

## Nota ao leitor

Este capítulo faz parte do livro "Termodinâmica para engenheiros". Trata-se de um projeto em andamento, compartilhado por mim e o Prof. Délson Luiz Módulo do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP Bauru. O texto é baseado em nossa experiência de mais de 20 anos no ensino da disciplina para cursos de engenharia.

Conforme mencionado, o projeto está incompleto. Dessa forma, para dar coerência ao texto, algumas figuras retiradas de livros clássicos de termodinâmica foram provisoriamente utilizadas e o texto adaptado para acompanhá-las. Tão logo nossas figuras fiquem prontas, as substituiremos. Comentários são muito bem-vindos!

Este material é protegido por direitos autorais e destinado exclusivamente para ser utilizado individualmente no curso de PME3344 – Termodinâmica Aplicada, 2º Semestre de 2023, oferecido pela Depto de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP aos alunos de Engenharia Elétrica e de Minas.

### Referências das figuras provisórias

- Çengel, Y. A.; Boles, M. A. Termodinâmica. McGraw-Hill, 5. ed., 2006.
- Moran e Shapiro - Princípios de Termodinâmica para Engenharia, 7a Ed., LTC, 2013.
- Klein, S., & Nellis, G. (2011). Thermodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511994883
- Sonntag, Borgnakke - Fundamentos da Termodinâmica, 8a Ed., Edgard Blucher, 2013.

Prof. Maurício Silva Ferreira, São Paulo 21 de março de 2023.

# Termodinâmica para Engenheiros

1. Introdução e Conceitos Fundamentais
  - 1.1 Energia e suas Transformações
  - 1.2 Termodinâmica e a Geração de Energia Elétrica no Brasil
  - 1.3 Sistemas Abertos e Fechados
    - Sistema Fechado
    - Volume de Controle
  - 1.4 Estado, Propriedades e Processo
    - Ponto de vista macroscópico e microscópico
    - Propriedades Intensivas e Extensivas
    - Fase e Substância Pura
    - Equilíbrio e Processo de Quase-equilíbrio
    - Postulado de Estado
  - 1.5 Dimensões e Unidades
  - 1.6 Medindo Propriedades
    - Volume Específico
    - Pressão
    - Temperatura
  - 1.7 Metodologia para Solução de Problemas Termodinâmicos
    - Considerações sobre a Seleção do Sistema
  - 1.8 Ferramentas da Termodinâmica
  - 1.9 Componentes Básicos de Sistemas Termofluidos
    - Tubo
    - Bomba
    - Compressor
    - Turbina Hidráulica
    - Turbina a Vapor
    - Trocador de Calor
    - Caldeira
    - Válvula

Referências

Problema

# Capítulo 1 – Introdução e Conceitos Fundamentais

## Objetivos

Os objetivos gerais deste capítulo introdutório são:

- Apresentar o escopo e métodos do livro Termodinâmica para Engenheiros;
- Explicar definições e conceitos básicos que serão utilizados ao longo do texto;
- Introduzir uma metodologia intuitiva para solução de problemas termodinâmicos.

Ao término deste capítulo você será capaz de:

- Explicar os conceitos de sistema, volume de controle, fronteira e vizinhança;
- Explicar os conceitos de propriedade, estado, processo, ciclo, equilíbrio e processo de quase-equilíbrio;
- Identificar propriedades intensivas e extensivas, citando exemplos;
- Explicar os conceitos de fase e substância pura, citando exemplos e contraexemplos;
- Descrever os passos da metodologia de análise de problemas termodinâmicos;
- Listar as cinco ferramentas de análise termodinâmica e os três modelos de substância para cálculo de propriedades;
- Explicar a finalidade de bombas, compressores, turbinas hidráulicas e a vapor, trocadores de calor, caldeiras e válvulas em sistemas termofluidos;
- Explicar como pressão e volume específico se comportam nesses equipamentos.

## 1. Introdução e Conceitos Fundamentais

A palavra "termodinâmica" tem origem na combinação de duas palavras gregas, *therme*, que significa calor, e *dynamis*, que significa potência ou força, poderíamos entendê-la como a "potência ou força do calor". Sob uma visão contemporânea, termodinâmica é a ciência da energia e da entropia – seu objeto de estudo é a energia e suas transformações. Como o termo entropia pode ser uma novidade, é mais oportuno, neste momento, nos atermos à segunda parte da definição. A termodinâmica trata de um dos temas mais relevantes da atualidade: energia. Conseqüentemente, é usual nos depararmos com notícias na mídia, versando, em geral, sobre os impactos ambientais de tecnologias de geração de energia e sobre o desenvolvimento e implantação de tecnologias baseadas em fontes renováveis, como energia solar e eólica. Ao longo de nossa jornada, visitaremos estes e outros temas relacionados, através de exemplos e problemas, e serão fornecidos os subsídios científicos necessários para

a análise e compreensão das vantagens e limitações de cada tecnologia, sempre com uma abordagem de engenharia. Nesta introdução, ao invés de apresentarmos uma visão geral e superficial das aplicações da Termodinâmica, iremos direto ao ponto, lançando as pedras fundamentais, introduzindo conceitos, metodologia e ferramentas básicas a serem utilizados na análise de situações e problemas termodinâmicos.

### **1.1 Energia e suas Transformações**

A termodinâmica é a ciência que se ocupa de estudar a energia e suas transformações, sendo assim, melhor começarmos adquirindo uma visão geral acerca das tecnologias para conversão energética atualmente disponíveis. Como engenheiros, devemos entender que aspectos técnicos e não técnicos que devem ser considerados na seleção da tecnologia para uma dada aplicação:

- 1) Viabilidade técnica – relacionada à possibilidade de implantação de uma tecnologia na escala desejada e com base na disponibilidade de fontes energéticas locais;
- 2) Viabilidade econômica – relacionada ao custo de cada tecnologia, sua manutenção e transporte da energia convertida. Por exemplo, parques eólicos costumam ficar afastados de centros consumidores e a construção de linhas de transmissão pode ser custosa;
- 3) Impacto social – relacionado à interferência que a implantação da tecnologia pode provocar na comunidade, direta ou indiretamente. A implantação de uma usina hidrelétrica, por exemplo, com a formação de seu reservatório pode obrigar uma população a ter que se deslocar, deixando suas casas, ou submergindo áreas produtivas.
- 4) Impacto ambiental – por último, mas nem por isso menos importante, é a questão do impacto no meio ambiente, seja por poluição atmosférica, hídrica, do solo, térmica, sonora e visual, ou, também, por depleção de recursos naturais.

Neste início, focaremos nos aspectos técnicos e econômicos, o aspecto social foje do escopo do livro, enquanto a questão ecológica será abordada ao longo de todo o texto. Do ponto de vista técnico, há dois pontos que já temos condições de discutir, a eficiência energética das tecnologias de conversão e características das tecnologias de armazenamento de energia:

- 1) Eficiência da conversão – definida como a razão entre a energia disponível na saída do conversor, isto é, a energia convertida, sobre a energia fornecida em sua entrada; sendo sempre um número inferior a 100 %, que quanto maior melhor;

- 2) Armazenamento de energia convertida – particularmente importante para implantação de sistemas baseados em energia solar e eólica, por sua intermitência, ou para veículos automotores. Tão importante quanto a quantidade de energia que pode ser armazenada, é a velocidade com que esta energia pode ser entregue para consumo.

A Fig. 1.1 nos apresenta as principais tecnologias de conversão de energia disponíveis (algumas delas também funcionam como tecnologias de armazenamento). Cada círculo representa uma fonte de energia diferente e cada seta está acompanhada de um ícone representativo do dispositivo responsável pela conversão energética no sentido indicado. Uma linha escura indica uma tecnologia bastante comum e aplicada em larga escala, em termos de quantidade de energia convertida e com viabilidade econômica. Uma linha clara, por sua vez, refere-se a uma tecnologia viável economicamente, mas ainda não amplamente empregada mundialmente. Por fim, a linha pontilhada diz respeito a tecnologias muito caras ou com limitações tecnológicas para utilização em larga escala. Esta classificação pode ser subjetiva e rapidamente ficar desatualizada, mas o objetivo não é ser uma classificação exaustiva, apenas uma apresentação do repertório tecnológico disponível. Adicionalmente, vale destacar que vamos usar o termo energia e formas de energia sem ainda termos tratado do tema no livro, mas os conhecimentos adquiridos no ensino médio são suficientes para seguirmos em frente.

