

TERMODINÂMICA

515 problemas resolvidos



Conselho Editorial da Editora Livraria da Física

Amílcar Pinto Martins - Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell - Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva - Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes - UNED, Madri

Iran Abreu Mendes - Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford - Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo - Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa - Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras - Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia - Universidade de Lisboa

Teresa Vergani - Universidade Aberta de Portugal

Daniel Muniz Beserra

TERMODINÂMICA

515 problemas resolvidos



2022

Copyright © 2022 Daniel Muniz Beserra
1ª Edição

Direção editorial: José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Beserra, Daniel Muniz
Termodinâmica: 515 problemas resolvidos / Daniel Muniz Beserra. --
São Paulo: Livraria da Física, 2022.

Bibliografia.
ISBN 978-65-5563-210-1

1. Termodinâmica I. Título.

22-108864

CDD-621.4021

Índices para catálogo sistemático:
1. Termodinâmica: Engenharia 621.4021

Cibele Maria Dias - Bibliotecária - CRB-8/9427

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.

Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107
da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

PREFÁCIO

Este livro se destina, primordialmente, a estudantes de curso de graduação em engenharia. Ele foi elaborado com base no entendimento do autor de que a resolução de uma grande variedade de problemas de Termodinâmica vai ajudar o estudante a solidificar a compreensão dos princípios básicos e propiciar mais segurança e correção na aplicação desses princípios.

Os 515 problemas foram selecionados a partir de livros tradicionais e literatura correlacionada, todos listados na bibliografia, no intuito de se abordar equações que traduzem detalhes importantes dos conceitos e princípios. Os problemas são resolvidos de forma detalhada e estão distribuídos em 11 capítulos, abrangendo dois períodos letivos, seguindo uma sequência semelhante à apresentada na maioria dos livros-texto tradicionais. Os cinco primeiros capítulos apresentam problemas relacionados aos conceitos e princípios básicos da Termodinâmica. O capítulo 6 reúne problemas relacionados especificamente ao escoamento compressível. Os capítulos 7 e 8 tratam de problemas relacionados às misturas e soluções. O capítulo 9 traz problemas de equilíbrio líquido-vapor. O capítulo 10 é dedicado às reações de combustão. No capítulo 11, o foco é a parte de equilíbrio em reações químicas.

O autor recomenda que a utilização do presente livro, seja precedida da leitura de livros-texto referentes a cada capítulo de interesse e que, ao utilizá-lo, o leitor adote a seguinte sistemática:

1. estudar o assunto pertinente nos livros-texto;
2. tentar resolver o problema sem consultar a solução apresentada;
3. analiticamente, comparar a solução aqui exposta com a solução proposta;
4. caso não consiga resolver, acompanhar os detalhes da resolução no texto;
5. avaliar criticamente a resposta obtida;
6. sempre tentar uma outra alternativa à solução apresentada.

Finalmente, o autor espera que este livro, suplementando livros tradicionais, contribua de alguma forma para o melhor entendimento dessa fascinante disciplina da engenharia.

Daniel Muniz Beserra
Fortaleza – Ce, julho de 2021

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – PROPRIEDADES DAS SUBSTÂNCIAS PURAS E EQUAÇÕES DE ESTADO – GÁS IDEAL.....

Volume específico e massa específica de líquidos e vapores – Fração molar e fração mássica – Título de uma mistura – Pressão total e pressão parcial – Equação de estado dos gases ideais.

CAPÍTULO 2 – TRABALHO E ENERGIA.....

Trabalho e potência – Energia cinética – Calor – Trabalho de expansão e trabalho de compressão.

CAPÍTULO 3 – A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....

Calor e trabalho envolvidos em processos – Variação da entalpia e da energia interna em processos com e sem mudança de fase – Calor específico – Conservação da massa – Aplicações da primeira lei em sistemas abertos: bocais, bombas, compressores e turbinas – Aplicações da primeira lei em processos em regime transiente.

CAPÍTULO 4 – A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.....

