalho para processos isotérmicos e reversíveis:

$$w = - \int_e^s v dp = -p_e v_e \ln \frac{p_s}{p_e} =$$

$$= -RT_e \ln \frac{p_s}{p_e}$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Ericsson & Ciclo Brayton

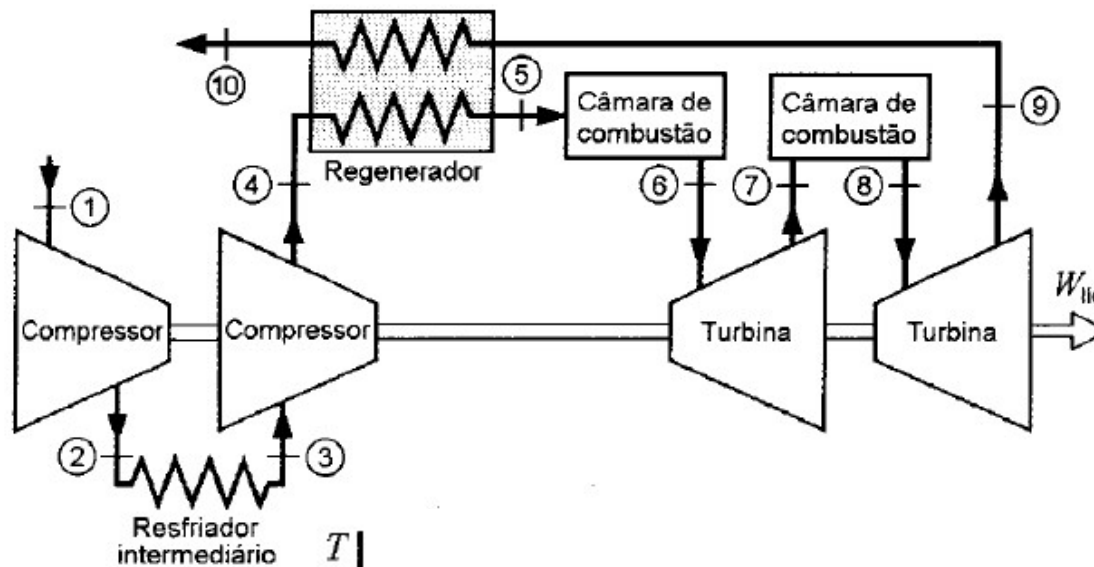
O processo isotérmico reversível para compressores e turbinas permitem o aumento do trabalho líquido do ciclo.

Na prática, as vazões que escoam na turbina e compressor são muito grandes, dificultando a extração e admissão de calor nestas correntes de forma que os processos possam ocorrer isotermicamente;

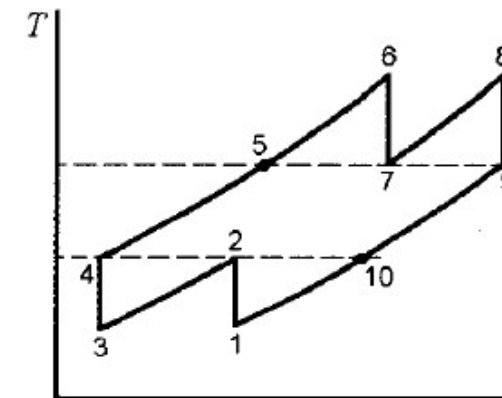
O ciclo Brayton pode ser aproximado do ciclo Ericsson, a partir do uso de múltiplos estágios nos compressores, com resfriamento intermediário entre os mesmos, expansão multiestágio com aquecimento interestágios, e o uso de um regenerador

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

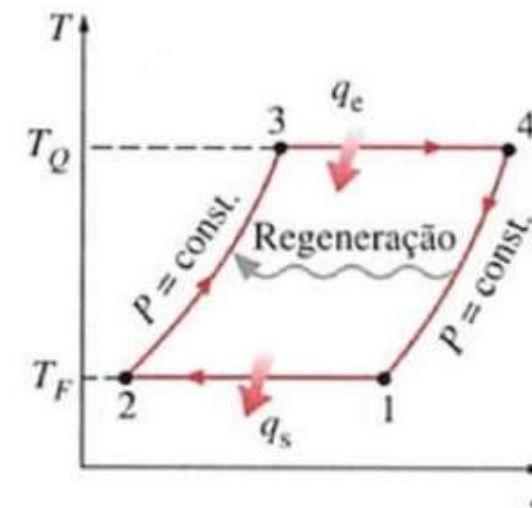
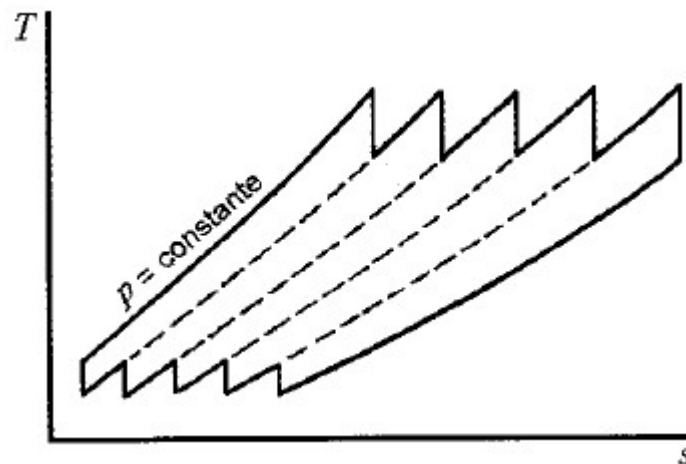
Ciclo Brayton – aproximação para ciclo Ericsson



Duplo estágio:



múltiplos estágios:

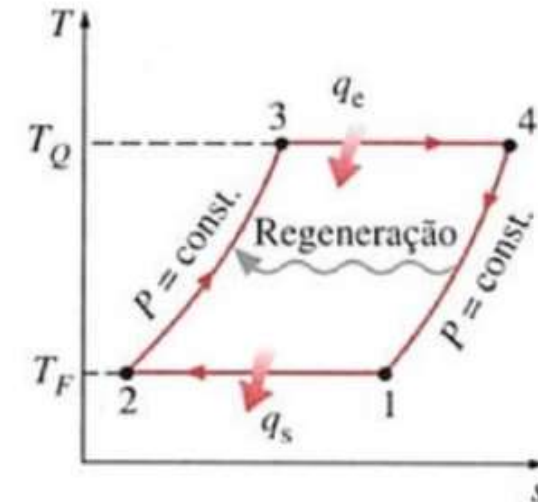
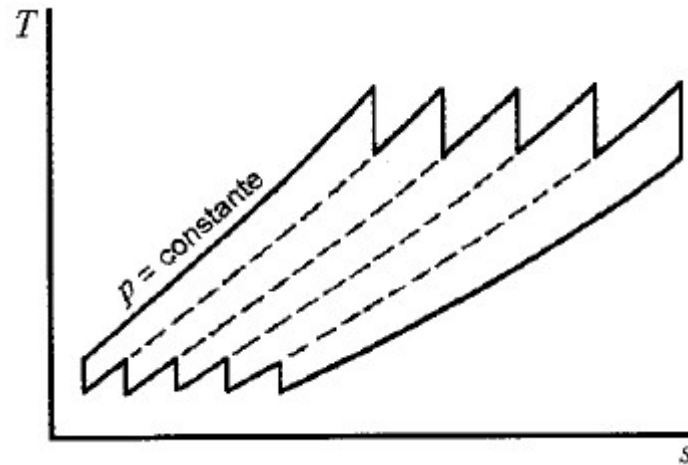


Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Brayton – aproximação para ciclo Ericsson

múltiplos
estágios:



Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição



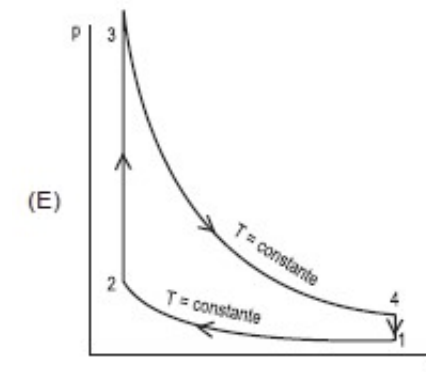
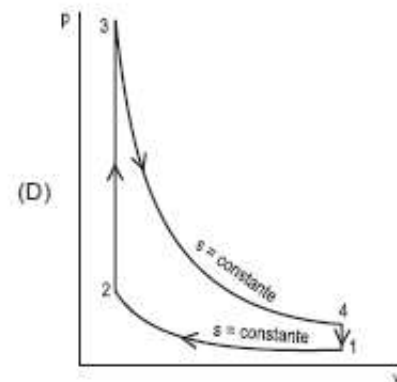
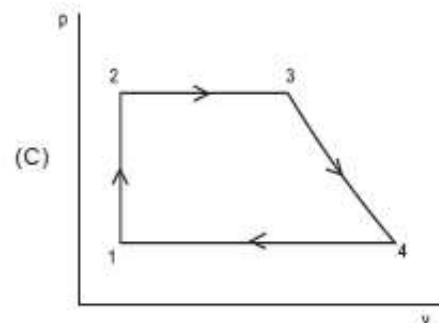
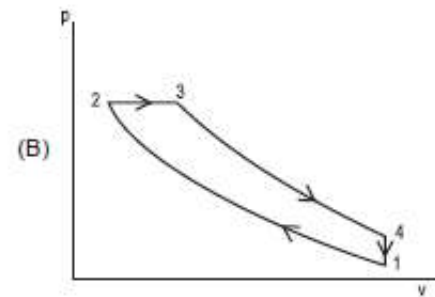
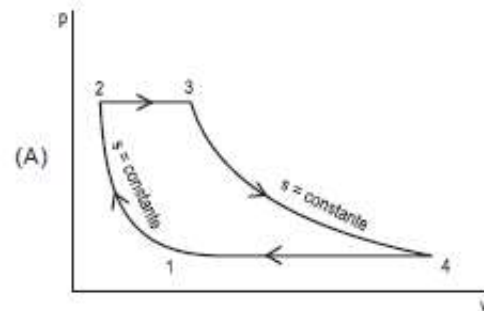
O ciclo Brayton pode ser aproximado do ciclo **Ericsson**, a partir do uso de **múltiplos estágios** nos compressores, com resfriamento intermediário entre os mesmos, expansão multiestágio com aquecimento interestágios, e o uso de um **regenerador**



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercícios Teóricos

52

O ciclo Brayton é o ciclo ideal para a turbina a gás simples. Qual gráfico pressão-volume se refere especificamente a esse ciclo?



PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2010). ENGENHEIRO(A) DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

51

Com relação ao ciclo Brayton, analise as afirmativas a seguir.

- I – A turbina a gás real difere do ciclo ideal, principalmente devido às irreversibilidades no compressor e na turbina, e à perda de carga nas passagens do fluido e na câmara de combustão (ou no trocador de calor para um ciclo fechado).
- II – O fluido de trabalho apresenta mudança de fase.
- III – O compressor utiliza uma pequena quantidade de trabalho na sua operação, em comparação ao trabalho gerado na turbina.
- IV – O rendimento do ciclo de turbina a gás pode ser melhorado pela introdução de um regenerador.

Estão corretas **APENAS** as afirmativas

- (A) I e II.
- (B) I e IV.
- (C) III e IV.
- (D) I, II e III.
- (E) II, III e IV.

PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2010): ENGENHEIRO(A) DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

45

Em um ciclo Brayton ideal, a temperatura na entrada e na saída da turbina valem, respectivamente, 1.400 K e 700 K. Sabe-se, também, que a temperatura de admissão do ar no compressor é 300 K. Com base nesses dados e admitindo válida a abordagem de ar-padrão frio, a taxa de compressão e o rendimento do ciclo são iguais, respectivamente, a

Dado: Razão de calores específicos do ar: $1,4 \cong \sqrt{2}$

- (A) 11,2 e 68%
- (B) 22,4 e 25%
- (C) 11,2 e 50%
- (D) 22,4 e 68%
- (E) 33,6 e 50%

PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2011): ENGENHEIRO(A)
DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA.

59

A respeito dos aspectos teóricos e práticos sobre o ciclo Brayton, sabe-se que é possível

- (A) avaliar o rendimento térmico com o conhecimento das temperaturas de entrada e saída do compressor, para o ciclo de Brayton ideal, considerando a análise de ar-padrão frio.
- (B) inserir um regenerador no ciclo Brayton de ar-padrão, visando ao reaproveitamento dos gases de exaustão na turbina, porém este procedimento acarretará uma queda no rendimento térmico do ciclo.
- (C) ser representado em um diagrama pressão-volume específico através de um retângulo, no caso do ciclo Brayton ideal de ar-padrão.
- (D) acrescentar um difusor antes do compressor, o que faz com que a velocidade do ar seja aumentada em uma turbina a gás estacionária.
- (E) introduzir um bocal, após a turbina com descarga subsônica, com o objetivo de aumentar a pressão conforme o gás escoar por este último equipamento.

PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2011). ENGENHEIRO(A)
DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto e Diesel

Histórico

Em 1892, o engenheiro alemão Rudolf **Diesel** registrou a patente do motor que leva seu nome até hoje, com **ignição por compressão**, onde não existia centelha elétrica para inflamar a mistura. A característica fundamental desse motor é que o **combustível é injetado dentro de uma câmara de combustão que já contém o ar aquecido** e pressurizado. A combustão da mistura se produz pela compressão (combustão espontânea) devido às condições combinadas de pressão e temperatura elevadas, e não por uma centelha, como ocorre no caso dos motores do ciclo Otto.

Os motores Diesel apresentavam excelente rendimento, embora necessitassem de um complexo sistema de injeção em alta pressão de combustível, problema que só foi resolvido eficientemente por Robert Bosch na década de 20.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto e Diesel

O ciclo de **Otto** é um ciclo termodinâmico idealizado que descreve o funcionamento de um típico motor de pistão de **ignição com centelha**.

É o ciclo termodinâmico mais comum em motores de automóveis. O ciclo de Otto é uma descrição do que acontece com uma massa de gás submetida a mudanças de pressão, temperatura, volume, adição de calor e remoção de calor.

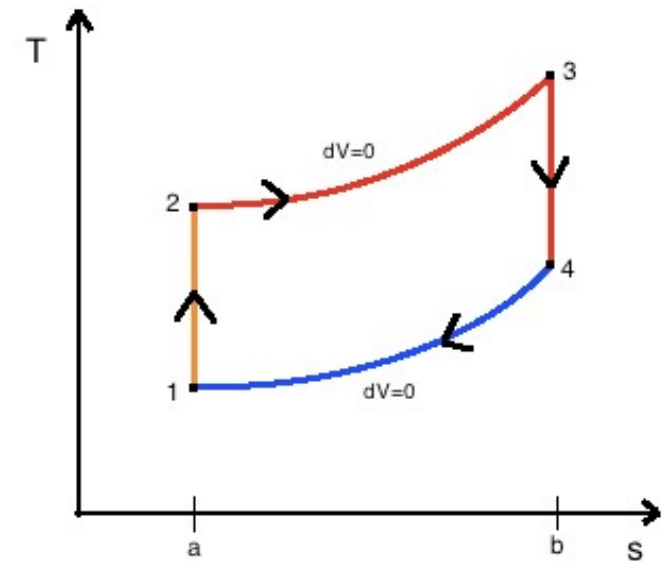
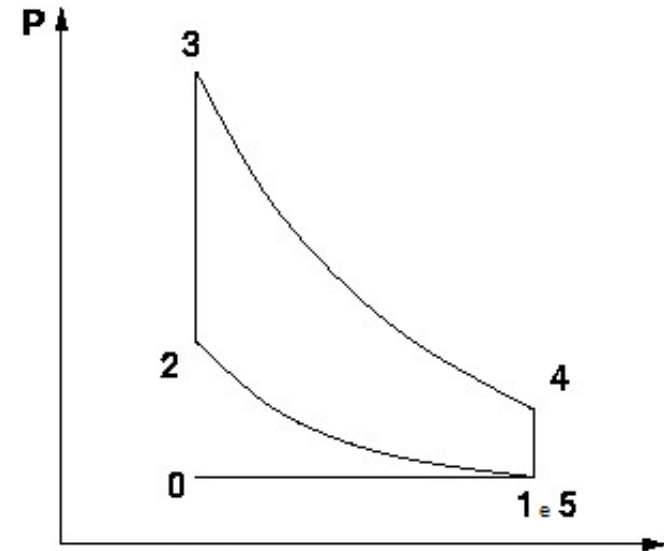
Nikolaus Otto foi a primeira pessoa a construir um motor de quatro tempos. Um motor estacionário que utilizava uma mistura gás de carvão como combustível . Os modernos motores de quatro tempos usando velas de ignição são chamados motores Otto

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto

O ciclo ideal de Otto pode ser representado pelas seguintes etapas:

- ❑ Admissão isobárica 0-1 (pressão constante);
- ❑ Compressão adiabática reversível 1-2 (isoentrópica);
- ❑ Combustão isocórica 2-3 (volume constante), expansão adiabática reversível 3-4 (isoentrópica);
- ❑ Abertura de válvula 4-5 (volume constante), exaustão isobárica 5-0 (pressão constante).

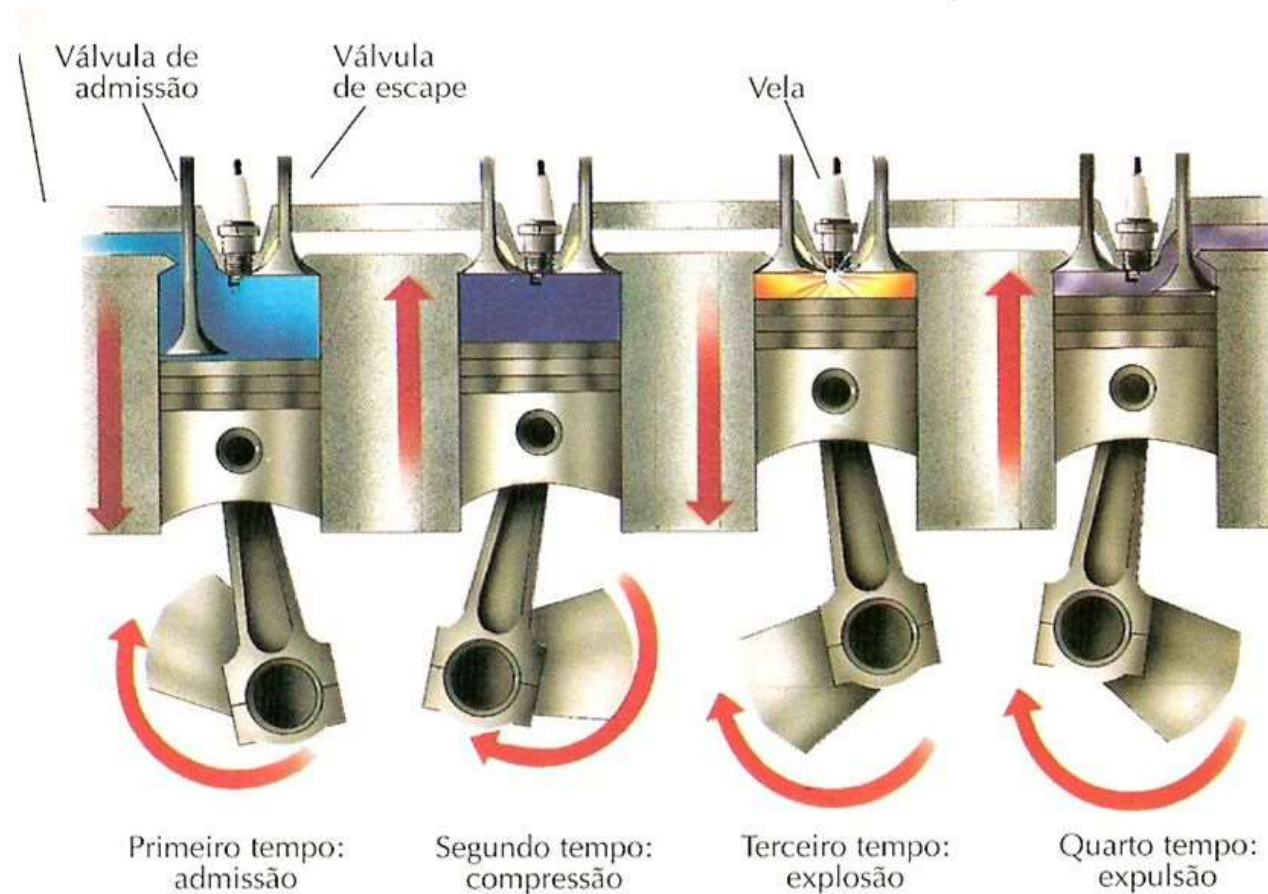


Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto

CICLOS TERMODINÂMICOS REAIS

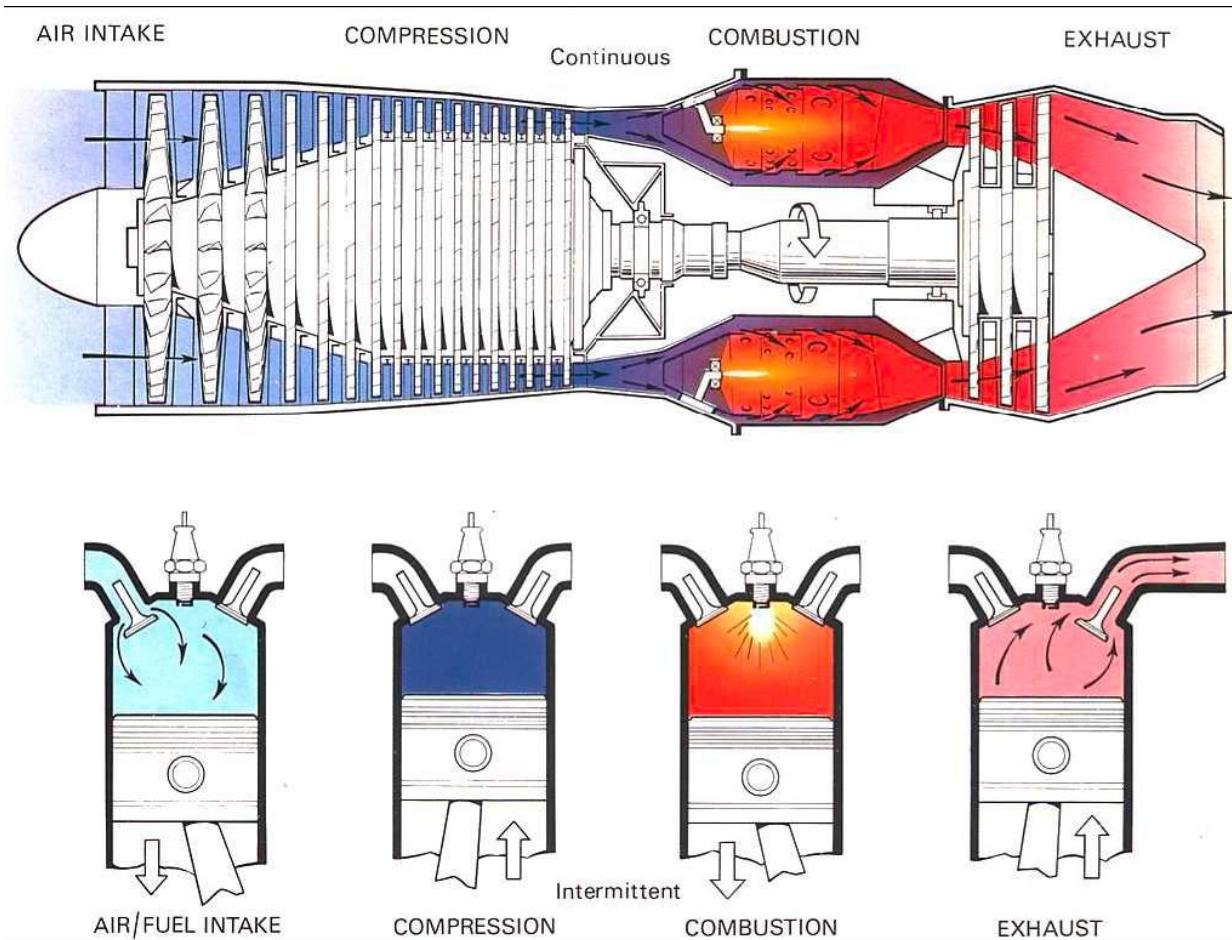
Os motores de combustão interna a 4 tempos – o Ciclo Otto



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos padrão a ar – Turbinas (Brayton) x MCI (Otto/Diesel)

Turbina a Gás x Motor Combustão



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

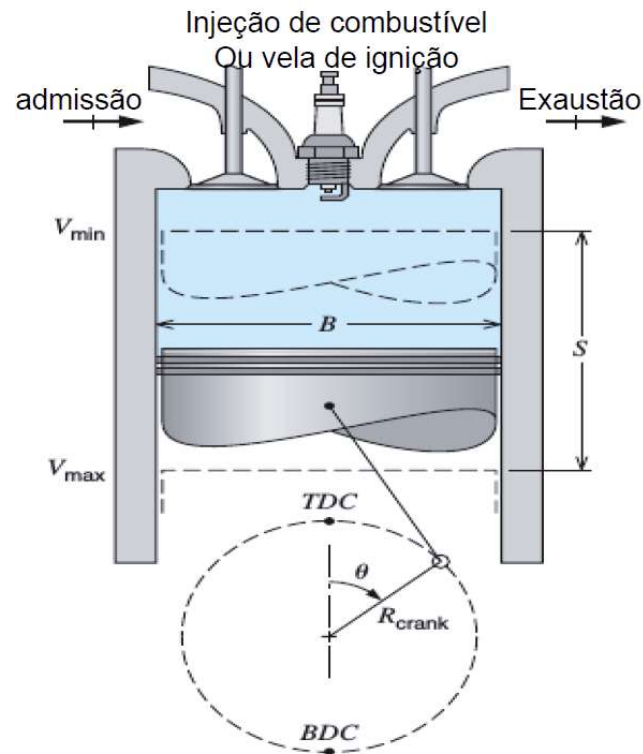
Ciclos Otto

Deslocamento de todos cilindros:

$$V_{desl} = N_{ciclo} (V_{max} - V_{min}) = N_{ciclo} A_{ciclo} S$$

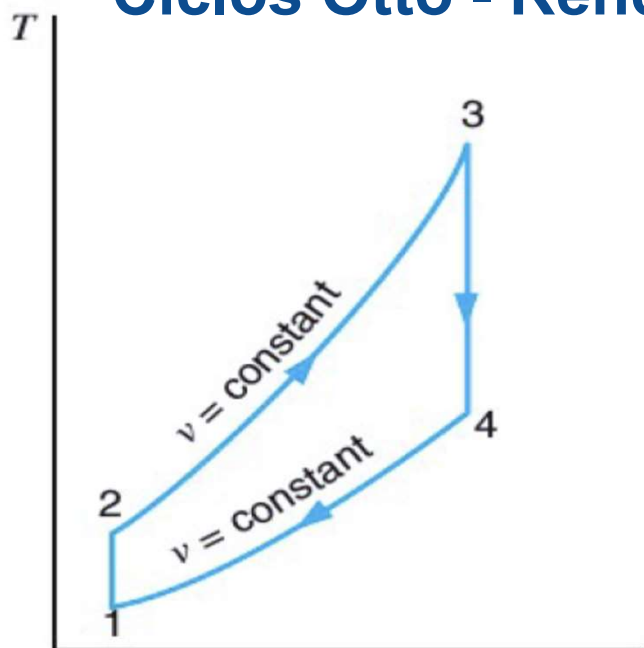
Taxa de compressão:

$$r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto - Rendimento térmico



Rendimento térmico:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{(u_3 - u_2)}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{(u_4 - u_1)}{(u_3 - u_2)} = 1 - \frac{T_1 C_v \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 C_v \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = r_v^{k-1}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

então:

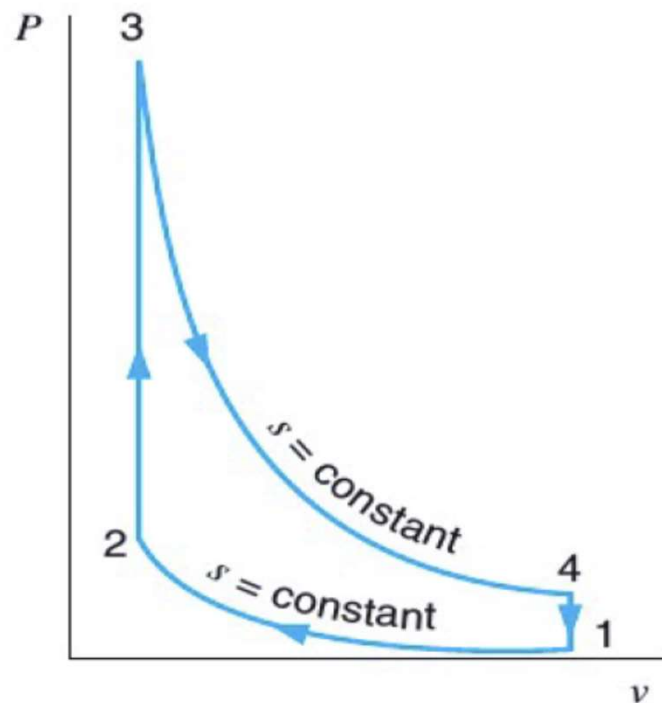
$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto - Etapas e curva de desempenho



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto - Pressão média efetiva

- Pressão que, ao agir no pistão durante todo o curso motor, realiza um trabalho igual ao realmente realizado sobre o pistão
- O trabalho em um ciclo é determinado pela multiplicação dessa pressão média efetiva pela área do pistão e pelo curso

$$p_{me} = \frac{w_{liq}}{(v_1 - v_2)}$$

Trabalho líquido específico:

$$w_{liq} = \oint P dv = P_{mef} (v_{max} - v_{min})$$



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

55

A pressão média efetiva (PME) pode ser usada como parâmetro para comparar o desempenho de motores alternativos de igual tamanho, sendo definida pela relação, na qual W é o trabalho e V é o volume, apresentada em

(A) $\frac{W_{\text{liq}} (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})}{2}$

(B) $\frac{W_{\text{liq}} (V_{\text{máx}} + V_{\text{mín}})}{2}$

(C) $W_{\text{liq}} (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})$

(D) $\frac{W_{\text{liq}}}{(V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})}$

(E) $\frac{W_{\text{liq}}}{2(V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})}$

PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2011):
ENGENHEIRO JÚNIOR MECÂNICA:

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto



O ciclo padrão **Otto** se aproxima do motor de combustão interna de **ignição por centelha** com aplicação usual em automóveis



No ciclo Otto ideal, o **rendimento é função exclusiva** da **relação de compressão r**



No motor real, quando se aumenta a relação de compressão, aumenta-se a tendência a detonação (batida de pino). Portanto, a **máxima relação de compressão é limitada pela detonação**



Exemplo 11.7

Cálculo ciclo Otto

- A relação de compressão num ciclo padrão a ar Otto é 10. No início do curso de compressão, a pressão é igual a 0,1MPa e a temperatura é 15°C. Sabendo que a transferência de calor ao ar, por ciclo é igual 1800kJ/kg de ar, determine:
 - 1. A pressão e a temperatura no estado final de cada processo do ciclo.
 - 2. O rendimento térmico
 - 3. A pressão média efetiva.

$$C_p = 1,0035 \text{ kJ/kg K} ; c_v = 0,7165 \text{ kJ/kg K}; k = 1,4; R = 0,2820 \text{ kJ/kg K}$$

Fonte: Introdução a Termodinâmica, Van Willen, 5ª. edição



Exemplo 11.7

Cálculo ciclo Otto

- Processo 1 -2: compressão isentrópica

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad \text{E} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

- Processo 2-3: recebimento de calor a volume constante

$$q_H = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2)$$

- Processo 3 - 4: expansão isentrópica

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} \quad \text{E} \quad \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^k$$

- Processo 4 -1: cessão de calor a volume constante

- Rendimento e pme: $\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad \text{E} \quad P_{\text{mef}} = \frac{W_{\text{liq}}}{V_1 - V_2}$



Exemplo 11.7 Cálculo ciclo Otto

- Cálculo dos volume específico em 1

$$v_1 = \frac{0,287 \times 288,2}{100} = 0,827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

- Cálculo de pressão, Temperatura e volume do ponto 2

$$T_2 = T_1 r_v^{k-1} = 288,2 \times 10^{0,4} = 723 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 r_v^k = 0,1 \times 10^{1,4} = 2,512 \text{ MPa}$$

$$V_2 = \frac{0,827}{10} = 0,0827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

- Cálculo de pressão e temperatura do ponto 3

$${}_2q_3 = c_v (T_3 - T_2) = 1800 \text{ kJ/kg}$$

$$T_3 = T_2 + {}_2q_3 / C_v \longrightarrow T_3 - T_2 = \frac{1800}{0,717} = 2510 \text{ K} \quad T_3 = 3234 \text{ K}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{3234}{723,9} = 4,467 \quad \text{Portanto: } P_3 = 11,222 \text{ MPa}$$

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.7

Cálculo ciclo Otto

□ Rendimento térmico:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} = 1 - \frac{1}{10^{0,4}} = 0,602 = 60,2$$

□ Verificando:

$${}_4 q_1 = c_v (T_1 - T_4) = 0,717 (288,2 - 1287,5) = -716,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{716,5}{1800} = 0,602 = 60,2$$

$$w_{\text{liq}} = 1800 - 716,5 = 1083,5 \text{ kJ/kg}$$

□ Cálculo da pressão média efetiva

$$P_{\text{mef}} = \frac{w_{\text{liq}}}{v_1 - v_2} = \frac{1083,5}{(0,827 - 0,0827)} = 1456 \text{ kPa}$$

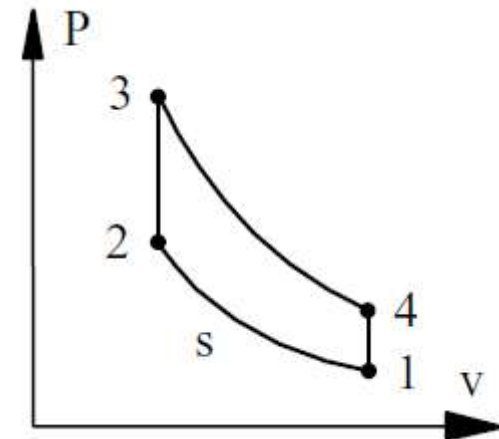
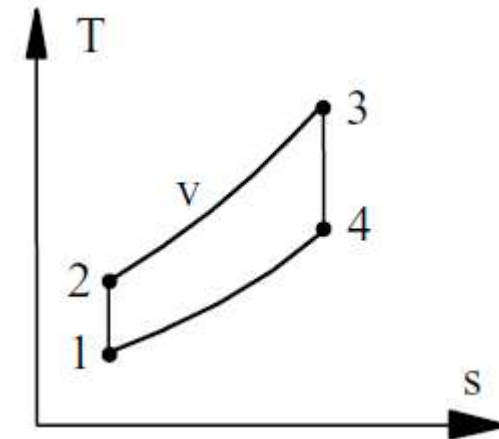


Exemplo 11.8

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Otto

11.93 Um motor a gasolina é alimentado com ar a 95 kPa e 300 K. O ar então é comprimido num processo que apresenta relação de compressão volumétrica igual a 8 para 1. Sabendo que o combustível libera 1300 kJ/kg de ar no processo de combustão, determine a temperatura e a pressão imediatamente após o processo de combustão.



[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.8

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Otto

11.93 Um motor a gasolina é alimentado com ar a 95 kPa e 300 K. O ar então é comprimido num processo que apresenta relação de compressão volumétrica igual a 8 para 1. Sabendo que o combustível libera 1300 kJ/kg de ar no processo de combustão, determine a temperatura e a pressão imediatamente após o processo de combustão.

Compression 1 to 2: $s_2 = s_1 \Rightarrow$ From Eq.8.33 and Eq.8.34

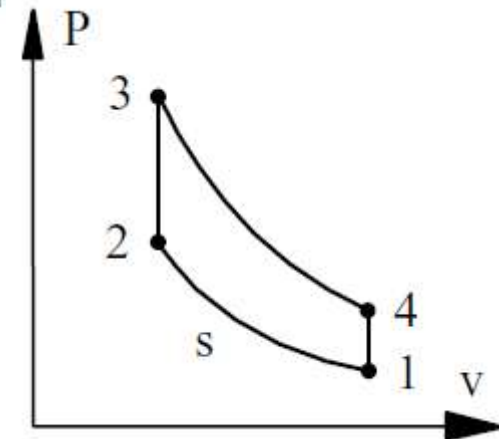
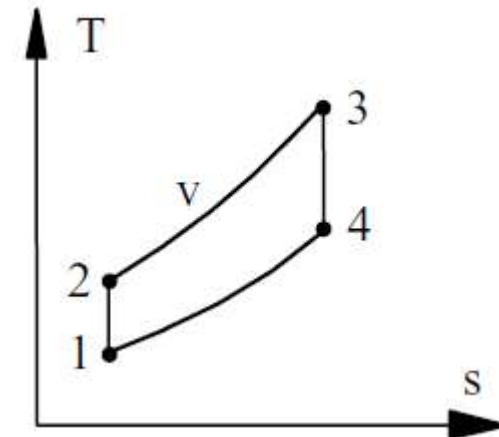
$$T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{k-1} = 300 \times 8^{0.4} = 689.2 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \times (v_1/v_2)^k = 95 \times 8^{1.4} = 1746 \text{ kPa}$$

Combustion 2 to 3 at constant volume: $u_3 = u_2 + q_H$

$$T_3 = T_2 + q_H/C_v = 689.2 + 1300/0.717 = \mathbf{2502 \text{ K}}$$

$$P_3 = P_2 \times (T_3/T_2) = 1746 (2502 / 689.2) = \mathbf{6338 \text{ kPa}}$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Diesel

O motor Diesel ou motor de ignição por compressão é um motor de combustão interna inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913), em que a combustão se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão do ar.