Na base da figura estão as energias elétrica e mecânica, justamente por estarem presentes no nosso cotidiano. Para conversão de energia elétrica em mecânica, utilizamos um motor elétrico e a volta pode ser executada através de um gerador elétrico. Energia hidráulica e eólica, que são formas de energia mecânica, podem ser facilmente convertidas em energia mecânica rotacional empregando-se turbinas hidráulicas e eólicas, respectivamente. A energia química, por sua vez, pode ser convertida em eletricidade por intermédio de pilhas e células a combustível, sendo a volta executada por baterias recarregáveis ou pela eletrólise da água para produção de hidrogênio. A energia solar pode ser convertida em elétrica utilizando-se células fotovoltaicas, que é uma tecnologia cada vez mais presente em nosso país, sendo bastante utilizada em residências. Um aquecedor solar é utilizado para converter a energia oriunda do Sol em energia térmica, armazenando-a em reservatórios de água quente para uso para banho.

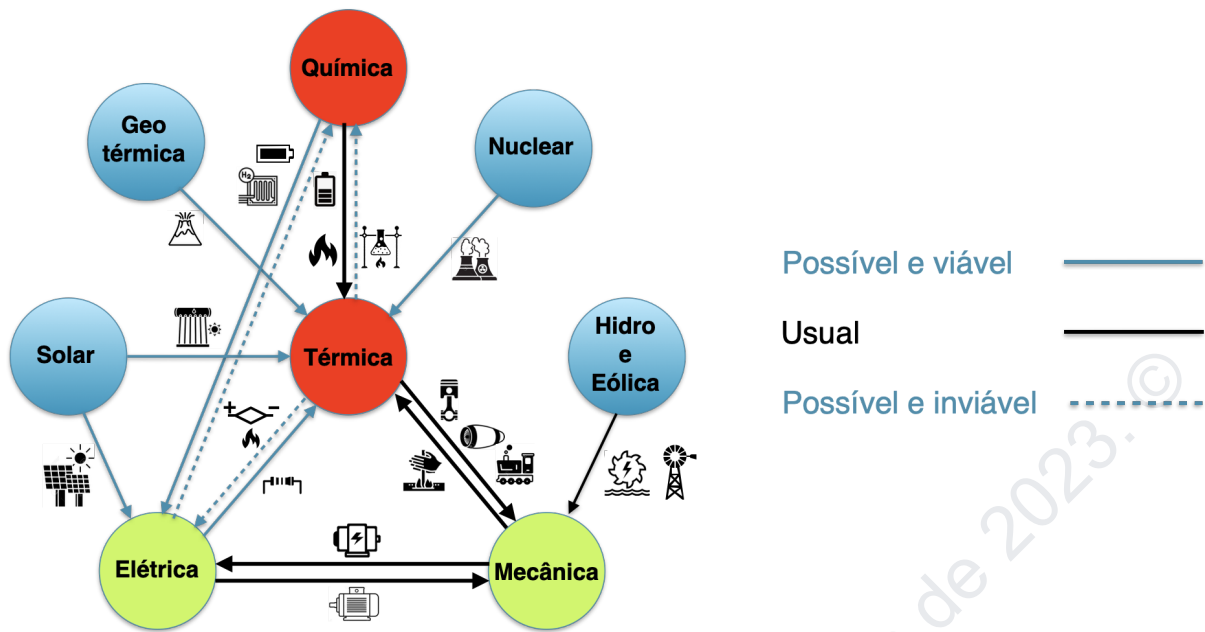


Fig. 1.1 – Principais tecnologias disponíveis para conversão de energia. Adaptado de Eastop; Croft, 1996.

Outras fontes de energia térmica abundantes são a nuclear, química, armazenada nos combustíveis, e a geotérmica (proveniente das altas temperaturas no interior da Terra). Existe ainda o *calor residual*, que nada mais é do que energia térmica proveniente de processos industriais, perdida para o ambiente por meio de gases aquecidos resultantes da combustão ou fluidos utilizados para resfriamento de algum equipamento, por exemplo. Mas como podemos converter a energia térmica em energia elétrica? A conversão direta é possível, através de *termopilhas*, que são dispositivos que se valem do *efeito Seebeck* – uma diferença de temperatura entre dois pólos da termopilha produz uma diferença de potencial elétrico. Entretanto, a eficiência da conversão é baixa e o custo elevado, sendo impraticável a sua utilização em larga escala. O caminho mais fácil consiste em primeiro converter a energia térmica em mecânica, para depois convertê-la em elétrica usando um gerador. Turbinas a gás, turbinas a vapor e motores de combustão interna são exemplos de máquinas que convertem energia térmica em mecânica (ver item 1.9 sobre explicação do funcionamento de cada equipamento). Notemos que alguns caminhos inversos são facilmente realizáveis: para converter energia mecânica em térmica basta haver atrito entre duas superfícies móveis, e para converter elétrica em mecânica é só utilizarmos um resistor elétrico. Por outro lado, para convertermos energia térmica em química são necessárias reações químicas endotérmicas, isto é, reações que absorvem energia. A utilização de hidrogênio como combustível ou fonte de energia para células a combustível vem crescendo rapidamente, se revelando uma

alternativa atraente para armazenamento de energia. O hidrogênio pode de ser obtido de diversas fontes e um código de cores é utilizado para diferenciação. O "hidrogênio verde" (H<sub>2</sub>V) é produzido a partir da eletrólise da água utilizando energias limpas e renováveis para a sua produção, sem a emissão de gás carbônico.

Assim, no centro dos processos de conversão de energia está a energia térmica. Devemos enxergá-la como um passo intermediário para conversão em energia elétrica, passando primeiro pela conversão em mecânica. Consequentemente, o foco do livro é na análise dos processos de conversão de energia térmica em mecânica.

Por que este interesse em convertemos outras formas de energia em elétrica? A resposta é muito simples, facilmente podemos convertê-la em térmica ou mecânica, e usá-la para aquecimento e refrigeração, ou para tocar o nosso cotidiano contemporâneo, repleto de celulares, computadores, dispositivos eletrônicos e eletrodomésticos.

Por fim, apenas uma questão semântica, é comum a utilização da expressão geração de energia, mas o que de fato acontece é a conversão de uma forma de energia em outra desejada.

A Tabela 1.1 apresenta valores de eficiência energética de alguns tecnologias de conversão em ordem decrescente. O importante aqui não é memorizarmos os valores, mas apenas termos um noção da ordem de grandeza relativa entre cada tecnologia e considerando qual energia está sendo convertida em qual.

Tabela 1.1 – Eficiência energética de algumas tecnologias de conversão de energia.

<b>Origem</b>	<b>Conversão de energia</b>	<b>Eficiência típica / %</b>	<b>Eficiência / %</b>
Aquecedor elétrico	Elétrica → Térmica	100	100
Gerador elétrico	Mecânica → Elétrica	95	90 a 99
Usina hidroelétrica	Mecânica → Elétrica	85	70 a 90
Motor elétrico	Elétrica → Mecânica	depende do tamanho	65 a 95
Célula a combustível	Química → Elétrica	depende do tipo	40 a 60
Turbinas a gás e a vapor combinadas	Química → Mecânica	50	40 a 60

Motor de combustão interna ciclo Diesel	Química → Mecânica	40 <sup>+</sup>	35 a 48 <sup>++</sup>
Turbina a vapor	Química → Mecânica	35	30 a 40
Turbina eólica	Mecânica → Mecânica	40	30 a 50
Motor de combustão interna: ciclo Otto	Química → Mecânica	30	25 a 35
Turbina a gás	Química → Mecânica	30	20 a 35
Célula fotovoltaica*	Solar → Elétrica	15	10 a 30
Planta geotérmica	Geotérmica → Mecânica	12	10 a 21

+ valor típico em veículos de passeio

++valor máximo válido para grandes motores diesel navais

\*considerando apenas modelos comerciais

Conforme destacado anteriormente, fontes energéticas intermitentes, veículos automotores, notebooks e celulares são exemplos de situações em que há a necessidade de se armazenar energia. Existem inúmeras tecnologias para acúmulo de energia, algumas muito familiares, como as pilhas, baterias e os tanques de combustível de automóveis, outras muito comuns na indústria, como o armazenamento através de ar comprimido, acumuladores hidráulicos e volantes de inércia, e, ainda, tecnologias em desenvolvimento, como o chamado armazenamento gravitacional, através da elevação de pesados blocos. Independente do tipo, dois aspectos precisam ser considerados para seleção: a quantidade de energia armazenada e a velocidade com a energia pode ser entregue para o consumidor. Uma ferramenta ideal para comparação do desempenho de tecnologias diferentes de armazenamento é o gráfico de Ragone. Na ordenada temos a energia armazenada e na abscissa a potência específica, ambas as grandezas divididas pela massa do acumulador energético. Como ambos os eixos são logarítmicos, podemos comparar o desempenho de formas de armazenamento baseadas em princípios completamente diferentes. Células a combustível têm alta densidade de energia, mas não conseguem entregá-la rapidamente. Inversamente, super capacitores armazenam uma pequena quantidade de energia, mas são capazes de entregá-la rapidamente. É interessante



compararmos a utilização de combustíveis, como gasolina e etanol, e armazenamento via baterias de íons de lítio em automóveis. Os carros elétricos e híbridos estão cada vez mais presentes em nosso cotidiano. Há pouco atrás tinham baixa autonomia comparados aos carros movidos a motores de combustão interna. Como pode ver na Fig. 1.2, a evolução das baterias íons de lítio tem propiciado autonomia similar.