Ciclo de Carnot – Ciclo de refrigeração – Bomba de calor – Variação de entropia – Processos isentrópicos – Processos irreversíveis – Trabalho e calor – Aplicação da segunda lei da termodinâmica a sistemas abertos – Eficiência isentrópica.

CAPÍTULO 5 – EQUAÇÕES DE ESTADO E RELAÇÕES GERAIS DA TERMODINÂMICA.....

Equação dos gases ideais – Equação de Redlich-Kwong – Equação do virial – Equação de van der Waals – Diagramas de compressibilidade – Equações de Maxwell – Coeficiente de expansão volumétrica – Coeficiente de compressibilidade térmica – Coeficiente de Joule-Thompson – Diagramas generalizados de desvio de entalpia – Entalpia e entropia residuais – Regra de Kay.

CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DA TERMODINÂMICA EM ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL..

Temperatura e pressão de estagnação – Temperatura e pressão estática – Velocidade do som e número de Mach – escoamento isentrópico – Temperatura e pressão crítica – Bocal convergente e bocal divergente – Bocal convergente-divergente – Onda de choque normal – escoamento em duto sem atrito e com transferência de calor (escoamento de Rayleigh) – Bocais de vapor.

CAPÍTULO 7 – TERMODINÂMICA DE MISTURAS

Volume molar parcial – Volume total de mistura – Volume molar de mistura – Entalpia parcial molar – Entalpia de mistura – Entropia de mistura – Equação de Gibbs-Duhem – Energia livre de Gibbs.

CAPÍTULO 8 – SOLUÇÕES.....

Pressão de vapor de soluções – Massa molar de soluto – Constante crioscópica – Constante ebulioscópica – Pressão osmótica – Fugacidade e coeficiente de fugacidade (equação do virial, correlações generalizadas, equação de van der Waals, SRW, tabela de propriedades termodinâmicas) – Azeotropia – Propriedades de excesso – Energia de Gibbs de excesso (equação de Margules, equação de Wilson, equação de van Laar) – Calor de solução.

CAPÍTULO 9 – EQUILÍBRIO LÍQUIDO/VAPOR.....

Pressão de vapor – Equação de Clausius-Clapeyron – Regra de Trouton – Entalpia de vaporização – Entropia de vaporização – Lei de Raoult – Composição no equilíbrio – Volatilidade relativa - Razão de equilíbrio – Ponto de bolha – Ponto de orvalho – Lei de Henry – Coeficiente de atividade – Lei de Raoult modificada – Operação de flash – Azeotropia – Equação de Margules – Equação de van Laar.

CAPÍTULO 10 – REAÇÕES QUÍMICAS – COMBUSTÃO

Combustão completa e incompleta – Razão ar/combustível – Ar teórico e excesso de ar – Composição de reagentes e produtos da combustão – Temperatura do ponto de orvalho – Entalpia (calor) de combustão – Temperatura

CAPÍTULO 11 – EQUILÍBRIOS EM REAÇÕES QUÍMICAS.....

Grau de avanço de reação (coordenada de reação) – Coeficientes estequiométricos – Constante de equilíbrio – Composição dos reagentes e produtos no equilíbrio – Pressões parciais no equilíbrio – Pressão total no equilíbrio – Energia livre de Gibbs de formação e de reação – Entalpia e entropia de reação – Taxa de conversão.

REFERÊNCIAS

SOBRE O AUTOR.....

PROPRIEDADES DAS SUBSTÂNCIAS PURAS E EQUAÇÕES DE ESTADO (GÁS IDEAL)

1.01 Sabendo-se que em uma mistura de líquido e vapor o volume total é dado pela equação

$$V = V_l + V_v$$

V = volume total da mistura

V_l = volume total do líquido

V_v = volume total do vapor

Expressar o volume específico da mistura (v) em termos do volume específico do líquido (v_l), do volume específico do vapor (v_v) e do título da mistura (x).

Solução.