- ❑ Define-se pelas seguintes características:
 - ≡ Ar é comprimido até pressão alta o suficiente para auto-ignitar o combustível;
 - ≡ Combustível é injetado no final do processo de compressão do ar.

- ❑ **Normalmente tem rendimento térmico melhor que o Otto e por isso usado para aplicações pesadas.**

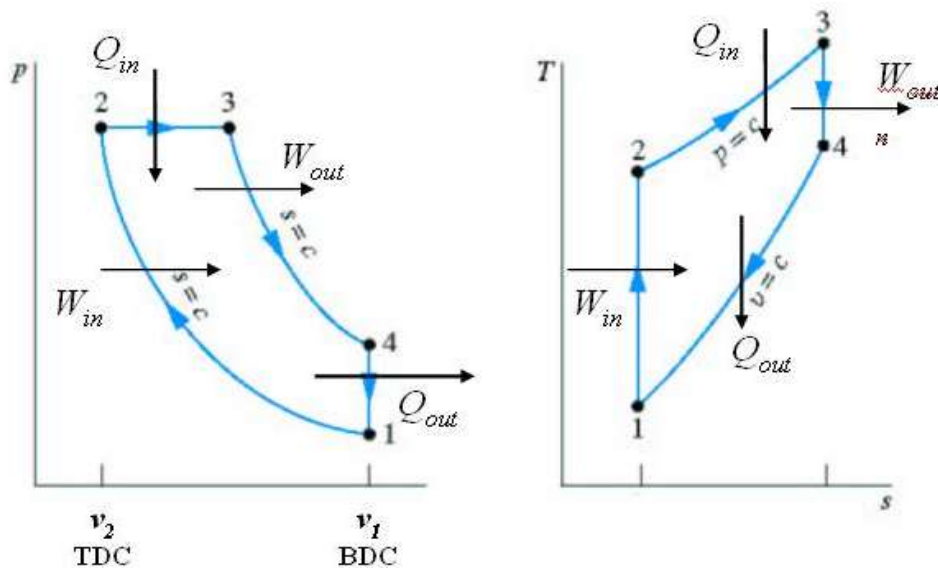
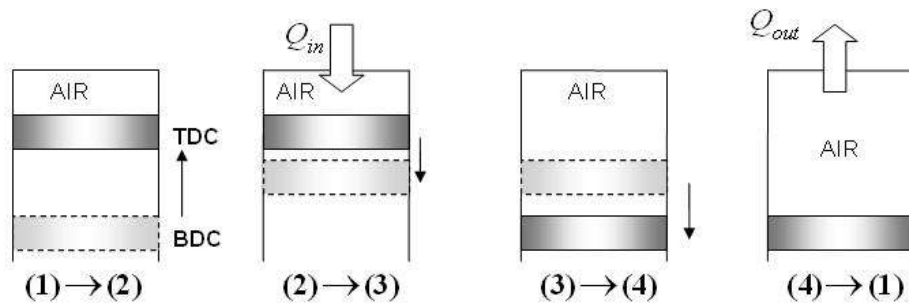
Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Diesel - Descrição

- ❑ Na maioria das aplicações os motores Diesel funcionam como um motor quatro tempos. O ciclo inicia-se com o êmbolo no ponto morto superior (PMS). A válvula de admissão está aberta e o êmbolo ao descer aspira o ar para dentro do cilindro.
- ❑ O êmbolo atinge o Ponto Morto Inferior (PMI), a válvula de admissão fecha, e inicia-se então a compressão. A temperatura do ar dentro do cilindro aumenta substancialmente devido à diminuição do volume.
- ❑ Pouco antes do PMS o combustível começa a ser pulverizado pelo ejetor em finas gotículas, misturando-se com o ar quente até que se dá a combustão. A combustão é controlada pela taxa de injeção de combustível, ou seja, pela quantidade de combustível que é injectado.
- ❑ A expansão começa após o PMS do êmbolo com a mistura (ar + combustível) na proporção certa para a combustão espontânea, onde o combustível continua a ser pulverizado até momentos antes do PMI.
- ❑ O ciclo termina com a fase de escape, onde o embolo retorna ao PMS, o que faz com que os gases de combustão sejam expulsos do cilindro, retomando assim o ciclo.

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Diesel - Diagramas



- 1 → 2 : Compressão isentrópica
- 2 → 3 : Fornecimento de calor a pressão constante (isobárico)
- 3 → 4 : Expansão isentrópica
- 4 → 1 : Cedência de calor a volume constante

Process	Energy Eq.
Compression	$u_2 - u_1 = -{}_1W_2$
Combustion	$u_3 - u_2 = q_H - {}_2W_3$
Expansion	$u_4 - u_3 = -{}_3W_4$
Heat rejection	$u_1 - u_4 = -q_L$

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Diesel - Trabalho e rendimento

Trabalho do ciclo: $W_{ciclo} = W_{1,2} + W_{2,3} + W_{3,4}$

Rendimento do ciclo: $\eta = \left(\frac{W_{ciclo}}{Q_{2,3}} \right)$

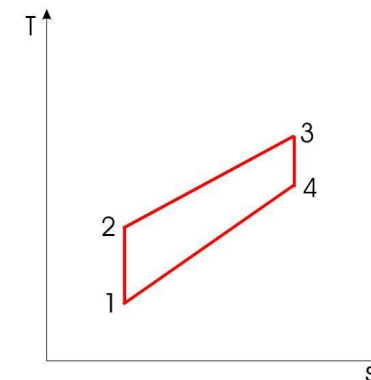
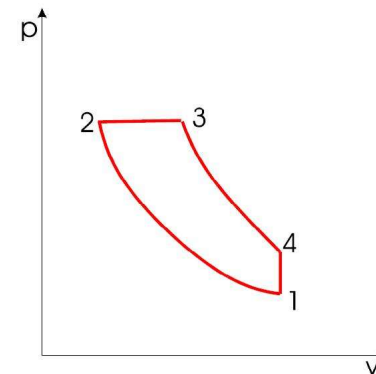
Pela 1ª. Lei da Termodinâmica, temos:

$$Q_H = u_3 - u_2 + \int_2^3 P dv = u_3 - u_2 + P_2(v_3 - v_2) = h_3 - h_2$$

O rendimento do ciclo Diesel é dado então por:

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \frac{(T_4/T_1 - 1)}{(T_3/T_2 - 1)}$$

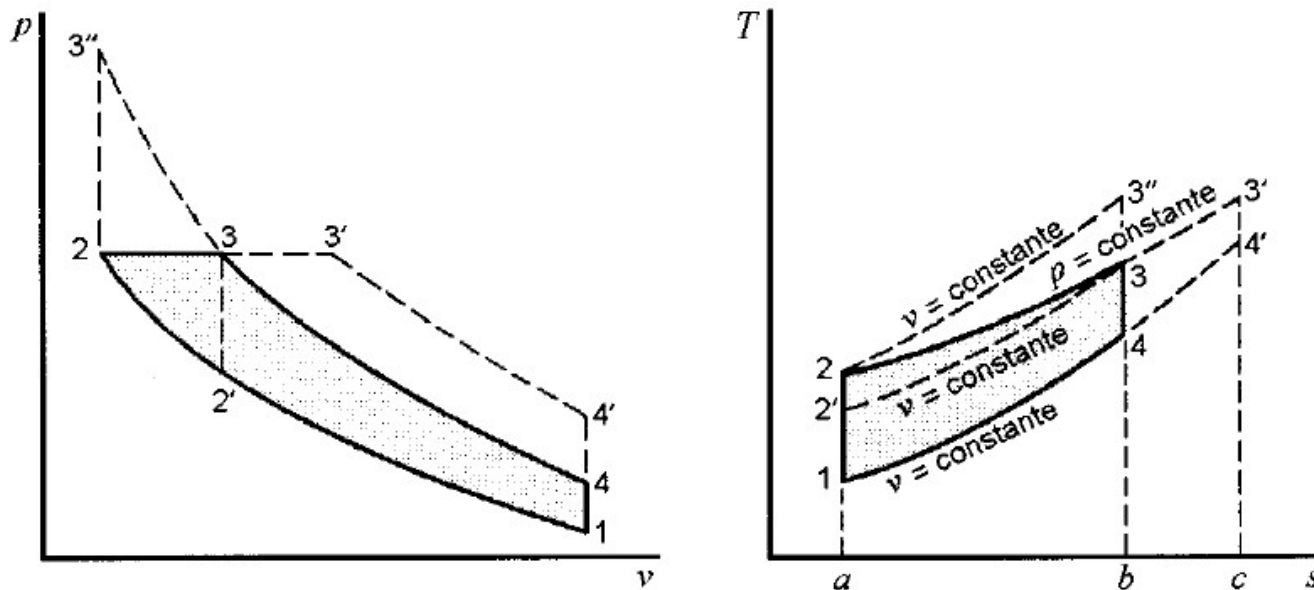
$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{kT_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto e Diesel – Comparativo

- ❑ Para um mesmo estado inicial e deslocamento do pistão, o ciclo **Otto apresentaria maior rendimento**.
- ❑ No entanto, na prática, consegue-se obter razões de compressão maiores com o motor diesel, daí ele ter maior rendimento.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto e Diesel – outras informações

- ❑ Comparação Motores diesel x Motores gasolina

<https://www.youtube.com/watch?v=o8Ybo8D5O2Q>



- ❑ Motor de Combustão Interna - comparação entre os ciclos Diesel e Otto

<https://www.youtube.com/watch?v=EriMTRQnXSE>



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Otto e Diesel – Motores Otto e Diesel





Exemplo 11.9

Cálculo ciclo Diesel

Um ciclo-padrão de ar Diesel apresenta relação de compressão igual a 20 e o calor transferido ao fluido de trabalho, por ciclo, é 1800 kJ/kg. Sabendo que no início do processo de compressão, a pressão é igual a 0,1 MPa e a temperatura é 15 °C, determine:

1. A pressão e a temperatura em cada ponto do ciclo;
2. O rendimento térmico;
3. A pressão média efetiva.



Exemplo 11.9

Cálculo ciclo Diesel

Modelo: Gás perfeito com calor específico constante e avaliado a 300 K.

Análise: Segunda lei da termodinâmica para o processo de compressão 1-2:

$$s_2 = s_1$$

Assim,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad \text{e} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

Primeira lei da termodinâmica para o processo de transferência de calor 2-3:

$$q_H = {}_2q_3 = c_p (T_3 - T_2)$$

Segunda lei para o processo de expansão 3-4:

$$s_4 = s_3$$

Assim,

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1}$$



Exemplo 11.9 Cálculo ciclo Diesel

Também,

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} \quad \text{e} \quad p_{\text{mef}} = \frac{w_{\text{liq}}}{(v_1 - v_2)}$$

Solução:

$$v_1 = \frac{0,287 \times 288,2}{100} = 0,827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{20} = \frac{0,827}{20} = 0,04135 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 20^{0,4} = 3,3145 \quad \Rightarrow \quad T_2 = 955,2 \text{ K}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = 20^{1,4} = 66,29 \quad \Rightarrow \quad p_2 = 6,629 \text{ MPa}$$

$$q_H = {}_2q_3 = c_p (T_3 - T_2) = 1800 \text{ kJ/kg}$$

$$T_3 - T_2 = \frac{1800}{1,004} = 1793 \quad \therefore \quad T_3 = 2748 \text{ K}$$

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.9

Cálculo ciclo Diesel

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{2748}{955,2} = 2,8769 \quad \therefore \quad v_3 = 0,11896 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} = \left(\frac{0,827}{0,11896} \right)^{0,4} = 2,1719 \quad \therefore \quad T_4 = 1265 \text{ K}$$

$$q_L = {}_4q_1 = c_v (T_1 - T_4) = 0,717 (288,2 - 1265) = -700,4 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{liq}} = 1800 - 700,4 = 1099,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{1099,6}{1800} = 61,1 \%$$

$$P_{\text{mef}} = \frac{w_{\text{liq}}}{(v_1 - v_2)} = \frac{1099,6}{(0,827 - 0,04135)} = 1400 \text{ kPa}$$



Exemplo 11.10

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Diesel

11.106 A temperatura e a pressão do ar antes do processo de compressão num motor diesel são iguais a 290 K e 95 kPa. Sabendo que a pressão e a temperatura máximas no ciclo são iguais a 6 MPa e 2400 K, determine a relação de compressão e a eficiência térmica do motor.

Compression process (isentropic) from Eqs.8.32-8.34:

$$(P_2/P_1) = (v_1/v_2)^k = CR^{1.4}$$

$$CR = v_1/v_2 = (P_2/P_1)^{1/k} = (6000/95)^{1/1.4} = \mathbf{19.32}$$

$$T_2 = T_1(P_2/P_1)^{k-1/k} = 290 \times (6000/95)^{0.2857} = 947.9 \text{ K}$$

Combustion and expansion volumes

$$v_3 = v_2 \times T_3/T_2 = v_1 T_3/(T_2 \times CR); \quad v_4 = v_1$$

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.10

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

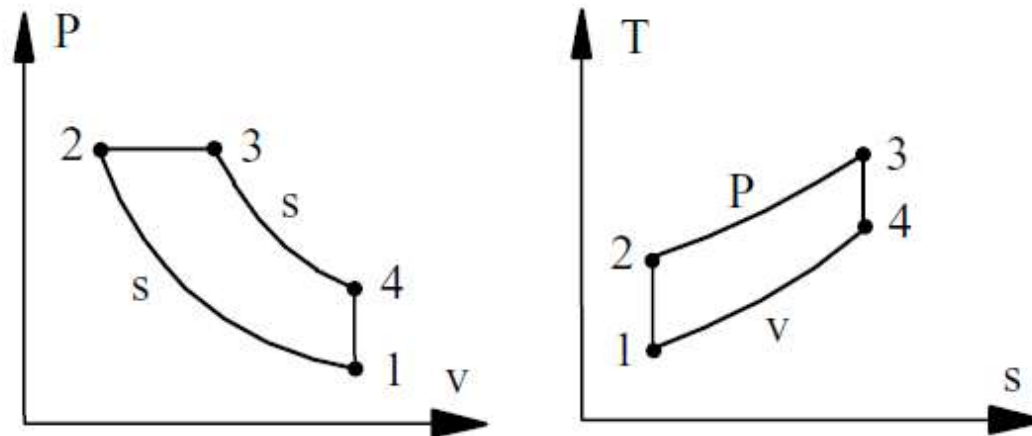
Cálculo ciclo Diesel

Expansion process, isentropic from Eq.8.32

$$\begin{aligned} T_4 &= T_3 (v_3/v_4)^{k-1} = T_3 [T_3 / (CR \times T_2)]^{k-1} \\ &= 2400 \times [2400 / (19.32 \times 947.9)]^{0.4} = 1064.6 \text{ K} \end{aligned}$$

Efficiency from Eq.11.7

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{1064.6 - 290}{2400 - 947.9} = \mathbf{0.619}$$





Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

61

Considere os motores movidos a óleo diesel de injeção direta na câmara de combustão, e os motores movidos a gasolina, nos quais há um bico injetor para cada cilindro e injeção no coletor de admissão, conhecidos como multi-ponto. Tais dados são acrescidos ao fato de que

- (A) a pressão de injeção do combustível deve ser alta o suficiente para pulverizar o jato e favorecer a turbulência, em função de a queima nos motores a gasolina ser espontânea.
- (B) a pressão de injeção deve ser maior que a pressão no tempo de compressão do motor, em decorrência de o combustível ser injetado dentro da câmara nos motores diesel.
- (C) a injeção da gasolina no coletor de admissão se dá a uma pressão abaixo da atmosférica, a fim de que o fluxo de ar presente no coletor de admissão possa arrastar o combustível.
- (D) a pressão de injeção da gasolina não deve ultrapassar a atmosférica em dez vezes seu valor ao nível do mar, para não haver detonação.
- (E) os motores a diesel equipados com velas de ignição têm bicos injetores cuja pressão de injeção pode ser menor do que os motores a diesel comuns.

PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2010): ENGENHEIRO(A)
DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA

54

O problema da detonação que pode ocorrer no motor de ignição por centelha deixa de ocorrer no motor Diesel.

PORQUE

Somente o ar é comprimido durante o curso de compressão do motor Diesel, ao contrário do motor de ignição por centelha, no qual uma mistura ar-combustível é comprimida.

Analisando-se as afirmações acima, conclui-se que

- (A) as duas afirmações são verdadeiras, e a segunda justifica a primeira.
- (B) as duas afirmações são verdadeiras, e a segunda não justifica a primeira.
- (C) a primeira afirmação é verdadeira, e a segunda é falsa.
- (D) a primeira afirmação é falsa, e a segunda é verdadeira.
- (E) as duas afirmações são falsas.

PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2011). ENGENHEIRO
JÚNIOR MECÂNICA



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

53

O ciclo padrão a ar Otto e o ciclo padrão a ar Diesel consistem em quatro processos.

Nesse contexto, considere as afirmativas a seguir.

- I - O processo de compressão isentrópica pertence a ambos os ciclos.
- II - O processo de fornecimento de calor a volume constante pertence a ambos os ciclos.
- III - O processo de expansão isentrópica pertence a ambos os ciclos.
- IV - O processo de rejeição de calor a volume constante pertence a ambos os ciclos.

Está correto o que se afirma **APENAS** em

- (A) I e II
- (B) II e III
- (C) III e IV
- (D) I, II e IV
- (E) I, III e IV

58

O objetivo da sobrealimentação nos motores a diesel é

- (A) aumentar a potência por unidade de cilindrada produzida pelo motor.
- (B) aumentar o resfriamento dos cilindros.
- (C) diminuir o consumo de combustível.
- (D) reduzir o nível de ruído do motor.
- (E) reduzir a pressão dentro dos cilindros.

PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2011): ENGENHEIRO
JÚNIOR MECÂNICA:

Introdução à Termodinâmica
GMEC 7611

Prof. Carlos Catunda

PROCESSO SELETIVO (PETROBRAS 2011). ENGENHEIRO(A)
DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR MECÂNICA



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercícios Teóricos

64

O rendimento térmico do ciclo padrão ar de Otto é dado pela expressão $\eta_t = 1 - r^{(1-k)}$, onde k é o expoente politrópico para o ar.

Para um motor cujo volume máximo deslocado por um pistão é de 488 cm^3 e o volume da câmara de combustão é igual a 61 cm^3 , o rendimento térmico é expressa por

- (A) $\eta_t = 1 - 0,875^{(1-k)}$
- (B) $\eta_t = 1 - 1,125^{(1-k)}$
- (C) $\eta_t = 1 - 7^{(1-k)}$
- (D) $\eta_t = 1 - 8^{(1-k)}$
- (E) $\eta_t = 1 - 9^{(1-k)}$

PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2012): ENGENHEIRO JÚNIOR MECÂNICA:

67

Um motor diesel de seis cilindros tem um volume total de 12,0 litros e taxa de compressão de 16:1.

Com base no ciclo padrão ar de Diesel, para esse motor, se a razão de corte é igual a 2,5, a razão entre o volume deslocado por um cilindro ao final do processo de fornecimento de calor a pressão constante, e o volume máximo desse mesmo cilindro é

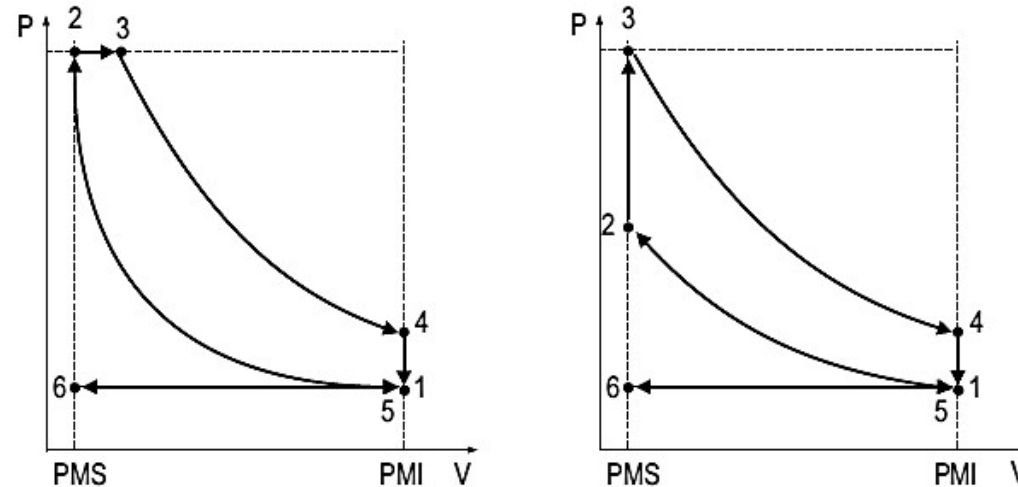
- (A) menor que 0,10
- (B) maior que 0,10 e menor que 0,12
- (C) maior que 0,12 e menor que 0,18
- (D) maior que 0,18 e menor que 0,20
- (E) maior que 0,20

PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2012): ENGENHEIRO JÚNIOR MECÂNICA.



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercícios Teóricos

63



As linhas 2-3 dos diagramas indicadores $P \times V$ do ciclo padrão ar de Otto e do ciclo padrão ar de Diesel correspondem respectivamente a

- (A) fornecimento de calor a volume constante e fornecimento de calor a pressão constante.
- (B) fornecimento de calor a pressão constante e rejeição de calor a volume constante.
- (C) fornecimento de calor a volume constante e compressão isobárica.
- (D) rejeição de calor a volume constante e rejeição de calor isentrópica.
- (E) compressão isentrópica e compressão isobárica.

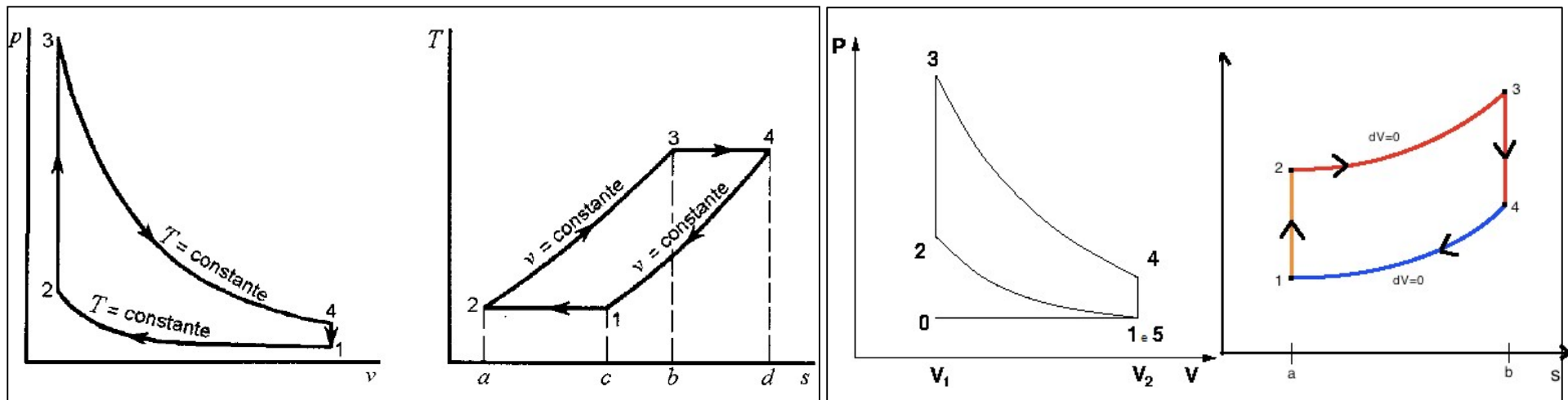
PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2012). ENGENHEIRO JÚNIOR MECÂNICA

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclos Stirling

Variação do ciclo Otto, onde os processos de compressão e expansão deixam de ser adiabáticos para serem isotérmicos

Dessa forma, nos processos de compressão e expansão também ocorre transferência de calor



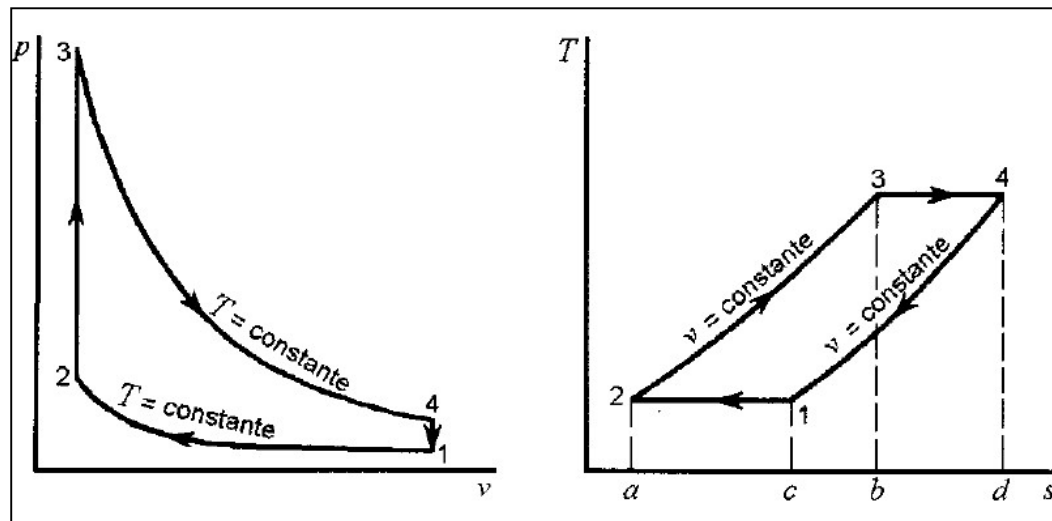
Ciclo Stirling

Ciclo Otto

Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

Ciclo Stirling

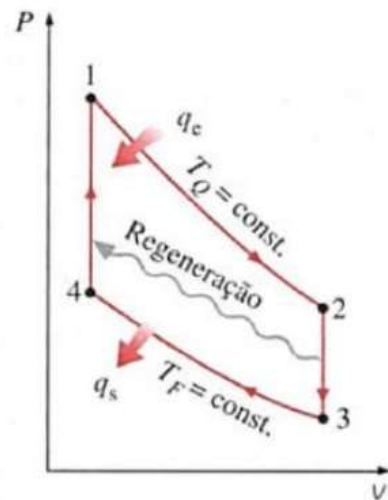
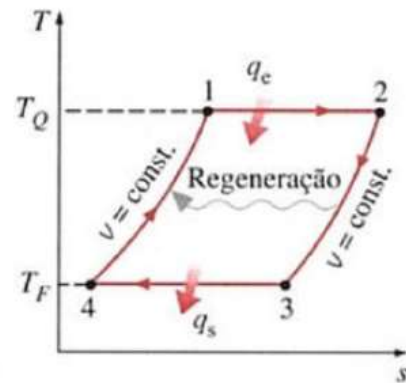
- ❑ O ciclo possui **regenerador**, ou seja, o calor recebido no processo 2-3 é igual ao calor transferido do gás no processo 4-1;
- ❑ Como todas as transferências de calor ocorrem em **processos isotérmicos**, a **eficiência desse ciclo é igual a eficiência do ciclo de Carnot** operando entre os mesmos reservatórios térmicos. Isso também se aplica ao ciclo de Ericsson.



Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

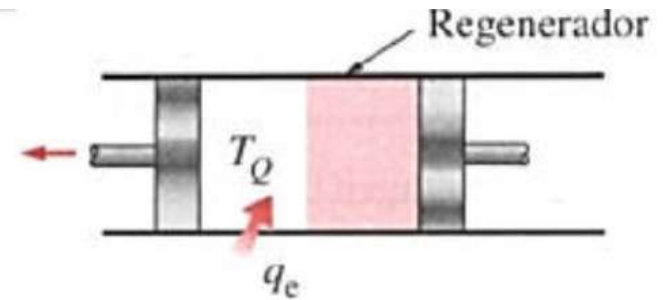
Ciclo Stirling

Implementação do Ciclo Stirling

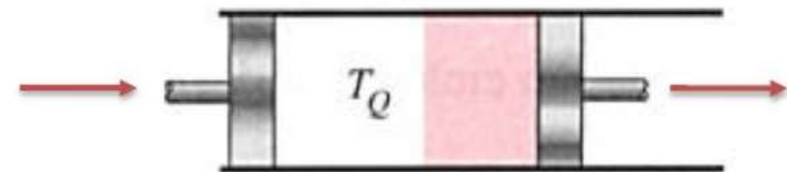


(b) Ciclo Stirling

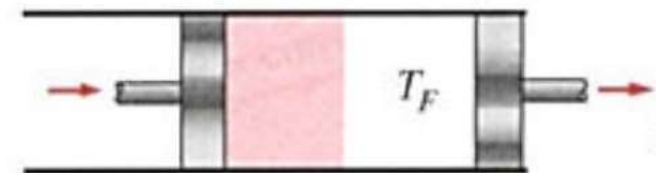
Estado 1



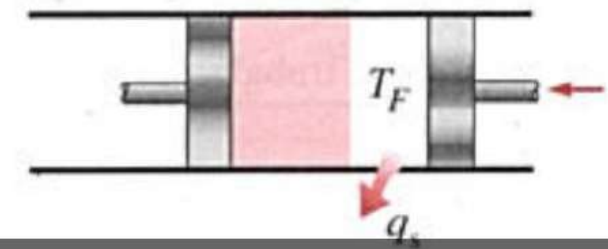
Estado 2



Estado 3

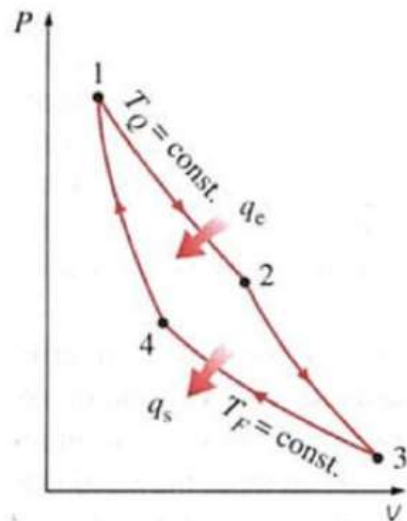
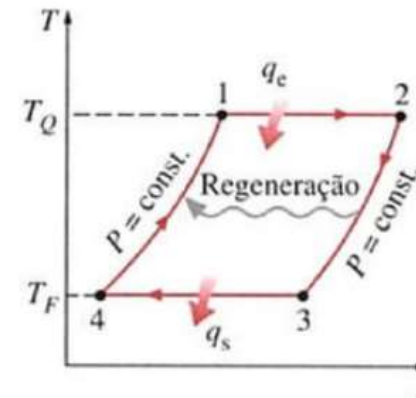
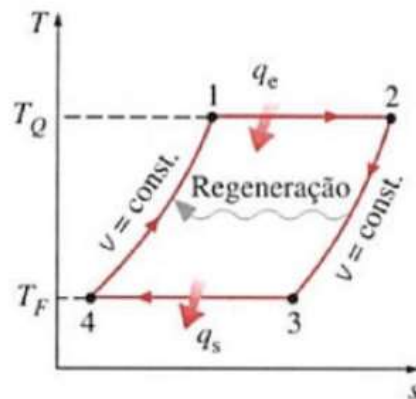
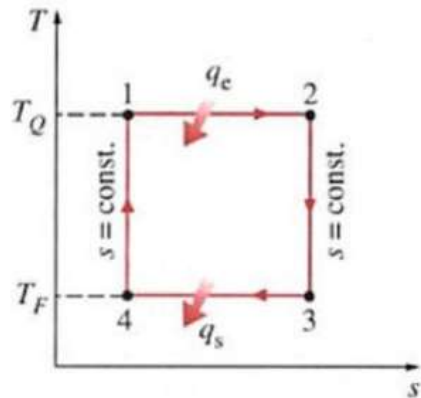


Estado 4

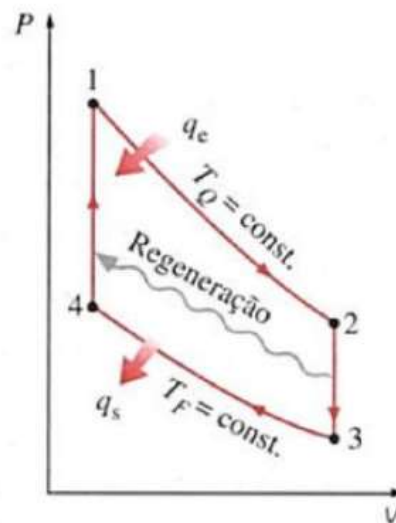


Capítulo 11 – Ciclos motores termodinâmicos

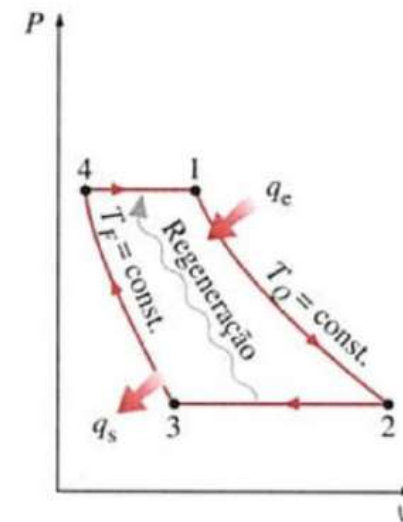
Comparativo: Carnot, Stirling, Ericsson



(a) Ciclo de Carnot



(b) Ciclo Stirling



(c) Ciclo Ericsson

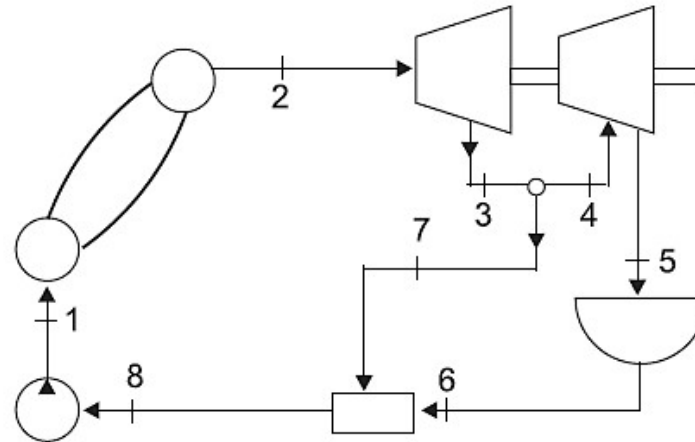


Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercícios Teóricos

66



O diagrama na figura acima representa o ciclo de

- (A) Stirling, e é empregado em turbinas a gás.
- (B) Stirling, e é empregado em motores alternativos.
- (C) Rankine com reaquecimento, e é empregado em turbinas a gás.
- (D) Rankine regenerativo, e é empregado em turbinas a vapor.
- (E) Brayton, e é empregado em motores alternativos.

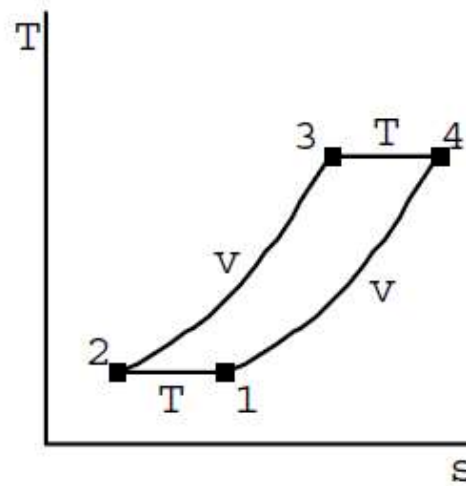
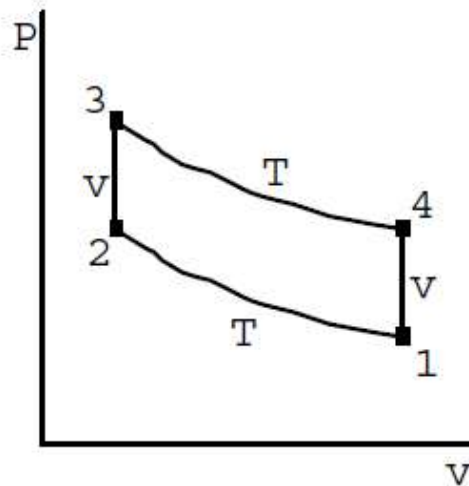
PROCESSO SELETIVO (TRANSPETRO 2012): ENGENHEIRO JÚNIOR MECÂNICA:



Exemplo 11.11 Cálculo ciclo Stirling

11.113 Considere um motor Stirling ideal no qual a pressão e a temperatura no início do processo de compressão isotérmica são iguais a 100 kPa e 25 °C. Sabendo que a relação de compressão é 6 e que a temperatura máxima do ciclo é 1100 °C, calcule:

- A pressão máxima do ciclo.
- O rendimento térmico do ciclo com e sem regeneradores.