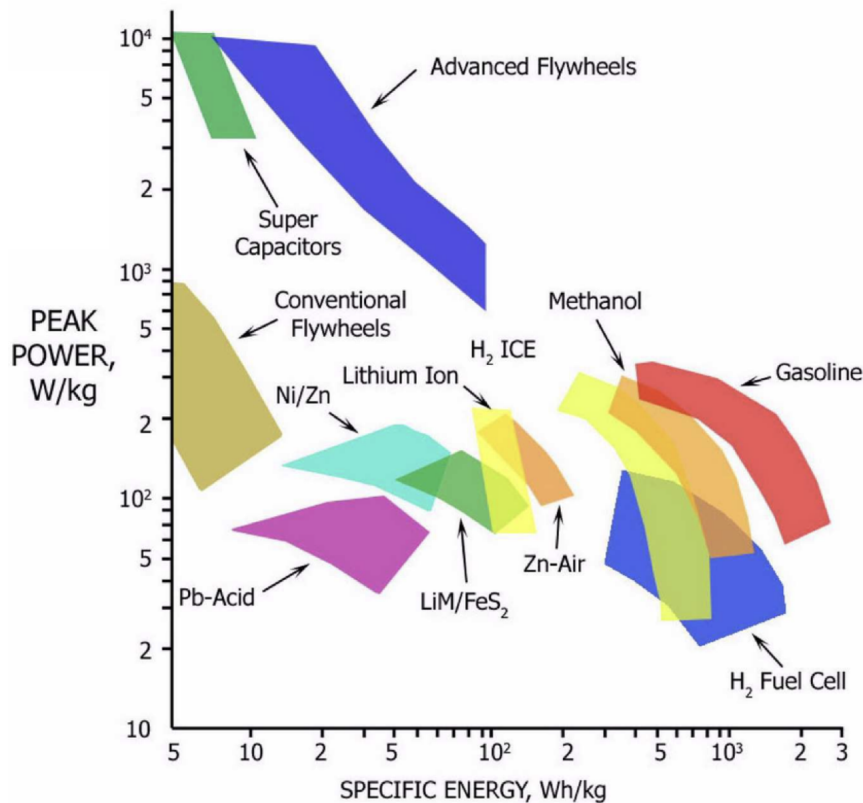


Fig. 1.2 – Comparação entre tecnologias de armazenamento de energia: densidade de potência versus densidade de energia. Adaptado de Levi; Foschi (2013).

Outra dimensão bastante importante na seleção da tecnologia de conversão é o custo. Na Tab. 1.2 são apresentados os custos ("overnight cost") de geração de energia elétrica. O "overnight cost" é o custo de implantação de uma tecnologia sem que nenhum juro seja incorrido durante a construção, como se a projeto fosse concluído da noite para o dia. A tabela também nos permite visualizar as faixas de potências geradas.

Tabela 1.2 – Custo de geração de energia elétrica. Adaptado de International Energy Agency. Projected costs of generating electricity, 2020.

Tecnologia	Custo / (US\$ / kWe)	Potência líquida / kWe
------------	----------------------	------------------------


\* Nota: o índice *e* indica potência elétrica

Por fim, recomendamos que o leitor retorne à este item após ter estudado os capítulos sobre ciclos de potência, Caps. # e #, dessa forma, será possível um nível maior de compreensão e aproveitamento das informações aqui apresentadas.

## 1.2 Termodinâmica e a Geração de Energia Elétrica no Brasil

De onde vem a energia elétrica no Brasil? Bem, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2022) a maior parte, por volta de 57 %, tem origem nas usinas hidrelétricas, 19 % provem de energia eólica e solar, e uma parte menor, mas não desprezível, maior que 15 %, vem de usinas termelétricas. Ou seja, pelo menos 76 % (57 + 19 %) de nossa matriz elétrica é oriunda de fontes renováveis. Entende-se por *matriz elétrica* como sendo a distribuição das fontes energéticas disponíveis utilizadas apenas para geração de energia elétrica em uma região. Já o termo *matriz energética* se refere à distribuição das fontes utilizadas no setor de transportes e agropecuária, para cocção e também geração de energia elétrica. Nossa matriz energética é composta por aproximadamente 45 % de fontes renováveis.

Em períodos de seca ou estiagem, aumenta a participação da energia elétrica gerada pelas termelétricas brasileiras, o que se reflete em um aumento do valor das tarifas de eletricidade. A termodinâmica fornece os meios necessários para compreendermos o funcionamento e analisarmos o desempenho dessas instalações. De fato, seremos capazes de fazê-lo com os conhecimentos e habilidades apresentados ao longo deste livro. Mas, para começar, é suficiente entendermos, em linhas gerais, como funciona uma usina termelétrica.

Uma usina ou central termelétrica, Fig. 1.3, utiliza-se da energia liberada pela queima de um combustível de origem fóssil (carvão, óleo combustível ou gás natural), renovável (biomassa) ou pela reação de fissão nuclear (urânio) em usinas nucleares para aquecer água em uma caldeira e produzir vapor d'água. O vapor produzido, a alta temperatura e pressão (3), expande em uma turbina a vapor, fazendo girar seu rotor e através de seu eixo acionar um gerador elétrico. Uma mistura líquido-vapor a baixa temperatura e pressão deixa a turbina (4) e é enviada a um condensador. Neste equipamento, o vapor transfere energia para uma outra

corrente de água a menor temperatura (água de resfriamento), deixando o como líquido (1). Grandes quantidades de água de resfriamento são necessárias, por isso essas centrais são posicionadas próximas a rios ou mares, como as Usinas Nucleares de Angra I e II, em Angra dos Reis - RJ. Note que as duas correntes de água não se misturam, a corrente de resfriamento retorna à sua origem e a outra permanece em circuito fechado. O líquido na saída do condensador encontra-se em baixa pressão e uma bomba é utilizada para aumentá-la e promover o retorno desta corrente de água para a caldeira (2), fechando assim o chamado ciclo de potência a vapor (para explicação do que é uma caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba ver item 1.9). Em resumo, o ciclo é composto por 4 equipamentos básicos, uma caldeira, uma turbina a vapor, um trocador de calor chamado condensador e uma bomba. Em primeira aproximação, existem dois níveis de pressão, o alto, desde o líquido na saída bomba até o vapor na entrada da turbina, e o baixo, da saída da turbina, até a entrada da bomba.

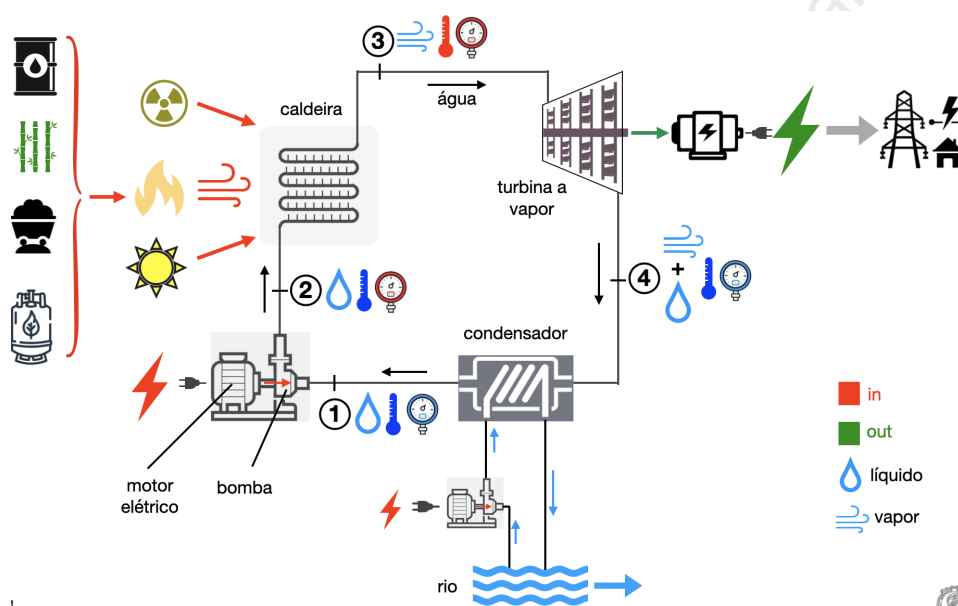


Figura 1.3 – Ilustração de um ciclo de potência a vapor: fontes energéticas comuns, gerador elétrico e sistema de resfriamento, destacando equipamentos, condição da matéria, nível de pressão e temperatura em cada ponto. Legenda: P = pressão, T = temperatura, ↑ = indica valor elevado, ↓valor baixo em termos relativos ao ciclo.