O título do vapor é definido pela equação

$$x = \frac{m_v}{m} \quad (i)$$

onde

m_v = massa do vapor

m = massa total

Lembrando as expressões dos volumes específicos

$$v = \frac{V}{M} \quad v_l = \frac{V_l}{m_l} \quad v_v = \frac{V_v}{m_v} \quad (ii)$$

onde

m_l = massa do líquido

Dividindo a expressão a seguir por m e aplicando as relações (ii)

$$V = V_l + V_v$$

$$v = \frac{m_l v_l}{m} + \frac{m_v v_v}{m}$$

Aplicando a definição do título e lembrando que $m_l = m - m_v$, então:

$$v = (1 - x)v_l + x v_v \quad (iii)$$

ou

$$v = v_l + x(v_v - v_l) \quad (iv)$$

1.02 Um tanque de 3 m^3 contém água na fase líquida e na fase vapor. A fase líquida corresponde a 2 % do volume total e a temperatura da mistura é $280 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual o título da mistura?

Solução. Dados:

volume da mistura, $V = 3 \text{ m}^3$

percentagem volumétrica do líquido = 2 %

temperatura da mistura $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$

A partir dos dados obtém-se:

volume total do líquido

$$V_l = 0,02 \times 3 \text{ m}^3 = 0,06 \text{ m}^3$$

volume total do vapor

$$V_v = 3 \text{ m}^3 - 0,06 \text{ m}^3 = 2,94 \text{ m}^3$$

Para $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$, obtém-se das tabelas de propriedades termodinâmicas da água:

volume específico do líquido $v_l = 0,001332 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor $v_v = 0,03017 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Das relações (ii) do problema 1.01

$$m_l = \frac{V_l}{v_l} = \frac{0,06 \text{ m}^3}{0,001332 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 45 \text{ kg}$$

$$m_v = \frac{V_v}{v_v} = \frac{2,94 \text{ m}^3}{0,03017 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 97,4 \text{ kg}$$

Com a equação (i) do problema 1.01, determina-se o título da mistura

$$x = \frac{m_v}{m} = \frac{97,4 \text{ kg}}{97,4 \text{ kg} + 45 \text{ kg}} = 0,68 \text{ (68\%)}$$

1.03 Um tanque contém uma mistura de água na fase líquida e na fase vapor. A pressão do tanque é 300 kPa e o volume específico da mistura é $0,4 \text{ m}^3/\text{kg}$. Calcular o título da mistura.

Solução. Dados:

volume específico da mistura, $v = 0,4 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

pressão da mistura = 300 kPa

Para pressão de 300 kPa, obtém-se da tabela de propriedades termodinâmicas da água:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001073 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,6058 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Utilizando a equação (iv) do problema 1.01, calcula-se o título:

$$x = \frac{v - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001073 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,6058 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001073 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,66 \text{ (66\%)}$$

1.04 Considerando que no problema anterior 1.03 o volume do tanque é 20 m^3 , calcular a massa do vapor.

Solução. Dados:

volume do tanque (mistura), $V = 20 \text{ m}^3$

volume específico da mistura, $v = 0,4 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

título, $x = 0,66$

Com a equação da definição de volume específico a seguir, calcula-se a massa total:

$$v = \frac{V}{m} \quad m = \frac{V}{v} = \frac{20 \text{ m}^3}{0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 50 \text{ kg}$$

Da definição do título, equação (i) do problema 1.01, a massa do vapor é:

$$m_v = x m = 0,66 \times 50 \text{ kg} = 33 \text{ kg}$$

1.05 Em um tanque contendo vapor de água, o volume do vapor saturado é 100 vezes o volume da água líquida. Qual o título da mistura se a pressão no tanque é 400 kPa?