Ideal Stirling cycle

$$T_1 = T_2 = 25 \text{ °C}$$

$$P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$CR = v_1/v_2 = 6$$

$$T_3 = T_4 = 1100 \text{ °C}$$



Exemplo 11.11 Cálculo ciclo Stirling

Isothermal compression (heat goes out)

$$T_1 = T_2 \Rightarrow P_2 = P_1(v_1/v_2) = 100 \times 6 = 600 \text{ kPa}$$

$${}_1w_2 = {}_1q_2 = -RT_1 \ln(v_1/v_2) = -0.287 \times 298.2 \ln(6) = -153.3 \text{ kJ/kg}$$

Constant volume heat addition

$$V_2 = V_3 \Rightarrow P_3 = P_2 T_3/T_2 = 600 \times 1373.2/298.2 = \mathbf{2763 \text{ kPa}}$$

$$q_{23} = u_3 - u_2 = C_{v_o}(T_3 - T_2) = 0.717 (1100 - 25) = 770.8 \text{ kJ/kg}$$

Isothermal expansion (heat comes in)

$$w_{34} = q_{34} = RT_3 \ln(v_4/v_3) = 0.287 \times 1373.2 \times \ln 6 = 706.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = 706.1 - 153.3 = 552.8 \text{ kJ/kg}$$

Efficiency without regenerator, (q_{23} and q_{34} are coming in from source)

$$\eta_{\text{NO REGEN}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{23} + q_{34}} = \frac{552.8}{770.8 + 706.1} = \mathbf{0.374},$$

Efficiency with regenerator, (Now only q_{34} is coming in from source)

$$\eta_{\text{WITH REGEN}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{34}} = \frac{552.8}{706.1} = \mathbf{0.783}$$

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.12

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Stirling

11.115 Considere um ciclo padrão a ar Stirling ideal com um regenerador ideal. A pressão e a temperatura mínimas do ciclo são 100 kPa e 25 °C, a relação de compressão é 10 e a temperatura máxima no ciclo é 1000 °C. Analise as interações trabalho e calor em cada um dos quatro processos deste ciclo e determine o rendimento térmico global do motor.



Exemplo 11.12

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Stirling

Ideal Stirling cycle diagram as in Fig. 11.31, with

$$P_1 = 100 \text{ kPa}, \quad T_1 = T_2 = 25^\circ\text{C}, \quad v_1/v_2 = 10, \quad T_3 = T_4 = 1000^\circ\text{C}$$

$$\text{From 1-2 at const } T: \quad {}_1w_2 = {}_1q_2 = T_1(s_2 - s_1)$$

$$= -RT_1 \ln(v_1/v_2) = -0.287 \times 298.2 \times \ln(10) = -197.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{From 2-3 at const } V: \quad {}_2w_3 = \mathbf{0}$$

$$q_{23} = C_{v0}(T_3 - T_2) = 0.717 (1000 - 25) = \mathbf{699 \text{ kJ/kg}}$$

$$\text{From 3-4 at const } T; \quad {}_3w_4 = {}_3q_4 = T_3(s_4 - s_3)$$

$$= +RT_3 \times \ln \frac{v_4}{v_3} = 0.287 \times 1237.2 \times \ln(10) = \mathbf{841.4 \text{ kJ/kg}}$$

[Tabela A.5](#)



Exemplo 11.12

Estudo Dirigido - Atividade em grupo (em sala)

Cálculo ciclo Stirling

From 4-1 at const V; ${}_4w_1 = 0$

$$q_{41} = C_{V0}(T_1 - T_4) = 0.717 (25 - 1000) = -699 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{NET}} = -197.1 + 0 + 841.4 + 0 = 644.3 \text{ kJ/kg}$$

Since q_{23} is supplied by $-q_{41}$ (regenerator)

$$q_H = q_{34} = 841.4 \text{ kJ/kg}, \quad \eta_{\text{TH}} = \frac{w_{\text{NET}}}{q_H} = \frac{644.3}{841.4} = 0.766$$

NOTE: $q_H = q_{34} = RT_3 \times \ln(10)$, $q_L = -{}_1q_2 = RT_1 \times \ln(10)$

$$\eta_{\text{TH}} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} = \frac{975}{1273.2} = 0.766 = \text{Carnot efficiency}$$



Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon John.
Fundamentos da termodinâmica. São Paulo: E. Blücher, 6^{ed}

Capítulo 11								
Ciclos de Potência	11.22	11.24	11.26	11.32	11.37	11.38		
Ciclo Otto	11.94	11.95	11.96	11.97	11.99	11.101	11.102	11.105
Ciclo Diesel	11.107	11.108	11.109	11.110	11.111	11.112		
Ciclo Stirling	11.114	11.117	11.118					
Ciclo Brayton	11.68	11.70	11.71	11.72	11.75			
Ciclo Ericsson	11.85	11.86						
Ciclos de Refrigeração	11.119	11.120	11.121	11.124	11.125	11.129	11.131	



Capítulo 12 – Relações Termodinâmicas

Objetivos:

- ≡ Desenvolver as relações termodinâmicas gerais
- ≡ Estudar as propriedades termodinâmicas da função de Helmholtz e Gibbs
- ≡ Estudar as equações generalizadas e as Funções de Estado

Capítulo 12 – Relações Termodinâmicas

Ao final desta etapa, o estudante deverá ser capaz de :

- Interpretar corretamente as hipóteses utilizadas para derivar a equação de Clapeyron.
- Utilizar a equação de Clapeyron nas três fronteiras de fase.
- Reconhecer o significado físico das derivadas parciais.
- Reconhecer a importância das relações de Maxwell e das outras relações entre propriedades apresentadas.
- Interpretar o significado das relações utilizadas no desenvolvimento das expressões que fornecem as variações de h , u e s .
- Reconhecer que os coeficiente de expansão linear e as compressibilidades são úteis na descrição de certos processos.
- Entender porque a velocidade do som é uma propriedade termodinâmica.
- Utilizar várias equações de estado.



Exemplo

Relações Termodinâmicas

A Equação de Clayperon

Determine a pressão de saturação do vapor d'água a -60°C utilizando os dados fornecidos pelas tabelas de vapor. (Ex 13.1-VW6^aed)

Solução: A Tab. B.1.5 do Apêndice não fornece as pressões de saturação para temperaturas menores do que -40°C . Entretanto, notamos que h_{sv} é relativamente constante nessa faixa e, portanto, vamos utilizar a Eq. 13.7 e a integraremos entre os limites -40°C e -60°C

$$\int_1^2 \frac{dp}{p} = \int_1^2 \frac{h_{iv}}{R} \frac{dT}{T^2} = \frac{h_{iv}}{R} \int_1^2 \frac{dT}{T^2}$$

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{h_{iv}}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

Como $p_2 = 0,0129 \text{ kPa}$, $T_2 = 233,2 \text{ K}$ e $T_1 = 213,2 \text{ K}$, temos

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{2838,9}{0,46152} \left(\frac{233,2 - 213,2}{233,2 \times 213,2} \right) = 2,4744$$

$$p_1 = 0,00109 \text{ kPa}$$



Exemplo

Expansividade Volumétrica e Compressibilidades Isotérmica e Adiabática

A pressão sobre um bloco de cobre, que apresenta massa de 1kg, é elevada, em um processo isotérmico e reversível, de 0,1MPa a 100MPa. Sabendo que a temperatura do bloco é 15°C, determine o trabalho efetuado sobre o cobre durante este processo, a variação de entropia por quilograma de cobre, o calor transferido e a variação de energia interna por quilograma de cobre nessa mudança de estado. Nas faixas de pressão e temperatura envolvidas neste problema, considere: (Ex 13.4-VW6^aed).

1. Expansividade volumétrica: $\alpha=5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
2. Compressibilidade isotérmica = $\beta=8,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$;
3. Volume específico = $0,000114 \text{ m}^3/\text{kg}$.



Exemplo

Expansividade Volumétrica e Compressibilidades Isotérmica e Adiabática

Análise: O trabalho realizado durante a compressão isotérmica reversível

$$w = \int p \, dv_T$$

A compressibilidade isotérmica foi definida por

$$\beta_T \equiv -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

$$v \beta_T \, dp_T = -dv_T$$

Portanto, para este processo isotérmico,

$$w = -\int_1^2 v \beta_T \, p \, dp_T$$

Como v e β_T permanecem praticamente constantes, podemos integrar a equ

$$w = -\frac{v \beta_T}{2} (p_2^2 - p_1^2)$$

A variação de entropia pode ser determinada a partir da relação de Maxwell Eq. 13.19 e da definição de expansividade volumétrica.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = -\frac{v}{T} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = -v \alpha_p$$
$$ds_T = -v \alpha_p \, dp_T$$

Esta equação pode ser facilmente integrada se admitirmos que v e α_p são constantes. Des

$$(s_2 - s_1)_T = -v \alpha_p (p_2 - p_1)_T$$

O calor transferido durante este processo isotérmico reversível é:

$$q = T (s_2 - s_1)$$

A variação da energia interna pode ser calculada a partir da primeira lei. Assim,

$$(u_2 - u_1) = q - w$$

Solução:

$$w = -\frac{v \beta_T}{2} (p_2^2 - p_1^2) = -\frac{1,14 \times 10^{-4} \times 8,6 \times 10^{-12}}{2} (100^2 - 0,1^2) \times 10^{12} = -4,9 \text{ J/kg}$$

$$(s_2 - s_1)_T = -v \alpha_p (p_2 - p_1)_T = 1,14 \times 10^{-4} \times 5,0 \times 10^{-5} (100 - 0,1) \times 10^6 = -0,5694 \text{ J/kg K}$$

$$q = T (s_2 - s_1) = -288,2 \times 0,5694 = -164,1 \text{ J/kg}$$

$$(u_2 - u_1) = q - w = -164,1 - (-4,9) = -159,2 \text{ J/kg}$$



Exemplo

Diagrama Generalizado para Variações de Entalpia a Temperatura Constante

Nitrogênio é estrangulado de 20MPa, -70°C , até 2MPa num processo adiabático e em regime permanente. Determine a temperatura final do nitrogênio. (Ex 13.5-VW6^{aed})

Solução: Utilizando os valores da Tab. A.2, obtemos

$$\begin{aligned} p_1 &= 20 \text{ MPa} & p_{r1} &= \frac{20}{3,39} = 5,9 \\ T_1 &= 203,2 \text{ K} & T_{r1} &= \frac{203,2}{126,2} = 1,61 \\ p_2 &= 2 \text{ MPa} & p_{r2} &= \frac{2}{3,39} = 0,59 \end{aligned}$$

O diagrama generalizado, Fig. D.2, fornece a variação de entalpia a temperatura constante.

$$\begin{aligned} \frac{h_1^* - h_1}{RT_c} &= 2,1 \\ h_1^* - h_1 &= 2,1 \times 0,2968 \times 126,2 = 78,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

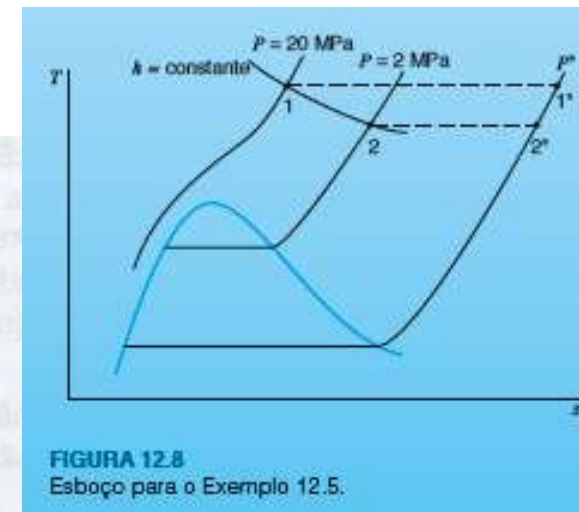


FIGURA 12.8
Esboço para o Exemplo 12.5.



Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

13.21 Um certo processo requer que o refrigerante R-12 esteja no estado de vapor saturado a $-140\text{ }^\circ\text{C}$. Sabendo que a temperatura do ponto triplo é igual a $-157\text{ }^\circ\text{C}$, determine a pressão e o volume específico do vapor no estado indicado.

13.47 O som se propaga no meio como ondas de pressão. Estas ondas podem ser modeladas como uma seqüência de processos de compressão e expansão isoentrópicas. A velocidade do som, c , é definida por $c^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$ e pode ser relacionada com a compressibilidade adiabática. Sabendo que a compressibilidade adiabática do etanol líquido a $20\text{ }^\circ\text{C}$ é igual a $940\text{ }\mu\text{m}^2/\text{N}$, determine a velocidade do som nesta temperatura.





Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Exercícios Van Wylen - 6ed					
Capítulo 13					
Equação de Clayperon	13.21	13.22	13.26	13.30	
Relações entre Propriedades	13.34	13.35	13.40		
Expansividade Volumétrica e Compressibilidade	13.41	13.42	13.47	13.48	13.51
Equações de Estado	13.53	13.55	13.66	13.67	
Diagramas Generalizados	13.69	13.72	13.76		
Misturas					

Apêndice A

Propriedades Gerais

Tabela A.1

Fatores de Conversão

Aceleração da gravidade

$g = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$

$g = 32,174\ 05\ \text{ft/s}^2$

Área (A)

$1\ \text{mm}^2 = 1,0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$

$1\ \text{ft}^2 = 144\ \text{in}^2$

$1\ \text{cm}^2 = 1,0 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 = 0,1550\ \text{in}^2$

$1\ \text{in}^2 = 6,4516\ \text{cm}^2 = 6,4516 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$

$1\ \text{m}^2 = 10,7639\ \text{ft}^2$

$1\ \text{ft}^2 = 0,092\ 903\ \text{m}^2$

Calor específico (C_p , C_v , C), entropia específica(s)

$1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0,238\ 846\ \text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/lbm}\cdot\text{°R)} = 4,1868\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$

Coeficiente de transferência de calor

$1\ \text{W/m}^2\cdot\text{K} = 0,176\ 11\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°R)} = 5,678\ 26\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$

Comprimento

$1\ \text{mm} = 0,001\ \text{m} = 0,1\ \text{cm}$

$1\ \text{ft} = 12\ \text{in}$

$1\ \text{cm} = 0,01 = 10\ \text{mm} = 0,3937\ \text{in}$

$1\ \text{in} = 2,54\ \text{cm} = 0,0254\ \text{m}$

$1\ \text{m} = 3,280\ 84\ \text{ft} = 39,370\ \text{in}$

$1\ \text{ft} = 0,3048\ \text{m}$

$1\ \text{km} = 0,621\ 371\ \text{mi}$

$1\ \text{mi} = 1,609\ 344\ \text{km}$

$1\ \text{mi} = 1609,3\ \text{m (US statute)}$

$1\ \text{yd} = 0,9144\ \text{m}$

Condutividade térmica

$1\ \text{W/m}\cdot\text{K} = 1\ \text{J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{K} = 0,577\ 789\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°R)} = 1,730\ 735\ \text{W/m}\cdot\text{K}$

Constante universal dos gases

$\bar{R} = N_A k = 8,314\ 51\ \text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$

$\bar{R} = 1,985\ 89\ \text{Btu/lbmol}\cdot\text{R}$

$= 1,985\ 89\ \text{kcal/kmol}\cdot\text{K}$

$= 1545,36\ \text{lb}\cdot\text{ft/lbmol}\cdot\text{R}$

$= 82,0578\ \text{atm}\cdot\text{L/kmol}\cdot\text{K}$

$= 0,730\ 24\ \text{atm}\cdot\text{ft}^3/\text{lbmol}\cdot\text{R}$

$= 10,7317\ (\text{lb}\cdot\text{ft}^2/\text{in}^2)\cdot\text{ft}^3/\text{lbmol}\cdot\text{R}$

Energia

$1\ \text{J} = 1\ \text{N}\cdot\text{m} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

$1\ \text{ft}\cdot\text{ft} = 1,355818$

$1\ \text{J} = 0,737\ 562\ \text{ft}\cdot\text{ft}$

$\text{J} = 1,285\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu}$

$1\ \text{cal (Int.)} = 4,186\ 81\ \text{J}$

$1\ \text{erg} = 1,0 \times 10^{-7}\ \text{J}$

$1\ \text{Btu (Int.)} = 1,055\ 056\ \text{kJ}$

$1\ \text{eV} = 1,602\ 177\ 33 \times 10^{-19}\ \text{J}$

$= 778,1693\ \text{ft}\cdot\text{ft}$

Energia específica (e, u)

$1\ \text{kJ/kg} = 0,429\ 92\ \text{Btu/lbm}$

$1\ \text{Btu/lbm} = 2,326\ \text{kJ/kg}$

$= 334,55\ \text{ft}\cdot\text{ft/lbm}$

$1\ \text{ft}\cdot\text{ft/lbm} = 2,989\ 07 \times 10^{-3}\ \text{kJ/kg}$
 $= 1,285\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu/lbm}$

Energia cinética específica ($1/2 V^2$)

$1\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 0,001\ \text{kJ/kg}$

$1\ \text{ft}^2/\text{s}^2 = 3,9941 \times 10^{-5}\ \text{Btu/lbm}$

$1\ \text{kJ/kg} = 1000\ \text{m}^2/\text{s}^2$

$1\ \text{Btu/lbm} = 250\ 37\ \text{ft}^2/\text{s}^2$

Energia potencial específica (Zg)

$1\ \text{m} - \text{gstd} = 9,806\ 65 \times 10^{-3}\ \text{kJ/kg}$

$1\ \text{ft} - \text{gstd} = 1,0\ \text{ft}\cdot\text{ft/lbm}$

$= 4,216\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu/lbm}$

$= 0,001\ 285\ \text{Btu/lbm}$

$= 0,002\ 989\ \text{kJ/kg}$

Fluxo de calor

$1\ \text{W/m}^2 = 0,316\ 998\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2 = 3,154\ 59\ \text{W/m}^2$

Força (F)

$1\ \text{N} = 0,224\ 809\ \text{lbf}$

$1\ \text{lbf} = 4,448\ 222\ \text{N}$

$1\ \text{kgf} = 9,806\ 65\ \text{N (1 kgf)}$

Massa

$1\ \text{kg} = 2,204\ 623\ \text{lbm}$

$1\ \text{lbm} = 0,453\ 592\ \text{kg}$

$1\ \text{ton} = 1000\ \text{kg}$

$1\ \text{slug} = 14,5939\ \text{kg}$

$1\ \text{grain} = 6,479\ 89 \times 10^{-5}\ \text{kg}$

$1\ \text{ton} = 2000\ \text{lbm}$

Massa específica

$1\ \text{kg/m}^3 = 0,062\ 427\ 97\ \text{lbm/ft}^3$

$1\ \text{lbm/ft}^3 = 16,018\ 46\ \text{kg/m}^3$

$1\ \text{g/cm}^3 = 1000\ \text{kg/m}^3$

$1\ \text{g/cm}^3 = 1\ \text{kg/L}$

Momento (Torque, τ)

$1\ \text{N}\cdot\text{m} = 0,737\ 562\ \text{lbm}\cdot\text{ft}$

$1\ \text{lbm}\cdot\text{ft} = 1,355\ 818\ \text{N}\cdot\text{m}$

Potência (\dot{Q} , \dot{W})

$1\ \text{W} = 1\ \text{J/s} = 1\ \text{N}\cdot\text{m/s}$

$1\ \text{lbf}\cdot\text{ft/s} = 1,355\ 818\ \text{W}$

$= 0,737\ 562\ \text{lbf}\cdot\text{ft/s}$

$= 4,626\ 24\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{kW} = 3412,14\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{Btu/s} = 1,055\ 056\ \text{kW}$

$1\ \text{hp (métrico)} = 0,735\ 499\ \text{kW}$

$1\ \text{hp (UK)} = 0,7457\ \text{kW}$

$1\ \text{ton de refrigeração} = 3,516\ 85\ \text{kW}$

$= 550\ \text{lbf}\cdot\text{ft/s}$

$= 2544,43\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{ton de refrigeração} = 12\ 000\ \text{Btu/h}$

Pressão (P)	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m·s ²	1 lbf/in ² = 6,894 757 kPa
1 bar = 1,0 × 10 ⁵ Pa = 100 kPa	
1 atm = 101,325 kPa	1 atm = 14,695 94 lbf/in ²
= 1,013 25 bar	= 29 921 in Hg [32 °F]
= 760 mm Hg [0 °C]	= 33,8995 ft H ₂ O [4 °C]
= 10,332 56 m H ₂ O [4 °C]	
1 torr = 1 mm Hg [0 °C]	
1 mm Hg [0 °C] = 0,133 322 kPa	1 in Hg [0 °C] = 0,491 15 lbf/in ²
1 m H ₂ O [4 °C] = 0,806 38 kPa	1 in H ₂ O [4 °C] = 0,0361 26 lbf/in ²
Quantidade de movimento (mV)	
1 kg·m/s = 7,232 94 lbf·ft/s	1 lbf·ft/s = 0,138 256 kg·m/s
= 0,224 809 lbf·s	
Temperatura (T)	
1 K = 1 °C = 1,8 R = 1,8 F	1 R = (5/9) K
TC = TK - 273,15	TF = TR - 459,67
= (TF - 32)/1,8	= 1,8 TC + 32
TK = TR/1,8	TR = 1,8 TK
Velocidade (V)	
1 m/s = 3,6 km/h	1 ft/s = 0,681 818 m/h
= 3,280 84 ft/s	= 0,3048 m/s
= 2,236 94 mi/h	= 1,097 28 km/h
1 km/h = 0,277 78 m/s	1 mi/h = 1,466 67 ft/s
= 0,911 34 ft/s	= 0,447 04 m/s
= 0,621 37 m/h	= 1,609 344 km/h
Volume específico (V)	
1 cm ³ /g = 0,001 m ³ /kg	
1 cm ³ /g = 1 L/kg	
1 m ³ /kg = 161 846 ft ³ /lbm	1 ft ³ /lbm = 0,062 428 m ³ /kg
Volume (V)	
1 m ³ = 35,3147 ft ³	1 ft ³ = 2,831 685 × 10 ⁻² m ³
1 L = 1 dm ³ = 0,001 m ³	1 in. ³ = 1,6387 × 10 ⁻⁵ m ³
1 Gal (US) = 3,785 412 L	1 Gal (UK) = 4,546 090 L
= 3,785 412 × 10 ⁻³ m ³	1 Gal (US) = 231,00 in. ³

Tabela A.2

Constantes críticas

Substância	Fórmula	Peso molecular	Temperatura K	Pressão MPa	Volume m ³ /kg
Amônia	NH ₃	17,031	405,5	11,35	0,00426
Argônio	Ar	39,948	150,8	4,87	0,00188
Bromo	Br ₂	159,808	588	10,30	0,000796
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	304,1	7,38	0,00212
Monóxido de carbono	CO	28,01	132,9	3,50	0,00333
Cloro	Cl ₂	70,906	416,9	7,98	0,00175
Fúor	F ₂	37,997	144,3	5,22	0,00174
Hélio	He	4,003	145,19	0,227	0,0143
Hidrogênio (normal)	H ₂	2,016	33,2	1,30	0,0323
Criptônio	Kr	83,80	209,4	5,50	0,00109
Neônio	Ne	20,183	44,4	2,76	0,00206
Óxido nítrico	NO	30,006	180	6,48	0,00192
Nitrogênio	N ₂	28,013	126,2	3,39	0,0032
Dióxido de nitrogênio	NO ₂	46,006	431	10,1	0,00365
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	308,6	7,24	0,00221
Oxigênio	O ₂	31,999	154,6	5,04	0,00229
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	430,8	7,88	0,00191
Água	H ₂ O	18,015	647,3	22,12	0,00317
Xenônio	Xe	131,30	289,7	5,84	0,000902
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	308,3	6,14	0,00433
Benzeno	C ₆ H ₆	78,114	562,2	4,89	0,00332
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	425,2	3,80	0,00439
Difluorocloroetano (142b)	CH ₂ ClCF ₂	100,495	410,3	4,25	0,00230
Difluoroclorometano (22)	CHClF ₂	86,469	369,3	4,97	0,00191
Diclorofluoreetano (141)	CH ₂ Cl ₂ F	116,95	481,5	4,54	0,00215
Diclorodifluoreetano (123)	CHCl ₂ CF ₃	152,93	456,9	3,66	0,00182
Difluoreetano (152a)	CHF ₂ CH ₃	66,05	386,4	4,52	0,00272
Difluorometano (32)	CF ₂ H ₂	52,024	351,3	5,78	0,00236
Etano	C ₂ H ₆	30,070	305,4	4,88	0,00493
Álcool etílico (etanol)	C ₂ H ₅ OH	46,069	513,9	6,14	0,00363
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	282,4	5,04	0,00465
n-Heptano	C ₇ H ₁₆	100,205	540,3	2,74	0,00431
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,178	507,5	3,01	0,00429
Metano	CH ₄	16,043	190,4	4,60	0,00615
Álcool metílico (metanol)	CH ₃ OH	32,042	512,6	8,09	0,00368
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	568,8	2,49	0,00431
Pentadifluoreetano (125)	CHF ₂ CF ₃	120,022	339,2	3,62	0,00176
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	72,151	469,7	3,37	0,00421
Propano	C ₃ H ₈	44,094	369,8	4,25	0,00454
Propeno	C ₃ H ₆	42,081	364,9	4,60	0,00430
Refrigerante misto	R-410a	72,585	344,5	4,90	0,00218
Tetrafluoreetano (134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	374,2	4,06	0,00197

Tabela A.3

Propriedades de alguns sólidos a 25 °C

Sólido	ρ , (kg/m ³)	C_p , (kJ/kg K)
Acrílico	1180	1,44
Areia (seca)	1500	0,8
Astato	2120	0,92
Borracha (maia)	1100	1,67
Carbono, diamante	3250	0,51
Carbono, grafite	2000-2500	0,61
Carvão	1200-1500	1,26
Concreto	2200	0,88
Gelo (0 °C)	917	2,04
Granito	2750	0,89
Lã	100	1,72
Lã de vidro	20	0,66
Madeira dura	720	1,26
Madeira mole (pinho)	510	1,38
Neve, firme	560	2,1
Papel	700	1,2
Poliestireno	920	2,3
PVC	1380	0,96
Sal, rocha	2100-2500	0,92
Silício	2330	0,70
Tijolo (comum)	1800	0,84
Vidro	2500	0,80
Metais		
Aço (AISI304)	7820	0,46
Alumínio	2700	0,90
Chumbo	113 40	0,13
Cobre comercial	8300	0,42
Estanho	7304	0,22
Ferro fundido	7272	0,42
Latão, 60-40	8400	0,38
Magnésio, 2% Mn	1778	1,00
Níquel, 10% Cr	8666	0,44
Ouro	193 00	0,13
Prata, 99,9% Ag	105 24	0,24
Sódio	971	1,21
Tungstênio	193 00	0,13
Zinco	7144	0,39

Tabela A.4

Propriedades de alguns líquidos a 25 °C

Líquido	ρ , kg/m ³	C_p , kJ/kg K
Água	4,18	997
Amônia	4,84	604
Benzeno	1,72	879
Butano	2,47	556
CCL ₄	0,83	1584
CO ₂	2,9	680
Etanol	2,46	783
Gasolina	2,08	750
Glicerina	2,42	1260
Metanol	2,55	787
n-Octano	2,23	692
Óleo (leve)	1,8	910
Óleo de motor	1,9	885
Propano	2,54	510
Querosene	2,0	815
R-12	0,97	1310
R-125	1,41	1191
R-134a	1,43	1206
R-22	1,26	1190
R-32	1,94	961
R-410a	1,69	1059
Metais líquidos		
Bismuto, Bi	100 40	0,14
Chumbo, Pb	106 60	0,16
Estanho, Sn	6950	0,24
Mercúrio, Hg	135 80	0,14
Na K (56/44)	887	1,13
Potássio, K	828	0,81
Sódio, Na	929	1,38
Zinco, Zn	6570	0,50

* Ou à temperatura de fusão, caso seja maior que 25 °C.

Tabela A.5

Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	ρ (kg/m ³)	C_{p0} kJ/kg K	C_{v0} kJ/kg K	$k = C_p/C_v$
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H ₂ O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH ₃	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,399
Etano	C ₂ H ₆	30,07	0,2785	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH ₄	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH ₃ OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,23	0,07279	0,092	1,711	1,638	1,044
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	1,292	0,922	0,662	1,393
Propano	C ₃ H ₈	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl ₂ F ₂	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	CHClF ₂	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF ₂ H ₂	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF ₂ CF ₃	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
R-410a		72,585	0,11455	2,967	0,809	0,694	1,165
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Trióxido de enxofre	SO ₃	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

* Ou na pressão de saturação, se esta for menor que 100 kPa.

Tabela A.6

Calor específico a pressão constante de vários gases ideais em função da temperatura*

Gás	Fórmula	$C_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ (kJ/kg K)				$\theta = T$ (Kelvin)/1000
		C0	C1	C2	C3	
Acetileno	C ₂ H ₂	1,03	2,91	-1,92	0,54	
Água (vapor)	H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,20	
Amônia	NH ₃	1,60	1,4	1,0	-0,7	
Ar		1,05	-0,365	0,85	-0,39	
Argônio	Ar	0,52	0	0	0	
Butano	C ₄ H ₁₀	0,163	5,70	-1,906	-0,049	
Dióxido de carbono	CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39	
Dióxido de enxofre	SO ₂	0,37	1,05	-0,77	0,21	
Etano	C ₂ H ₆	0,18	5,92	-2,31	0,29	
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0,2	4,65	-1,82	0,03	
Etileno	C ₂ H ₄	0,136	5,58	-3,0	0,63	
Hélio	He	5,193	0	0	0	
Hidrogênio	H ₂	13,46	4,6	-6,85	3,79	
Metano	CH ₄	1,2	3,25	0,75	-0,71	
Metanol	CH ₃ OH	0,66	2,21	0,81	-0,89	
Monóxido de carbono	CO	1,10	-0,46	1,0	-0,454	
Neônio	Ne	1,03	0	0	0	
Nitrogênio	N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42	
n-Octano	C ₈ H ₁₈	-0,053	6,75	-3,67	0,775	
Óxido nítrico	NO	0,98	-0,031	0,325	-0,14	
Óxido nítrico	N ₂ O	0,49	1,65	-1,31	0,42	
Oxigênio	O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33	
Propano	C ₃ H ₈	-0,096	6,95	-3,6	0,73	
R-12 [†]	CCl ₂ F ₂	0,26	1,47	-1,25	0,36	
R-22 [†]	CHClF ₂	0,2	1,87	-1,35	0,35	
R-32 [†]	CF ₂ H ₂	0,227	2,27	-0,93	0,041	
R-125 [†]	CHF ₂ CF ₃	0,305	1,68	-0,284	0	
R-134a [†]	CF ₃ CH ₂ F	0,165	2,81	-2,23	1,11	
Trióxido de enxofre	SO ₃	0,24	1,7	-1,5	0,46	

* Equações proporcionam resultados válidos na faixa de 260 K a 1200 K.

† Equações aplicáveis para temperaturas de, no máximo, 500 K.