Neste início, consideramos apenas o ciclo de potência (Fig. 1.4), que é a parte principal de uma planta termelétrica. Existem outros equipamentos e módulos na planta, os quais serão apresentados no Capítulo # – Ciclos de Potência a Vapor. Ao longo desta introdução,

usaremos o ciclo de potência a vapor como exemplo, ilustrando a aplicação dos conceitos, metodologia e ferramentas básicas empregados na análise de problemas termodinâmicos.

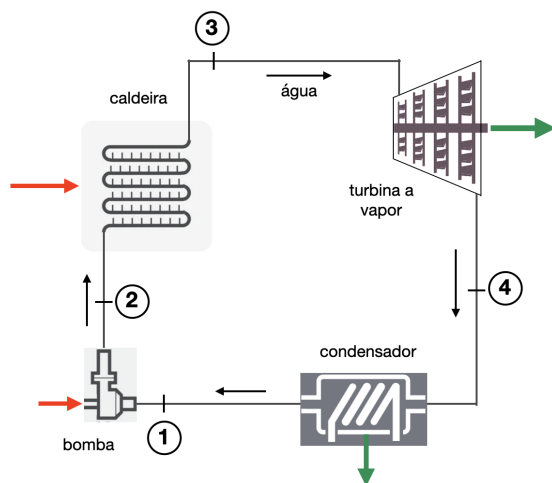


Figura 1.4 – Ilustração de um ciclo de potência a vapor, destacando os equipamentos e as entradas e saídas de energias através das setas.

Na discussão anterior, empregamos palavras-chaves como energia, vapor, pressão e temperatura sem nos ocuparmos em defini-los ou explicá-los, o que faremos em momento oportuno. Por enquanto, a visão comum sobre esses conceitos, construída com nossa experiência cotidiana, é suficiente. Da mesma forma, apresentamos alguns equipamentos – caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba, sem maiores explicações, mas começaremos a detalhar sua finalidade e funcionamento no item 1.9.

### 1.3 Sistemas Aberto e Fechado

Em termodinâmica, o objeto de estudo é chamado de *sistema*, definido como: uma quantidade de matéria ou região no espaço selecionada para análise. Tudo o que é externo ao sistema é denominado *vizinhança* e a superfície que separa o sistema de sua vizinhança é chamada de *fronteira*. A fronteira de um sistema termodinâmico pode coincidir com uma superfície de contorno de um equipamento ou objeto, ou ser uma superfície imaginária posicionada de forma conveniente para análise. A fronteira pode ser *fixa* ou *móvel*, acompanhando, por exemplo, a movimentação de alguma superfície móvel do dispositivo. A fronteira, em se tratando de uma superfície, não tem espessura e, portanto, não ocupa volume ou possui massa.

Trabalharemos com dois tipos de sistemas: os *sistemas fechados*, também chamados de massas de controle ou, simplesmente, sistemas, e os *sistemas abertos*, comumente chamados de *volumes de controle*. Empregaremos os termos normalmente utilizados: sistema para designar um sistema fechado, e volume de controle para um sistema aberto.

### **Sistema Fechado**

Define-se sistema fechado como: uma quantidade fixa de matéria selecionada para análise. Implícita nesta definição está a ideia de que massa não cruza a fronteira, isto é, não há entrada ou saída de matéria do sistema fechado – são sempre os mesmos átomos contidos no sistema. Vejamos alguns exemplos ilustrativos. Na Fig. 1.5a está representado um conjunto cilindro-pistão contendo um gás. Desejamos responder à pergunta: como varia o volume ocupado pelo gás ao aplicarmos a força  $F$  indicada na figura? A própria questão sugere escolhermos o gás como sistema; a fronteira é representada na figura pela linha pontilhada. Admitindo-se que não há nenhum vazamento entre o contato cilindro-pistão, nenhuma massa cruza a fronteira, temos, então, uma quantidade fixa de matéria, e, portanto, um sistema fechado. A fronteira é móvel, de modo a acompanhar a variação de volume do gás promovida pela ação da força  $F$ , externa ao sistema. A vizinhança, no caso, é composta pelo cilindro, o pistão – que por sua vez é pressionado pela atmosfera, e a Terra – sobre o gás age a força peso. Consideremos agora a Fig. 1.5b, em que é apresentada a mesma situação do exemplo anterior, porém com a fronteira posicionada em outra posição. Nesse caso, quando fôssemos realizar a análise, deveríamos considerar que agora o sistema é composto pelo gás e pelo pistão; a vizinhança, por sua vez, pelo cilindro, atmosfera e a Terra. Esse caso serve para ilustrar a importância de se definir claramente o sistema, evitando-se ambiguidades na solução do problema termodinâmico. Em outro exemplo, Fig. 1.5c, o gás é aquecido pela chama posicionada abaixo do conjunto e experimenta um aumento de volume. Podemos estar interessados em determinar a temperatura final do gás, o que sugere, novamente, escolhê-lo como sistema. Na situação proposta, claramente identificamos que energia cruza a fronteira, da chama para o sistema, atravessando, primeiramente, a parede do cilindro. Igualmente aos exemplos anteriores, temos um sistema fechado, sua definição estabelece apenas que massa não pode atravessar a fronteira, não estabelecendo nenhuma restrição à entrada ou saída de energia. O tipo especial de sistema em que nem massa e nem energia cruzam a fronteira é chamado de *sistema isolado*. Note que, como ainda não falamos sobre temperatura e energia, usamos, por ora, esses termos sem nenhuma formalidade ou maiores explicações. No último exemplo, Fig. 1.5d, o recipiente fechado contém, inicialmente, uma mistura ar-combustível

(hidrocarboneto), selecionada como sistema. A vela, externa ao sistema, dispara uma faísca que provoca o início da reação de combustão. Ao término da reação, o interior do recipiente contém os produtos da combustão ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ , para citar alguns). Também, nesse exemplo, trata-se de um sistema fechado. Apesar da mudança na composição química e considerando-se que não há vazamentos, temos a mesma massa no início e ao final – veja que os mesmos átomos continuam no sistema, apenas combinados de forma diferente.