Solução. Dados:

volume do vapor, $V_v = 100 V_l$

pressão da mistura = 400 kPa

Com essa pressão obtém-se das tabelas de termodinâmicas da água:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001084 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,4625 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

O título é expresso pela equação $x = \frac{m_v}{m}$ e das relações (ii) do problema 1.01 a equação do título também ser escrita como:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} \qquad x = \frac{\frac{V_v}{v_v}}{\frac{V_v}{v_v} + \frac{V_l}{v_l}} \qquad (i)$$

Substituindo os valores numéricos e considerando que $V_v = 100 V_l$, obtém-se o título:

$$x = \frac{\frac{100 V_l}{0,4625 \frac{m^3}{kg}}}{\frac{100 V_l}{0,4625 \frac{m^3}{kg}} + \frac{V_l}{0,001084 \frac{m^3}{kg}}} = 0,19 \text{ (19\%)}$$

1.06 Sob pressão de 600 kPa, 50 kg de uma mistura de água e vapor é aquecida à pressão constante até que o título alcance 0,75 (75 %). Qual o volume final da mistura?

Solução. Dados

massa total, $m = 50 \text{ kg}$

título final, $x = 0,75$

pressão da mistura $P = 600 \text{ kPa}$

Observar que o aquecimento deve apenas aumentar a quantidade da fase vapor permanecendo a mistura saturada na mesma temperatura. Com a pressão de 600 kPa, obtém-se da tabela de propriedades termodinâmicas da água:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001101 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,3157 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Com esses valores e os dados do problema, calcula-se o volume específico da mistura na condição final, utilizando-se a equação (iv) do problema 1.01:

$$v = v_l + x(v_v - v_l)$$

$$v = 0,001101 \frac{m^3}{kg} + 0,75(0,3157 \frac{m^3}{kg} - 0,001101 \frac{m^3}{kg})$$

$$v = 0,237 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Com as relações (ii) do problema 1.01, calcula-se o volume final:

$$V = v m = 0,237 \frac{m^3}{kg} \times 50 \text{ kg} = 11,8 \text{ m}^3$$

1.07 Considerando que no problema anterior a pressão é de 300 kPa. Qual o volume final?

Solução. Dados

massa total, $m = 50 \text{ kg}$

título final, $x = 0,75$

pressão da mistura = 300 kPa

Adotar as mesmas considerações do problema anterior. Com a pressão de 300 kPa obtém-se da tabela de propriedades termodinâmicas da água:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001073 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,6058 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Com esses valores e os dados do problema, calcula-se o volume específico da mistura na condição final, utilizando-se a equação (iv) do problema 1.01.

$$v = v_l + x(v_v - v_l)$$

$$v = 0,001073 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + 0,75(0,6058 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001073 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}})$$

$$v = 0,455 \text{ m}^3/\text{kg}$$

com uma das equações (ii) do problema 1.01, calcula-se o volume final:

$$V = mv = 0,455 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 50 \text{ kg} = 22,7 \text{ m}^3$$

1.08 Em um tanque de 6 m^3 , coexistem uma certa quantidade de vapor e 80 kg de água na fase líquida. Se a temperatura da mistura é $300 \text{ }^\circ\text{C}$, qual a pressão no tanque e o título da mistura?

Solução. Dados:

volume da mistura, $V = 6 \text{ m}^3$

massa do líquido, $m_l = 80 \text{ kg}$

temperatura, $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$

Da tabela de propriedades termodinâmicas da água na condição de vapor saturado à temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$, encontra-se diretamente a pressão, ou seja $8,58 \text{ MPa}$, obtendo-se também:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001404 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,02168 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Com v_l e com a m_l , calcula-se o volume do líquido V_l usando as relações (ii) do problema 1.01

$$V_l = m_l v_l = 80 \text{ kg} \times 0,001404 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0,11 \text{ m}^3$$

logo o volume do vapor V_v , será:

$$V_v = V - V_l = 6 \text{ m}^3 - 0,11 \text{ m}^3 = 5,89 \text{ m}^3$$

$$m_v = \frac{V_v}{v_v} = \frac{5,89 \text{ m}^3}{0,02168 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 272 \text{ kg}$$

então calcula-se o título x , usando a equação da definição do título,

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} = \frac{272 \text{ kg}}{272 \text{ kg} + 80 \text{ kg}} = 0,77 \text{ (77\%)}$$

1.09 Um kg de água saturada, sob pressão atmosférica constante, é totalmente vaporizado. (i) Calcular o volume antes da vaporização (ii) e o volume depois da vaporização total da água.