[Ex.11.3](#)[Ex.11.5](#)[Ex.11.7](#)[Ex.11.9](#)[Ex.11.11](#)[Ex.11.4](#)[Ex.11.6](#)[Ex.11.8](#)[Ex.11.10](#)[Ex.11.12](#)

Tabela A.7.1

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 ^o (kJ/kg × K)
200	142,77	200,17	6,46260
220	157,07	220,22	6,55812
240	171,38	240,27	6,64535
260	185,70	260,32	6,72562
280	200,02	280,39	6,79998
290	207,19	290,43	6,83521
298,15	213,04	298,62	6,86305
300	214,36	300,47	6,86926
320	228,73	320,58	6,93413
340	243,11	340,70	6,99515
360	257,53	360,86	7,05276
380	271,99	381,06	7,10735
400	286,49	401,30	7,15926
420	301,04	421,59	7,20875
440	315,64	441,93	7,25607
460	330,31	462,34	7,30142
480	345,04	482,81	7,34499
500	359,84	503,36	7,38692
520	374,73	523,98	7,42736
540	389,69	544,69	7,46642
560	404,74	565,47	7,50422
580	419,87	586,35	7,54084
600	435,10	607,32	7,57638
620	450,42	628,38	7,61090
640	465,83	649,53	7,64448
660	481,34	670,78	7,67717
680	496,94	692,12	7,70903
700	512,64	713,56	7,74010
720	528,44	735,10	7,77044
740	544,33	756,73	7,80008
760	560,32	778,46	7,82905
780	576,40	800,28	7,85740
800	592,58	822,20	7,88514
850	633,42	877,40	7,95207
900	674,82	933,15	8,01581
950	716,76	989,44	8,07667
1000	759,19	1046,22	8,13493
1050	802,10	1103,48	8,19081

Tabela A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (continuação)

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s ^o (kJ/kg × K)
1100	845,45	1161,18	8,24449
1150	889,21	1219,30	8,29616
1200	933,37	1277,81	8,34596
1250	977,89	1336,68	8,39402
1300	1022,75	1395,89	8,44046
1350	1067,94	1455,43	8,48539
1400	1113,43	1515,27	8,52891
1450	1159,20	1575,40	8,57111
1500	1205,25	1635,80	8,61208
1550	1251,55	1696,45	8,65185
1600	1298,08	1757,33	8,69051
1650	1344,83	1818,44	8,72811
1700	1391,80	1879,76	8,76472
1750	1438,97	1941,28	8,80039
1800	1486,33	2002,99	8,83516
1850	1533,87	2064,88	8,86908
1900	1581,59	2126,95	8,90219
1950	1629,47	2189,19	8,93452
2000	1677,52	2251,58	8,96611
2050	1725,71	2314,13	8,99699
2100	1774,06	2376,82	9,02721
2150	1822,54	2439,66	9,05678
2200	1871,16	2502,63	9,08573
2250	1919,91	2565,73	9,11409
2300	1968,79	2628,96	9,14189
2350	2017,79	2692,31	9,16913
2400	2066,91	2755,78	9,19586
2450	2116,14	2819,37	9,22208
2500	2165,48	2883,06	9,24781
2550	2214,93	2946,86	9,27308
2600	2264,48	3010,76	9,29790
2650	2314,13	3074,77	9,32228
2700	2363,88	3138,87	9,34625
2750	2413,73	3203,06	9,36980
2800	2463,66	3267,35	9,39297
2850	2513,69	3331,73	9,41576
2900	2563,80	3396,19	9,43818
2950	2613,99	3460,73	9,46025
3000	2664,27	3525,36	9,48198

Tabela A.7.2

Pressões e volumes relativos em função da pressão em processos isotrópicos

T (K)	P _r	v _r	T (K)	P _r	v _r	T (K)	P _r	v _r
200	0,2703	493,47	680	20,784	21,818	1800	1051,05	1,14204
220	0,3770	389,15	700	23,160	20,155	1850	1182,9	1,04294
240	0,5109	313,27	720	25,742	18,652	1900	1327,5	0,95445
260	0,6757	256,58	740	28,542	17,289	1950	1485,8	0,87521
280	0,8756	213,26	760	31,573	16,052	2000	1658,6	0,80410
290	0,9899	195,36	780	34,851	14,925	2050	1847,1	0,74012
298,15	1,0907	182,29	800	38,388	13,897	2100	2052,1	0,68242
300	1,1146	179,49	850	46,468	11,695	2150	2274,8	0,63027
320	1,3972	152,73	900	60,520	9,9169	2200	2516,2	0,58305
340	1,7281	131,20	950	74,815	8,4677	2250	2777,5	0,54020
360	2,1123	113,65	1000	91,651	7,2760	2300	3059,9	0,50124
380	2,5548	99,188	1050	111,35	6,2885	2350	3364,6	0,46576
400	3,0612	87,137	1100	134,25	5,4641	2400	3693,0	0,43338
420	3,6373	77,003	1150	160,73	4,7714	2450	4046,2	0,40378
440	4,2892	68,409	1200	191,17	4,1859	2500	4425,8	0,37669
460	5,0233	61,066	1250	226,02	3,6880	2550	4833,0	0,35185
480	5,8466	54,748	1300	265,72	3,2626	2600	5269,5	0,32903
500	6,7663	49,278	1350	310,74	2,8971	2650	5736,7	0,30805
520	7,7900	44,514	1400	361,62	2,5817	2700	6236,2	0,28872
540	8,9257	40,344	1450	418,89	2,3083	2750	6769,7	0,27089
560	10,182	36,676	1500	483,16	2,0703	2800	7338,7	0,25443
580	11,568	33,436	1550	554,96	1,8625	2850	7945,1	0,23921
600	13,092	30,561	1600	634,97	1,6804	2900	8590,7	0,22511
620	14,766	28,001	1650	723,86	1,52007	2950	9277,2	0,21205
640	16,598	25,713	1700	822,33	1,37858	3000	10007	0,19992
660	18,600	23,662	1750	931,14	1,25330			

Tabela A.8

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

T (K)	Nitrogênio, Diatômico (N ₂) R = 0,2968 kJ/kg × K M = 28,013 kg/kmol			Oxigênio, Diatômico (O ₂) R = 0,2598 kJ/kg × K M = 31,999 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ^o (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ^o (kJ/kg × K)
200	148,39	207,75	6,4250	129,84	181,81	6,0466
250	185,50	259,70	6,6568	162,41	227,37	6,2499
300	222,63	311,67	6,8463	195,20	273,15	6,4168
350	259,80	363,68	7,0067	228,37	319,31	6,5590
400	297,09	415,81	7,1459	262,10	366,03	6,6838
450	334,57	468,13	7,2692	296,52	413,45	6,7954
500	372,35	520,75	7,3800	331,72	461,63	6,8969
550	410,52	573,76	7,4811	367,70	510,61	6,9903
600	449,16	627,24	7,5741	404,46	560,36	7,0768
650	488,34	681,26	7,6606	441,97	610,86	7,1577
700	528,09	735,86	7,7415	480,18	662,06	7,2336
750	568,45	791,05	7,8176	519,02	713,90	7,3051
800	609,41	846,85	7,8897	558,46	766,33	7,3728
850	650,98	903,26	7,9581	598,44	819,30	7,4370
900	693,13	960,25	8,0232	638,90	872,75	7,4981
950	735,85	1017,81	8,0855	679,80	926,65	7,5564
1000	779,11	1075,91	8,1451	721,11	980,95	7,6121
1100	867,14	1193,62	8,2572	804,80	1090,62	7,7166
1200	957,00	1313,16	8,3612	889,72	1201,53	7,8131
1300	1048,46	1434,31	8,4582	975,72	1313,51	7,9027
1400	1141,35	1556,87	8,5490	1062,67	1426,44	7,9864
1500	1235,50	1680,70	8,6345	1150,48	1540,23	8,0649
1600	1330,72	1805,80	8,7151	1239,10	1654,83	8,1389
1700	1426,89	1931,45	8,7914	1328,49	1770,21	8,2088
1800	1523,90	2058,15	8,8638	1418,63	1886,33	8,2752
1900	1621,66	2185,58	8,9327	1509,50	2003,19	8,3384
2000	1720,07	2313,68	8,9984	1601,10	2120,77	8,3987
2100	1819,08	2442,36	9,0612	1693,41	2239,07	8,4564
2200	1918,62	2571,58	9,1213	1786,44	2358,08	8,5117
2300	2018,63	2701,28	9,1789	1880,17	2477,79	8,5650
2400	2119,08	2831,41	9,2343	1974,60	2598,20	8,6162
2500	2219,93	2961,93	9,2876	2069,71	2719,30	8,6656
2600	2321,13	3092,81	9,3389	2165,50	2841,07	8,7134
2700	2422,66	3224,03	9,3884	2261,94	2963,49	8,7596
2800	2524,50	3355,54	9,4363	2359,01	3086,55	8,8044
2900	2626,62	3487,34	9,4825	2456,70	3210,22	8,8478
3000	2729,00	3619,41	9,5273	2554,97	3334,48	8,8899

Tabela A.8 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

T (K)	Dióxido de carbono (CO ₂) R = 0,1889 kJ/kg × K M = 44,010 kg/kmol			Água (H ₂ O) R = 0,4615 kJ/kg × K M = 18,015 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ^o (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ^o (kJ/kg × K)
200	97,49	135,28	4,5439	276,38	368,69	9,7412
250	126,21	173,44	4,7139	345,98	461,36	10,1547
300	157,70	214,38	4,8631	415,87	554,32	10,4936
350	191,78	257,90	4,9972	486,37	647,90	10,7821
400	228,19	303,76	5,1196	557,79	742,40	11,0345
450	266,69	351,70	5,2325	630,40	838,09	11,2600
500	307,06	401,52	5,3375	704,36	935,12	11,4644
550	349,12	453,03	5,4356	779,79	1033,63	11,6522
600	392,72	506,07	5,5279	856,75	1133,67	11,8263
650	437,71	560,51	5,6151	935,31	1235,30	11,9890
700	483,97	616,22	5,6976	1015,49	1338,56	12,1421
750	531,40	673,09	5,7761	1097,35	1443,49	12,2868
800	579,89	731,02	5,8508	1180,90	1550,13	12,4244
850	629,35	789,93	5,9223	1266,19	1658,49	12,5558
900	676,69	849,72	5,9906	1353,23	1768,60	12,6817
950	730,85	910,33	6,0561	1442,03	1880,48	12,8026
1000	782,75	971,67	6,1190	1532,61	1994,13	12,9192
1100	888,55	1096,36	6,2379	1719,05	2226,73	13,1408
1200	996,64	1223,34	6,3483	1912,42	2466,25	13,3492
1300	1106,68	1352,28	6,4515	2112,47	2712,46	13,5462
1400	1218,38	1482,87	6,5483	2318,89	2965,03	13,7334
1500	1331,50	1614,88	6,6394	2531,28	3223,57	13,9117
1600	1445,85	1748,12	6,7254	2749,24	3487,69	14,0822
1700	1561,26	1882,43	6,8068	2972,35	3756,95	14,2454
1800	1677,61	2017,67	6,8841	3200,17	4030,92	14,4020
1900	1794,78	2153,73	6,9577	3432,28	4309,18	14,5524
2000	1912,67	2290,51	7,0278	3668,24	4591,30	14,6971
2100	2031,21	2427,95	7,0949	3908,08	4877,29	14,8366
2200	2150,34	2565,97	7,1591	4151,28	5166,64	14,9712
2300	2270,00	2704,52	7,2206	4397,56	5459,08	15,1012
2400	2390,14	2843,55	7,2798	4646,71	5754,37	15,2269
2500	2510,74	2983,04	7,3368	4898,49	6052,31	15,3485
2600	2631,73	3122,93	7,3917	5152,73	6352,70	15,4663
2700	2753,10	3263,19	7,4446	5409,24	6655,36	15,5805
2800	2874,81	3403,79	7,4957	5667,86	6960,13	15,6914
2900	2996,84	3544,71	7,5452	5928,44	7266,87	15,7990
3000	3119,18	3685,95	7,5931	6190,86	7575,44	15,9036

Tabela A.9

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Nitrogênio diatômico (N ₂)		Nitrogênio monatômico (N)	
	$\bar{h}_{T,298}^0 = 0$ kJ/kmol $M = 28,013$ kg/kmol		$\bar{h}_{T,298}^0 = 472\ 680$ kJ/kmol $M = 14,007$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K
0	-8670	0	-6197	0
100	-5768	159,812	-4119	130,593
200	-2857	179,985	-2040	145,001
298	0	191,609	0	153,300
300	54	191,789	38	153,429
400	2971	200,181	2117	159,409
500	5911	206,740	4196	164,047
600	8894	212,177	6274	167,837
700	11937	216,865	8353	171,041
800	15046	221,016	10431	173,816
900	18223	224,757	12510	176,265
1000	21463	228,171	14589	178,455
1100	24760	231,314	16667	180,436
1200	28109	234,227	18746	182,244
1300	31503	236,943	20825	183,908
1400	34936	239,487	22903	185,448
1500	38405	241,881	24982	186,883
1600	41904	244,139	27060	188,224
1700	45430	246,276	29139	189,484
1800	48979	248,304	31218	190,672
1900	52549	250,234	33296	191,796
2000	56137	252,075	35375	192,863
2200	63362	255,518	39534	194,845
2400	70640	258,684	43695	196,655
2600	77963	261,615	47860	198,322
2800	85323	264,342	52033	199,868
3000	92715	266,892	56218	201,311
3200	100134	269,286	60420	202,667
3400	107577	271,542	64646	203,948
3600	115042	273,675	68902	205,164
3800	122526	275,698	73194	206,325
4000	130027	277,622	77532	207,437
4400	145078	281,209	86367	209,542
4800	160188	284,495	95457	211,519
5200	175352	287,530	104843	213,397
5600	190572	290,349	114550	215,195
6000	205848	292,984	124590	216,926

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Oxigênio diatômico (O ₂)		Oxigênio monatômico (O)	
	$\bar{h}_{T,298}^0 = 0$ kJ/kmol $M = 21,999$ kg/kmol		$\bar{h}_{T,298}^0 = 249\ 170$ kJ/kmol $M = 16,00$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K
0	-8683	0	-6725	0
100	-5777	173,308	-4518	135,947
200	-2868	193,483	-2186	152,153
298	0	205,148	0	161,059
300	54	205,329	41	161,194
400	3027	213,873	2207	167,431
500	6086	220,693	4343	172,198
600	9245	226,450	6462	176,060
700	12499	231,465	8570	179,310
800	15836	235,920	10671	182,116
900	19241	239,931	12767	184,585
1000	22703	243,579	14860	186,790
1100	26212	246,923	16950	188,783
1200	29761	250,011	19039	190,600
1300	33345	252,878	21126	192,270
1400	36958	255,556	23212	193,816
1500	40600	258,068	25296	195,254
1600	44267	260,434	27381	196,599
1700	47959	262,673	29464	197,862
1800	51674	264,797	31547	199,053
1900	55414	266,819	33630	200,179
2000	59176	268,748	35713	201,247
2200	66770	272,366	39878	203,232
2400	74453	275,708	44045	205,045
2600	82225	278,818	48216	206,714
2800	90080	281,729	52391	208,262
3000	98013	284,466	56574	209,705
3200	106022	287,050	60767	211,058
3400	114101	289,499	64971	212,332
3600	122245	291,826	69190	213,538
3800	130447	294,043	73424	214,682
4000	138705	296,161	77675	215,773
4400	155374	300,133	86234	217,812
4800	172240	303,801	94873	219,891
5200	189312	307,217	103592	221,435
5600	206618	310,423	112391	223,066
6000	224210	313,457	121264	224,597

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Dióxido de carbono (CO ₂)		Monóxido de carbono (CO)	
	$\bar{h}_{T,298}^0 = -393\ 522$ kJ/kmol $M = 44,01$ kg/kmol		$\bar{h}_{T,298}^0 = 110\ 527$ kJ/kmol $M = 28,01$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K
0	-9364	0	-8671	0
100	-6457	179,010	-5772	165,852
200	-3413	199,976	-2860	186,024
298	0	213,794	0	197,651
300	69	214,024	54	197,831
400	4003	225,314	2977	206,240
500	8305	234,902	5932	212,833
600	12906	243,284	8942	218,321
700	17754	250,752	12021	223,067
800	22806	257,496	15174	227,277
900	28030	263,646	18397	231,074
1000	33397	269,299	21686	234,538
1100	38885	274,528	25031	237,726
1200	44473	279,390	28427	240,679
1300	50148	283,931	31867	243,431
1400	55895	288,190	35343	246,006
1500	61705	292,199	38852	248,426
1600	67569	295,984	42388	250,707
1700	73480	299,567	45948	252,866
1800	79432	302,969	49529	254,913
1900	85420	306,207	53128	256,860
2000	91439	309,294	56743	258,716
2200	103562	315,070	64012	262,182
2400	115779	320,384	71326	265,361
2600	128074	325,307	78679	268,302
2800	140435	329,887	86070	271,044
3000	152853	334,170	93504	273,607
3200	165321	338,194	100962	276,012
3400	177836	341,988	108440	278,279
3600	190394	345,576	115938	280,422
3800	202990	348,981	123454	282,454
4000	215624	352,221	130989	284,387
4400	240992	358,266	146108	287,989
4800	266488	363,812	161285	291,290
5200	292112	368,939	176510	294,337
5600	317870	373,711	191782	297,167
6000	343782	378,180	207105	299,809

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Água (H ₂ O)		Hidroxila (OH)	
	$\bar{h}_{T,298}^0 = -241\ 826$ kJ/kmol $M = 18,015$ kg/kmol		$\bar{h}_{T,298}^0 = 38\ 987$ kJ/kmol $M = 17,007$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{T,298}^0)$ kJ/kmol	\bar{s}^0 kJ/kmol K
0	-9904	0	-9172	0
100	-6617	152,386	-6140	149,591
200	-3262	175,468	-2975	171,592
298	0	188,835	0	183,709
300	62	189,043	55	183,894
400	3450	198,787	3034	192,466
500	6922	206,532	5991	199,066
600	10499	213,051	8943	204,448
700	14190	218,739	11902	209,008
800	18002	223,626	14881	212,984
900	21937	228,460	17889	216,526
1000	26000	232,739	20935	219,735
1100	30190	236,732	24024	222,680
1200	34506	240,485	27159	225,408
1300	38941	244,035	30340	227,955
1400	43491	247,406	33567	230,347
1500	48149	250,620	36838	232,604
1600	52907	253,690	40151	234,741
1700	57757	256,631	43502	236,772
1800	62693	259,452	46890	238,707
1900	67706	262,162	50311	240,556
2000	72788	264,769	53763	242,328
2200	83153	269,706	60751	245,659
2400	93741	274,312	67840	248,743
2600	104520	278,625	75018	251,614
2800	115463	282,680	82268	254,301
3000	126548	286,504	89585	256,825
3200	137756	290,120	96960	259,205
3400	149073	293,550	104388	261,456
3600	160484	296,812	111864	263,592
3800	171981	299,919	119382	265,625
4000	183552	302,887	126940	267,563
4400	206892	308,448	142165	271,191
4800	230456	313,573	157522	274,531
5200	254216	318,328	173002	277,629
5600	278161	322,764	188598	280,518
6000	302295	326,926	204309	283,227

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 x MPa) base molar

T (K)	Hidrogênio (H ₂)		Hidrogênio monoatômico (H)	
	$\bar{h}_f^{\circ}{}_{298}$	\bar{s}°	$\bar{h}_f^{\circ}{}_{298}$	\bar{s}°
	kJ/kmol	kJ/kmol K	kJ/kmol	kJ/kmol K
0	-8467	0	-6197	0
100	-5467	100,727	-4119	92,009
200	-2774	119,410	-2040	106,417
298	0	130,678	0	114,716
300	53	130,856	38	114,845
400	2961	139,219	2117	120,825
500	5883	145,738	4196	125,463
600	8799	151,078	6274	129,253
700	11730	155,609	8353	132,457
800	14681	159,554	10431	135,233
900	17657	163,060	12510	137,681
1000	20663	166,225	14589	139,871
1100	23704	169,121	16667	141,852
1200	26785	171,798	18746	143,661
1300	29907	174,294	20825	145,324
1400	33073	176,637	22903	146,865
1500	36281	178,849	24982	148,299
1600	39533	180,946	27060	149,640
1700	42826	182,941	29139	150,900
1800	46160	184,846	31218	152,089
1900	49532	186,670	33296	153,212
2000	52942	188,419	35375	154,279
2200	59665	191,719	39632	156,260
2400	66915	194,789	43689	158,069
2600	74082	197,659	47847	159,732
2800	81355	200,355	52004	161,273
3000	88725	202,898	56161	162,707
3200	96187	205,306	60318	164,048
3400	103736	207,593	64475	165,308
3600	111367	209,773	68633	166,497
3800	119077	211,856	72790	167,620
4000	126864	213,851	76947	168,687
4400	142658	217,612	85261	170,668
4800	158730	221,109	93576	172,476
5200	175057	224,379	101890	174,140
5600	191607	227,447	110205	175,681
6000	208332	230,322	118519	177,114

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 x MPa) base molar

T (K)	Óxido nítrico (NO)		Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	
	$\bar{h}_f^{\circ}{}_{298}$	\bar{s}°	$\bar{h}_f^{\circ}{}_{298}$	\bar{s}°
	kJ/kmol	kJ/kmol K	kJ/kmol	kJ/kmol K
0	-9192	0	-10186	0
100	-6073	177,031	-6861	202,563
200	-2951	198,747	-3495	225,852
298	0	210,759	0	240,034
300	55	210,943	68	240,263
400	3040	219,529	3927	251,342
500	6069	226,263	8099	260,638
600	9144	231,886	12555	268,755
700	12308	236,762	17250	275,988
800	15548	241,088	22138	282,513
900	18858	244,985	27180	288,450
1000	22229	248,536	32344	293,889
1100	25653	251,799	37606	298,904
1200	29120	254,816	42946	303,551
1300	32626	257,621	48351	307,876
1400	36164	260,243	53808	311,920
1500	39729	262,703	59309	315,715
1600	43319	265,019	64846	319,289
1700	46929	267,208	70414	322,664
1800	50557	269,282	76008	325,861
1900	54201	271,252	81624	328,898
2000	57859	273,128	87259	331,788
2200	65212	276,632	98578	337,182
2400	72606	279,849	109948	342,128
2600	80034	282,822	121358	346,695
2800	87491	285,585	132800	350,934
3000	94973	288,165	144267	354,890
3200	102477	290,587	155756	358,597
3400	110000	292,867	167262	362,085
3600	117541	295,022	178783	365,378
3800	125099	297,065	190316	368,495
4000	132671	299,007	201860	371,456
4400	147857	302,626	224973	376,963
4800	163094	305,940	248114	381,997
5200	178377	308,998	271276	386,632
5600	193703	311,838	294455	390,926
6000	209070	314,488	317648	394,926

Tabela A.10

Entalpia de formação e entropia absoluta de várias substâncias a 25 °C e 100 kPa

Substância	Fórmula	M	Estado	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	gás	+226 731	200,958
Água	H ₂ O	18,015	gás	-241 826	188,834
Água	H ₂ O	18,015	líquido	-285 830	69,950
Amônia	NH ₃	17,031	gás	-45 720	192,572
Benzeno	C ₆ H ₆	78,114	gás	+82 980	269,562
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	gás	-126 200	306,647
Carbono (grafita)	C	12,011	sólido	0	5,740
Dióxido de carbono	CO ₂	44,010	gás	-393 522	213,795
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,059	gás	-296 842	248,212
Enxofre	S	32,06	sólido	0	32,066
Etileno	C ₂ H ₄	30,070	gás	-84 740	229,597
Etilanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	gás	-235 000	282,444
Etilanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	líquido	-277 380	160,554
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	gás	+52 467	219,330
Heptano	C ₇ H ₁₆	100,205	gás	-187 900	427,805
Hexano	C ₆ H ₁₄	86,178	gás	-167 300	387,979
Metano	CH ₄	16,043	gás	-74 873	186,251
Metanol	CH ₃ OH	32,042	gás	-201 300	239,709
Metanol	CH ₃ OH	32,042	líquido	-239 220	126,809
Monóxido de carbono	CO	28,011	gás	-110 527	197,653
Nitrometano	CH ₃ NO ₂	61,04	líquido	-113 100	171,80
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	gás	-208 600	466,514
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	líquido	-250 105	360,575
Óxido de Nitrogênio	N ₂ O	44,013	gás	+82 050	219,957
Ozônio	O ₃	47,998	gás	+142 674	238,932
Pentano	C ₅ H ₁₂	72,151	gás	-146 500	348,945
Peróxido de hidrogênio	H ₂ O ₂	34,015	gás	-136 106	232,991
Propano	C ₃ H ₈	44,094	gás	-103 900	269,917
Propeno	C ₃ H ₆	42,081	gás	+20 430	267,066
Trióxido de enxofre	SO ₃	80,059	gás	-395 765	256,769
T-T-Diesel	C ₁₄ H ₃₀	198,06	líquido	-174 000	525,90

Tabela A. 11

Logaritmos na base e da constante de equilíbrio K

Para a reação $\nu_A A + \nu_B B \rightleftharpoons \nu_C C + \nu_D D$, a constante de equilíbrio K é definida por: $K = \frac{y_C^{\nu_C} y_D^{\nu_D}}{y_A^{\nu_A} y_B^{\nu_B}} \frac{P^{-\nu_C-\nu_D-\nu_A-\nu_B}}{P^{\nu}}$, $f^0 = 0,1 \text{ MPa}$

Temp K	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$	$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$\text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{N}$	$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}$	$2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2$	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$	$\text{N}_2 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$
298	-164,003	-186,963	-367,528	-184,420	-212,075	-207,529	-69,868	-41,355
500	-92,830	-105,623	-213,405	-105,385	-120,331	-115,234	-40,449	-30,725
1000	-39,810	-45,146	-99,146	-46,321	-51,951	-47,052	-18,709	-23,039
1200	-30,878	-35,003	-80,025	-36,363	-40,467	-36,736	-15,082	-21,752
1400	-24,467	-27,741	-66,345	-29,222	-32,244	-27,679	-12,491	-20,826
1600	-19,638	-22,282	-56,069	-23,849	-26,067	-21,656	-10,547	-20,126
1800	-15,868	-18,028	-48,066	-19,658	-21,258	-16,987	-9,035	-19,577
2000	-12,841	-14,619	-41,655	-16,299	-17,406	-13,266	-7,825	-19,136
2200	-10,356	-11,826	-36,404	-13,546	-14,253	-10,232	-6,836	-18,773
2400	-8,280	-9,495	-32,023	-11,249	-11,625	-7,715	-6,012	-18,470
2600	-6,519	-7,520	-28,313	-9,303	-9,402	-5,594	-5,316	-18,214
2800	-5,005	-5,826	-25,129	-7,633	-7,496	-3,781	-4,720	-17,994
3000	-3,690	-4,356	-22,367	-6,184	-5,845	-2,217	-4,205	-17,805
3200	-2,538	-3,069	-19,947	-4,916	-4,401	-0,853	-3,755	-17,640
3400	-1,519	-1,932	-17,810	-3,795	-3,128	0,346	-3,369	-17,496
3600	-0,611	-0,922	-15,909	-2,799	-1,996	1,408	-3,008	-17,369
3800	0,201	-0,017	-14,205	-1,906	-0,984	2,355	-2,694	-17,257
4000	0,934	0,799	-12,671	-1,101	-0,074	3,204	-2,413	-17,157
4500	2,483	2,520	-8,423	0,602	1,847	4,985	-1,824	-16,953
5000	3,724	3,898	-6,816	1,972	3,383	6,397	-1,368	-16,797
5500	4,739	5,027	-4,672	3,088	4,639	7,542	-0,980	-16,678
6000	5,587	5,969	-2,876	4,040	5,684	8,488	-0,671	-16,588

Fonte: Consistente com JANAF Thermochemical Tables, 3. ed., Thermal Group, Dow Chemical U.S.A., Mid., MI, 1985.

Apêndice B

Propriedades Termodinâmicas

Tabela B.1 — Propriedades Termodinâmicas da Água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v _l	v _g	u _l	u _h	u _g	h _l	h _h	h _g	s _l	s _h	s _g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0	2375,33	2375,33	0	2501,35	2501,35	0	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8932	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19666	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	418,92	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Tabela B.1.1 (continuação)

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v _l	v _g	u _l	u _h	u _g	h _l	h _h	h _g	s _l	s _h	s _g
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860
225	2547,7	0,001199	0,07849	963,72	1639,58	2603,30	966,77	1836,50	2803,27	2,5639	3,6863	6,2502
230	2794,9	0,001209	0,07158	986,72	1617,17	2603,89	990,10	1813,85	2803,95	2,6099	3,6047	6,2146
235	3060,1	0,001219	0,06536	1009,88	1594,24	2604,11	1013,61	1790,53	2804,13	2,6557	3,5233	6,1791
240	3344,2	0,001229	0,05976	1033,19	1570,75	2603,95	1037,31	1766,50	2803,81	2,7015	3,4422	6,1436
245	3648,2	0,001240	0,05470	1056,69	1546,68	2603,37	1061,21	1741,73	2802,95	2,7471	3,3612	6,1083
250	3973,0	0,001251	0,05013	1080,37	1522,00	2602,37	1085,34	1716,18	2801,52	2,7927	3,2802	6,0729
255	4319,5	0,001263	0,04598	1104,26	1496,66	2600,93	1109,72	1689,80	2799,51	2,8382	3,1992	6,0374
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,86	2499,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2783
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9983	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
374,1	22089	0,003155										

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271
225	124,00	0,001064	0,79325	520,45	2013,10	2533,56	520,69	2191,35	2712,04	1,5705	5,5173	7,0878
250	127,43	0,001067	0,71871	535,08	2002,14	2537,21	535,34	2181,55	2716,89	1,6072	5,4455	7,0526
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918
325	136,30	0,001076	0,56201	572,88	1973,46	2546,34	573,23	2155,76	2728,99	1,7005	5,2646	6,9651
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,41398	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565
500	151,86	0,001093	0,37489	639,66	1921,57	2561,23	640,21	2108,47	2748,67	1,8606	4,9606	6,8212
550	155,48	0,001097	0,34268	655,30	1909,17	2564,47	655,91	2097,04	2752,94	1,8972	4,8920	6,7892
600	158,85	0,001101	0,31567	669,88	1897,52	2567,40	670,54	2086,26	2756,80	1,9311	4,8289	6,7600
650	162,01	0,001104	0,29268	683,55	1886,51	2570,06	684,26	2076,04	2760,30	1,9627	4,7704	6,7330
700	164,97	0,001108	0,27286	696,43	1876,07	2572,49	697,20	2066,30	2763,50	1,9922	4,7158	6,7080
750	167,77	0,001111	0,25560	708,62	1866,11	2574,73	709,45	2056,98	2766,43	2,0199	4,6647	6,6846
800	170,43	0,001115	0,24043	720,20	1856,58	2576,79	721,10	2048,04	2769,13	2,0461	4,6166	6,6627

Tabela B.1.2 (continuação)

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
850	172,96	0,001118	0,22698	731,25	1847,45	2578,69	732,20	2039,43	2771,63	2,0709	4,5711	6,6421
900	175,38	0,001121	0,21497	741,81	1838,65	2580,46	742,82	2031,12	2773,94	2,0946	4,5280	6,6225
950	177,69	0,001124	0,20419	751,94	1830,17	2582,11	753,00	2023,08	2776,08	2,1171	4,4869	6,6040
1000	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1821,97	2583,64	762,79	2015,29	2778,08	2,1386	4,4478	6,5864
1100	184,09	0,001133	0,17753	780,08	1806,32	2586,40	781,32	2000,36	2781,68	2,1791	4,3744	6,5535
1200	187,99	0,001139	0,16333	797,27	1791,55	2588,82	798,64	1986,19	2784,82	2,2165	4,3067	6,5233
1300	191,64	0,001144	0,15125	813,42	1777,53	2590,95	814,91	1972,67	2787,58	2,2514	4,2438	6,4953
1400	195,07	0,001149	0,14084	828,68	1764,15	2592,83	830,29	1959,72	2790,00	2,2842	4,1850	6,4692
1500	198,32	0,001154	0,13177	843,14	1751,30	2594,50	844,87	1947,28	2792,15	2,3150	4,1298	6,4448
1750	205,76	0,001166	0,11349	876,44	1721,39	2597,83	878,48	1917,95	2796,43	2,3851	4,0044	6,3895
2000	212,42	0,001177	0,09963	906,42	1693,84	2600,26	908,77	1890,74	2799,51	2,4473	3,8935	6,3408
2250	218,45	0,001187	0,08875	933,81	1668,18	2601,98	936,48	1865,19	2801,67	2,5034	3,7938	6,2971
2500	223,99	0,001197	0,07998	959,09	1644,04	2603,13	962,09	1840,98	2803,07	2,5546	3,7028	6,2574
2750	229,12	0,001207	0,07275	982,65	1621,16	2603,81	985,97	1817,89	2803,86	2,6018	3,6190	6,2208
3000	233,90	0,001216	0,06668	1004,76	1599,34	2604,10	1008,41	1795,73	2804,14	2,6456	3,5412	6,1869
3250	238,38	0,001226	0,06152	1025,62	1578,43	2604,04	1029,60	1774,37	2803,97	2,6866	3,4685	6,1551
3500	242,60	0,001235	0,05707	1045,41	1558,29	2603,70	1049,73	1753,70	2803,43	2,7252	3,4000	6,1252
4000	250,40	0,001252	0,04978	1082,28	1519,99	2602,27	1087,29	1714,09	2801,38	2,7963	3,2737	6,0700
5000	263,99	0,001286	0,03944	1147,78	1449,34	2597,12	1154,21	1640,12	2794,33	2,9201	3,0532	5,9733
6000	275,64	0,001319	0,03244	1205,41	1384,27	2589,69	1213,32	1571,00	2784,33	3,0266	2,8625	5,8891
7000	285,88	0,001351	0,02737	1257,51	1322,97	2580,48	1266,97	1505,10	2772,07	3,1210	2,6922	5,8132
8000	295,06	0,001384	0,02352	1305,54	1264,25	2569,79	1316,61	1441,33	2757,94	3,2067	2,5365	5,7431
9000	303,40	0,001418	0,02048	1350,47	1207,28	2557,75	1363,23	1378,88	2742,11	3,2857	2,3915	5,6771
10000	311,06	0,001452	0,01803	1393,00	1151,40	2544,41	1407,53	1317,14	2724,67	3,3595	2,2545	5,6140
11000	318,15	0,001489	0,01599	1433,68	1096,06	2529,74	1450,05	1255,55	2705,60	3,4294	2,1233	5,5527
12000	324,75	0,001527	0,01426	1472,92	1040,76	2513,67	1491,24	1193,59	2684,83	3,4961	1,9962	5,4923
13000	330,93	0,001567	0,01278	1511,09	984,99	2496,08	1531,46	1130,76	2662,22	3,5604	1,8718	5,4323
14000	336,75	0,001611	0,01149	1548,53	928,23	2476,76	1571,08	1066,47	2637,55	3,6231	1,7485	5,3716
15000	342,24	0,001658	0,01034	1585,58	869,85	2455,43	1610,45	1000,04	2610,49	3,6847	1,6250	5,3097
16000	347,43	0,001711	0,00931	1622,63	809,07	2431,70	1650,00	930,59	2580,59	3,7460	1,4995	5,2454
17000	352,37	0,001770	0,00836	1660,16	744,80	2404,96	1690,25	856,90	2547,15	3,8078	1,3698	5,1776
18000	357,06	0,001840	0,00749	1698,86	675,42	2374,28	1731,97	777,13	2509,09	3,8713	1,2330	5,1044
19000	361,54	0,001924	0,00666	1739,87	598,18	2338,05	1776,43	688,11	2464,54	3,9387	1,0841	5,0227
20000	365,81	0,002035	0,00583	1785,47	507,58	2293,05	1826,18	583,56	2409,74	4,0137	0,9132	4,9269
21000	369,89	0,002206	0,00495	1841,97	388,74	2230,71	1888,30	446,42	2334,72	4,1073	0,6942	4,8015
22000	373,80	0,002808	0,00353	1973,16	108,24	2081,39	2034,92	124,04	2158,97	4,3307	0,1917	4,5224
22089	374,14	0,003155	0,00315	2029,58	0	2029,58	2099,26	0	209			

Tabela B.1.3

Vapor d'água superaquecido

T	P = 10 kPa (45,81 °C)				P = 50 kPa (81,33 °C)				P = 100 kPa (99,62 °C)			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,05252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4158,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75689	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	11,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182
P = 200 kPa (120,23 °C)				P = 300 kPa (133,55 °C)				P = 400 kPa (143,63 °C)				
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	0,46246	2553,55	2738,53	6,8958
150	0,95964	2576,87	2768,80	7,2795	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778	0,47084	2564,48	2752,82	6,9299
200	1,08034	2654,39	2870,46	7,5066	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115	0,53422	2646,83	2860,51	7,1706
250	1,19880	2731,22	2970,98	7,7085	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165	0,59512	2726,11	2964,16	7,3788
300	1,31616	2808,55	3071,79	7,8926	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022	0,65484	2804,81	3068,75	7,5661
400	1,54930	2966,69	3276,55	8,2217	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329	0,77262	2964,36	3273,41	7,8964
500	1,78139	3130,75	3487,03	8,5132	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250	0,88934	3129,15	3484,89	8,1912
600	2,01297	3301,36	3703,96	8,7769	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892	1,00555	3300,22	3702,44	8,4557
700	2,24426	3478,81	3927,66	9,0194	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319	1,12147	3477,95	3926,53	8,6987
800	2,47539	3663,19	4158,27	9,2450	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575	1,23722	3662,51	4157,40	8,9244
900	2,70643	3854,49	4395,77	9,4565	1,80406	3854,20	4395,42	9,2691	1,35288	3853,91	4395,06	9,1361
1000	2,93740	4052,53	4640,01	9,6563	1,95812	4052,27	4639,71	9,4689	1,46847	4052,02	4639,41	9,3360
1100	3,16834	4257,01	4890,68	9,8458	2,11214	4256,77	4890,41	9,6585	1,58404	4256,53	4890,15	9,5255
1200	3,39927	4467,46	5147,32	10,0262	2,26614	4467,23	5147,07	9,8389	1,69958	4466,99	5146,83	9,7059
1300	3,63018	4683,23	5409,26	10,1982	2,42013	4682,99	5409,03	10,0109	1,81511	4682,75	5408,80	9,8780
P = 500 kPa (151,86 °C)				P = 600 kPa (158,85 °C)				P = 800 kPa (170,43 °C)				
Sat.	0,37489	2561,23	2748,67	6,8212	0,31567	2567,40	2756,80	6,7600	0,24043	2576,79	2769,13	6,6627
200	0,42492	2642,91	2855,37	7,0592	0,35202	2638,91	2850,12	6,9665	0,26080	2630,61	2839,25	6,8158
250	0,47436	2723,50	2960,68	7,2708	0,39383	2720,86	2957,16	7,1816	0,29314	2715,46	2949,97	7,0384
300	0,52256	2802,91	3064,20	7,4598	0,43437	2801,00	3061,63	7,3723	0,32411	2797,14	3056,43	7,2327
350	0,57012	2882,59	3167,65	7,6328	0,47424	2881,12	3165,66	7,5463	0,35439	2878,16	3161,68	7,4088
400	0,61728	2963,19	3271,83	7,7937	0,51372	2962,02	3270,25	7,7078	0,38426	2859,66	3267,07	7,5715
500	0,71093	3128,35	3483,82	8,0872	0,59199	3127,55	3482,75	8,0020	0,44331	3125,95	3480,60	7,8672
600	0,80406	3299,64	3701,67	8,3521	0,66974	3299,07	3700,91	8,2673	0,50184	3297,91	3699,38	8,1332
700	0,89691	3477,52	3925,97	8,5952	0,74720	3477,08	3925,41	8,5107	0,56007	3476,22	3924,27	8,3770
800	0,98959	3662,17	4156,96	8,8211	0,82450	3661,63	4156,52	8,7367	0,61813	3661,14	4155,65	8,6033
900	1,08217	3853,63	4394,71	9,0329	0,90169	3853,34	4394,36	8,9485	0,67610	3852,77	4393,65	8,8153
1000	1,17469	4051,76	4639,11	9,2328	0,97883	4051,51	4638,81	9,1484	0,73401	4051,00	4638,20	9,0153
1100	1,26718	4256,29	4889,88	9,4224	1,05594	4256,05	4889,61	9,3381	0,79188	4255,57	4889,08	9,2049
1200	1,35964	4466,76	5146,58	9,6028	1,13302	4466,52	5146,34	9,5185	0,84974	4466,05	5145,85	9,3854
1300	1,45210	4682,52	5408,57	9,7749	1,21009	4682,28	5408,34	9,6906	0,90758	4681,81	5407,87	9,5575

Tabela B.1.3 (continuação)