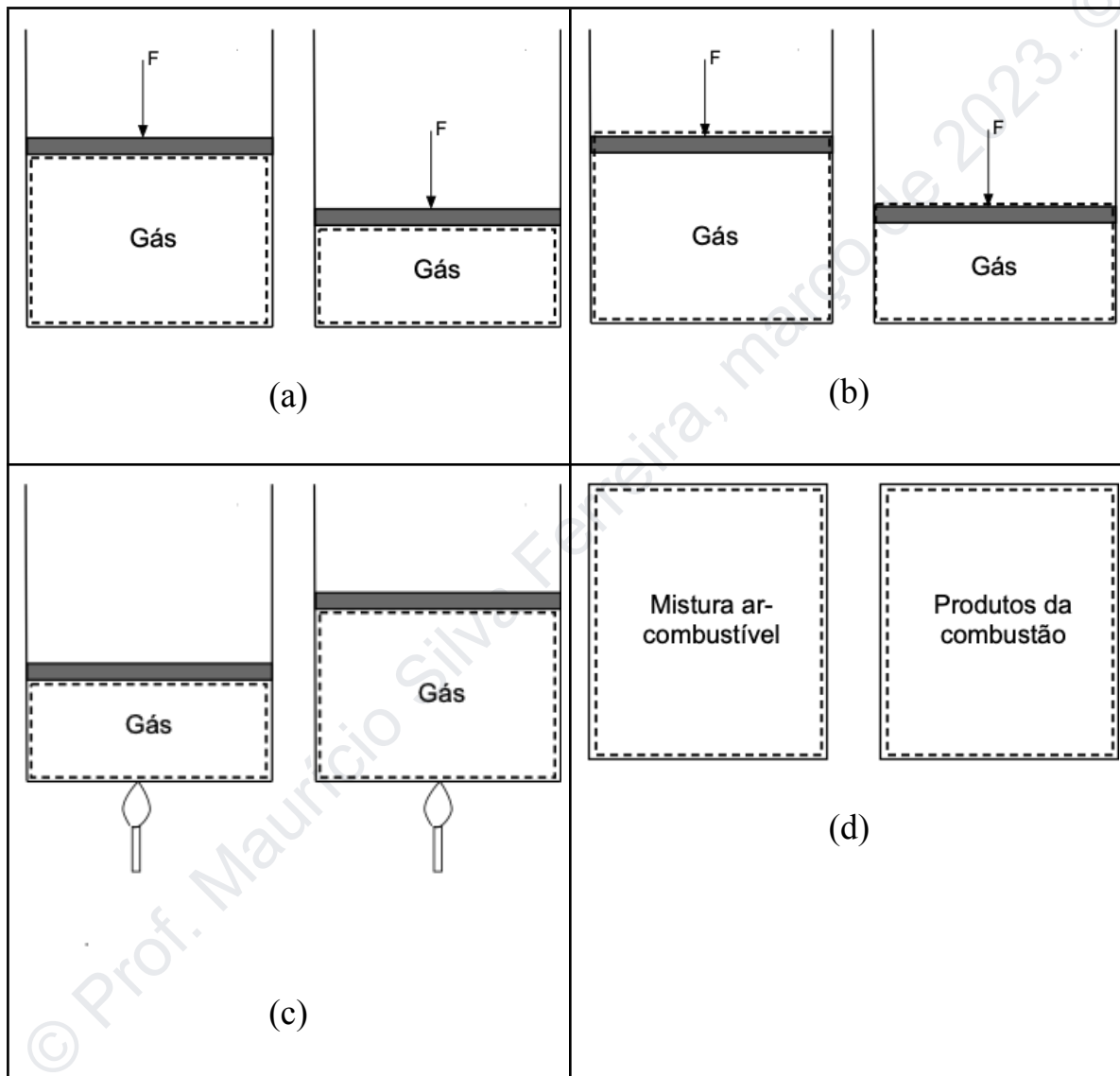


Figura 1.5 – Exemplos ilustrando o conceito de sistema fechado: (a) Sistema com fronteira móvel, acompanhando a geometria do conjunto cilindro-pistão, (b) Mesma situação anterior, com sistema diferente, (c) Sistema com energia cruzando a fronteira e (d) Sistema com fronteira fixa e composição química variável.

## Volume de Controle

Um sistema aberto, comumente chamado de volume de controle, é definido como: uma região no espaço selecionada para análise. A definição não estabelece qualquer restrição ao fluxo de massa através da fronteira, pelo contrário, volumes de controles são amplamente utilizados em engenharia na análise de dispositivos em que há entrada e saída de massa, como: bombas, compressores, turbinas e trocadores de calor, por exemplo.

A título de ilustração, consideremos novamente o ciclo de potência representado na Fig. 1.4, ele nos ajudará a praticar os conceitos de sistema e volume de controle. Na solução de ciclos termodinâmicos, analisamos em sequência cada um dos equipamentos que compõem o ciclo. Trabalha-se, portanto, com quatro volumes de controle diferentes, com cada fronteira envolvendo um único componente. Por exemplo, considerando-se uma fronteira em torno da turbina, Fig. 1.6a, temos um volume de controle com uma única entrada (3) e uma única saída de massa (4). Observe que o eixo da turbina cruza a fronteira e por seu intermédio há uma interação energética com a vizinhança, conforme veremos. Um dos objetivos desta análise é calcular o valor desta interação. Na Fig. 1.6b, a fronteira agora envolve o condensador, temos novamente um volume de controle, mas com duas entradas, (4) para a água do ciclo e (I) para a água de resfriamento, e duas saídas, (1) para a água do ciclo e (II) para a água de resfriamento. De forma similar, poderíamos considerar volumes de controle para os demais equipamentos. Por outro lado, para uma fronteira em torno do ciclo como um todo, Fig. 1.4, teríamos um sistema fechado. Veja que agora nenhuma massa cruza a fronteira, toda a movimentação de fluido é interna ao sistema, e, portanto, não precisamos nos preocupar com ela!

Cabe, neste instante, uma pequena interrupção na sequência lógica para definirmos o que é um fluido. Um *fluido* é uma substância que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Em outras palavras, um fluido submetido a uma força tangencial escoar no sentido desta força. É o que acontece com líquidos, gases ou uma mistura de ambos. Sólidos se deformam quando submetidos a tensões de cisalhamento, mas enquanto no regime elástico, a deformação é limitada.

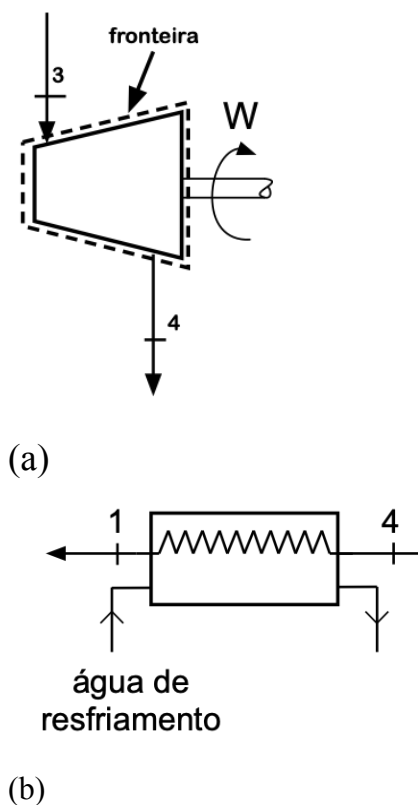


Figura 1.6 – Exemplos ilustrando o conceito de volume de controle: (a) fronteira que engloba a turbina e (b) fronteira que engloba o condensador.

#### 1.4 Estado, Propriedades e Processo

No exemplo do ciclo de potência, Fig. 1.4, enumeramos quatro seções entre os equipamentos que compõem o ciclo. O fluido em cada seção se encontrava em uma condição diferente, na entrada e saída da bomba era um líquido, na entrada da turbina um vapor e na saída da turbina uma mistura líquido-vapor, podendo, ainda estar mais ou menos “denso”, ou mais “quente” ou “frio”. Esta condição da matéria é chamada em termodinâmica de *estado*. Um estado é caracterizado por uma coleção de quantidades macroscópicas observáveis, chamadas *propriedades termodinâmicas*. Como exemplo de propriedades, podemos citar massa, volume, temperatura, pressão e energia. As propriedades refletem, em nível macroscópico, o que acontece em nível microscópico. Por exemplo, quando falamos de espaçamento entre moléculas, estamos falando, no domínio macroscópico, da razão entre massa por volume ocupado, ou, quando falamos de agitação molecular, estamos falando em nível macroscópico de temperatura. Caso qualquer propriedade da matéria varie, houve uma mudança de estado e



dizemos que ocorreu um *processo*. Chamamos de *ciclo* termodinâmico uma sequência de processos que começa e termina no mesmo estado. Em síntese, temos:

*Estado termodinâmico* – ou simplesmente estado, é a condição da matéria caracterizada por suas propriedades termodinâmicas;

*Propriedade termodinâmica* – ou simplesmente propriedade, é uma característica macroscópica da matéria;

*Processo* – se qualquer propriedade da matéria variar, houve uma mudança de estado e dizemos que ocorreu um processo.

No exemplo do ciclo de potência, Fig. 1.4, existem quatro estados diferentes. O fluido passa por diversos processos conforme atravessa a caldeira, turbina, condensador e bomba, descrevendo um ciclo termodinâmico, daí o nome ciclo de potência. É comum que alguma propriedade permaneça constante ao longo de um processo, na passagem pela caldeira e condensador, por exemplo, frequentemente é possível considerar que a pressão permanece constante; nesse caso, dizemos que o processo é *isobárico*. Na Tabela 1.3 são apresentadas as denominações utilizadas para descrever processos a propriedades constantes.

Tabela 1.3 – Adjetivos usados para descrever processos a propriedades constantes

<b>Processo a ... constante</b>	<b>Adjetivo</b>
Pressão	Isobárico
Temperatura	Isotérmico
Volume	Isocórico ou isovolumétrico
Entalpia	Isentálpico
Entropia	Isentrópico

Como diferenciar uma grandeza qualquer de uma propriedade termodinâmica? Bem, uma grandeza é uma propriedade se sua variação entre dois estados for independente do processo, ou, por outro lado, se o valor de uma determinada quantidade depende dos detalhes do processo, e não apenas dos estados finais, ela não é uma propriedade. Por exemplo, digamos que nós temos duas cidades, chamadas de A e B. A cidade A está a 1.000 m de altura, enquanto a cidade B está ao nível do mar (0 m). Considere que existem duas estradas que ligam as duas cidades, uma tem 100 km de distância e a outra 75 km. Há duas grandezas em

questão, para as quais desejamos determinar se são propriedades ou não: altura e distância. De acordo com a definição anterior, altura é uma propriedade de cidade, faz sentido falar em diferença (variação) de altura entre as duas cidades e isso não tem nada a ver com a estrada escolhida para ir de A a B. Por outro lado, distância não é uma propriedade de cidade, pois esta depende, literalmente, do caminho escolhido; veja que não faz sentido falar em variação de distância entre A e B. Voltaremos a tratar desse assunto quando falarmos de calor e trabalho.