Solução. Dados:

pressão atmosférica mantida constante $P = 101,3 \text{ kPa}$

massa do líquido, $m_l = 1 \text{ kg}$

i. Antes da vaporização

Com a pressão atmosférica obtém-se na tabela das propriedades termodinâmicas volume específico do líquido, $v_l = 0,001044 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Usando as relações (ii) do problema 1.01, calcula-se o volume da água (antes) da vaporização:

$$V_l = v_l m_l = 0,001044 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 1 \text{ kg} = 0,001044 \text{ m}^3 \text{ (1,044 l)}$$

ii. Depois da vaporização.

Da tabela será necessário somente o volume específico do vapor na mesma pressão

volume específico do vapor, $v_v = 1,673 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Analogamente

$$V_v = v_v m_v = 1,673 \frac{m^3}{kg} \times 1 kg = 1,673 m^3 (1.673 l)$$

Observar a grande expansão volumétrica à pressão constante em decorrência da vaporização.

1.10 Um tanque de aço de volume igual a $5 m^3$ contém água e vapor sob pressão de 800 kPa e com o título da mistura igual a 0,8. O tanque é resfriado de tal forma que a pressão cai para 400 kPa. Qual o título final da mistura?

Solução. Dados:

Condição inicial

volume total, $V = 5 m^3$

pressão inicial da mistura, $P_i = 800 kPa (0,8 MPa)$

título inicial, $x_i = 0,8$

Condição final

Volume total, $V = 5 m^3$

pressão final mistura, $P_f = 400 kPa (0,4 MPa)$

Para o cálculo do título final pode ser utilizada a equação (iv) do problema 1.01:

$$v = v_l + x(v_v - v_l)$$

O volume específico da mistura (v) é determinado com os dados da condição inicial (verificar que em ambas as condições o volume específico da mistura é o mesmo).

Com a pressão de saturação 0,8 MPa, obtém-se das tabelas de propriedades termodinâmicas da água:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001115 m^3 kg^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,2404 m^3 kg^{-1}$

$$v = 0,001115 \frac{m^3}{kg} + 0,8 \left(0,2404 \frac{m^3}{kg} - 0,001115 \frac{m^3}{kg} \right) = 0,1925 m^3/kg$$

Para a condição final (pressão 0,4 MPa)

volume específico do líquido, $v_l = 0,001084 m^3 kg^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,4625 m^3 kg^{-1}$

então o título da mistura na condição final é:

$$x_f = \frac{v - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0,1925 \frac{m^3}{kg} - 0,001084 \frac{m^3}{kg}}{0,4625 \frac{m^3}{kg} - 0,001084 \frac{m^3}{kg}} = 0,41 (41\%)$$

1.11 No problema anterior 1.10, calcular a massa total.

Solução. Dados

Condição inicial

volume total, $V = 5 \text{ m}^3$

pressão inicial da mistura, $P_i = 800 \text{ kPa}$ ($0,8 \text{ MPa}$)

título inicial, $x_i = 0,8$

Em qualquer das condições, o volume específico da mistura e a massa total não se alteram, portanto, utilizar o volume específico da mistura já calculado.

Utilizando as equações (ii) do problema 1.01, calcula-se a massa total:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{5 \text{ m}^3}{0,1925 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 25,9 \text{ kg}$$

1.12 Em um tanque de aço (rígido) está armazenado vapor superaquecido à pressão de $1,4 \text{ MPa}$ e à temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Se o fluido for resfriado até a temperatura de $160 \text{ }^\circ\text{C}$. (i), Qual será a pressão final? (ii) Qual será o título?