Vapor d'água superaquecido

T	P = 1000 kPa (179,91 °C)				P = 1200 kPa (187,99 °C)				P = 1400 kPa (195,07 °C)			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,19444	2583,64	2778,08	6,5864	0,16333	2588,82	2784,82	6,5233	0,14084	2592,83	2790,00	6,4692
200	0,20596	2621,90	2827,86	6,6939	0,16930	2612,74	2815,90	6,5898	0,14302	2603,09	2803,32	6,4975
250	0,23268	2709,91	2942,59	6,9246	0,19235	2704,20	2935,01	6,8293	0,16350	2696,32	2927,22	6,7467
300	0,25794	2793,21	3051,15	7,1228	0,21382	2789,22	3045,80	7,0316	0,18228	2785,16	3040,35	6,9533
350	0,28247	2875,18	3157,65	7,3010	0,23452	2872,16	3153,59	7,2120	0,20026	2869,12	3149,49	7,1359
400	0,30659	2957,29	3263,88	7,4650	0,25480	2954,90	3260,66	7,3773	0,21780	2952,50	3257,42	7,3025
500	0,35411	3124,34	3478,44	7,7621	0,29463	3122,72	3476,28	7,6758	0,25215	3121,10	3474,11	7,6026
600	0,40109	3296,76	3697,85	8,0289	0,33393	3295,60	3696,32	7,9434	0,28596	3294,44	3694,78	7,8710
700	0,44779	3475,35	3923,14	8,2731	0,37294	3474,48	3922,01	8,1881	0,31947	3473,61	3920,87	8,1160
800	0,49432	3660,46	4154,78	8,4996	0,41177	3659,77	4153,90	8,4149	0,35281	3659,09	4153,03	8,3431
900	0,54075	3852,19	4392,94	8,7118	0,45051	3851,62	4392,23	8,6272	0,38606	3851,05	4391,53	8,5555
1000	0,58712	4050,49	4637,60	8,9119	0,48919	4049,98	4637,00	8,8274	0,41924	4049,47	4636,41	8,7558
1100	0,63345	4255,99	4888,55	9,1016	0,52783	4254,61	4888,02	9,0171	0,45239	4254,14	4887,49	8,9456
1200	0,67977	4465,58	5145,36	9,2821	0,56646	4465,12	5144,87	9,1977	0,48552	4464,65	5144,38	9,1262
1300	0,72608	4681,33	5407,41	9,4542	0,60507	4680,86	5406,95	9,3698	0,51864	4680,39	5406,49	9,2983
P = 1600 kPa (201,40 °C)				P = 1800 kPa (207,15 °C)				P = 2000 kPa (212,42 °C)				
Sat.	0,12380	2595,95	2794,02	6,4217	0,11042	2598,38	2797,13	6,3793	0,09963	2600,26	2799,51	6,3408
250	0,14184	2692,26	2919,20	6,6732	0,12497	2686,02	2910,96	6,6066	0,11144	2679,58	2902,46	6,5452
300	0,15862	2781,03	3034,83	6,8844	0,14021	2776,83	3029,21	6,8226	0,12547	2772,56	3023,50	6,7663
350	0,17456	2866,05	3145,35	7,0693	0,15457	2862,95	3141,18	7,0099	0,13857	2859,81	3136,96	6,9562
400	0,19005	2950,09	3254,17	7,2373	0,16847	2947,66	3250,90	7,1793	0,15120	2945,21	3247,60	7,1270
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	0,22029	3119,47	3471,93	7,5389	0,19550	3117,84	3469,75	7,4824	0,17568	3116,20	3467,55	7,4316
600	0,24998	3293,27	3693,23	7,8080	0,22193	3292,10	3691,69	7,7523	0,19860	3290,93	3690,14	7,7023
700	0,27937	3472,74	3919,73	8,0535	0,24818	3471,87	3918,59	7,9983	0,22323	3470,99	3917,45	7,9487
800	0,30859	3658,40	4152,15	8,2808	0,27420	3657,71	4151,27	8,2258	0,24668	3657,03	4150,40	8,1766
900	0,33772	3850,47	4390,82	8,4934	0,30012	3849,90	4390,11	8,4386	0,27004	3849,33	4389,40	8,3895
1000	0,36678	4048,96	4635,81	8,6938	0,32598	4048,45	4635,21	8,6390	0,29333	4047,94	4634,61	8,5900
1100	0,39581	4253,86	4886,95	8,8837	0,35180	4253,18	4886,42	8,8290	0,31659	4252,71	4885,89	8,7800
1200	0,											

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

T	P = 5000 kPa (263,99 °C)				P = 6000 kPa (275,64 °C)				P = 8000 kPa (295,06 °C)			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,03944	2597,12	2794,33	5,9733	0,03244	2589,69	2784,33	5,8891	0,02352	2569,79	2757,94	5,7431
300	0,04532	2697,94	2924,53	6,2083	0,03616	2667,22	2884,19	6,0573	0,02426	2590,93	2784,98	5,7905
350	0,05194	2808,67	3068,39	6,4492	0,04223	2789,61	3042,97	6,3334	0,02995	2747,67	2967,30	6,1300
400	0,05781	2908,58	3196,64	6,6458	0,04739	2892,81	3177,17	6,5407	0,03432	2863,75	3138,28	6,3633
450	0,06330	2999,64	3316,15	6,8185	0,05214	2988,90	3301,76	6,7192	0,03817	2966,66	3271,99	6,5550
500	0,06857	3090,92	3433,76	6,9758	0,05665	3082,20	3422,12	6,8802	0,04175	3064,30	3398,27	6,7239
550	0,07368	3181,82	3550,23	7,1217	0,06101	3174,57	3540,62	7,0287	0,04516	3159,76	3521,01	6,8778
600	0,07869	3273,01	3666,47	7,2588	0,06525	3266,89	3658,40	7,1676	0,04845	3254,43	3642,03	7,0205
700	0,08849	3457,67	3900,13	7,5122	0,07352	3453,15	3894,28	7,4234	0,05481	3444,00	3882,47	7,2812
800	0,09811	3646,62	4137,17	7,7440	0,08160	3643,12	4132,74	7,6566	0,06097	3636,08	4123,84	7,5173
900	0,10762	3840,71	4378,82	7,9593	0,08958	3837,84	4375,29	7,8727	0,06702	3832,08	4368,26	7,7350
1000	0,11707	4040,35	4625,69	8,1612	0,09749	4037,83	4622,74	8,0751	0,07301	4032,81	4616,87	7,9384
1100	0,12648	4245,61	4878,02	8,3519	0,10536	4243,26	4875,42	8,2661	0,07896	4238,60	4870,25	8,1299
1200	0,13587	4456,30	5135,67	8,5300	0,11321	4454,00	5133,28	8,4473	0,08489	4449,45	5128,54	8,3115
1300	0,14526	4671,96	5398,24	8,7055	0,12106	4669,64	5395,97	8,6199	0,09080	4665,02	5391,46	8,4842
P = 10 000 kPa (311,06 °C)				P = 15 000 kPa (342,24 °C)				P = 20 000 kPa (365,81 °C)				
Sat.	0,01803	2544,41	2724,67	5,6140	0,01034	2455,43	2610,49	5,3097	0,00583	2293,05	2409,74	4,9269
350	0,02242	2699,16	2923,39	5,9442	0,01147	2520,36	2692,41	5,4420	-	-	-	-
400	0,02641	2832,38	3096,46	6,2119	0,01565	2740,70	2975,44	5,8810	0,00994	2619,22	2818,07	5,5539
450	0,02975	2943,32	3240,83	6,4189	0,01845	2879,47	3156,15	6,1403	0,01270	2806,16	3060,06	5,9016
500	0,03279	3045,77	3373,63	6,5965	0,02080	2996,52	3308,53	6,3442	0,01477	2942,82	3238,18	6,1400
550	0,03564	3144,54	3500,92	6,7561	0,02293	3104,71	3448,61	6,5198	0,01656	3062,34	3393,45	6,3347
600	0,03837	3241,68	3625,34	6,9028	0,02491	3208,64	3582,30	6,6775	0,01818	3174,00	3537,57	6,5048
650	-	-	-	-	0,02680	3310,37	3712,32	6,8223	0,01969	3281,46	3675,32	6,6582
700	0,04358	3434,72	3870,52	7,1687	0,02861	3410,94	3840,12	6,9572	0,02113	3386,46	3809,09	6,7993
800	0,04859	3628,97	4114,91	7,4077	0,03210	3610,99	4092,43	7,2040	0,02385	3592,73	4069,80	7,0544
900	0,05349	3826,32	4361,24	7,6272	0,03546	3811,89	4343,75	7,4279	0,02645	3797,44	4326,37	7,2830
1000	0,05832	4027,81	4611,04	7,8315	0,03875	4015,41	4596,63	7,6347	0,02897	4003,12	4582,45	7,4925
1100	0,06312	4233,97	4865,14	8,0236	0,04200	4222,55	4852,56	7,8282	0,03145	4211,30	4840,24	7,6874
1200	0,06789	4444,93	5123,84	8,2054	0,04523	4433,78	5112,27	8,0108	0,03391	4422,81	5100,96	7,8706
1300	0,07265	4660,44	5386,99	8,3783	0,04845	4649,12	5375,94	8,1839	0,03636	4637,95	5365,10	8,0441
P = 30 000 kPa				P = 40 000 kPa								
375	0,001789	1737,75	1791,43	3,9303	0,001641	1677,09	1742,71	3,8289	-	-	-	-
400	0,002790	2067,34	2151,04	4,4728	0,001908	1854,52	1930,83	4,1134	-	-	-	-
425	0,005304	2455,06	2614,17	5,1503	0,002532	2096,83	2198,11	4,5028	-	-	-	-
450	0,006735	2619,30	2821,35	5,4423	0,003693	2365,07	2512,79	4,9459	-	-	-	-
500	0,008679	2820,67	3081,03	5,7904	0,005623	2678,36	2908,26	5,4699	-	-	-	-
550	0,010168	2970,31	3275,36	6,0342	0,006984	2869,69	3149,05	5,7784	-	-	-	-
600	0,011446	3100,53	3443,91	6,2330	0,008094	3022,61	3346,38	6,0113	-	-	-	-
650	0,012596	3221,04	3598,93	6,4057	0,009064	3158,04	3520,58	6,2054	-	-	-	-
700	0,013661	3335,84	3745,67	6,5606	0,009942	3283,63	3681,29	6,3750	-	-	-	-
800	0,015623	3555,60	4024,31	6,8332	0,011523	3517,89	3978,80	6,6662	-	-	-	-
900	0,017448	3768,48	4291,93	7,0717	0,012963	3739,42	4257,93	6,9150	-	-	-	-
1000	0,019196	3978,79	4554,68	7,2867	0,014324	3954,64	4527,59	7,1356	-	-	-	-
1100	0,020803	4189,18	4816,28	7,4845	0,015643	4167,38	4793,08	7,3264	-	-	-	-
1200	0,022589	4401,29	5078,97	7,6691	0,016940	4380,11	5057,72	7,5224	-	-	-	-
1300	0,024266	4615,96	5343,95	7,8432	0,018229	4594,28	5323,45	7,6969	-	-	-	-

Tabela B.1.4
Água líquida comprimida

T	P = 500 kPa (151,86 °C)				P = 2000 kPa (212,42 °C)				P = 5000 kPa (263,99 °C)			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,001093	639,66	640,21	1,8606	0,001177	906,42	908,77	2,4473	0,001286	1147,78	1154,21	2,9201
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,000998	0,03	5,02	0,0001
0,01	0,000999	0,01	0,51	0,0000	0,000999	0,03	2,03	0,0001	-	-	-	-
20	0,001002	83,91	84,41	0,2965	0,001001	83,82	85,82	0,2962	0,001000	83,64	88,64	0,2955
40	0,001008	167,47	167,98	0,5722	0,001007	167,29	169,30	0,5716	0,001006	166,93	171,95	0,5705
60	0,001017	251,00	251,51	0,8308	0,001016	250,73	252,77	0,8300	0,001015	250,21	255,28	0,8284
80	0,001029	334,73	335,24	1,0749	0,001028	334,38	336,44	1,0739	0,001027	333,69	338,83	1,0719
100	0,001043	418,80	419,32	1,3065	0,001043	418,36	420,45	1,3053	0,001041	417,50	422,71	1,3030
120	0,001060	503,37	503,90	1,5273	0,001059	502,84	504,96	1,5259	0,001058	501,79	507,07	1,5232
140	0,001080	588,66	589,20	1,7389	0,001079	588,02	590,18	1,7373	0,001077	586,74	592,13	1,7342
160	-	-	-	-	0,001101	674,14	676,34	1,9410	0,001099	672,61	678,10	1,9374
180	-	-	-	-	0,001127	761,46	763,71	2,1382	0,001124	759,62	765,24	2,1341
200	-	-	-	-	0,001156	850,30	852,61	2,3301	0,001153	848,08	853,85	2,3254
220	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001187	938,43	944,36	2,5128
240	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001226	1031,34	1037,47	2,6978
260	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001275	1127,92	1134,30	2,8829
P = 10 000 kPa (311,06 °C)				P = 15 000 kPa (342,24 °C)				P = 20 000 kPa (365,81 °C)				
Sat.	0,001452	1393,00	1407,53	3,3595	0,001658	1585,58	1610,45	3,6847	0,002035	1785,47	1826,18	4,0137
0	0,000995	0,10	10,05	0,0003	0,000993	0,15	15,04	0,0004	0,000990	0,20	20,00	0,0004
20	0,000997	83,35	83,32	0,2945	0,000995	83,05	97,97	0,2934	0,000993	82,75	102,61	0,2922
40	0,001003	166,33	176,36	0,5685	0,001001	165,73	180,75	0,5665	0,000999	165,15	185,14	0,5646
60	0,001013	249,34	259,47	0,8258	0,001011	248,49	263,65	0,8231	0,001008	247,66	267,82	0,8205
80	0,001025	332,56	342,81	1,0687	0,001022	331,46	346,79	1,0655	0,001020	330,38	350,78	1,0623
100	0,001039	416,09	426,48	1,2992	0,001036	414,72	430,26	1,2954	0,001034	413,37	434,04	1,2917
120	0,001055	500,07	510,61	1,5188	0,001052	498,39	514,17	1,5144	0,001050	496,75	517,74	1,5101
140	0,001074	584,67	595,40	1,7291	0,001071	582,64	598,70	1,7241	0,001068	580,67	602,03	1,7192
160	0,001195	670,11	681,07	1,9316	0,001092	667,69	684,07	1,9259	0,001089	665,34	687,11	1,9203
180	0,001120	756,63	767,83	2,1274	0,001116	753,74	770,48	2,1209	0,001112	750,94	773,18	2,1146
200	0,001148	844,49	855,97	2,3178	0,001143	841,04	858,18	2,3103	0,001139	837,70	860,47	2,3031
220	0,001181	934,07	945,98	2,5038	0,001175	929,89	947,52	2,4952	0,001169	925,89	949,27	2,4869
240	0,001219	1025,94	1038,13	2,6872	0,001211	1020,82	1038,99	2,6770	0,001205	1015,94	1040,04	2,6673
260	0,001265	1121,03	1133,68	2,8698	0,001255	1114,59	1133,41	2,8575	0,001246	1108,53	1133,45	2,8459
280	0,001322	1220,90	1234,11	3,0547	0,001308	1212,47	1232,09	3,0392	0,001297	1204,69	1230,62	3,0248
300	0,001397	1328,34	1342,31	3,2468	0,001377	1316,58	1337,23	3,2259	0,001360	1306,10	1333,29	3,2071
320	-	-	-	-	0,001472	1431,05	1453,13	3,4246	0,001444	1415,66	1444,53	3,3978
340	-	-	-	-	0,001631	1567,42	1591,88	3,6545	0,001568	1539,64	1571,01	3,6074
360	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001823	170		

Tabela B.1.4 (continuação)
Água líquida comprimida

T °C	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 30\,000\text{ kPa}$				$P = 50\,000\text{ kPa}$				
0	0,000986	0,25	29,82	0,0001	0,000977	0,20	49,03	-0,0014
20	0,000989	82,16	111,82	0,2898	0,000980	80,98	130,00	0,2847
40	0,000995	164,01	193,87	0,5606	0,000987	161,84	211,20	0,5526
60	0,001004	246,03	276,16	0,8153	0,000996	242,96	292,77	0,8051
80	0,001016	328,28	358,75	1,0561	0,001007	324,32	374,68	1,0439
100	0,001029	410,76	441,63	1,2844	0,001020	405,86	456,87	1,2703
120	0,001044	493,58	524,91	1,5017	0,001035	487,63	539,37	1,4857
140	0,001062	576,86	608,73	1,7097	0,001052	569,76	622,33	1,6915
160	0,001082	660,81	693,27	1,9095	0,001070	652,39	705,91	1,8890
180	0,001105	745,57	778,71	2,1024	0,001091	735,68	790,24	2,0793
200	0,001130	831,34	865,24	2,2892	0,001115	819,73	875,46	2,2634
220	0,001159	918,32	953,09	2,4710	0,001141	904,67	961,71	2,4419
240	0,001192	1006,84	1042,60	2,6489	0,001170	990,69	1049,20	2,6158
260	0,001230	1097,38	1134,29	2,8242	0,001203	1078,06	1138,23	2,7860
280	0,001275	1190,69	1228,96	2,9985	0,001242	1167,19	1229,26	2,9536
300	0,001330	1287,89	1327,80	3,1740	0,001286	1258,66	1322,95	3,1200
320	0,001400	1390,64	1432,63	3,3538	0,001339	1353,23	1420,17	3,2867
340	0,001492	1501,71	1546,47	3,5425	0,001403	1451,91	1522,07	3,4556
360	0,001627	1626,57	1675,36	3,7492	0,001484	1555,97	1630,16	3,6290
380	0,001869	1781,35	1837,43	4,0010	0,001588	1667,13	1746,54	3,8100

Tabela B.1.5
Saturação sólido – vapor

Temp. T °C	Pressão p kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Sólido sat. $v_f \times 10^3$	Evap. v_g	Vapor sat. v_g	Sólido sat. u_f	Subl. u_{fg}	Vapor sat. u_g	Sólido sat. h_f	Subl. h_{fg}	Vapor sat. h_g	Sólido sat. s_f	Subl. s_{fg}	Vapor sat. s_g
0,01	0,6113	0,0010908	206,152	206,153	-333,40	2708,7	2375,3	-333,40	2834,7	2501,3	-1,2210	10,3772	9,1562
0	0,6108	0,0010908	206,314	206,315	-333,42	2708,7	2375,3	-333,42	2834,8	2501,3	-1,2211	10,3776	9,1565
-2	0,5177	0,0010905	241,662	241,663	-337,61	2710,2	2372,5	-337,61	2835,3	2497,6	-1,2369	10,4562	9,2193
-4	0,4376	0,0010901	283,798	283,799	-341,78	2711,5	2369,8	-341,78	2835,7	2494,0	-1,2526	10,5358	9,2832
-6	0,3689	0,0010898	334,138	334,139	-345,91	2712,9	2367,0	-345,91	2836,2	2490,3	-1,2683	10,6165	9,3482
-8	0,3102	0,0010894	394,413	394,414	-350,02	2714,2	2364,2	-350,02	2836,6	2486,6	-1,2839	10,6982	9,4143
-10	0,2601	0,0010891	466,756	466,757	-354,09	2715,5	2361,4	-354,09	2837,0	2482,9	-1,2995	10,7809	9,4815
-12	0,2176	0,0010888	553,802	553,803	-358,14	2716,8	2358,7	-358,14	2837,3	2479,2	-1,3150	10,8648	9,5498
-14	0,1815	0,0010884	658,824	658,824	-362,16	2718,0	2355,9	-362,16	2837,6	2475,5	-1,3306	10,9498	9,6192
-16	0,1510	0,0010881	785,906	785,907	-366,14	2719,2	2353,1	-366,14	2837,9	2471,8	-1,3461	11,0359	9,6898
-18	0,1252	0,0010878	940,182	940,183	-370,10	2720,4	2350,3	-370,10	2838,2	2468,1	-1,3617	11,1233	9,7616
-20	0,10355	0,0010874	1128,112	1128,113	-374,03	2721,6	2347,5	-374,03	2838,4	2464,3	-1,3772	11,2120	9,8348
-22	0,08535	0,0010871	1357,863	1357,864	-377,93	2722,7	2344,7	-377,93	2838,6	2460,6	-1,3928	11,3020	9,9093
-24	0,07012	0,0010868	1639,752	1639,753	-381,80	2723,7	2342,0	-381,80	2838,7	2456,9	-1,4083	11,3935	9,9852
-26	0,05741	0,0010864	1986,775	1986,776	-385,64	2724,8	2339,2	-385,64	2838,9	2453,2	-1,4239	11,4864	10,0625
-28	0,04684	0,0010861	2415,200	2415,201	-389,45	2725,8	2336,4	-389,45	2839,0	2449,5	-1,4394	11,5808	10,1413
-30	0,03810	0,0010858	2945,227	2945,228	-393,23	2726,8	2333,6	-393,23	2839,0	2445,8	-1,4550	11,6765	10,2215
-32	0,03090	0,0010854	3601,822	3601,823	-396,98	2727,8	2330,8	-396,98	2839,1	2442,1	-1,4705	11,7733	10,3028
-34	0,02499	0,0010851	4416,252	4416,253	-400,71	2728,7	2328,0	-400,71	2839,1	2438,4	-1,4860	11,8713	10,3853
-36	0,02016	0,0010848	5430,115	5430,116	-404,40	2729,6	2325,2	-404,40	2839,1	2434,7	-1,5014	11,9704	10,4690
-38	0,01618	0,0010844	6707,021	6707,022	-408,06	2730,5	2322,4	-408,06	2839,0	2431,0	-1,5168	12,0714	10,5546
-40	0,01286	0,0010841	8366,395	8366,396	-411,70	2731,3	2319,6	-411,70	2838,9	2427,2	-1,5321	12,1768	10,6447

Os valores tabelados de v_g estão multiplicados por 1000. Por exemplo, a -8 °C: $v_g \times 10^3 = 1,0898$. Portanto, $v_g = 0,0010898\text{ m}^3/\text{kg}$. (N.T.)

Tabela B.2 — Propriedades Termodinâmicas da Amônia

Tabela B.2.1 — Amônia saturada

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado		Vapor saturado	Líquido saturado		Vapor saturado	Líquido saturado		Vapor saturado	Líquido saturado		Vapor saturado
		v_f	v_g	v_g	u_f	u_g	u_g	h_f	h_g	h_g	s_f	s_g	s_g
-50	40,9	0,001424	2,62557	2,62700	-43,82	1309,1	1265,2	-43,76	1416,3	1372,6	-0,1916	6,3470	6,1554
-45	54,5	0,001437	2,00489	2,00632	-22,01	1293,5	1271,4	-21,94	1402,8	1380,8	-0,0950	6,1484	6,0534
-40	71,7	0,001450	1,55111	1,55256	-0,10	1277,6	1277,4	0	1388,8	1388,8	0	5,9567	5,9567
-35	93,2	0,001463	1,21466	1,21613	21,93	1261,3	1283,3	22,06	1374,5	1396,5	0,0935	5,7715	5,8650
-30	119,5	0,001476	0,96192	0,96339	44,08	1244,8	1288,9	44,26	1359,8	1404,0	0,1856	5,5922	5,7778
-25	151,6	0,001490	0,76970	0,77119	66,36	1227,9	1294,3	66,58	1344,6	1411,2	0,2763	5,4185	5,6947
-20	190,2	0,001504	0,62184	0,62334	88,76	1210,7	1299,5	89,05	1329,0	1418,0	0,3657	5,2498	5,6155
-15	236,3	0,001519	0,50686	0,50838	111,30	1193,2	1304,5	111,66	1312,9	1424,6	0,4538	5,0859	5,5397
-10	290,9	0,001534	0,41655	0,41808	133,96	1175,2	1309,2	134,41	1296,4	1430,8	0,5408	4,9265	5,4673
-5	354,9	0,001550	0,34493	0,34648	156,76	1157,0	1313,7	157,31	1279,4	1436,7	0,6266	4,7711	5,3977
0	429,6	0,001566	0,28763	0,28920	179,69	1138,3	1318,0	180,36	1261,8	1442,2	0,7114	4,6195	5,3309
5	515,9	0,001583	0,24140	0,24299	202,77	1119,2	1322,0	203,58	1243,7	1447,3	0,7951	4,4715	5,2666
10	615,2	0,001600	0,20381	0,20541	225,99	1099,7	1325,7	226,97	1225,1	1452,0	0,8779	4,3266	5,2045
15	728,6	0,001619	0,17300	0,17462	249,36	1079,7	1329,1	250,54	1205,8	1456,3	0,9598	4,1846	5,1444
20	857,5	0,001638	0,14758	0,14922	272,89	1059,3	1332,2	274,30	1185,9	1460,2	1,0408	4,0452	5,0860
25	1003,2	0,001658	0,12647	0,12813	296,59	1038,4	1335,0	298,25	1165,2	1463,5	1,1210	3,9083	5,0293
30	1167,0	0,001680	0,10881	0,11049	320,46	1016,9	1337,4	322,42	1143,9	1466,3	1,2005	3,7734	4,9738
35	1350,4	0,001702	0,09397	0,09567	344,50	994,9	1339,4	346,80	1121,8	1468,6	1,2792	3,6403	4,9196
40	1554,9	0,001725	0,08141	0,08313	368,74	972,2	1341,0	371,43	1098,8	1470,2	1,3574	3,5088	4,8662
45	1782,0	0,001750	0,07073	0,07248	393,19	948,9	1342,1	396,31	1074,9	1471,2	1,4350	3,3786	4,8136
50	2033,1	0,001777	0,06159	0,06337	417,87	924,8	1342,7	421,48	1050,0	1471,5	1,5121	3,2493	4,7614
55	2310,1	0,001804	0,05375	0,05555	442,79	899,9	1342,7	446,96	1024,1	1471,0	1,5888	3,1208	4,7095
60	2614,4	0,001834	0,04697	0,04880	467,99	874,2	1342,1	472,79	997,0	1469,7	1,6652	2,9925	4,6577
65	2947,8	0,001866	0,04109	0,04296	493,51	847,4	1340,9	499,01	968,5	1467,5	1,7415	2,8642	4,6057
70	3312,0	0,001900	0,03597	0,03787	519,39	819,5	1338,9	525,69	938,7	1464,4	1,8178	2,7354	4,5533
75	3709,0	0,001937	0,03148	0,03341	545,70	790,4	1336,1	552,88	907,2	1460,1	1,8943	2,6058	4,5001
80	4140,5	0,001978	0,02753	0,02951	572,50	759,9	1332,4	580,69	873,9	1454,6	1,9712	2,4746	4,4458
85	4608,6	0,002022	0,02404	0,02606	599,90	727,8	1327,7	609,21	838,6	1447,8	2,0488	2,3413	4,3901
90	5115,3	0,002071	0,02093	0,02300	627,99	693,7	1321,7	638,59	800,8	1439,4	2,1273	2,2051	4,3325
95	5662,9	0,002126	0,01815	0,02028	656,95	657,4	1314,4	668,99	760,2	1429,2	2,2073	2,0650	4,2723
100	6253,7	0,002188	0,01565	0,01784	686,96	618,4	1305,3	700,64	716,2	1416,9	2,2893	1,9195	4,2088
105	6890,4	0,002261	0,01337	0,01564	718,30	575,9	1294,2	733,87	668,1	1402,0	2,3740	1,7667	4,1407
110	7575,7	0,002347	0,01128	0,01363	751,37	529,1	1280,5	769,15	614,6	1383,7	2,4625	1,6040	4,0685
115	8313,3	0,002452	0,00933	0,01178	786,82	476,2	1263,1	807,21	553,8	1361,0	2,5566	1,4267	3,9833
120	9107,2	0,002589	0,00744	0,01003	825,77	414,5	1240,3	849,36	482,3	1331,7	2,6593	1,2268	3,8861
125	9963,5	0,002783	0,00554	0,00833	870,69	337,7	1208,4	898,42	393,0	1291,4	2,7775	0,9870	3,7645
130	10891,6	0,003122	0,00337	0,00649	929,29	226,9	1156,2	963,29	263,7	1227,0	2,9326	0,6540	3,5866
132,3	11333,2	0,004255	0	0,00426	1037,62	0	1037,6	1085,85	0	1085,9	3,2316	0	3,2316

Tabela B.2.2

Amônia superaquecida

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	50 kPa (-46,53 °C)			100 kPa (-33,60 °C)			150 kPa (-25,22 °C)		
					v	u	h	v	u	h	v	u	h
					(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
Sat.	2,1752	1269,6	1378,3	6,0839	1,1381	1284,9	1398,7	5,8401	0,7787	1294,1	1410,9	5,6983	
-30	2,3448	1296,2	1413,4	6,2333	1,1573	1291,0	1406,7	5,8734	-	-	-	-	
-20	2,4463	1312,3	1434,6	6,3187	1,2101	1307,8	1428,8	5,9626	0,7977	1308,3	1422,9	5,7465	
-10	2,5471	1328,4	1455,7	6,4006	1,2621	1324,6	1450,8	6,0477	0,8336	1320,7	1445,7	5,8349	
0	2,6474	1344,5	1476,9	6,4795	1,3136	1341,3	1472,6	6,1291	0,8689	1337,9	1468,3	5,9189	
10	2,7472	1360,7	1498,1	6,5556	1,3647	1357,9	1494,4	6,2073	0,9037	1355,0	1490,6	5,9992	
20	2,8466	1377,0	1519,3	6,6293	1,4153	1374,5	1516,1	6,2826	0,9382	1372,0	1512,8	6,0761	
30	2,9458	1393,3	1540,6	6,7008	1,4657	1391,2	1537,7	6,3553	0,9723	1389,0	1534,9	6,1502	
40	3,0447	1409,8	1562,0	6,7703	1,5158	1407,9	1559,5	6,4258	1,0062	1406,0	1556,9	6,2217	
50	3,1435	1426,3	1583,5	6,8379	1,5658	1424,7	1581,2	6,4943	1,0398	1423,0	1578,9	6,2910	
60	3,2421	1443,0	1605,1	6,9038	1,6156	1441,5	1603,1	6,5609	1,0734	1440,0	1601,0	6,3583	
70	3,3406	1459,9	1626,9	6,9682	1,6653	1458,5	1625,1	6,6258	1,1068	1457,2	1623,2	6,4238	
80	3,4390	1476,9	1648,8	7,0312	1,7148	1475,6	1647,1	6,6892	1,1401	1474,4	1645,4	6,4877	
100	3,6355	1511,4	1693,2	7,1533	1,8137	1510,3	1691,7	6,8120	1,2065	1509,3	1690,2	6,6112	
120	3,8318	1546,6	1738,2	7,2708	1,9124	1545,7	1736,9	6,9300	1,2726	1544,8	1735,6	6,7297	
140	4,0280	1582,5	1783,9	7,3842	2,0109	1581,7	1782,8	7,0439	1,3386	1580,9	1781,7	6,8439	
160	4,2240	1619,2	1830,4	7,4941	2,1093	1618,5	1829,4	7,1540	1,4044	1617,8	1828,4	6,9544	
180	4,4199	1656,7	1877,7	7,6008	2,2075	1656,0	1876,8	7,2609	1,4701	1655,4	1875,9	7,0615	
200	4,6157	1694,9	1925,7	7,7045	2,3057	1694,3	1924,9	7,3648	1,5357	1693,7	1924,1	7,1666	
220	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6013	1732,9	1973,1	7,2670	
					200 kPa (-18,86 °C)			300 kPa (-9,24 °C)			400 kPa (-1,89 °C)		
Sat.	0,5946	1300,6	1419,6	5,5979	0,40607	1309,9	1431,7	5,4565	0,30942	1316,4	1440,2	5,3559	
-10	0,6193	1316,7	1440,6	5,6791	-	-	-	-	-	-	-	-	
0	0,6465	1334,5	1463,8	5,7659	0,42382	1327,5	1454,7	5,5420	0,31227	1320,2	1445,1	5,3741	
10	0,6732	1352,1	1488,8	5,8484	0,44251	1346,1	1478,9	5,6290	0,32701	1339,9	1470,7	5,4663	
20	0,6995	1369,5	1509,4	5,9270	0,46077	1364,4	1502,6	5,7113	0,34129	1359,1	1495,6	5,5525	
30	0,7255	1386,8	1531,9	6,0025	0,47870	1382,3	1526,0	5,7896	0,35520	1377,7	1519,8	5,6338	
40	0,7513	1404,0	1554,3	6,0751	0,49636	1400,1	1549,0	5,8645	0,36884	1396,1	1543,6	5,7111	
50	0,7769	1421,3	1576,6	6,1453	0,51382	1417,8	1571,9	5,9365	0,38226	1414,2	1567,1	5,7850	
60	0,8023	1438,5	1598,9	6,2133	0,53111	1435,4	1594,7	6,0060	0,39550	1432,2	1590,4	5,8560	
70	0,8275	1455,8	1621,3	6,2794	0,54827	1453,0	1617,5	6,0732	0,40860	1450,1	1613,6	5,9244	
80	0,8527	1473,1	1643,7	6,3437	0,56532	1470,6	1640,2	6,1385	0,42160	1468,0	1636,7	5,9907	

Tabela B.2.2 (continuação)
Amônia superaquecida

T °C	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
500 kPa (4,13 °C)												
Sat.	0,25035	1321,3	1446,5	5,2776	0,21038	1325,2	1451,4	5,2133	0,15958	1330,9	1458,6	5,1110
10	0,25757	1333,5	1462,3	5,3340	0,21115	1326,7	1453,4	5,2205	-	-	-	-
20	0,26949	1353,6	1488,3	5,4244	0,22154	1347,9	1480,8	5,3156	0,16138	1335,8	1464,9	5,1328
30	0,28103	1373,0	1513,5	5,5090	0,23152	1368,2	1507,1	5,4037	0,16947	1358,0	1493,5	5,2287
40	0,29227	1392,0	1538,1	5,5889	0,24118	1387,8	1532,5	5,4862	0,17720	1379,0	1520,8	5,3171
50	0,30328	1410,6	1562,2	5,6647	0,25059	1406,9	1557,3	5,5641	0,18465	1399,3	1547,0	5,3996
60	0,31410	1429,0	1586,1	5,7373	0,25981	1425,7	1581,6	5,6383	0,19189	1419,0	1572,5	5,4774
70	0,32478	1447,3	1609,6	5,8070	0,26888	1444,3	1605,7	5,7094	0,19886	1438,3	1597,5	5,5513
80	0,33535	1465,4	1633,1	5,8744	0,27783	1462,8	1629,5	5,7778	0,20590	1457,4	1622,1	5,6219
100	0,35621	1501,7	1679,8	6,0031	0,29545	1499,5	1676,8	5,9081	0,21949	1495,0	1670,6	5,7555
120	0,37681	1538,2	1726,6	6,1253	0,31281	1536,3	1724,0	6,0314	0,23280	1532,5	1718,7	5,8811
140	0,39722	1575,2	1773,8	6,2422	0,32987	1573,5	1771,5	6,1491	0,24590	1570,1	1766,9	6,0006
160	0,41748	1612,7	1821,4	6,3548	0,34699	1611,2	1819,4	6,2623	0,25886	1608,2	1815,3	6,1150
180	0,43764	1650,8	1869,6	6,4636	0,36389	1649,5	1867,8	6,3717	0,27170	1646,8	1864,2	6,2254
200	0,45771	1689,6	1918,5	6,5691	0,38071	1688,5	1916,9	6,4776	0,28445	1686,1	1913,6	6,3322
220	0,47770	1729,2	1968,1	6,6717	0,39745	1728,2	1966,6	6,5806	0,29712	1726,0	1963,7	6,4358
240	0,49763	1769,5	2018,3	6,7717	0,41412	1768,6	2017,0	6,6808	0,30973	1766,7	2014,5	6,5367
260	0,51749	1810,6	2069,3	6,8692	0,43073	1809,8	2068,2	6,7786	0,32228	1808,1	2065,9	6,6350
280	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33477	1850,2	2118,0	6,7310
300	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34722	1893,1	2170,9	6,8248
1000 kPa (24,90 °C)												
Sat.	0,12852	1334,9	1463,4	5,0304	0,10751	1337,8	1466,8	4,9635	0,09231	1339,8	1469,0	4,9060
30	0,13206	1347,1	1479,1	5,0826	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0,13868	1369,8	1508,5	5,1778	0,11287	1360,0	1495,4	5,0564	0,09432	1349,5	1481,6	4,9463
50	0,14499	1391,3	1536,3	5,2654	0,11846	1383,0	1525,1	5,1497	0,09942	1374,2	1513,4	5,0462
60	0,15106	1412,1	1563,1	5,3471	0,12378	1404,8	1553,3	5,2357	0,10423	1397,2	1543,1	5,1370
70	0,15695	1432,2	1589,1	5,4240	0,12890	1425,8	1580,5	5,3159	0,10882	1419,2	1571,5	5,2209
80	0,16270	1451,9	1614,6	5,4971	0,13387	1446,2	1606,8	5,3916	0,11324	1440,3	1598,8	5,2994
100	0,17389	1490,5	1664,3	5,6342	0,14347	1485,8	1658,0	5,5325	0,12172	1481,0	1651,4	5,4443
120	0,18477	1528,6	1713,4	5,7622	0,15275	1524,7	1708,0	5,6631	0,12986	1520,7	1702,5	5,5775
140	0,19545	1566,8	1762,2	5,8834	0,16181	1563,3	1757,5	5,7860	0,13777	1559,9	1752,8	5,7023
160	0,20597	1605,2	1811,2	5,9992	0,17071	1602,2	1807,1	5,9031	0,14552	1599,2	1802,9	5,8208
180	0,21638	1644,2	1860,5	6,1105	0,17950	1641,5	1856,9	6,0156	0,15315	1638,8	1853,2	5,9343
200	0,22669	1683,7	1910,4	6,2182	0,18819	1681,3	1907,1	6,1241	0,16068	1678,9	1903,8	6,0437
220	0,23693	1723,9	1960,8	6,3226	0,19680	1721,8	1957,9	6,2292	0,16813	1719,6	1955,0	6,1495
240	0,24710	1764,8	2011,9	6,4241	0,20534	1762,9	2009,3	6,3313	0,17551	1761,0	2006,7	6,2523
260	0,25720	1806,4	2063,6	6,5229	0,21382	1804,7	2061,3	6,4308	0,18283	1803,0	2059,0	6,3523
280	0,26726	1848,8	2116,0	6,6194	0,22225	1847,3	2114,0	6,5278	0,19010	1845,8	2111,9	6,4498
300	0,27726	1891,8	2169,1	6,7137	0,23063	1890,6	2167,3	6,6225	0,19732	1889,3	2165,5	6,5450
320	-	-	-	-	0,23897	1934,6	2221,3	6,7151	0,20450	1933,5	2219,8	6,6380