### **Ponto de vista macroscópico e microscópico**

Do ponto de vista microscópico, qualquer substância, seja ela um sólido, líquido ou gás, é constituída por um elevado número de moléculas, com seus núcleos atômicos e elétrons, com maior ou menor espaçamento e agitação. Em um vapor, por exemplo, as moléculas estão mais afastadas entre si do que em um líquido. Considerando dois recipientes com um litro de água líquida, se o espaçamento ou agitação molecular for diferente, teremos um estado diferente entre ambos. Para caracterizar este estado do ponto de vista microscópico, é necessário conhecer a posição, a velocidade e diversas outras variáveis que caracterizam o estado interno de cada molécula. Considerando que um litro de água líquida contém aproximadamente  $6 \times 10^{24}$  moléculas, constata-se que é inviável seguir por esse caminho. De fato, pouquíssimas dessas grandezas em nível microscópico impactam no comportamento macroscópico da substância. A prática revela que investigar o comportamento macroscópico de um sistema, isto é, analisar como variam pressão, temperatura e demais propriedades termodinâmicas, é suficiente para a maioria das aplicações em engenharia. A singeleza desta abordagem apoia-se no fato de que as medições macroscópicas são extremamente lentas e grosseiras quando comparadas com as respectivas escala de tempo e espaço em nível atômico (Callen, 1985).

Em *Termodinâmica Clássica*, assunto deste livro, consideramos o ponto de vista macroscópico, porém utilizaremos, ocasionalmente, o ponto de vista microscópico para nos apoiar em algumas análises, objetivando aumentar nossa compreensão do fenômeno. A ciência que se ocupa de estabelecer uma ligação quantitativa entre propriedades microscópicas e o comportamento macroscópico de substâncias é chamada de *Termodinâmica Estatística*. Como o próprio nome sugere, esta disciplina se vale de ferramentas estatísticas para analisar o comportamento de um grupo elevado de partículas. Notemos, por fim, que a Termodinâmica Clássica não explica porque a matéria se comporta de uma determinada forma, permitindo apenas a predição quantitativa de seu comportamento.

## Propriedades Extensivas e Intensivas

Podemos classificar as propriedades termodinâmicas em extensivas e intensivas. Os valores das propriedades extensivas dependem da quantidade de substância no sistema ou extensão do sistema, quanto maior o sistema, maior o valor da propriedade. Por outro lado, propriedades intensivas são independentes da quantidade de substância, dependendo do estado termodinâmico. A melhor maneira de se identificar o tipo é entendendo que propriedades extensivas são aditivas. Assim, considerando-se o sistema ilustrado na Fig. 1.7 e subdividido em duas partes iguais e uniformes, a massa e o volume do sistema são iguais à soma das massas e volumes das partes. Portanto, massa ( $m$ ) e volume ( $\nabla$ ) são propriedades extensivas. Por outro lado, temperatura e pressão do sistema não são iguais à soma das temperaturas e pressões das partes. Sendo assim, temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ) são propriedades intensivas. A razão entre a massa e volume, chamada massa específica, representada pela letra grega  $\rho$  também é uma propriedade intensiva, por que? No próximo item, que trata de dimensões e unidades, será apresentada uma lista abrangente de propriedades intensivas e extensivas a serem utilizadas.

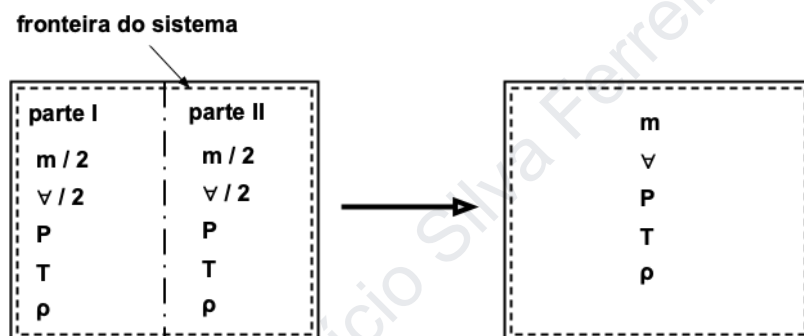


Figura 1.7 – Propriedades extensivas são aditivas, a propriedade do todo é igual à soma das respectivas propriedades das partes.

## Fase e Substância Pura

A matéria pode existir em diversas fases e frequentemente nos depararemos com situações em que mais de uma fase está presente. Chamamos de *fase* uma quantidade de matéria homogênea em composição química e estrutura física. Vejamos alguns exemplos para ilustrar este novo conceito. Na Fig. 1.8 são representados tanques contendo substâncias em diversas combinações e fases. Na Fig. 1.8a temos água em duas fases, uma líquida e outra gasosa, chamada de vapor (ver explicação a seguir). Observe que se retirarmos uma amostra qualquer de uma das fases, sempre identificamos a mesma composição química – moléculas de  $H_2O$ . Por estrutura física homogênea queremos dizer que a matéria é inteiramente um gás em uma

das fases e líquido na outra. Na Fig. 1.8b, observamos água em três fases, como líquido, vapor e sólido. Em (c), temos ar, uma mistura uniforme de gases – mesma estrutura física. Se tomarmos amostras em diversos pontos do tanque observamos a mesma composição química – os gases com a mesma distribuição em volume. Por fim, no exemplo (d), temos uma mistura bifásica, isto é, formada por duas fases, ambas líquidas – note que água e óleo são imiscíveis. Dentro de cada fase a composição química é homogênea.

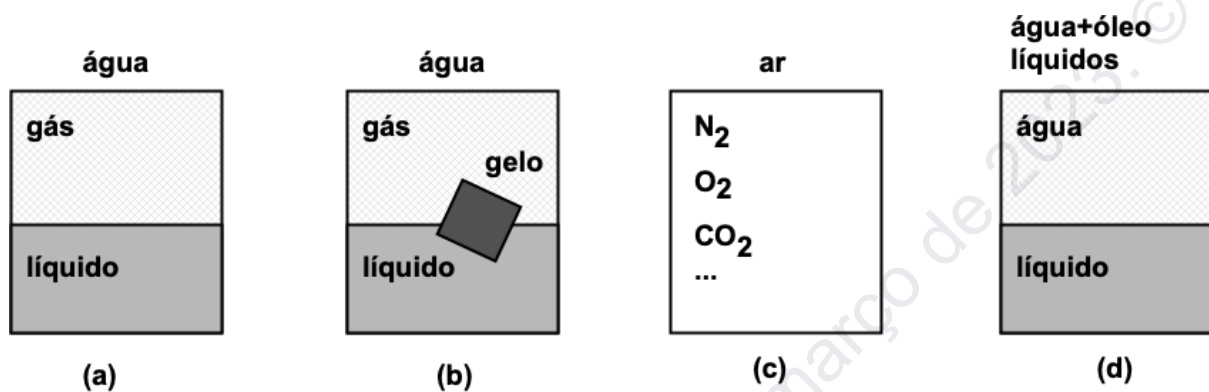


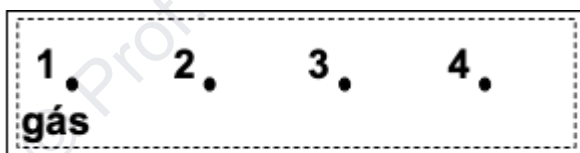
Figura 1.8 – A composição química e estrutura física é homogênea em cada. (a) exemplo de mistura bifásica de água, (b) mistura multifásica com água, (c) exemplo de mistura monofásica – ar, e (d) mistura bifásica com mais de um componente.

Utilizamos o termo vapor sem explicá-lo. Chamamos de vapor a fase gasosa em contato com a fase líquida ou em que seu estado está próximo da região de saturação. Definiremos o termo saturação no Capítulo 2 – Substância Pura, por enquanto podemos entender que o termo indica a condição de mudança de fase de vapor para líquido.

Estamos em condições de definir o tipo de substância que analisaremos na maior parte deste livro, até o Capítulo # – Misturas Reativas, que trata de reações químicas. Uma *substância pura* é aquela que apresenta composição química homogênea e invariável. Convém ressaltar que por homogênea queremos dizer que a composição não depende da posição – ao retirarmos amostras em diversos pontos no interior da substância, a análise revela a mesma composição química. Por invariável queremos informar que a composição não varia com o tempo. Observe que a definição não impede que a substância pura se apresente em diversas fases. Por exemplo, se considerarmos o conteúdo que aparece em cada um dos casos da Fig. 1.8 como nosso sistema, podemos considerá-lo formado por uma substância pura apenas em (a), (b) e (c). Isto não acontece no item (d) pois a composição química é diferente entre as fases.