Solução. Dados:

Estado inicial (vapor superaquecido)

pressão inicial, $P_i = 1,4 \text{ MPa}$

temperatura inicial, $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$

Estado final

temperatura inicial, $T_f = 160 \text{ }^\circ\text{C}$

Da tabela de propriedades termodinâmicas da água na condição de vapor superaquecido ($P = 1,4 \text{ MPa}$ e $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$), obtém-se:

volume específico do vapor superaquecido, $v_{vsa} = 0,18228 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Para a pressão inicial de $1,4 \text{ MPa}$, a temperatura de saturação é aproximadamente $195 \text{ }^\circ\text{C}$, logo, à $160 \text{ }^\circ\text{C}$ a condição é de saturação, coexistindo líquido e vapor. Verificar que na condição final o volume específico da mistura é igual a volume específico do vapor superaquecido, pois o volume total é constante.

i. Cálculo da pressão final

Da tabela de vapor saturado para a temperatura de 160 °C, a pressão é encontrada diretamente na tabela de propriedades termodinâmicas da água:

$$P_2 = 0,62 \text{ MPa.}$$

ii. Título no estado final

O volume específico do fluido saturado é mesmo do vapor superaquecido. Para as condições de saturação à temperatura de 160 °C:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001102 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,3071 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Utilizando a equação (iv) do problema 1.01, calcula-se o título:

$$x = \frac{v - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0,18228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001102 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,3071 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001102 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,59 \text{ (59 \%)}$$

1.13 Em um tanque de aço (rígido), está armazenado vapor saturado seco (título igual a 1) sob pressão de 0,6 MPa. Uma fornalha interna aquece o vapor até a pressão de 1,0 MPa. Qual a temperatura final?

Solução. Dados:

Estado inicial (vapor saturado)

título, $x = 1$

pressão inicial, $P_i = 0,6 \text{ MPa}$

Estado final

pressão final, $P_f = 1 \text{ MPa}$

Com o aquecimento a volume constante, o vapor saturado assume a condição de vapor superaquecido. Da tabela de vapor saturado (propriedades termodinâmicas da água), na pressão de 0,6 MPa, obtém-se:

volume específico do vapor saturado ($x = 1$), $v_v = 0,3157 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Como o volume do tanque é fixo, esse também é o volume específico do vapor superaquecido. Na tabela de vapor de superaquecido, procura-se esse valor do volume específico correspondente à pressão de 1,0 MPa e ao localizá-lo lê-se a temperatura conforme dados a seguir:

Para pressão de 1,0 MPa	$T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$v = 0,3066 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
	$T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$v = 0,3541 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Por interpolação linear, para $v_v = 0,3157 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ a temperatura é aproximadamente $419 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.14 Em um tanque de aço (rígido), está armazenado líquido e vapor de água na pressão de 2 MPa. A mistura é aquecida até o ponto crítico. Qual a razão entre o volume de vapor saturado e o volume do líquido saturado antes do aquecimento?

Solução. Dados:

pressão $P = 2 \text{ MPa}$

Na pressão de 2 MPa, (tabelas de propriedades termodinâmicas)

volume específico do líquido, $v_l = 0,001177 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,09963 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Na condição crítica, o volume específico da água (tabelas de propriedades críticas) de substâncias puras é:

$$v_c = 0,0031 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Tomando-se como base cálculo o volume de 1 m^3 (constante), calcula-se a massa total da água:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{1 \text{ m}^3}{0,0031 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 323 \text{ kg}$$

Com equação (iv) do problema 1.01, calcula-se o título da mistura inicial:

$$x = \frac{v - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0,0031 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001177 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,09963 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} - 0,001177 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,02 \text{ (2\%)}$$