Tabela B.2.2 (continuação)
Amônia superaquecida

T °C	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
1600 kPa (41,03 °C)								
Sat.	0,08079	1341,2	1470,5	4,8553	0,06444	1342,6	1471,5	4,7680
50	0,08506	1364,9	1501,0	4,9510	0,06471	1344,5	1473,9	4,7754
60	0,08951	1389,3	1532,5	5,0472	0,06875	1372,3	1509,8	4,8848
70	0,09372	1412,3	1562,3	5,1351	0,07246	1397,8	1542,7	4,9821
80	0,09774	1434,3	1590,6	5,2167	0,07595	1421,6	1573,5	5,0707
100	0,10539	1476,2	1644,8	5,3659	0,08248	1466,1	1631,1	5,2294
120	0,11268	1516,6	1696,9	5,5018	0,08861	1508,3	1685,5	5,3714
140	0,11974	1556,4	1748,0	5,6286	0,09447	1549,3	1738,2	5,5022
160	0,12662	1596,1	1798,7	5,7485	0,10016	1589,9	1790,2	5,6251
180	0,13339	1636,1	1849,5	5,8631	0,10571	1630,6	1842,0	5,7420
200	0,14005	1676,5	1900,5	5,9734	0,11116	1671,6	1893,9	5,8540
220	0,14663	1717,4	1952,0	6,0800	0,11652	1713,1	1946,1	5,9621
240	0,15314	1759,0	2004,1	6,1834	0,12182	1755,2	1998,8	6,0668
260	0,15959	1801,3	2056,7	6,2839	0,12705	1797,9	2052,0	6,1685
280	0,16599	1844,3	2109,9	6,3819	0,13224	1841,3	2105,8	6,2675
300	0,17234	1888,0	2163,7	6,4775	0,13737	1885,4	2160,1	6,3641
320	0,17865	1932,4	2218,2	6,5710	0,14246	1930,2	2215,1	6,4583
340	0,18492	1977,5	2273,4	6,6624	0,14751	1975,6	2270,7	6,5505
360	0,19115	2023,3	2329,1	6,7519	0,15253	2021,8	2326,8	6,6406
5000 kPa (88,90 °C)								
Sat.	0,02365	1323,2	1441,4	4,3454	0,00826	1206,8	1289,4	3,7587
100	0,02636	1369,7	1501,5	4,5091	-	-	-	-
120	0,03024	1435,1	1586,3	4,7306	-	-	-	-
140	0,03350	1489,8	1657,3	4,9068	0,01195	1341,8	1461,3	4,1839
160	0,03643	1539,5	1721,7	5,0591	0,01461	1432,2	1578,3	4,4610
180	0,03916	1586,9	1782,7	5,1968	0,01666	1500,6	1667,2	4,6617
200	0,04174	1633,1	1841,8	5,3245	0,01842	1560,3	1744,5	4,8287
220	0,04422	1678,9	1900,0	5,4450	0,02001	1615,8	1816,0	4,9767
240	0,04662	1724,8	1957,9	5,5600	0,02150	1669,2	1884,2	5,1123
260	0,04895	1770,9	2015,6	5,6704	0,02290	1721,6	1950,6	5,2392
280	0,05123	1817,4	2073,6	5,7771	0,02424	1773,6	2015,9	5,3596
300	0,05346	1864,5	2131,8	5,8805	0,02552	1825,5	2080,7	5,4746
320	0,05565	1912,1	2190,3	5,9809	0,02676	1877,6	2145,2	5,5852
340	0,05779	1960,3	2249,2	6,0786	0,02796	1930,0	2209,6	5,6921
360	0,05990	2009,1	2308,6	6,1738	0,02913	1982,8	2274,1	5,7955
380	0,06198	2058,5	2368,4	6,2668	0,03026	2036,1	2338,7	5,8960
400	0,06403	2108,4	2428,6	6,3576	0,03137	2089,8	2403,5	5,9937
420	0,06606	2159,0	2489,3	6,4464	0,03245	2143,9	2468,5	6,0888
440	0,06806	2210,1	2550,4	6,5334	0,03351	2198,5	2533,7	6,1815

Tabela B.3 – Propriedades Termodinâmicas do Dióxido de Carbono

Tabela B.3.1 – Dióxido de carbono saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_f	Evap. v_g	Vapor saturado v_g	Líquido saturado u_f	Evap. u_g	Vapor saturado u_g	Líquido saturado h_f	Evap. h_g	Vapor saturado h_g	Líquido saturado s_f	Evap. s_{fg}	Vapor saturado s_g
-50,0	682,3	0,000866	0,05492	0,05579	-20,55	302,26	281,71	-19,96	339,73	319,77	-0,0863	1,5224	1,4362
-48	739,5	0,000872	0,05075	0,05162	-16,64	298,86	282,21	-16,00	336,38	320,38	-0,0688	1,4940	1,4252
-46	800,2	0,000878	0,04694	0,04782	-12,72	295,42	282,69	-12,02	332,98	320,96	-0,0515	1,4659	1,4144
-44	864,4	0,000883	0,04347	0,04435	-8,80	291,94	283,15	-8,03	329,52	321,49	-0,0342	1,4380	1,4038
-42	932,5	0,000889	0,04029	0,04118	-4,85	288,42	283,57	-4,02	326,00	321,97	-0,0171	1,4103	1,3933
-40	1004,5	0,000896	0,03739	0,03828	-0,90	284,86	283,96	0	322,42	322,42	0	1,3829	1,3829
-38	1080,5	0,000902	0,03472	0,03562	3,07	281,26	284,33	4,04	318,78	322,82	0,0170	1,3556	1,3726
-36	1160,7	0,000909	0,03227	0,03318	7,05	277,60	284,66	8,11	315,06	323,17	0,0339	1,3285	1,3624
-34	1245,2	0,000915	0,03002	0,03093	11,05	273,90	284,95	12,19	311,28	323,47	0,0507	1,3016	1,3523
-32	1334,2	0,000922	0,02794	0,02886	15,07	270,14	285,21	16,30	307,43	323,72	0,0675	1,2748	1,3423
-30	1427,8	0,000930	0,02603	0,02696	19,11	266,32	285,43	20,43	303,48	323,92	0,0842	1,2481	1,3323
-28	1526,1	0,000937	0,02425	0,02519	23,17	262,45	285,61	24,60	299,46	324,06	0,1009	1,2215	1,3224
-26	1629,3	0,000945	0,02261	0,02356	27,25	258,51	285,75	28,78	295,35	324,14	0,1175	1,1950	1,3125
-24	1737,5	0,000953	0,02110	0,02205	31,35	254,50	285,85	33,00	291,15	324,15	0,1341	1,1686	1,3026
-22	1850,9	0,000961	0,01968	0,02065	35,48	250,41	285,89	37,26	286,85	324,11	0,1506	1,1421	1,2928
-20	1969,6	0,000969	0,01837	0,01934	39,64	246,25	285,89	41,55	282,44	323,99	0,1672	1,1157	1,2829
-18	2093,8	0,000978	0,01715	0,01813	43,82	242,01	285,84	45,87	277,93	323,80	0,1837	1,0893	1,2730
-16	2223,7	0,000987	0,01601	0,01700	48,04	237,68	285,73	50,24	273,30	323,53	0,2003	1,0628	1,2631
-14	2359,3	0,000997	0,01495	0,01595	52,30	233,26	285,56	54,65	268,54	323,19	0,2169	1,0362	1,2531
-12	2501,0	0,001007	0,01396	0,01497	56,59	228,73	285,32	59,11	263,65	322,76	0,2334	1,0096	1,2430
-10	2648,7	0,001017	0,01303	0,01405	60,92	224,10	285,02	63,62	258,61	322,23	0,2501	0,9828	1,2328
-8	2802,7	0,001028	0,01216	0,01319	65,30	219,35	284,65	68,18	253,43	321,61	0,2668	0,9558	1,2226
-6	2963,2	0,001040	0,01134	0,01238	69,73	214,47	284,20	72,81	248,08	320,89	0,2835	0,9286	1,2121
-4	3130,3	0,001052	0,01057	0,01162	74,20	209,46	283,66	77,50	242,55	320,05	0,3003	0,9012	1,2015
-2	3304,2	0,001065	0,00985	0,01091	78,74	204,29	283,03	82,26	236,83	319,09	0,3173	0,8734	1,1907
0	3485,1	0,001078	0,00916	0,01024	83,34	198,96	282,30	87,10	230,89	317,99	0,3344	0,8453	1,1797
2	3673,3	0,001093	0,00852	0,00961	88,01	193,44	281,46	92,02	224,73	316,75	0,3516	0,8167	1,1683
4	3868,8	0,001108	0,00790	0,00901	92,76	187,73	280,49	97,05	218,30	315,35	0,3690	0,7877	1,1567
6	4072,0	0,001124	0,00732	0,00845	97,60	181,78	279,38	102,18	211,59	313,77	0,3866	0,7580	1,1446
8	4283,1	0,001142	0,00677	0,00791	102,54	175,57	278,11	107,43	204,56	311,99	0,4045	0,7276	1,1321
10	4502,2	0,001161	0,00624	0,00740	107,60	169,07	276,67	112,83	197,15	309,98	0,4228	0,6963	1,1190
12	4729,7	0,001182	0,00573	0,00691	112,79	162,23	275,02	118,38	189,33	307,72	0,4414	0,6640	1,1053
14	4965,8	0,001205	0,00524	0,00645	118,14	154,99	273,13	124,13	181,02	305,15	0,4605	0,6304	1,0909
16	5210,8	0,001231	0,00477	0,00600	123,69	147,26	270,95	130,11	172,12	302,22	0,4802	0,5952	1,0754
18	5465,1	0,001260	0,00431	0,00557	129,48	138,95	268,43	136,36	162,50	298,86	0,5006	0,5581	1,0588
20	5729,1	0,001293	0,00386	0,00515	135,56	129,90	265,46	142,97	152,00	294,96	0,5221	0,5185	1,0406
22	6003,1	0,001332	0,00341	0,00474	142,03	119,89	261,92	150,02	140,34	290,36	0,5449	0,4755	1,0203
24	6287,7	0,001379	0,00295	0,00433	149,04	108,55	257,59	157,71	127,09	284,80	0,5695	0,4277	0,9972
26	6583,7	0,001440	0,00247	0,00391	156,88	95,20	252,07	166,36	111,45	277,80	0,5971	0,3726	0,9697
28	6891,8	0,001526	0,00193	0,00346	166,20	78,26	244,46	176,72	91,58	268,30	0,6301	0,3041	0,9342
30	7213,7	0,001685	0,00121	0,00290	179,49	51,83	231,32	191,65	60,58	252,23	0,6778	0,1998	0,8776
31,0	7377,3	0,002139	0	0,00214	203,56	0	203,56	219,34	0	219,34	0,7680	0	0,7680

Tabela B.3.2

Dióxido de carbono superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)				
									400 kPa (NA)			
Sat.	-	-	-	-	0,04783	282,69	320,95	1,4145				
-40	0,10499	292,46	334,46	1,5947	0,04966	287,05	326,78	1,4398				
-20	0,11538	305,30	351,46	1,6646	0,05546	301,13	345,49	1,5168				
0	0,12552	318,31	368,51	1,7295	0,06094	314,92	363,67	1,5859				
20	0,13551	331,57	385,77	1,7904	0,06623	328,73	381,72	1,6497				
40	0,14538	345,14	403,29	1,8482	0,07140	342,70	399,82	1,7094				
60	0,15518	359,03	421,10	1,9033	0,07648	356,90	418,09	1,7660				
80	0,16491	373,25	439,21	1,9561	0,08150	371,37	436,57	1,8199				
100	0,17460	387,80	457,64	2,0069	0,08647	386,11	455,29	1,8714				
120	0,18425	402,67	476,37	2,0558	0,09141	401,15	474,27	1,9210				
140	0,19388	417,86	495,41	2,1030	0,09631	416,47	493,52	1,9687				
160	0,20348	433,35	514,74	2,1487	0,10119	432,07	513,03	2,0148				
180	0,21307	449,13	534,36	2,1930	0,10606	447,95	532,80	2,0594				
200	0,22264	465,20	554,26	2,2359	0,11090	464,11	552,83	2,1027				
220	0,23219	481,55	574,42	2,2777	0,11573	480,52	573,11	2,1447				
240	0,24173	498,16	594,85	2,3183	0,12056	497,20	593,64	2,1855				
260	0,25127	515,02	615,53	2,3578	0,12537	514,12	614,41	2,2252				
					1000 kPa (-40,12 °C)				1400 kPa (-30,58 °C)			
Sat.	0,03845	283,94	322,39	1,3835	0,02750	285,37	323,87	1,3352				
-20	0,04342	298,89	342,31	1,4655	0,02957	294,04	335,44	1,3819				
0	0,04799	313,15	361,14	1,5371	0,03315	309,42	355,83	1,4595				
20	0,05236	327,27	379,63	1,6025	0,03648	324,23	375,30	1,5283				
40	0,05660	341,46	398,05	1,6633	0,03966	338,90	394,42	1,5914				
60	0,06074	355,82	416,56	1,7206	0,04274	353,62	413,45	1,6503				
80	0,06482	370,42	435,23	1,7750	0,04575	368,48	432,52	1,7059				
100	0,06885	385,26	454,11	1,8270	0,04870	383,54	451,72	1,7588				
120	0,07284	400,38	473,22	1,8768	0,05161	398,83	471,09	1,8093				
140	0,07680	415,77	492,57	1,9249	0,05450	414,36	490,66	1,8579				
160	0,08074	431,43	512,17	1,9712	0,05736	430,14	510,44	1,9046				
180	0,08465	447,36	532,02	2,0160	0,06020	446,17	530,45	1,9498				
200	0,08856	463,56	552,11	2,0594	0,06302	462,45	550,68	1,9935				
220	0,09244	480,01	572,46	2,1015	0,06583	478,98	571,14	2,0358				
240	0,09632	496,72	593,04	2,1424	0,06863	495,76	591,83	2,0770				
260	0,10019	513,67	613,86	2,1822	0,07141	512,77	612,74	2,1169				
280	0,10405	530,86	634,90	2,2209	0,07419	530,01	633,88	2,1558				

Tabela B.3.2 (continuação)
Dióxido de carbono superaquecido

T °C	2000 kPa (-19,50 °C)				3000 kPa (-5,55 °C)			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,01903	285,88	323,95	1,2804	0,01221	284,09	320,71	1,2098
0	0,02193	303,24	347,09	1,3684	0,01293	290,52	329,32	1,2416
20	0,02453	319,37	368,42	1,4438	0,01512	310,21	355,56	1,3344
40	0,02693	334,88	388,75	1,5109	0,01698	327,61	378,55	1,4104
60	0,02922	350,19	408,64	1,5725	0,01868	344,14	400,19	1,4773
80	0,03143	365,49	428,36	1,6300	0,02029	360,30	421,16	1,5385
100	0,03359	380,90	448,07	1,6843	0,02182	376,35	441,82	1,5954
120	0,03570	396,46	467,85	1,7359	0,02331	392,42	462,35	1,6490
140	0,03777	412,22	487,76	1,7853	0,02477	408,57	482,87	1,6999
160	0,03982	428,18	507,83	1,8327	0,02619	424,87	503,44	1,7485
180	0,04186	444,37	528,08	1,8784	0,02759	441,34	524,12	1,7952
200	0,04387	460,79	548,53	1,9226	0,02898	457,99	544,92	1,8401
220	0,04587	477,43	569,17	1,9653	0,03035	474,83	565,88	1,8835
240	0,04786	494,31	590,02	2,0068	0,03171	491,88	587,01	1,9255
260	0,04983	511,41	611,08	2,0470	0,03306	509,13	608,30	1,9662
280	0,05180	528,73	632,34	2,0862	0,03440	526,59	629,78	2,0057
300	0,05377	546,26	653,80	2,1243	0,03573	544,25	651,43	2,0442
6000 kPa (21,98 °C)					10 000 kPa			
Sat.	0,00474	261,97	290,42	1,0206	-	-	-	-
20	-	-	-	-	0,00117	118,12	129,80	0,4594
40	0,00670	298,62	338,82	1,1806	0,00159	184,23	200,14	0,6906
60	0,00801	322,51	370,54	1,2789	0,00345	277,63	312,11	1,0389
80	0,00908	342,74	397,21	1,3567	0,00451	312,82	357,95	1,1728
100	0,01004	361,47	421,69	1,4241	0,00530	338,20	391,24	1,2646
120	0,01092	379,47	445,02	1,4850	0,00598	360,19	419,96	1,3396
140	0,01176	397,10	467,68	1,5413	0,00658	380,54	446,38	1,4051
160	0,01257	414,56	489,97	1,5939	0,00715	399,99	471,46	1,4644
180	0,01335	431,97	512,06	1,6438	0,00768	418,94	495,73	1,5192
200	0,01411	449,40	534,04	1,6913	0,00819	437,61	519,49	1,5705
220	0,01485	466,91	556,01	1,7367	0,00868	456,12	542,91	1,6190
240	0,01558	484,52	578,00	1,7804	0,00916	474,58	566,14	1,6652
260	0,01630	502,27	600,05	1,8226	0,00962	493,03	589,26	1,7094
280	0,01701	520,15	622,19	1,8634	0,01008	511,53	612,32	1,7518
300	0,01771	538,18	644,44	1,9029	0,01053	530,11	635,37	1,7928
320	0,01840	556,37	666,80	1,9412	0,01097	548,77	658,46	1,8324

Tabela B.4 – Propriedades Termodinâmicas de R-410a
Tabela B.4.1 – R-410a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v _f	Evap. v _g	Vapor saturado v _g	Líquido saturado u _f	Evap. u _g	Vapor saturado u _g	Líquido saturado h _f	Evap. h _g	Vapor saturado h _g	Líquido saturado s _f	Evap. s _g	Vapor saturado s _g
-60	64,1	0,000727	0,36772	0,36845	-27,50	256,41	228,91	-27,45	279,96	252,51	-0,1227	1,3135	1,1907
-55	84,0	0,000735	0,28484	0,28558	-20,70	251,89	231,19	-20,64	275,83	255,19	-0,0912	1,2644	1,1732
-51,4	101,3	0,000741	0,23875	0,23949	-15,78	248,59	232,81	-15,70	272,78	257,08	-0,0688	1,2301	1,1613
-50	108,7	0,000743	0,22344	0,22418	-13,88	247,31	233,43	-13,80	271,60	257,80	-0,0603	1,2171	1,1568
-45	138,8	0,000752	0,17729	0,17804	-7,02	242,67	235,64	-6,92	267,27	260,35	-0,0299	1,1715	1,1416
-40	175,0	0,000762	0,14215	0,14291	-0,13	237,95	237,81	0	262,83	262,83	0	1,1273	1,1273
-35	218,4	0,000771	0,11505	0,11582	6,80	233,14	239,94	6,97	258,26	265,23	0,0294	1,0844	1,1139
-30	269,6	0,000781	0,09392	0,09470	13,78	228,23	242,01	13,99	253,55	267,54	0,0585	1,0428	1,1012
-25	329,7	0,000792	0,07726	0,07805	20,82	223,21	244,03	21,08	248,69	269,77	0,0871	1,0022	1,0893
-20	399,6	0,000803	0,06400	0,06480	27,92	218,07	245,99	28,24	243,65	271,89	0,1154	0,9625	1,0779
-15	480,4	0,000815	0,05334	0,05416	35,08	212,79	247,88	35,47	238,42	273,90	0,1435	0,9236	1,0671
-10	573,1	0,000827	0,04470	0,04553	42,32	207,36	249,69	42,80	232,98	275,78	0,1713	0,8854	1,0567
-5	678,9	0,000841	0,03764	0,03848	49,85	201,75	251,41	50,22	227,31	277,53	0,1989	0,8477	1,0466
0	798,7	0,000855	0,03182	0,03267	57,07	195,95	253,02	57,76	221,37	279,12	0,2264	0,8104	1,0368
5	933,9	0,000870	0,02699	0,02786	64,80	189,93	254,53	65,41	215,13	280,55	0,2537	0,7734	1,0272
10	1085,7	0,000886	0,02295	0,02383	72,24	183,66	255,90	73,21	208,57	281,78	0,2810	0,7366	1,0176
15	1255,4	0,000904	0,01955	0,02045	80,02	177,10	257,12	81,15	201,64	282,79	0,3083	0,6998	1,0081
20	1444,2	0,000923	0,01666	0,01758	87,94	170,21	258,16	89,27	194,28	283,55	0,3357	0,6627	0,9984
25	1653,6	0,000944	0,01420	0,01514	96,03	162,95	259,98	97,59	186,43	284,02	0,3631	0,6253	0,9884
30	1885,1	0,000968	0,01208	0,01305	104,32	155,24	259,56	106,14	178,02	284,16	0,3908	0,5872	0,9781
35	2140,2	0,000995	0,01025	0,01124	112,83	147,00	259,83	114,95	168,94	283,89	0,4189	0,5482	0,9671
40	2420,7	0,001025	0,00865	0,00967	121,61	138,11	259,72	124,09	159,04	283,13	0,4473	0,5079	0,9552
45	2728,3	0,001060	0,00723	0,00829	130,72	128,41	259,13	133,61	148,14	281,76	0,4765	0,4656	0,9421
50	3065,2	0,001103	0,00597	0,00707	140,27	117,63	257,90	143,65	135,93	279,58	0,5067	0,4206	0,9273
55	3433,7	0,001156	0,00482	0,00598	150,44	105,34	255,78	154,41	121,89	275,30	0,5384	0,3715	0,9099
60	3836,9	0,001227	0,00374	0,00497	161,57	90,70	252,27	166,28	105,04	271,33	0,5729	0,3153	0,8882
65	4278,3	0,001338	0,00265	0,00399	174,59	71,59	246,19	180,32	82,95	263,26	0,6130	0,2453	0,8583
70	4763,1	0,001619	0,00124	0,00286	194,53	37,47	232,01	202,24	43,40	245,64	0,6752	0,1265	0,8017
71,3	4901,2	0,00218	0	0,00218	215,78	0	215,78	226,46	0	226,46	0,7449	0	0,7449

Tabela B.4.2

R-410a superaquecido

T °C	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
50 kPa (-64,34 °C)					100 kPa (-51,65 °C)			
Sat.	0,46484	226,90	250,15	1,2070	0,24247	232,70	256,94	1,1621
-60	0,47585	229,60	253,40	1,2225	-	-	-	-
-40	0,52508	241,94	268,20	1,2888	0,25778	240,40	266,18	1,2027
-20	0,57295	254,51	283,16	1,3504	0,28289	253,44	281,73	1,2667
0	0,62016	267,52	298,53	1,4088	0,30723	266,72	297,44	1,3265
20	0,66698	281,05	314,40	1,4649	0,33116	280,42	313,54	1,3833
40	0,71355	295,15	330,83	1,5191	0,35483	294,64	330,12	1,4380
60	0,75995	309,84	347,83	1,5717	0,37833	309,40	347,24	1,4910
80	0,80623	325,11	365,43	1,6230	0,40171	324,75	364,92	1,5425
100	0,85243	340,99	383,61	1,6731	0,42500	340,67	383,17	1,5928
120	0,89857	357,46	402,38	1,7221	0,44822	357,17	401,99	1,6419
140	0,94465	374,50	421,74	1,7701	0,47140	374,25	421,39	1,6901
160	0,99070	392,12	441,65	1,8171	0,49453	391,89	441,34	1,7372
180	1,03671	410,28	462,12	1,8633	0,51764	410,07	461,84	1,7835
200	1,08270	428,98	483,11	1,9087	0,54072	428,79	482,86	1,8289
220	1,12867	448,19	504,63	1,9532	0,56378	448,02	504,40	1,8734
240	1,17462	467,90	526,63	1,9969	0,58682	467,74	526,42	1,9172
150 kPa (-43,35 °C)					200 kPa (-37,01 °C)			
Sat.	0,16540	236,36	261,17	1,1368	0,12591	239,09	264,27	1,1192
-40	0,16851	238,72	263,99	1,1489	-	-	-	-
-20	0,18613	252,34	280,26	1,2159	0,13771	251,18	278,72	1,1783
0	0,20289	265,90	296,33	1,2770	0,15070	265,06	295,20	1,2410
20	0,21921	279,78	312,66	1,3347	0,16322	279,13	311,78	1,2995
40	0,23525	294,12	329,40	1,3899	0,17545	293,59	328,68	1,3553
60	0,25112	308,97	346,64	1,4433	0,18750	308,53	346,03	1,4090
80	0,26686	324,37	364,40	1,4950	0,19943	324,00	363,89	1,4610
100	0,28251	340,35	382,72	1,5455	0,21127	340,02	382,28	1,5117
120	0,29810	356,89	401,60	1,5948	0,22305	356,60	401,21	1,5611
140	0,31364	374,00	421,04	1,6430	0,23477	373,74	420,70	1,6094
160	0,32915	391,66	441,03	1,6902	0,24645	391,43	440,72	1,6568
180	0,34462	409,87	461,56	1,7366	0,25810	409,66	461,28	1,7032
200	0,36006	428,60	482,61	1,7820	0,26973	428,41	482,35	1,7487
220	0,37548	447,84	504,16	1,8266	0,28134	447,67	503,93	1,7933
240	0,39089	467,58	526,21	1,8705	0,29293	467,41	526,00	1,8372
260	0,40628	487,78	548,73	1,9135	0,30450	487,63	548,53	1,8803

Tabela B.4.2 (continuação)

R-410a superaquecido

T °C	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
300 kPa (-27,37 °C)					400 kPa (-19,98 °C)			
Sat.	0,08548	243,08	268,72	1,0949	0,06475	246,00	271,90	1,0779
-20	0,08916	248,71	275,46	1,1219	-	-	-	-
0	0,09845	263,33	292,87	1,1881	0,07227	261,51	290,42	1,1483
20	0,10720	277,81	309,96	1,2485	0,07916	276,44	308,10	1,2108
40	0,11564	292,53	327,22	1,3054	0,08571	291,44	325,72	1,2689
60	0,12388	307,65	344,81	1,3599	0,09207	306,75	343,58	1,3242
80	0,13200	323,25	362,85	1,4125	0,09828	322,49	361,80	1,3773
100	0,14003	339,37	381,38	1,4635	0,10440	338,72	380,48	1,4288
120	0,14798	356,03	400,43	1,5132	0,11045	355,45	399,64	1,4788
140	0,15589	373,23	420,00	1,5617	0,11645	372,72	419,30	1,5276
160	0,16376	390,97	440,10	1,6093	0,12241	390,51	439,47	1,5752
180	0,17159	409,24	460,72	1,6558	0,12834	408,82	460,16	1,6219
200	0,17940	428,03	481,85	1,7014	0,13424	427,64	481,34	1,6676
220	0,18719	447,31	503,47	1,7462	0,14012	446,96	503,01	1,7125
240	0,19496	467,09	525,58	1,7901	0,14598	466,76	525,15	1,7565
260	0,20272	487,33	548,15	1,8332	0,15182	487,03	547,76	1,7997
280	0,21046	508,02	571,16	1,8756	0,15766	507,74	570,81	1,8422
500 kPa (-13,89 °C)					600 kPa (-8,67 °C)			
Sat.	0,05208	248,29	274,33	1,0647	0,04351	250,15	276,26	1,0540
0	0,05651	259,59	287,84	1,1155	0,04595	257,54	285,12	1,0869
20	0,06231	275,02	306,18	1,1803	0,05106	273,56	304,20	1,1543
40	0,06775	290,32	324,20	1,2398	0,05576	289,19	322,64	1,2152
60	0,07297	305,84	342,32	1,2959	0,06023	304,91	341,05	1,2722
80	0,07804	321,72	360,74	1,3496	0,06455	320,94	359,67	1,3265
100	0,08302	338,05	379,56	1,4014	0,06877	337,38	378,65	1,3787
120	0,08793	354,87	398,84	1,4517	0,07292	354,29	398,04	1,4294
140	0,09279	372,20	418,60	1,5007	0,07701	371,68	417,89	1,4786
160	0,09760	390,05	438,85	1,5486	0,08106	389,58	438,22	1,5266
180	0,10238	408,40	459,59	1,5954	0,08508	407,98	459,03	1,5736
200	0,10714	427,26	480,83	1,6413	0,08907	426,88	480,32	1,6196
220	0,11187	446,61	502,55	1,6862	0,09304	446,26	502,08	1,6646
240	0,11659	466,44	524,73	1,7303	0,09700	466,11	524,31	1,7088
260	0,12129	486,73	547,37	1,7736	0,10093	486,42	546,98	1,7521
280	0,12598	507,46	570,45	1,8161	0,10486	507,18	570,09	1,7947
300	0,13066	528,62	593,95	1,8578	0,10877	528,36	593,62	1,8365

Tabela B.4.2 (continuação)
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
800 kPa (0,05 °C)				1000 kPa (7,25 °C)				
Sat.	0,03262	253,04	279,14	1,0367	0,02596	255,16	281,12	1,0229
20	0,03693	270,47	300,02	1,1105	0,02838	267,11	295,49	1,0730
40	0,04074	286,83	319,42	1,1746	0,03170	284,35	316,05	1,1409
60	0,04429	303,01	338,44	1,2334	0,03470	301,04	335,75	1,2019
80	0,04767	319,36	357,49	1,2890	0,03753	317,73	355,27	1,2588
100	0,05095	336,03	376,79	1,3421	0,04025	334,65	374,89	1,3128
120	0,05415	353,11	396,42	1,3934	0,04288	351,91	394,79	1,3648
140	0,05729	370,64	416,47	1,4431	0,04545	369,58	415,04	1,4150
160	0,06039	388,65	436,96	1,4915	0,04798	387,70	435,68	1,4638
180	0,06345	407,13	457,90	1,5388	0,05048	406,28	456,76	1,5113
200	0,06649	426,10	479,30	1,5850	0,05294	425,33	478,27	1,5578
220	0,06951	445,55	501,15	1,6302	0,05539	444,84	500,23	1,6032
240	0,07251	465,46	523,46	1,6746	0,05781	464,80	522,62	1,6477
260	0,07549	485,82	546,21	1,7181	0,06023	485,21	545,43	1,6914
280	0,07846	506,61	569,38	1,7607	0,06262	506,05	568,67	1,7341
300	0,08142	527,83	592,97	1,8026	0,06501	527,30	592,31	1,7761
1200 kPa (13,43 °C)				1400 kPa (18,88 °C)				
Sat.	0,02145	256,75	282,50	1,0111	0,01819	257,94	283,40	1,0006
20	0,02260	263,39	290,51	1,0388	0,01838	259,18	284,90	1,0057
40	0,02563	281,72	312,48	1,1113	0,02127	278,93	308,71	1,0843
60	0,02830	299,00	332,96	1,1747	0,02371	296,88	330,07	1,1505
80	0,03077	316,06	352,98	1,2331	0,02593	314,35	350,64	1,2105
100	0,03311	333,24	372,97	1,2881	0,02801	331,80	371,01	1,2666
120	0,03537	350,69	393,13	1,3408	0,03000	349,46	391,46	1,3199
140	0,03756	368,51	413,59	1,3915	0,03192	367,43	412,13	1,3712
160	0,03971	386,75	434,40	1,4407	0,03380	385,79	433,12	1,4208
180	0,04183	405,43	455,62	1,4886	0,03565	404,56	454,47	1,4690
200	0,04391	424,55	477,24	1,5353	0,03746	423,77	476,21	1,5160
220	0,04597	444,12	499,29	1,5809	0,03925	443,41	498,36	1,5618
240	0,04802	464,14	521,77	1,6256	0,04102	463,49	520,92	1,6066
260	0,05005	484,60	544,66	1,6693	0,04278	483,99	543,88	1,6505
280	0,05207	505,48	567,96	1,7122	0,04452	504,91	567,25	1,6936
300	0,05407	526,77	591,66	1,7543	0,04626	526,25	591,01	1,7358
320	0,05607	548,47	615,75	1,7956	0,04798	547,97	615,14	1,7772

Tabela B.4.2 (continuação)
R-410a superaquecido

T °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
1800 kPa (28,22 °C)				2000 kPa (32,31 °C)				
Sat.	0,01376	259,38	284,15	0,9818	0,01218	259,72	284,09	0,9731
40	0,01534	272,67	300,29	1,0344	0,01321	269,07	295,49	1,0099
60	0,01754	292,34	323,92	1,1076	0,01536	289,90	320,62	1,0878
80	0,01945	310,76	345,77	1,1713	0,01717	308,88	343,22	1,1537
100	0,02119	328,84	366,98	1,2297	0,01880	327,30	364,91	1,2134
120	0,02283	346,93	388,03	1,2847	0,02032	345,64	386,29	1,2693
140	0,02441	365,24	409,17	1,3371	0,02177	364,12	407,66	1,3223
160	0,02593	383,85	430,51	1,3875	0,02317	382,86	429,20	1,3732
180	0,02741	402,82	452,16	1,4364	0,02452	401,94	450,99	1,4224
200	0,02886	422,19	474,14	1,4839	0,02585	421,40	473,10	1,4701
220	0,03029	441,97	496,49	1,5301	0,02715	441,25	495,55	1,5166
240	0,03170	462,16	519,22	1,5753	0,02844	461,50	518,37	1,5619
260	0,03309	482,77	542,34	1,6195	0,02970	482,16	541,56	1,6063
280	0,03447	503,78	565,83	1,6627	0,03095	503,21	565,12	1,6497
300	0,03584	525,19	589,70	1,7051	0,03220	524,66	589,05	1,6922
320	0,03720	546,98	613,94	1,7467	0,03343	546,49	613,35	1,7338
340	0,03855	569,15	638,54	1,7875	0,03465	568,69	637,99	1,7747
3000 kPa (49,07 °C)				4000 kPa (61,90 °C)				
Sat.	0,00729	258,19	280,06	0,9303	0,00460	250,37	268,76	0,8782
60	0,00858	274,96	300,70	0,9933	-	-	-	-
80	0,01025	298,38	329,12	1,0762	0,00661	285,02	311,48	1,0028
100	0,01159	319,07	353,84	1,1443	0,00792	309,62	341,29	1,0850
120	0,01277	338,84	377,16	1,2052	0,00897	331,39	367,29	1,1529
140	0,01387	358,32	399,92	1,2617	0,00990	352,14	391,75	1,2136
160	0,01489	377,80	422,49	1,3150	0,01076	372,51	415,53	1,2698
180	0,01588	397,46	445,09	1,3661	0,01156	392,82	439,05	1,3229
200	0,01683	417,37	467,85	1,4152	0,01232	413,25	462,52	1,3736
220	0,01775	437,60	490,84	1,4628	0,01305	433,88	486,10	1,4224
240	0,01865	458,16	514,11	1,5091	0,01377	454,79	509,85	1,4696
260	0,01954	479,08	537,69	1,5541	0,01446	475,99	533,83	1,5155
280	0,02041	500,37	561,59	1,5981	0,01514	497,51	558,08	1,5601
300	0,02127	522,01	585,81	1,6411	0,01581	519,37	582,60	1,6037
320	0,02212	544,02	610,37	1,6833	0,01647	541,55	607,42	1,6462
340	0,02296	566,37	635,25	1,7245	0,01712	564,06	632,54	1,6879
360	0,02379	589,07	660,45	1,7650	0,01776	586,90	657,95	1,7286