## Equilíbrio

O termo equilíbrio sugere uma situação de repouso ou de ausência de movimento. A termodinâmica clássica lida com processos entre estados de equilíbrio, por isso, é fundamental compreendermos o conceito de equilíbrio. Para apresentá-lo, consideremos, inicialmente, a situação mais simples: um sistema isolado – não há nenhum tipo de interação com a vizinhança, Fig. 1.9. Vamos admitir que somos capazes de medir a temperatura em qualquer ponto no interior do sistema. Fizemos a medição em quatro pontos em um determinado instante de tempo e observamos que  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ . Se continuarmos monitorando estas temperaturas conforme o tempo passa, observaremos que os valores vão se aproximando, até que um estado particular com temperatura uniforme  $T_u$  é atingido, com  $T_4 < T_u < T_1$ . Chamamos este estado de estado de *equilíbrio térmico* – a partir deste instante, enquanto o sistema permanecer isolada, a  $T_u$  permanecerá constante. Analogamente, se a pressão for uniforme, dizemos que o sistema está em *equilíbrio mecânico*. Para o gás composto por um único componente, como o do exemplo, veremos que estas duas condições são suficientes para dizermos que o sistema está em *equilíbrio*. Para um caso mais geral, envolvendo uma mistura com múltiplos componentes e fases, outras condições devem ser satisfeitas para o equilíbrio: o *equilíbrio químico*, *difusivo* e de *fases* devem estar presentes. Definições detalhadas dos vários tipos de equilíbrio serão fornecidas em momento oportuno. Em outras palavras, na ausência de gradientes internos, não observamos mais transferência de calor, massa, quantidade de movimento (movimento do fluido) ou a presença de reações químicas – cessam os "movimentos". Observe que *se um sistema (fechado ou aberto) em equilíbrio for isolado da vizinhança, seu estado permanece inalterado*. Podemos usar esta observação como uma espécie de teste para verificarmos se um sistema está ou não em equilíbrio.



$$T_1 > T_2 > T_3 > T_4$$

Figura 1.9 – Sistema isolado contendo um gás formado por um único componente. As medições de temperatura em diversos pontos no instante inicial indicam valores heterogêneos

Vamos realizar outros experimentos com o sistema anterior em equilíbrio, fazendo-o interagir com outros três sistemas, em condições distintas (Fig. 1.10). Ao interagir com as vizinhanças,

observaremos novamente movimento, e, eventualmente, novas condições de equilíbrio serão atingidas. Considere os dois sistemas representados na Fig. 1.10a, com ambos isolados da vizinhança. A fronteira comum é rígida e impermeável, permitindo a passagem de energia mas não de massa. Medições de temperatura em um determinado instante indicam que a temperatura do gás no sistema I ( $T_1$ ) é maior do que aquela de II ( $T_2$ ). À medida que o tempo passa e os dois sistemas interagem entre si, as medições mostram que  $T_1$  aumenta e  $T_2$  diminui, até que, eventualmente, se igualam. Durante o processo, aprenderemos que ocorre uma interação energética do tipo calor entre os gases, também chamada de transferência de calor, e que esse movimento cessa quando as temperaturas se igualam. Dizemos então que o equilíbrio térmico foi alcançado entre os sistemas, ou entre o sistema I e sua vizinhança – no caso, o sistema II. No exemplo (b), permitimos a interação entre os sistemas através de um pistão bem lubrificado livre para se mover, mas impermeável à passagem de massa.

Inicialmente,  $P_1 > P_2$  e o pistão estava travado por um pino. Após a remoção do pino, o pistão é livre para se mover, deslocando-se inicialmente para a direita. Cessado o movimento oscilante do pistão, por ação de efeitos dissipativos nos gases, observa-se a configuração da Fig. 1.10b da direita. Temos, no caso, equilíbrio mecânico – lembrando adicionalmente que a pressão deve ser uniforme no interior de cada sistema para que isso seja verdade. Vamos considerar também que o pistão é feito de material bom condutor de calor, de tal forma que as temperaturas finais nos sistemas são iguais, e o equilíbrio térmico também é alcançado – ambas as condições são suficientes para afirmarmos que ambos os sistemas estão em equilíbrio. A ideia agora é comparar o estado final do sistema I no experimento (a) com o seu estado no experimento (b). As medições mostram que as pressões e temperaturas são diferentes, indicando que os sistemas atingiram estados de equilíbrio diferentes por interagirem com vizinhanças diferentes. Por fim, considerando o experimento (a), vamos ampliar a fronteira fazendo com que o novo sistema seja formado pelo sistema I, II e a parede que separa os gases. Já havíamos concluído que ambas as partes estavam equilibradas ao término do experimento, mas ao mudar o sistema, podemos ficar confusos. De fato, o sistema composto continua em equilíbrio, porém as propriedades não são uniformes, apenas em cada parte que o compõe. Neste caso, há uma restrição interna aos sistemas que impede a equalização das pressões. Define-se restrição interna como *barreiras no interior de um sistema que impedem a livre interação entre as partes que o compõem*. Revisitaremos este ponto quando falarmos de misturas reativas. Podemos generalizar esta observação experimental escrevendo

Para um sistema em equilíbrio com restrições internas, cada subsistema estará em equilíbrio, mas em um estado diferente.

Podemos resumir nossas observações sob um outro ponto de vista, numa forma diretamente aplicável à análise de problemas

Num sistema em equilíbrio desprovido de restrições internas e fases, as propriedades são uniformes, e um único valor de cada propriedade é representativo do sistema como um todo.

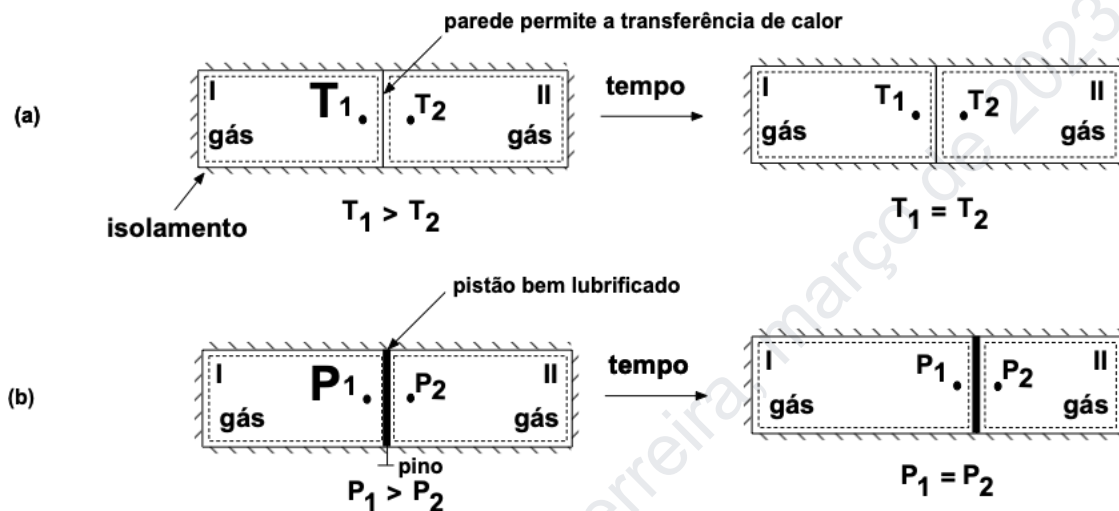


Figura 1.10 – Exemplo de sistemas com barreiras internas.

A palavra fase apareceu na afirmação anterior para destacar que quando temos, por exemplo, um recipiente isolado com água líquida e vapor em equilíbrio, apesar da pressão e temperatura ser a mesma entre as fases, não podemos dizer o mesmo da massa específica – o vapor é menos denso do que o líquido.

Por fim, ressaltamos que esta ausência de movimento característica do equilíbrio acontece apenas em nível macroscópico. Ao observarmos o sistema em escala microscópica, veríamos um cenário muito diferente do repouso: flutuações em nível molecular, mas com características insuficientes para serem detectadas em nível macroscópico.