Com o título calcula-se as massas do vapor e do líquido iniciais:

$$m_v = x m = 0,02 \times 323 \text{ kg} = 6,46 \text{ kg}$$

$$m_l = m - m_v = 323 \text{ kg} - 6,46 \text{ kg} = 316,54 \text{ kg}$$

Com as massas calcula-se os volumes do vapor e do líquido:

$$V_v = v_v m_v = 0,09963 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 6,46 \text{ kg} = 0,64 \text{ m}^3$$

$$V_l = v_l m_l = 0,001177 \frac{m^3}{kg} \times 316,54 kg = 0,37 m^3$$

Então a razão entre o volume do vapor saturado e do líquido saturado é:

$$Razão = \frac{V_v}{V_l} = \frac{0,64 m^3}{0,37 m^3} = 1,7$$

1.15 Em um tanque de aço (rígido) está armazenado líquido-vapor de água à temperatura de 360 °C. A mistura é aquecida até o ponto crítico. Qual a razão entre o volume de vapor saturado e o volume do líquido saturado antes do aquecimento?

Solução. Dados:

Temperatura, $T = 360$ °C

Das tabelas de propriedades termodinâmicas na condição de vapor saturado:

volume específico do líquido, $v_l = 0,001892 m^3 kg^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,006947 m^3 kg^{-1}$

Na condição crítica, o volume específico é, conforme tabelas de propriedades termodinâmicas da água,

$v_c = 0,0031 m^3 kg^{-1}$

Tomando-se como base cálculo o volume de 1 m³, calcula-se a massa da água total:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{1 m^3}{0,0031 \frac{m^3}{kg}} = 323 kg$$

com equação (iv) do problema 1.01, calcula-se o título da mistura inicial:

$$x = \frac{v - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0,0031 \frac{m^3}{kg} - 0,001892 \frac{m^3}{kg}}{0,006947 \frac{m^3}{kg} - 0,001892 \frac{m^3}{kg}} = 0,24 (24 \%)$$

com o título, calcula-se as massas do vapor e do líquido iniciais:

$$m_v = 0,24 \times 323 kg = 77,5 kg$$

$$m_l = 323 kg - 77,5 kg = 245,5 kg$$

com as massas calcula-se os volumes do vapor e do líquido:

$$V_v = v_v m_v = 0,006947 \frac{m^3}{kg} \times 77,5 kg = 0,54 m^3$$

$$V_l = v_l m_l = 0,001892 \frac{m^3}{kg} \times 245,5 kg = 0,46 m^3$$

Então a razão entre o volume do vapor saturado e do líquido saturado:

$$Razão = \frac{V_v}{V_l} = \frac{0,54 m^3}{0,46 m^3} = 1,2$$

1.16 A água saturada ocupa um volume de $2 m^3$ e mantendo-se a pressão constante em 300 kPa, a água é totalmente vaporizada. Usando as tabelas de propriedades termodinâmicas, calcular o volume final.

Solução. Dados:

volume total inicial $V_i = 2 m^3$

pressão = 300 kPa

das tabelas de propriedades termodinâmicas

volume específico do líquido, $v_l = 0,001073 m^3 kg^{-1}$

volume específico do vapor, $v_v = 0,6058 m^3 kg^{-1}$

Calcula-se inicialmente a massa da água:

$$m_l = \frac{V_i}{v_l} = \frac{2 m^3}{0,001073 m^3/kg} = 1.864 kg$$

uma vez que a água foi totalmente vaporizada à pressão constante, calcula-se o volume final V_f , usando-se o volume específico do vapor.

$$V_f = m_v v_v = 1.864 kg \times 0,6058 \frac{m^3}{kg} = 1.129 m^3$$

1.17 Com os dados do problema anterior 1.16, e considerando o vapor de água com comportamento de um gás ideal, calcular o volume final usando a equação de estado de um gás ideal.

Solução. Dados:

volume total inicial, $V_i = 2 m^3$

pressão = 300 kPa

das tabelas de propriedades termodinâmicas da água

temperatura de saturação para 300 kPa, $T = 133,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($407 K$)

massa molar da água, $M = 18,015 g mol^{-1}$

massa da água (calculada no problema anterior), $m = 1.864 kg$