Tabela B.5 – Propriedades Termodinâmicas de R-134a

Tabela B.5.1 – R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_f	Evap. v_g	Vapor saturado v_r	Líquido saturado u_f	Evap. u_g	Vapor saturado u_r	Líquido saturado h_f	Evap. h_g	Vapor saturado h_r	Líquido saturado s_f	Evap. s_g	Vapor saturado s_r
-70	8,3	0,000675	1,97207	1,97274	119,46	218,74	338,20	119,47	235,15	354,62	0,6645	1,1575	1,8220
-65	11,7	0,000679	1,42915	1,42983	123,18	217,76	340,94	123,18	234,55	357,73	0,6825	1,1268	1,8094
-60	16,3	0,000684	1,05199	1,05268	127,52	216,19	343,71	127,53	233,33	360,86	0,7031	1,0947	1,7978
-55	22,2	0,000689	0,78609	0,78678	132,36	214,14	346,50	132,37	231,63	364,00	0,7256	1,0618	1,7874
-50	29,9	0,000695	0,59587	0,59657	137,60	211,71	349,31	137,62	229,54	367,16	0,7493	1,0286	1,7780
-45	39,6	0,000701	0,45783	0,45853	143,15	208,99	352,15	143,18	227,14	370,32	0,7740	0,9956	1,7695
-40	51,8	0,000708	0,35625	0,35696	148,95	206,05	355,00	148,98	224,50	373,48	0,7991	0,9629	1,7620
-35	66,8	0,000715	0,28051	0,28122	154,93	202,93	357,96	154,98	221,67	376,64	0,8245	0,9308	1,7553
-30	85,1	0,000722	0,22330	0,22402	161,06	199,67	360,73	161,12	218,68	379,80	0,8499	0,8994	1,7493
-25	107,2	0,000728	0,18947	0,19020	165,73	197,16	362,89	165,80	216,36	382,16	0,8690	0,8763	1,7453
-20	133,7	0,000730	0,17957	0,18030	167,30	196,31	363,61	167,38	215,57	382,95	0,8754	0,8687	1,7441
-20	133,7	0,000738	0,14576	0,14649	173,65	192,85	366,50	173,74	212,34	386,08	0,9007	0,8388	1,7395
-15	165,0	0,000746	0,11932	0,12007	180,07	189,32	369,39	180,19	209,00	389,20	0,9258	0,8096	1,7354
-10	201,7	0,000755	0,09845	0,09921	186,57	185,70	372,27	186,72	205,56	392,28	0,9507	0,7812	1,7319
-5	244,5	0,000764	0,08181	0,08257	193,14	182,01	375,15	193,32	202,02	395,34	0,9755	0,7534	1,7288
0	294,0	0,000773	0,06842	0,06919	199,77	178,24	378,01	200,00	198,36	398,36	1,0000	0,7262	1,7262
5	350,9	0,000783	0,05755	0,05833	206,48	174,38	380,85	206,75	194,57	401,32	1,0243	0,6995	1,7239
10	415,8	0,000794	0,04866	0,04945	213,25	170,42	383,67	213,58	190,65	404,23	1,0485	0,6733	1,7218
15	489,5	0,000805	0,04133	0,04213	220,10	166,35	386,45	220,49	186,58	407,07	1,0725	0,6475	1,7200
20	572,8	0,000817	0,03524	0,03606	227,03	162,16	389,19	227,49	182,35	409,84	1,0963	0,6220	1,7183
25	666,3	0,000829	0,03015	0,03098	234,04	157,83	391,87	234,59	177,92	412,51	1,1201	0,5967	1,7168
30	771,0	0,000843	0,02587	0,02671	241,14	153,34	394,48	241,79	173,29	415,08	1,1437	0,5716	1,7153
35	887,6	0,000857	0,02224	0,02310	248,34	148,68	397,02	249,10	168,42	417,52	1,1673	0,5465	1,7139
40	1017,0	0,000873	0,01915	0,02002	255,65	143,81	399,46	256,54	163,28	419,82	1,1909	0,5214	1,7123
45	1160,2	0,000890	0,01650	0,01739	263,08	138,71	401,79	264,11	157,85	421,96	1,2145	0,4962	1,7106
50	1318,1	0,000908	0,01422	0,01512	270,63	133,35	403,98	271,83	152,08	423,91	1,2381	0,4706	1,7088
55	1491,6	0,000928	0,01224	0,01316	278,33	127,68	406,01	279,72	145,93	425,65	1,2619	0,4447	1,7066
60	1681,8	0,000951	0,01051	0,01146	286,19	121,66	407,85	287,79	139,33	427,13	1,2857	0,4182	1,7040
65	1889,9	0,000976	0,00899	0,00997	294,24	115,22	409,46	296,09	132,21	428,30	1,3099	0,3910	1,7008
70	2117,0	0,001005	0,00765	0,00866	302,51	108,27	410,78	304,64	124,47	429,11	1,3343	0,3627	1,6970
75	2364,4	0,001038	0,00645	0,00749	311,06	100,68	411,74	313,51	115,94	429,45	1,3592	0,3330	1,6923
80	2633,6	0,001078	0,00537	0,00645	319,96	92,26	412,22	322,79	106,40	429,19	1,3849	0,3013	1,6862
85	2926,2	0,001128	0,00437	0,00550	329,35	82,67	412,01	332,65	95,45	428,10	1,4117	0,2665	1,6782
90	3244,5	0,001195	0,00341	0,00461	339,51	71,24	410,75	343,38	82,31	425,70	1,4404	0,2267	1,6671
95	3591,5	0,001297	0,00243	0,00373	351,17	56,25	407,42	355,83	64,98	420,81	1,4733	0,1765	1,6498
100	3973,2	0,001557	0,00108	0,00264	368,55	28,19	396,74	374,74	32,47	407,21	1,5228	0,0870	1,6098
101,2	4064,0	0,001969	0	0,00197	382,97	0	382,97	390,98	0	390,98	1,5658	0	1,5658

Tabela B.5.2

R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,36589	354,61	373,06	1,7629	0,19257	362,73	381,98	1,7456	0,13139	368,06	387,77	1,7372
-20	0,40507	368,57	388,82	1,8279	0,19860	367,36	387,22	1,7665	-	-	-	-
-10	0,42222	375,53	396,64	1,8582	0,20785	374,51	395,27	1,7978	0,13602	373,44	393,84	1,7606
0	0,43921	382,63	404,59	1,8878	0,21652	381,76	403,41	1,8281	0,14222	380,85	402,19	1,7917
10	0,45608	389,90	412,70	1,9170	0,22527	389,14	411,67	1,8578	0,14828	388,36	410,60	1,8220
20	0,47287	397,32	420,96	1,9456	0,23392	396,66	420,05	1,8869	0,15424	395,98	419,11	1,8515
30	0,48958	404,90	429,38	1,9739	0,24250	404,31	428,56	1,9155	0,16011	403,71	427,73	1,8804
40	0,50623	412,64	437,96	2,0017	0,25101	412,12	437,22	1,9436	0,16592	411,59	436,47	1,9088
50	0,52284	420,55	446,70	2,0292	0,25948	420,08	446,03	1,9712	0,17168	419,60	445,35	1,9367
60	0,53941	428,63	455,60	2,0563	0,26791	428,20	454,99	1,9985	0,17740	427,76	454,37	1,9642
70	0,55595	436,86	464,66	2,0831	0,27631	436,47	464,10	2,0255	0,18308	436,06	463,53	1,9913
80	0,57247	445,26	473,88	2,1096	0,28468	444,89	473,36	2,0521	0,18874	444,52	472,83	2,0180
90	0,58896	453,82	483,26	2,1358	0,29302	453,47	482,78	2,0784	0,19437	453,13	482,28	2,0444
100	0,60544	462,53	492,81	2,1617	0,30135	462,21	492,35	2,1044	0,19999	461,89	491,89	2,0705
110	0,62190	471,41	502,50	2,1874	0,30967	471,11	502,07	2,1301	0,20559	470,80	501,64	2,0963
120	0,63835	480,44	512,36	2,2128	0,31797	480,16	511,95	2,1555	0,21117	479,87	511,54	2,1218
130	0,65479	489,63	522,37	2,2379	0,32626	489,36	521,98	2,1807	0,21675	489,08	521,60	2,1470
140	-	-	-	-	-	-	-	-	0,22231	498,45	531,80	2,1720
Sat.	0,10002	372,15	392,15	1,7320	0,06787	378,33	398,69	1,7259	0,05136	383,02	403,56	1,7223
-10	0,10013	372,31	392,34	1,7328	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0,10501	379,91	400,91	1,7647	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,10974	387,55	409,50	1,7956	0,07111	385,84	407,17	1,7564	0,05168	383,98	404,65	1,7261
20	0,11436	395,27	418,15	1,8256	0,07441	393,80	416,12	1,7874	0,05436	392,22	413,97	1,7584
30	0,11889	403,10	426,87	1,8549	0,07762	401,81	425,10	1,8175	0,05693	400,45	423,22	1,7895
40	0,12335	411,04	435,71	1,8836	0,08075	409,90	434,12	1,8468	0,05940	408,70	432,46	1,8195
50	0,12776	419,11	444,66	1,9117	0,08382	418,09	443,23	1,8755	0,06181	417,03	441,75	1,8487
60	0,13213	427,31	453,74	1,9394	0,08684	426,39	452,44	1,9035	0,06417	425,44	451,10	1,8772
70	0,13646	435,65	462,95	1,9666	0,08982	434,82	461,76	1,9311	0,06648	433,95	460,55	1,9051
80	0,14076	444,14	472,30	1,9935	0,09277	443,37	471,21	1,9582	0,06877	442,58	470,09	1,9325
90	0,14504	452,78	481,79	2,0200	0,09570	452,07	480,78	1,9850	0,07102	451,34	479,75	1,9595
100	0,14930	461,56	491,42	2,0461	0,09861	460,90	490,48	2,0113	0,07325	460,22	489,52	1,9860
110	0,15355	470,50	501,21	2,0720	0,10150	469,87	500,32	2,0373	0,07547	469,24	499,43	2,0122
120	0,15777	479,58	511,13	2,0976	0,10437	478,99	510,30	2,0631	0,07767	478,40	509,46	2,0381
130	0,16199	488,81	521,21	2,1229	0,10723	488,26	520,43	2,0885	0,07985	487,69	519,63	2,0636
140	0,16620	498,19	531,43	2,1479	0,11008	497,66	530,69	2,1136	0,08202	497,13	529,94	2,0889
150	-	-	-	-	0,11292	507,22	541,09	2,1385	0,08418	506,71	540,38	2,1139
160	-	-	-	-	0,11575	516,91	551,64	2,1631	0,08634	516,43	550,97	2,1386

Tabela B.5.2 (continuação)
R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
500 kPa (15,66 °C)					600 kPa (21,52 °C)				800 kPa (31,30 °C)			
Sat.	0,04126	386,82	407,45	1,7198	0,03442	390,01	410,66	1,7179	0,02571	395,15	415,72	1,7150
20	0,04226	390,52	411,65	1,7342	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,04446	398,99	421,22	1,7663	0,03609	397,44	419,09	1,7461	-	-	-	-
40	0,04656	407,44	430,72	1,7971	0,03796	406,11	428,88	1,7779	0,02711	403,17	424,86	1,7446
50	0,04858	415,91	440,20	1,8270	0,03974	414,75	438,59	1,8084	0,02861	412,23	435,11	1,7768
60	0,05055	424,44	449,72	1,8560	0,04145	423,41	448,28	1,8379	0,03002	421,20	445,22	1,8076
70	0,05247	433,06	459,29	1,8843	0,04311	432,13	457,99	1,8666	0,03137	430,17	455,27	1,8373
80	0,05435	441,77	468,94	1,9120	0,04473	440,93	467,76	1,8947	0,03268	439,17	465,31	1,8662
90	0,05620	450,59	478,69	1,9392	0,04632	449,82	477,61	1,9222	0,03394	448,22	475,38	1,8943
100	0,05804	459,53	488,55	1,9660	0,04788	458,82	487,55	1,9492	0,03518	457,35	485,50	1,9218
110	0,05985	468,60	498,52	1,9924	0,04943	467,94	497,59	1,9758	0,03639	466,58	495,70	1,9487
120	0,06164	477,79	508,61	2,0184	0,05095	477,18	507,75	2,0019	0,03758	475,92	505,99	1,9753
130	0,06342	487,13	518,83	2,0440	0,05246	486,55	518,03	2,0277	0,03876	485,37	516,38	2,0014
140	0,06518	496,59	529,19	2,0694	0,05396	496,05	528,43	2,0532	0,03992	494,94	526,88	2,0271
150	0,06694	506,20	539,67	2,0945	0,05544	505,69	538,95	2,0784	0,04107	504,64	537,50	2,0525
160	0,06869	515,95	550,29	2,1193	0,05692	515,46	549,61	2,1033	0,04221	514,46	548,23	2,0775
170	0,07043	525,83	561,04	2,1438	0,05839	525,36	560,40	2,1279	0,04334	524,42	559,09	2,1023
180	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04446	534,51	570,08	2,1268
1000 kPa (39,37 °C)				1200 kPa (46,31 °C)				1400 kPa (52,42 °C)				
Sat.	0,02038	399,16	419,54	1,7125	0,01676	402,37	422,49	1,7102	0,01414	404,98	424,78	1,7077
40	0,02047	399,78	420,25	1,7148	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,02185	409,39	431,24	1,7494	0,01724	406,15	426,84	1,7237	-	-	-	-
60	0,02311	418,78	441,89	1,7818	0,01844	416,08	438,21	1,7584	0,01503	413,03	434,08	1,7360
70	0,02429	428,05	452,34	1,8127	0,01953	425,74	449,18	1,7908	0,01608	423,20	445,72	1,7704
80	0,02542	437,29	462,70	1,8425	0,02055	435,27	459,92	1,8217	0,01704	433,09	456,94	1,8026
90	0,02650	446,53	473,03	1,8713	0,02151	444,74	470,55	1,8514	0,01793	442,83	467,93	1,8333
100	0,02754	455,82	483,36	1,8994	0,02244	454,20	481,13	1,8801	0,01878	452,50	478,79	1,8628
110	0,02856	465,18	493,74	1,9268	0,02333	463,71	491,70	1,9081	0,01958	462,17	489,59	1,8914
120	0,02956	474,62	504,17	1,9537	0,02420	473,27	502,31	1,9354	0,02036	471,87	500,38	1,9192
130	0,03053	484,16	514,69	1,9801	0,02504	482,91	512,97	1,9621	0,02112	481,63	511,19	1,9463
140	0,03150	493,81	525,30	2,0061	0,02587	492,65	523,70	1,9884	0,02186	491,46	522,05	1,9730
150	0,03244	503,57	536,02	2,0318	0,02669	502,48	534,51	2,0143	0,02258	501,37	532,98	1,9991
160	0,03338	513,46	546,84	2,0570	0,02750	512,43	545,43	2,0398	0,02329	511,39	543,99	2,0248
170	0,03431	523,46	557,77	2,0820	0,02829	522,50	556,44	2,0649	0,02399	521,51	555,10	2,0502
180	0,03523	533,60	568,83	2,1067	0,02907	532,68	567,57	2,0898	0,02468	531,75	566,30	2,0752

Tabela B.5.2 (continuação)
R-134a superaquecido

Temp. °C	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
1600 kPa (57,90 °C)				2000 kPa (67,48 °C)				3000 kPa (86,20 °C)				
Sat.	0,01215	407,11	426,54	1,7051	0,00930	410,15	428,75	1,6991	0,00528	411,83	427,67	1,6759
60	0,01239	409,49	429,32	1,7135	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,01345	420,37	441,89	1,7507	0,00958	413,37	432,53	1,7101	-	-	-	-
80	0,01438	430,72	453,72	1,7847	0,01055	425,20	446,30	1,7497	-	-	-	-
90	0,01522	440,79	465,15	1,8166	0,01137	436,20	458,95	1,7850	0,00575	418,93	436,19	1,6995
100	0,01601	450,71	476,33	1,8469	0,01211	446,78	471,00	1,8177	0,00665	433,77	453,73	1,7472
110	0,01676	460,57	487,39	1,8762	0,01279	457,12	482,69	1,8487	0,00734	446,48	468,50	1,7862
120	0,01748	470,42	498,39	1,9045	0,01342	467,34	494,19	1,8783	0,00792	458,27	482,04	1,8211
130	0,01817	480,30	509,37	1,9321	0,01403	477,51	505,57	1,9069	0,00845	469,58	494,91	1,8535
140	0,01884	490,23	520,38	1,9591	0,01461	487,68	516,90	1,9346	0,00893	480,61	507,39	1,8840
150	0,01949	500,24	531,43	1,9855	0,01517	497,89	528,22	1,9617	0,00937	491,49	519,62	1,9133
160	0,02013	510,33	542,54	2,0115	0,01571	508,15	539,57	1,9882	0,00980	502,30	531,70	1,9415
170	0,02076	520,52	553,73	2,0370	0,01624	518,48	550,96	2,0142	0,01021	513,09	543,71	1,9689
180	0,02138	530,81	565,02	2,0622	0,01676	528,89	562,42	2,0398	0,01060	523,89	555,69	1,9956
4000 kPa (100,33 °C)				6000 kPa				10 000 kPa				
Sat.	0,00252	394,86	404,94	1,6036	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	0,001059	328,34	334,70	1,4081	0,000991	320,72	330,62	1,3856
100	-	-	-	-	0,001150	346,71	353,61	1,4595	0,001040	336,45	346,85	1,4297
110	0,00428	429,74	446,84	1,7148	0,001307	368,06	375,90	1,5184	0,001100	352,74	363,73	1,4744
120	0,00500	445,97	465,99	1,7642	0,001698	396,59	406,78	1,5979	0,001175	369,69	381,44	1,5200
130	0,00556	459,63	481,87	1,8040	0,002396	426,81	441,18	1,6843	0,001272	387,44	400,16	1,5670
140	0,00603	472,19	496,29	1,8394	0,002985	448,34	466,25	1,7458	0,001400	405,97	419,98	1,6155
150	0,00644	484,15	509,92	1,8720	0,003439	465,19	485,82	1,7926	0,001564	424,99	440,63	1,6649
160	0,00683	495,77	523,07	1,9027	0,003814	479,89	502,77	1,8322	0,001758	443,77	461,34	1,7133
170	0,00718	507,19	535,92	1,9320	0,004141	493,45	518,30	1,8676	0,001965	461,65	481,30	1,7589
180	0,00752	518,51	548,57	1,9603	0,004435	506,35	532,96	1,9004	0,002172	478,40	500,12	1,8009

Tabela B.6 — Propriedades Termodinâmicas do Nitrogênio

Tabela B.6.1 — Nitrogênio saturado

Temp. K	Pressão MPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_f	Evap. v_g	Vapor saturado v_g	Líquido saturado u_f	Evap. u_{fg}	Vapor saturado u_g	Líquido saturado h_f	Evap. h_{fg}	Vapor saturado h_g	Líquido saturado s_f	Evap. s_{fg}	Vapor saturado s_g
63,1	12,5	0,001150	1,48074	1,48189	-150,92	196,86	45,94	-150,91	215,39	64,48	2,4234	3,4109	5,8343
65	17,4	0,001160	1,09231	1,09347	-147,19	194,37	47,17	-147,17	213,38	66,21	2,4816	3,2828	5,7645
70	38,6	0,001191	0,52513	0,52632	-137,13	187,54	50,40	-137,09	207,79	70,70	2,6307	2,9684	5,5991
75	76,1	0,001223	0,28052	0,28174	-127,04	180,47	53,43	-126,95	201,82	74,87	2,7700	2,6909	5,4609
77,3	101,3	0,001240	0,21515	0,21639	-122,27	177,04	54,76	-122,15	198,84	76,69	2,8326	2,5707	5,4033
80	137,0	0,001259	0,16249	0,16375	-116,86	173,06	56,20	-116,69	195,32	78,63	2,9014	2,4415	5,3429
85	229,1	0,001299	0,10018	0,10148	-106,55	165,20	58,65	-106,25	188,15	81,90	3,0266	2,2135	5,2401
90	360,8	0,001343	0,06477	0,06611	-96,06	158,76	60,70	-95,58	180,13	84,55	3,1466	2,0015	5,1480
95	541,1	0,001393	0,04337	0,04476	-85,35	147,60	62,25	-84,59	171,07	86,47	3,2627	1,8007	5,0634
100	779,2	0,001452	0,02975	0,03120	-74,33	137,50	63,17	-73,20	160,68	87,48	3,3761	1,6068	4,9829
105	1084,6	0,001522	0,02066	0,02218	-62,89	126,18	63,29	-61,24	148,59	87,35	3,4883	1,4151	4,9034
110	1467,6	0,001610	0,01434	0,01595	-50,81	113,11	62,31	-48,45	134,15	85,71	3,6017	1,2196	4,8213
115	1939,3	0,001729	0,00971	0,01144	-37,66	97,36	59,70	-34,31	116,19	81,88	3,7204	1,0104	4,7307
120	2513,0	0,001915	0,00608	0,00799	-22,42	76,63	54,21	-17,61	91,91	74,30	3,8536	0,7659	4,6195
125	3208,0	0,002355	0,00254	0,00490	-0,83	40,73	39,90	6,73	48,88	55,60	4,0399	0,3910	4,4309
126,2	3397,8	0,003194	0	0,00319	18,94	0	18,94	29,79	0	29,79	4,2193	0	4,2193

Tabela B.6.2

Nitrogênio superaquecido

Temp. K	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	100 kPa (77,24 K)				200 kPa (83,82 K)				400 kPa (91,22 K)			
					v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,21903	54,70	76,61	5,4059	0,11520	58,01	81,05	5,2673	0,05992	61,13	85,10	5,1268				
100	0,29103	72,84	101,94	5,6944	0,14252	71,73	100,24	5,4775	0,06806	69,30	96,52	5,2466				
120	0,35208	87,94	123,15	5,8878	0,17397	87,14	121,93	5,6753	0,08486	85,48	119,42	5,4556				
140	0,41253	102,95	144,20	6,0501	0,20476	102,33	143,28	5,8399	0,10085	101,06	141,40	5,6250				
160	0,47263	117,91	165,17	6,1901	0,23519	117,40	164,44	5,9812	0,11647	116,38	162,96	5,7690				
180	0,53254	132,83	186,09	6,3132	0,26542	132,41	185,49	6,1052	0,13186	131,55	184,30	5,8947				
200	0,59231	147,74	206,97	6,4232	0,29551	147,37	206,48	6,2157	0,14712	146,64	205,49	6,0063				
220	0,65199	162,63	227,83	6,5227	0,32552	162,31	227,41	6,3155	0,16228	161,68	226,59	6,1089				
240	0,71161	177,51	248,67	6,6133	0,35546	177,23	248,32	6,4064	0,17738	176,67	247,62	6,1984				
260	0,77118	192,39	269,51	6,6967	0,38535	192,14	269,21	6,4900	0,19243	191,64	268,61	6,2824				
280	0,83072	207,26	290,33	6,7739	0,41520	207,04	290,08	6,5674	0,20745	206,58	289,56	6,3600				
300	0,89023	222,14	311,16	6,8457	0,44503	221,93	310,94	6,6393	0,22244	221,52	310,50	6,4322				
350	1,03891	259,35	363,24	7,0063	0,51952	259,18	363,09	6,8001	0,25982	258,85	362,78	6,5934				
400	1,18752	296,66	415,41	7,1456	0,59392	296,52	415,31	6,9396	0,29712	296,25	415,10	6,7331				
450	1,33607	334,16	467,77	7,2690	0,66827	334,04	467,70	7,0630	0,33437	333,81	467,56	6,8567				
500	1,48458	371,95	520,41	7,3799	0,74258	371,85	520,37	7,1740	0,37159	371,65	520,28	6,9678				
600	1,78154	448,79	626,94	7,5741	0,89114	448,71	626,94	7,3682	0,44595	448,55	626,93	7,1622				
700	2,07845	527,74	735,58	7,7415	1,03965	527,68	735,61	7,5357	0,52025	527,55	735,65	7,3298				
800	2,37532	609,07	846,60	7,8897	1,18812	609,02	846,64	7,6839	0,59453	608,92	846,73	7,4781				
900	2,67217	692,79	960,01	8,0232	1,33657	692,75	960,07	7,8175	0,66878	692,67	960,19	7,6117				
1000	2,96900	778,78	1075,68	8,1451	1,48501	778,74	1075,75	7,9393	0,74302	778,68	1075,89	7,7335				
800 kPa (96,37 K)				800 kPa (100,38 K)				1000 kPa (103,73 K)								
Sat.	0,04046	62,57	86,85	5,0411	0,03038	63,21	87,52	4,9768	0,02416	63,35	87,51	4,9237				
100	0,04299	66,41	92,20	5,0957	-	-	-	-	-	-	-	-				
120	0,05510	83,73	116,79	5,3204	0,04017	81,88	114,02	5,2191	0,03117	79,91	111,08	5,1357				
140	0,06620	99,75	139,47	5,4953	0,04886	98,41	137,50	5,4002	0,03845	97,02	135,47	5,3239				
160	0,07689	115,34	161,47	5,6422	0,05710	114,28	159,95	5,5501	0,04522	113,20	158,42	5,4772				
180	0,08734	130,89	183,10	5,7696	0,06509	129,82	181,89	5,6793	0,05173	128,94	180,67	5,6082				
200	0,09786	145,91	204,50	5,8823	0,07293	145,17	203,51	5,7933	0,05809	144,43	202,52	5,7234				
220	0,10788	161,04	225,76	5,9837	0,08067	160,40	224,94	5,8954	0,06436	159,76	224,11	5,8263				
240	0,11803	176,11	246,92	6,0757	0,08835	175,54	246,23	5,9880	0,07055	174,98	245,53	5,9194				
260	0,12813	191,13	268,01	6,1601	0,09599	190,63	267,42	6,0728	0,07670	190,13	266,83	6,0047				
280	0,13820	206,13	289,05	6,2381	0,10358	205,68	288,54	6,1511	0,08281	205,23	288,04	6,0833				
300	0,14824	221,11	310,06	6,3105	0,11115	220,70	309,62	6,2238	0,08889	220,29	309,18	6,1582				
350	0,17326	258,52	362,48	6,4722	0,12998	258,19	362,17	6,3858	0,10401	257,86	361,87	6,3187				
400	0,19819	295,97	414,89	6,6121	0,14873	295,69	414,68	6,5260	0,11905	295,42	414,47	6,4591				
450	0,22308	333,57	467,42	6,7359	-	-	-	-	-	-	-	-				
500	0,24792	371,45	520,20	6,8471	0,18609	371,25	520,12	6,7613	0,14899	371,04	520,04	6,6947				
600	0,29755	448,40	626,93	7,0416	0,22335	448,24	626,93	6,9560	0,17883	448,09	626,92	6,8895				
700	0,34712	527,43	735,70	7,2093	0,26056	527,31	735,76	7,1237	0,20862	527,19	735,81	7,0573				
800	0,39666	608,82	846,82	7,3576	0,29773	608,73	846,91	7,2721	0,23837	608,63	847,00	7,2057				
900	0,44618	692,59	960,30	7,4912	0,33488	692,52	960,42	7,4058	0,26810	692,44	960,54	7,3394				
1000	0,49568	778,61	1078,02	7,6131	0,37202	778,55	1076,16	7,5277	0,29782	778,49	1076,30	7,4614				

Tabela B.6.2 (continuação)

Nitrogênio superaquecido

T K	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	1500 kPa (110,38 K)				2000 kPa (115,58 K)			
					v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,01555	62,17	85,51	4,8148	0,01100	59,25	81,25	4,7193				
120	0,01899	74,26	102,75	4,9650	0,01260	66,90	92,10	4,8116				
140	0,02452	93,36	130,15	5,1767	0,01752	89,37	124,40	5,0618				
160	0,02937	110,44	154,50	5,3394	0,02144	107,55	150,43	5,2358				
180	0,03393	126,71	177,60	5,4755	0,02503	124,42	174,48	5,3775				
200	0,03832	142,56	200,03	5,5937	0,02844	140,66	197,53	5,4989				
220	0,04260	158,14	222,05	5,6987	0,03174	156,52	219,99	5,6060				
240	0,04682	173,57	243,80	5,7933	0,03496	172,15	242,08	5,7021				
260	0,05099	188,87	265,36	5,8796	0,03814	187,62	263,90	5,7894				
280	0,05512	204,10	286,78	5,9590	0,04128	202,97	285,53	5,8696				
300	0,05922	219,27	308,10	6,0325	0,04440	218,24	307,03	5,9438				
350	0,06940	257,03	361,13	6,1960	0,05209	256,21	360,39	6,1083				
400	0,07949	294,73	413,96	6,3371	0,05971	294,05	413,47	6,2500				
450	0,08953	332,53	466,82	6,4616	0,06727	331,95	466,49	6,3750				
500	0,09953	370,54	519,84	6,5733	0,07480	370,05	519,65	6,4870				
600	0,11948	447,71	626,92	6,7685	0,08980	447,33	626,93	6,6825				
700	0,13937	526,89	735,94	6,9365	0,10474	526,59	736,07	6,8507				
800	0,15923	608,39	847,22	7,0851	0,11965	608,14	847,45	6,9994				
900	0,17906	692,24	960,83	7,2189	0,13454	692,04	961,13	7,1333				
1000	0,19889	778,32	1076,65	7,3409	0,14942	778,16	1077,01	7,2553				
3000 kPa (123,61 K)				10 000 kPa								
Sat.	0,00582	46,03	63,47	4,5032	-	-	-	-				
140	0,01038	79,98	111,13	4,8706	0,00200	0,84	20,87	4,0373				
160	0,01350	101,35	141,85	5,0763	0,00291	47,44	76,52	4,4088				
180	0,01614	119,68	168,09	5,2310	0,00402	82,44	122,65	4,6813				
200	0,01857	136,78	192,49	5,3596	0,00501	108,21	158,35	4,8697				
220	0,02088	153,24	215,88	5,4711	0,00590	129,86	188,88	5,0153				
240	0,02312	169,30	238,66	5,5702	0,00672	149,42	216,64	5,1362				
260	0,02531	185,10	261,02	5,6597	0,00749	167,77	242,72	5,2406				
280	0,02746	200,72	283,09	5,7414	0,00824	185,34	267,69	5,3331				
300	0,02958	216,21	304,94	5,8168	0,00895	202,38	291,90	5,4167				
350	0,03480	254,57	358,96	5,9834	0,01067	243,57	350,26	5,5967				
400	0,03993	292,70	412,50	6,1264	0,01232	283,59	406,79	5,7477				
500	0,05008	369,06	519,29	6,3647	0,01551	362,42	517,48	5,9948				
600	0,06013	446,57	626,95	6,5609	0,01861	441,47	627,58	6,1955				
700	0,07012	525,99	736,35	6,7295	0,02167	521,96	738,65	6,3667				
800	0,08008	607,67	847,92	6,8785	0,02470	604,42	851,43	6,5172				
900	0,09003	691,65	961,73	7,0125	0,02771	689,02	966,15	6,6523				
1000	0,09996	777,85	1077,72	7,1347	0,03072	775,88	1082,84	6,7753				

Tabela B.7 – Propriedades Termodinâmicas do Metano

Tabela B.7.1 – Metano saturado

Temp. K	Pressão MPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_f	Evap. v_g	Vapor saturado v_g	Líquido saturado u_f	Evap. u_{fg}	Vapor saturado u_g	Líquido saturado h_f	Evap. h_{fg}	Vapor saturado h_g	Líquido saturado s_f	Evap. s_{fg}	Vapor saturado s_g
90,7	11,7	0,002215	3,97941	3,98163	-358,10	496,59	138,49	-358,07	543,12	185,05	4,2264	5,9891	10,2155
95	19,8	0,002243	2,44845	2,45069	-343,79	488,62	144,83	-343,75	537,18	193,43	4,3805	5,6545	10,0350
100	34,4	0,002278	1,47657	1,47885	-326,90	478,96	152,06	-326,83	529,77	202,94	4,5538	5,2977	9,8514
105	56,4	0,002315	0,93780	0,94012	-309,79	468,89	159,11	-309,66	521,82	212,16	4,7208	4,9697	9,6905
110	88,2	0,002353	0,62208	0,62443	-292,50	458,41	165,91	-292,29	513,29	221,00	4,8817	4,6663	9,5480
111,7	101,3	0,002367	0,54760	0,54997	-286,74	454,85	168,10	-286,50	510,33	223,83	4,9336	4,5706	9,5042
115	132,3	0,002395	0,42800	0,43040	-275,05	447,48	172,42	-274,74	504,12	229,38	5,0368	4,3836	9,4205
120	191,6	0,002439	0,30367	0,30610	-257,45	436,02	178,57	-256,98	494,20	237,23	5,1867	4,1184	9,3051
125	269,0	0,002486	0,22108	0,22357	-239,66	423,97	184,32	-238,99	483,44	244,45	5,3321	3,8675	9,1996
130	367,6	0,002537	0,16448	0,16701	-221,65	411,25	189,60	-220,72	471,72	251,00	5,4734	3,6286	9,1020
135	490,7	0,002592	0,12458	0,12717	-203,40	397,77	194,37	-202,13	458,90	256,77	5,6113	3,3993	9,0106
140	641,6	0,002653	0,09575	0,09841	-184,86	383,42	198,56	-183,16	444,85	261,69	5,7464	3,1775	8,9239
145	823,7	0,002719	0,07445	0,07717	-165,97	368,06	202,09	-163,73	429,38	265,66	5,8794	2,9613	8,8406
150	1040,5	0,002794	0,05839	0,06118	-146,65	351,53	204,88	-143,74	412,29	268,54	6,0108	2,7486	8,7594
155	1295,6	0,002877	0,04605	0,04892	-126,82	333,61	206,79	-123,09	393,27	270,18	6,1415	2,5372	8,6787
160	1592,8	0,002974	0,03638	0,03936	-106,35	314,01	207,66	-101,61	371,96	270,35	6,2724	2,3248	8,5971
165	1935,9	0,003086	0,02868	0,03177	-85,06	292,30	207,24	-79,08	347,82	268,74	6,4046	2,1080	8,5126
170	2329,3	0,003222	0,02241	0,02563	-62,67	267,81	205,14	-55,17	320,02	264,85	6,5399	1,8824	8,4224
175	2777,6	0,003393	0,01718	0,02058	-38,75	239,47	200,72	-29,33	287,20	257,87	6,6811	1,6411	8,3223
180	3286,4	0,003623	0,01266	0,01629	-12,43	205,16	192,73	-0,53	246,77	246,25	6,8333	1,3710	8,2043
185	3863,2	0,003977	0,00846	0,01243	18,47	159,49	177,96	33,83	192,16	226,00	7,0095	1,0387	8,0483
190	4520,5	0,004968	0,00300	0,00797	69,10	67,01	136,11	91,56	80,58	172,14	7,3015	0,4241	7,7256
190,6	4599,2	0,006148	0	0,00615	101,46	0	101,46	129,74	0	129,74	7,4999	0	7,4999

Tabela B.7.2

Metano superaquecido

Temp. K	100 kPa (111,50 K)				200 kPa (120,61 K)				400 kPa (131,42 K)			
	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,55665	167,90	223,56	9,5084	0,29422	179,30	238,14	9,2918	0,15427	191,01	252,72	9,0754
125	0,63126	190,21	253,33	9,7606	0,30695	186,80	248,19	9,3736	-	-	-	-
150	0,78586	230,18	306,77	10,1504	0,37700	227,91	303,31	9,7759	0,18233	223,16	296,09	9,3843
175	0,89840	269,72	359,56	10,4759	0,44486	268,05	357,02	10,1071	0,21799	264,61	351,81	9,7280
200	1,02994	309,20	412,19	10,7570	0,51165	307,88	410,21	10,3912	0,25246	305,19	406,18	10,0185
225	1,16092	348,90	464,99	11,0058	0,57786	347,81	463,38	10,6417	0,28631	345,61	460,13	10,2726
250	1,29154	389,12	518,27	11,2303	0,64370	388,19	516,93	10,8674	0,31978	386,32	514,23	10,5007
275	1,42193	430,17	572,36	11,4365	0,70931	429,36	571,22	11,0743	0,35301	427,74	568,94	10,7092
300	1,55215	472,36	627,58	11,6286	0,77475	471,65	626,60	11,2670	0,38606	470,23	624,65	10,9031
325	1,68225	516,00	684,23	11,8100	0,84008	515,37	683,38	11,4488	0,41899	514,10	681,69	11,0857
350	1,81226	561,34	742,57	11,9829	0,90530	560,77	741,83	11,6220	0,45183	559,63	740,36	11,2595
375	1,94220	608,58	802,80	12,1491	0,97046	608,07	802,16	11,7885	0,48460	607,03	800,87	11,4265
400	2,07209	657,89	865,10	12,3099	1,03557	657,41	864,53	11,9495	0,51731	656,47	863,39	11,5879
425	2,20193	709,36	929,55	12,4661	1,10062	708,92	929,05	12,1059	0,54997	708,05	928,04	11,7446
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,58260	761,85	994,89	11,8974
475	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61520	817,89	1063,97	12,0468
500	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64778	876,18	1135,29	12,1931
525	-	-	-	-	-	-	-	-	0,68033	936,67	1208,81	12,3386
600 kPa (138,72 K) 800 kPa (144,40 K) 1000 kPa (149,13 K)												
Sat.	0,10496	197,54	260,51	8,9458	0,07941	201,70	265,23	8,8505	0,06367	204,45	268,12	8,7735
150	0,11717	218,08	288,38	9,1390	0,08434	212,53	280,00	8,9509	0,06434	206,28	270,62	8,7902
175	0,14227	261,03	346,39	9,4970	0,10433	257,30	340,76	9,3260	0,08149	253,38	334,87	9,1871
200	0,16603	302,44	402,06	9,7944	0,12278	299,62	397,85	9,6310	0,09681	296,73	393,53	9,5006
225	0,18911	343,37	456,84	10,0525	0,14050	341,10	453,50	9,8932	0,11132	338,79	450,11	9,7672
250	0,21180	384,44	511,52	10,2830	0,15781	382,53	508,78	10,1262	0,12541	380,61	506,01	10,0028
275	0,23424	426,11	566,66	10,4931	0,17485	424,47	564,35	10,3381	0,13922	422,82	562,04	10,2164
300	0,25650	468,80	622,69	10,6882	0,19172	467,36	620,73	10,5343	0,15285	465,91	618,76	10,4138
325	0,27863	512,82	680,00	10,8716	0,20845	511,55	678,31	10,7186	0,16635	510,26	676,61	10,5990
350	0,30067	558,48	738,88	11,0461	0,22510	557,33	737,41	10,8938	0,17976	556,18	735,94	10,7748
375	0,32264	605,99	799,57	11,2136	0,24167	604,95	798,28	11,0617	0,19309	603,91	797,00	10,9433
400	0,34456	655,52	862,25	11,3754	0,25818	654,57	861,12	11,2239	0,20636	653,62	859,98	11,1059
425	0,36643	707,18	927,04	11,5324	0,27465	706,31	926,03	11,3813	0,21959	705,44	925,03	11,2636
450	0,38826	761,05	994,00	11,6855	0,29109	760,24	993,11	11,5346	0,23279	759,44	992,23	11,4172
475	0,41006	817,15	1063,18	11,8351	0,30749	816,40	1062,40	11,6845	0,24595	815,66	1061,61	11,5672
500	0,43184	875,48	1134,59	11,9816	0,32387	874,79	1133,89	11,8311	0,25909	874,10	1133,19	11,7141
525	0,45360	936,03	1208,18	12,1252	0,34023	935,38	1207,56	11,9749	0,27221	934,73	1206,95	11,8580
550	-	-	-	-	0,35657	998,14	1283,45	12,1161	0,28531	997,53	1282,84	11,9992

Tabela B.7.2 (continuação)

Metano superaquecido

T K	1500 kPa (158,32 K)				2000 kPa (165,86 K)			
	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,04196	207,53	270,47	8,6215	0,03062	207,01	268,25	8,4975
175	0,05078	242,64	318,81	8,9121	0,03504	229,90	299,97	8,6839
200	0,06209	289,13	382,26	9,2514	0,04463	280,91	370,17	9,0596
225	0,07239	332,85	441,44	9,5303	0,05289	326,64	432,43	9,3532
250	0,08220	375,70	499,00	9,7730	0,06059	370,67	491,84	9,6036
275	0,09171	418,65	556,21	9,9911	0,06796	414,40	550,31	9,8266
300	0,10103	462,27	613,82	10,1916	0,07513	458,59	608,85	10,0303
325	0,11022	507,04	672,37	10,3790	0,08216	503,80	668,12	10,2200
350	0,11931	553,30	732,26	10,5565	0,08909	550,40	728,58	10,3992
375	0,12832	601,30	793,78	10,7263	0,09594	598,69	790,57	10,5703
400	0,13728	651,24	857,16	10,8899	0,10274	648,87	854,34	10,7349
425	0,14619	703,26	922,54	11,0484	0,10949	701,08	920,06	10,8942
450	0,15506	757,43	990,02	11,2027	0,11620	755,43	987,84	11,0491
475	0,16391	813,80	1059,66	11,3532	0,12289	811,94	1057,72	11,2003
500	0,17273	872,37	1131,46	11,5005	0,12955	870,64	1129,74	11,3480
525	0,18152	933,12	1205,41	11,6448	0,13619	931,51	1203,88	11,4927
550	0,19031	996,02	1281,48	11,7864	0,14281	994,51	1290,13	11,6346
4000 kPa (186,10 K) 8000 kPa								
Sat.	0,01160	172,96	219,34	8,0035	-	-	-	-
200	0,01763	237,70	308,23	8,4675	0,00412	55,58	88,54	7,2069
225	0,02347	298,52	392,39	8,8653	0,00846	217,30	284,98	8,1344
250	0,02814	349,08	461,63	9,1574	0,01198	298,05	393,92	8,5964
275	0,03235	396,67	526,07	9,4031	0,01469	357,88	475,39	8,9064
300	0,03631	443,48	588,73	9,6212	0,01705	411,71	548,15	9,1598
325	0,04011	490,62	651,07	9,8208	0,01924	463,52	617,40	9,3815
350	0,04381	538,70	713,93	10,0071	0,02130	515,02	685,39	9,5831
375	0,04742	588,18	777,86	10,1835	0,02328	567,12	753,34	9,7706
400	0,05097	639,34	843,24	10,3523	0,02520	620,38	821,95	9,9477
425	0,05448	692,38	910,31	10,5149	0,02707	675,14	891,71	10,1169
450	0,05795	747,43	979,23	10,6725	0,02891	731,63	962,92	10,2796
475	0,06139	804,55	1050,12	10,8258	0,03072	789,99	1035,75	10,4372
500	0,06481	863,78	1123,01	10,9753	0,03251	850,28	1110,34	10,5902
525	0,06820	925,11	1197,93	11,1215	0,03428	912,54	1186,74	10,7393
550	0,07158	988,53	1274,86	11,2646	0,03603	976,77	1264,99	10,8849
575	0,07495	1053,98	1353,77	11,4049	0,03776	1042,96	1345,07	11,0272

Apêndice C

Calos Específico de Gás Ideal

Apêndice D

Equação de Estado

Tabela D.1

Equações de estado

Modelo	c	d	b ₀	a ₀
Gás Ideal	0	0	0	0
Van der Waals	0	0	1/8	27/64
Redlich-Kwong	1	0	0,08664	0,42748 (T _r) ^{-1/2}
Soave	1	0	0,08664	0,42748 [1 + f(1 - T _r ^{1/2})] ²
Peng-Robinson	2	-1	0,0778	0,45724 [1 + f(1 - T _r ^{1/2})] ²

Tabela D.3

Fatores de compressibilidade na saturação líquido-vapor (fluido simples de Lee-Kesler)

T _r	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	1
P _r ^{sat}	2,7E-4	4,6E-3	0,028	0,099	0,252	0,373	0,532	0,737	1
Z _r	6,5E-5	9,5E-4	0,0052	0,017	0,042	0,062	0,090	0,132	0,29
Z _r	0,999	0,988	0,957	0,897	0,807	0,747	0,673	0,569	0,29

Tabela D.4

Fatores acêntricos de algumas substâncias

Substância		ω	Substância		ω
Água	H ₂ O	0,344	Hélio	He	-0,365
Amônia	NH ₃	0,25	Metano	CH ₄	0,011
Argônio	Ar	0,001	Neônio	Ne	-0,029
Bromo	Br ₂	0,108	Nitrogênio	N ₂	0,039
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0,199	R-32	CF ₂ H ₂	0,277
Etano	C ₂ H ₆	0,099	R-125	CHF ₂ CF ₃	0,305

Tabela D.2

Equação de estado de Lee-Kesler

A equação generalizada de estado de Lee-Kesler é:

$$Z = \frac{P_r v_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{v_r} + \frac{C}{v_r^2} + \frac{D}{v_r^5} + \frac{c_4}{T_r^3 v_r^2} \beta + \frac{\gamma}{v_r^2} \exp \left(-\frac{\gamma}{v_r^2} \right)$$

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^8}$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

em que:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad P_r = \frac{P}{P_c} \quad v_r = \frac{v}{RT_c/P_c}$$

Os valores das constantes são os seguintes:

Constante	Fluido simples	Constante	Fluido simples
b ₁	0,1181193	c ₃	0,0
b ₂	0,265728	c ₄	0,042724
b ₃	0,154790	d ₁ × 10 ⁴	0,155488
b ₄	0,030323	d ₂ × 10 ⁴	0,623689
c ₁	0,0236744	β	0,65392
c ₂	0,0186984	γ	0,060167

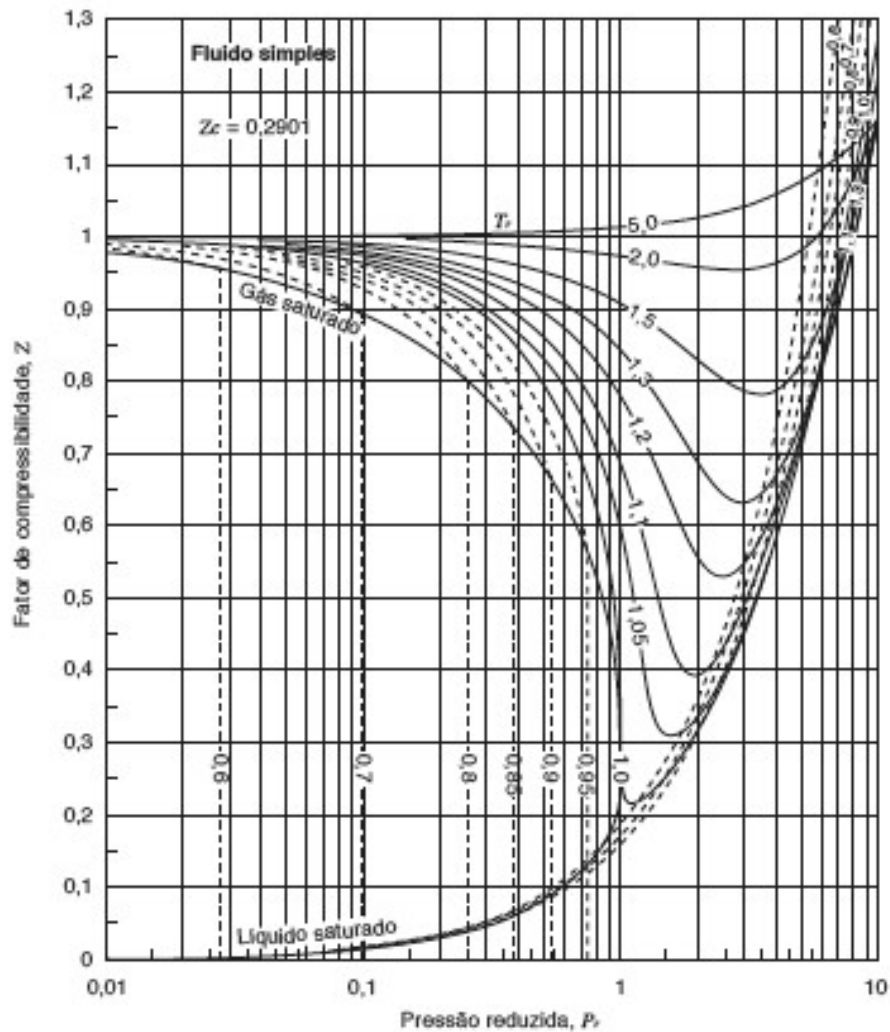


Figura D.1
Fator de compressibilidade para o fluido de Lee-Kesler simples.

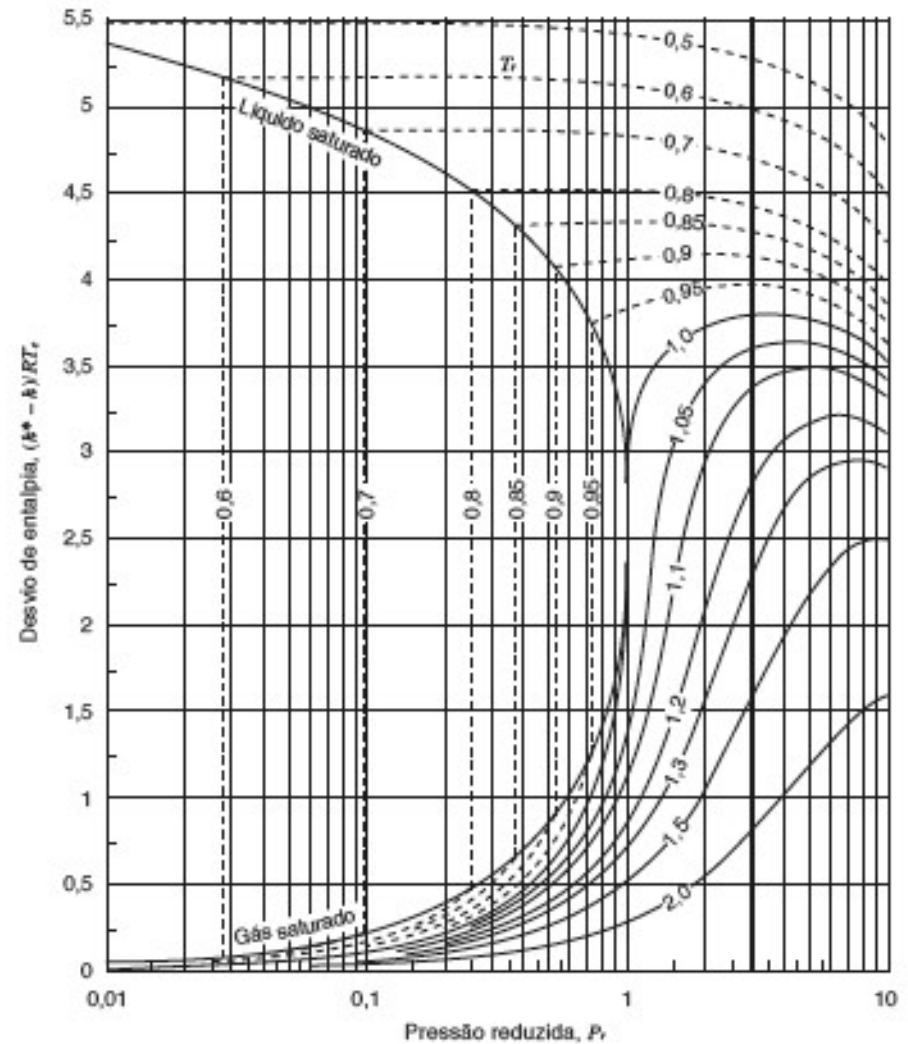


Figura D.2
Desvio de entalpia para o fluido de Lee-Kesler simples.

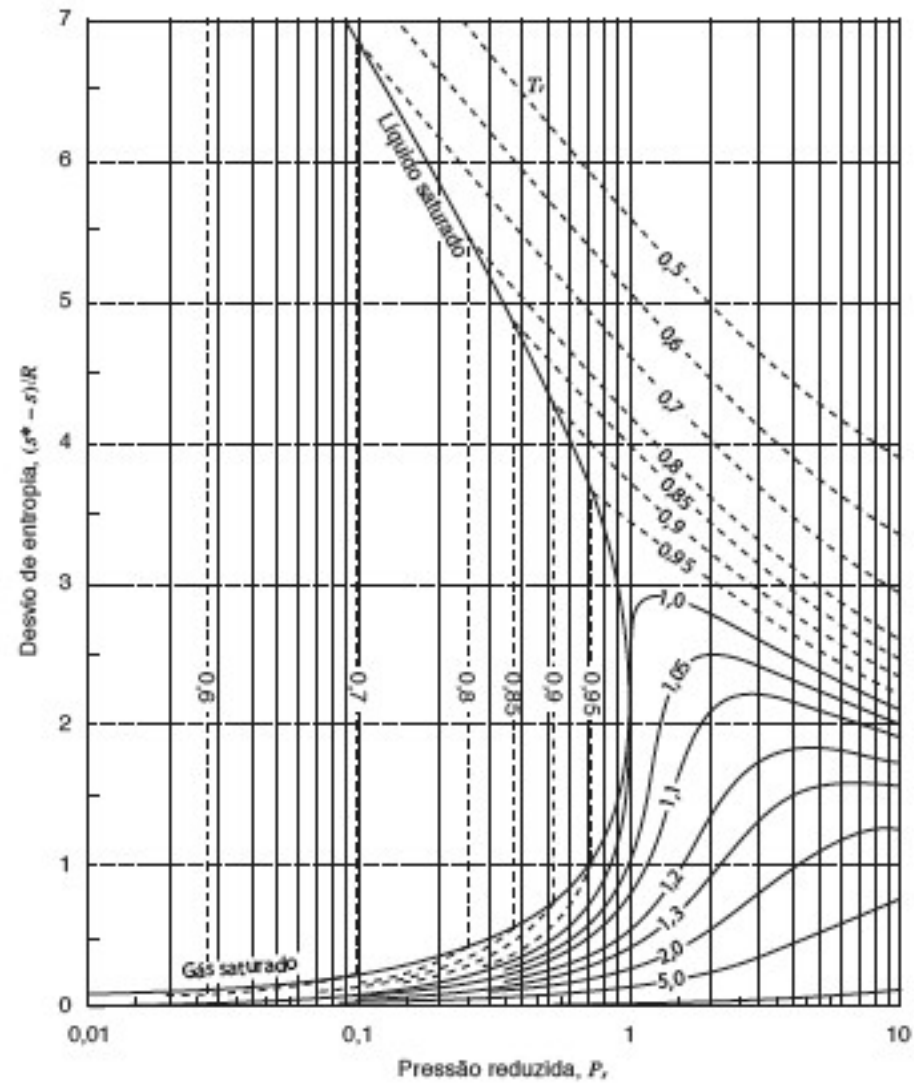


Figura D.3
Desvio de entropia para o fluido de Lee-Kesler simples.

Apêndice E

Diagramas

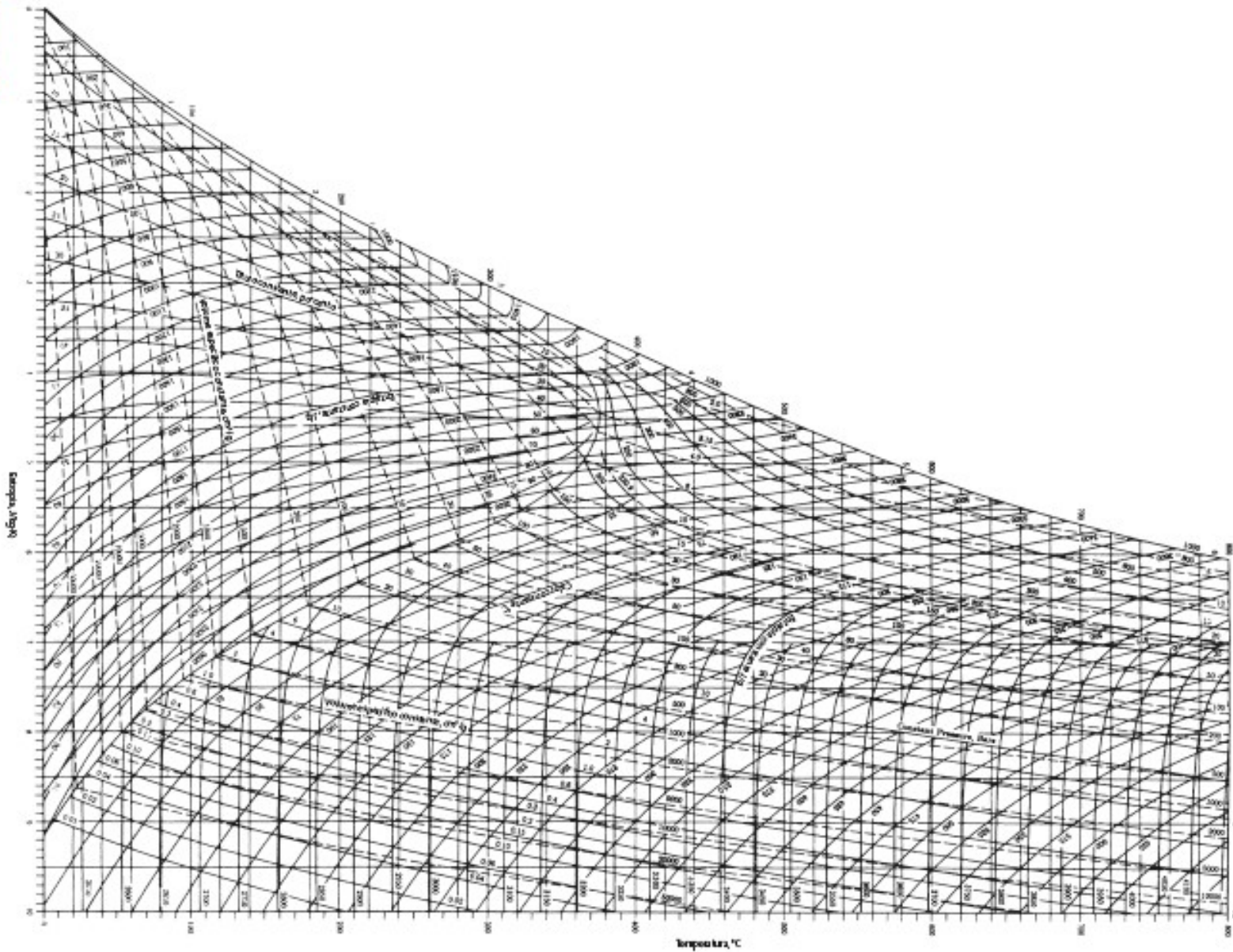


Figura E.1

Diagrama temperatura-entropia da água.
 Keenan, Keyes, Hill e Moore. Steam Tables (International Edition – Metric Units). Copyright ©1989, John Wiley & Sons, Inc.

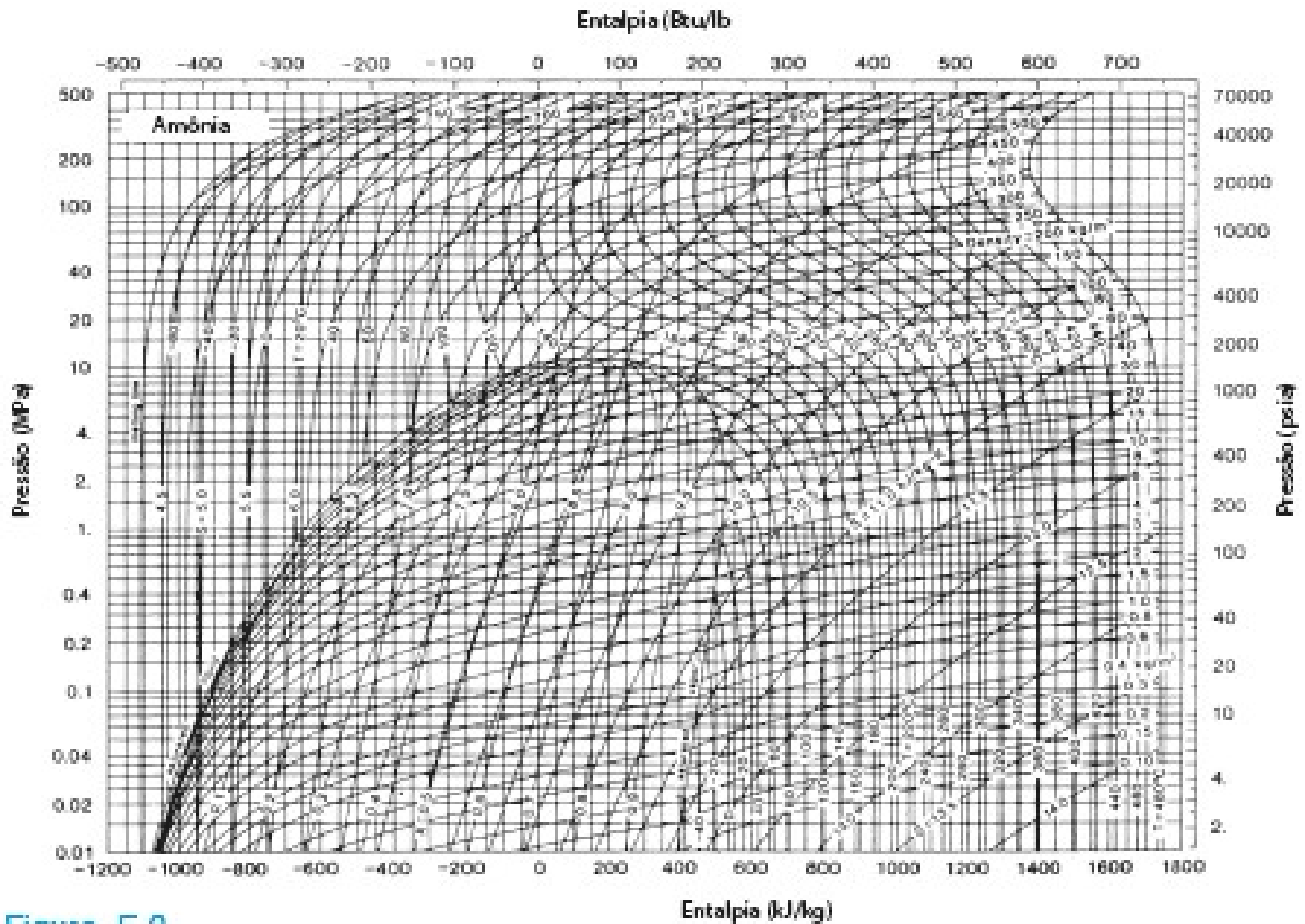


Figura E.2
Diagrama pressão-entalpia da amônia.

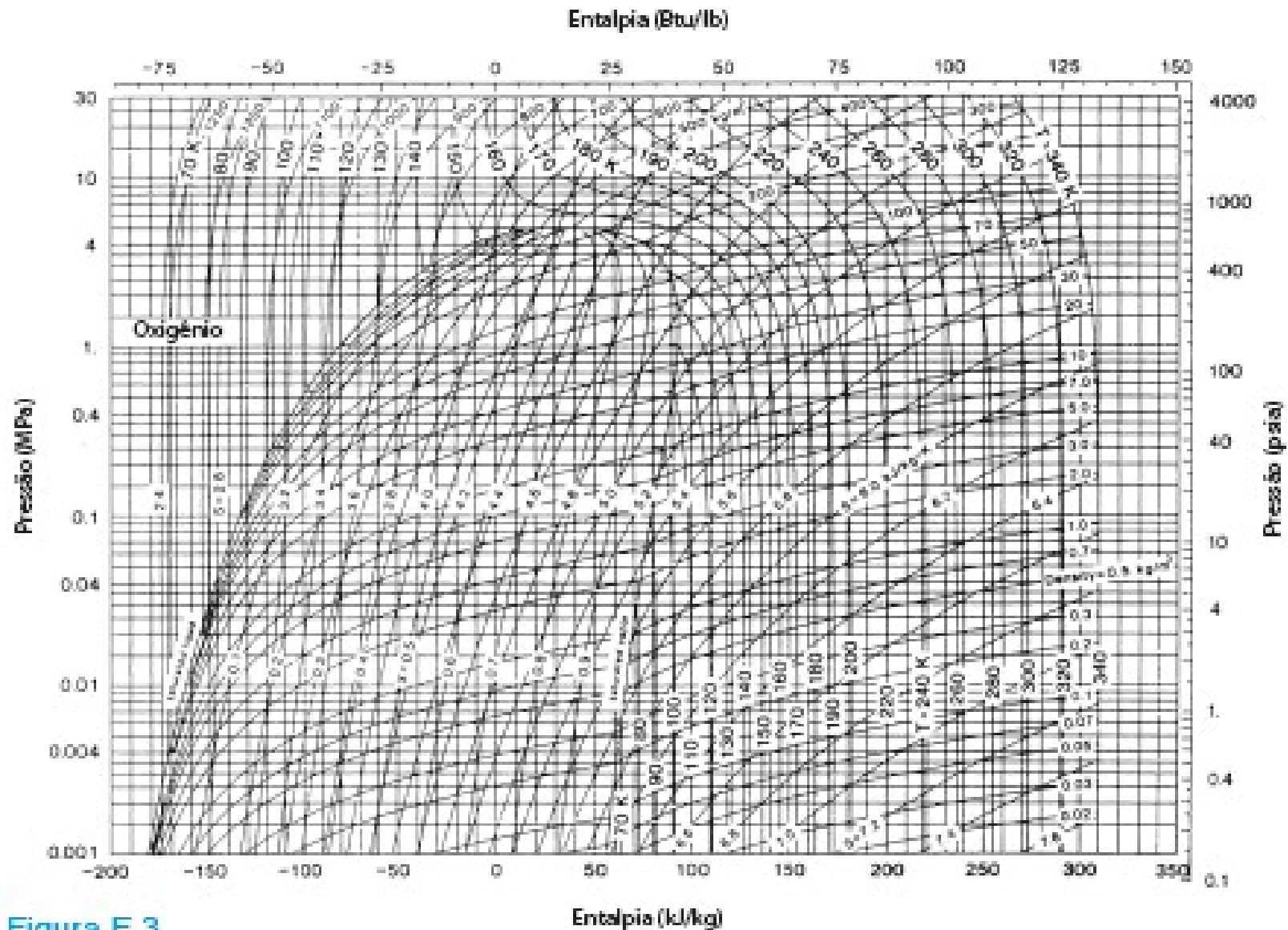


Figura E.3
Diagrama pressão-entalpia do oxigênio.

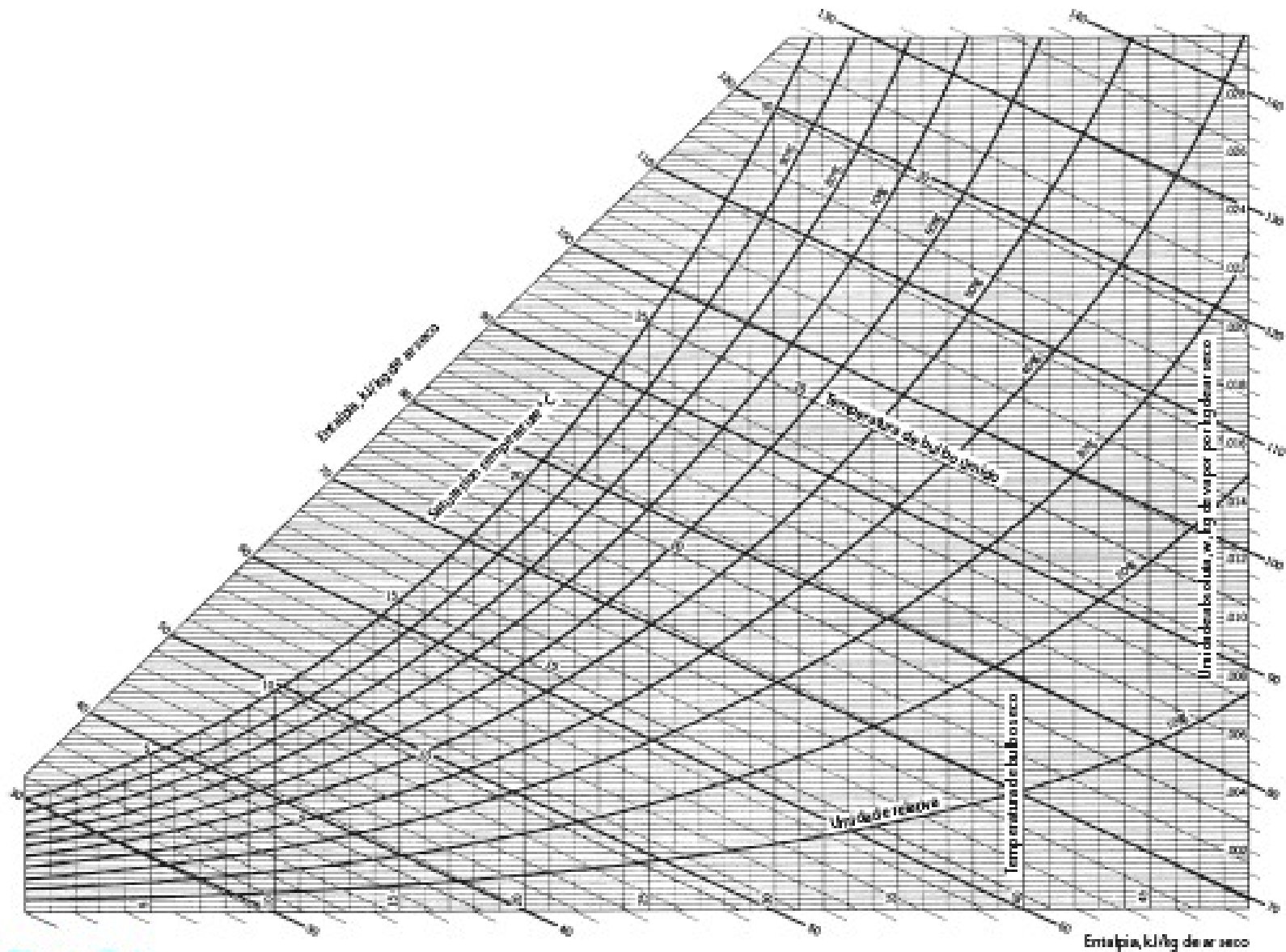


Figura E.4
Carta psicrométrica.



CARTA PSICROMETRICA

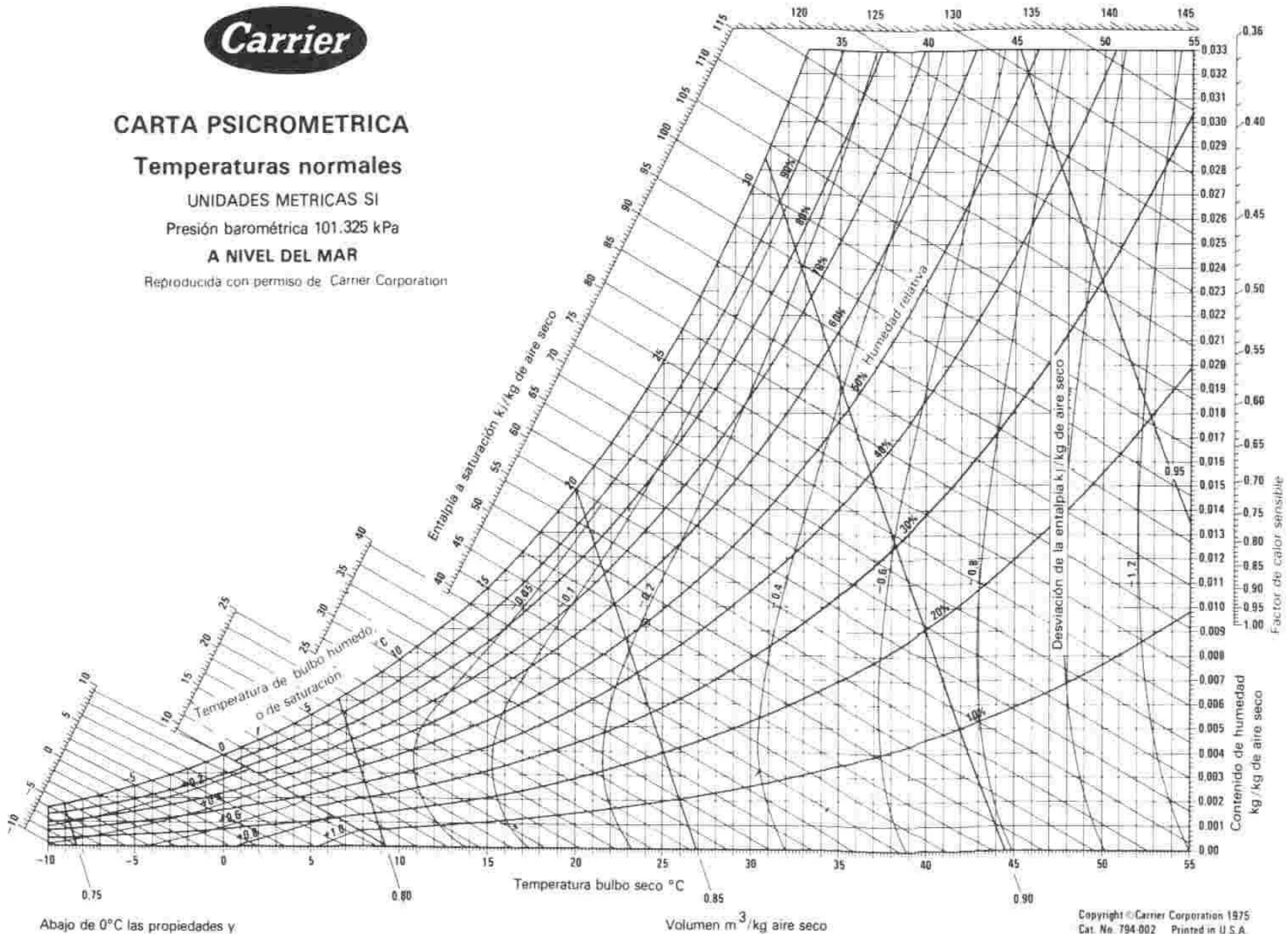
Temperaturas normales

UNIDADES METRICAS SI

Presión barométrica 101.325 kPa

A NIVEL DEL MAR

Reproducida con permiso de Carrier Corporation



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de entalpia son para hielo

Copyright © Carrier Corporation 1975
Cat. No. 794-002 Printed in U.S.A.

Fig. 5-11

Método para resolver um problema

Os primeiros passos em uma análise termodinâmica são:

1. Definição do sistema ou volume de controle; Fazer um esboço e indicar as interações com o meio
2. Estabelecer:
 - ≡ O que é conhecido do estado inicial: quais as propriedades?
 - ≡ O que é conhecido do estado final
3. Estabelecer o que se conhece do processo? Alguma grandeza é constante ou nula? Existe alguma relação funcional conhecida entre duas propriedades?
4. Fazer um diagrama (exemplo: Txv ou Pxv)
5. Estabelecer o modelo de previsão do comportamento da substância (por exemplo: gás perfeito, tabelas de vapor, etc)
6. Analisar o problema as fronteiras sobre as equações: conservação da massa, conservação da energia, segunda lei da termodinâmica

Perguntas?

Contato:



<http://lattes.cnpq.br/9510794972870727>



[@carloscatunda](#)



carlos.catunda@cefet-rj.br