### Processo de quase-equilíbrio

Considere os experimentos da Fig. 1.11. Em um caso, desejamos aquecer o gás no interior do conjunto cilindro-pistão de  $T_i$  a  $T_f$ . No outro, queremos expandir o gás de uma pressão inicial  $P_i$  até uma pressão final  $P_f$  menor. Vamos realizar cada experimento de duas maneiras diferentes: uma rápida, situação da esquerda, e outra lenta (direita). Durante os processos, mediremos temperatura e pressão nos pontos 1 e 2. Em (a), o aquecimento rápido é



promovido pela ação de uma chama, que mantém a placa aquecedora em uma temperatura bem maior que  $T_1$  ( $\Delta T$  grande, isto é, não desprezível em face de  $T_1$ ). Ao longo do processo, observamos uma grande diferença de temperatura entre os pontos 1 e 2, com  $T_1 > T_2$ . Em outras palavras, a temperatura não é homogênea no interior do gás – em cada instante o sistema gás não está em equilíbrio. Por outro lado, na situação representada à direita, através de um sistema de aquecimento eletroeletrônico, conseguimos manter a temperatura da placa aquecedora ligeiramente superior a  $T_1$ . Em qualquer instante, observamos  $T_1 \approx T_2$  ( $T_1 - T_2 \ll T_1$  ou  $T_2$ ), quer dizer, a cada instante, ao longo do processo, o sistema sempre estará numa condição próxima ao equilíbrio. Podemos realizar um teste com ambos os sistemas e processos (rápido e lento) para verificar o equilíbrio: isolá-los da vizinhança durante o aquecimento. Conforme destacamos anteriormente, após o isolamento, qualquer "movimento" no sistema só pode ter origem interna; como não há interação com a vizinhança, significa que o sistema não estava em equilíbrio. Observaríamos, no caso (a), um "movimento" interno de uniformização da temperatura ( $T_1$  diminui e  $T_2$  aumenta) em direção a uma temperatura intermediária entre  $T_1$  e  $T_2$ . Na situação (b), mediríamos mínimas variações em ambas temperaturas, confirmando a hipótese de proximidade à condição de equilíbrio. Analogamente, no experimento (b), ao removermos a massa  $M$  de uma única vez (direita), ou gradativamente, retirando  $dm$  a cada passo (esquerda), observaríamos gradientes de pressão na primeira situação e homogeneidade na pressão no 2°.

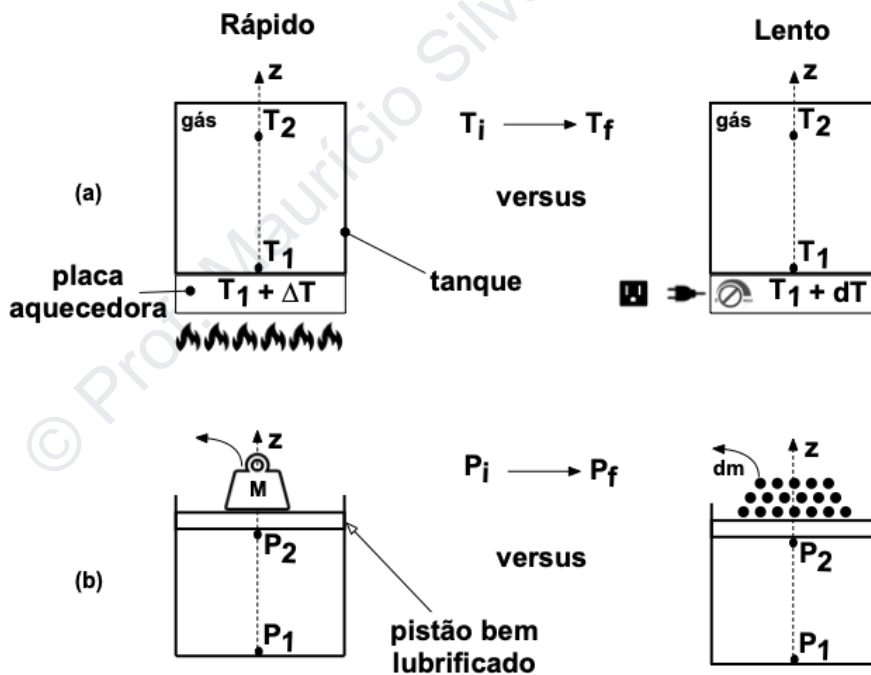


Figura 1.11 – Comparação entre a distribuição de (a) temperatura e (b) pressão dos sistemas em processos rápidos e lentos.



Quando um processo é executado de forma lenta o chamamos de processo de *quase-equilíbrio* ou *quase-estático*. Define-se processo de quase-equilíbrio como a

*representação aproximada de um processo em que o estado do sistema se altera a uma taxa lenta em comparação com a taxa com que o sistema se aproxima internamente do equilíbrio.*

Em outras palavras, conforme o sistema percorre o processo, internamente ele estará sempre numa condição muito próxima do equilíbrio, mesmo com seu estado se alterando continuamente. Futuramente, quando estivermos melhor equipados, melhoraremos esta definição.

### **Postulado de Estado**

O estado de um sistema é descrito por suas propriedades, mas quantas propriedades são necessárias para definirmos um estado? Antes de responder a esta pergunta, utilizaremos um exemplo para explicar o seu significado. Considere que estamos desenvolvendo um banco de dados digital para uma empresa que tem como política identificar seus colaboradores pelo nome e não um número. O banco contará com campos como nome, sobrenome, nome da mãe, telefone, endereço de e-mail, função, salário, idade, etc. Quantas informações são necessárias para identificar um funcionário? Bem, provavelmente o primeiro nome não deve ser suficiente, mas o nome, sobrenome e nome da mãe devem ser suficientes; ou seja, são necessárias três informações. Identificado o colaborador, todas as demais informações podem ser recuperadas. Voltando ao contexto termodinâmico, a experiência acumulada durante mais de dois séculos de experimentos nos mostra que, de fato, um número pequeno de propriedades é suficiente. A partir deste conjunto de propriedades, todas as demais podem ser inferidas. O número exato é dado pelo chamado *Postulado de Estado*. Antes de apresentá-lo, vamos definir dois conceitos: o de postulado e o de sistema compressível simples.

*Postulado*: “proposição posta no início de uma dedução, não sendo deduzida de nenhuma outra no sistema considerado” (Lalande, 1999).

*Sistema Compressível Simples (SCS)*: Sistema (aberto ou fechado) em equilíbrio, desprovido de restrições internas e em que forças de campo (elétrico, magnético e gravitacional), forças inerciais, movimento e tensão superficial não são importantes.

Caso esses efeitos fossem importantes, uma propriedade adicional precisaria ser especificada para cada um deles. Por exemplo, caso nós devêssemos considerar efeitos gravitacionais,

inerciais ou de movimento, precisaríamos especificar a cota do centro de gravidade do sistema, a aceleração e a velocidade do sistema.

Para uma SCS o postulado de estado diz:

*Duas propriedades intensivas independentes, mais a massa ou volume são suficientes para caracterizar completamente o estado.*

Duas propriedades são independentes se uma puder ser variada enquanto a outra é mantida constante. Quando falarmos de substância pura no Cap. 2, voltaremos a este assunto. Da mesma forma, ampliaremos o postulado de estado oportunamente.

### 1.5 Dimensões e Unidades

De acordo com o Vocabulário Internacional Metrológico (VIM 2012), uma *grandeza* é definida como: “propriedade dum fenômeno dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência.” Massa, volume, pressão e temperatura são exemplos de grandezas. A referência é uma unidade de medida. Nesse texto, trabalharemos preferencialmente com o Sistema Internacional de Unidades (SI), entretanto, na vida profissional é comum termos que lidar com outros sistemas de unidade. A nossa recomendação é sempre converter todos os valores para o SI, realizar toda a análise nesse sistema para, por fim, se necessário, converter os resultados para o sistema original. No SI, as grandezas de base e suas respectivas unidades são dadas na Tabela 1.4. Como o próprio nome indica, essas grandezas formam uma base, e cada uma é independente das demais, isto é, uma grandeza de base não pode ser escrita em função das demais.

Tabela 1.4 – Grandezas de base e suas unidades no Sistema Internacional (SI)

Grandeza de base		Unidade no SI	
Nome	Símbolo	Nome	Símbolo
comprimento	L	metro	m
massa	M	kilograma	kg
tempo	T	segundo	s

corrente elétrica	I	ampere	A
temperatura termodinâmica	$\theta$	kelvin	K
quantidade de substância	n	mol	mol
intensidade luminosa	J	candela	cd

Notas: 1) Note que os nomes de unidades que homenageiam cientistas são escritos com letras minúsculas. Assim, ampere, kelvin, newton, joule e pascal referem-se às unidades e não aos cientistas;

2) Na língua portuguesa é comum encontrarmos o termo quilograma, mas o INMETRO (2012) estabelece que o nome a ser empregado é quilograma;

3) O nome da unidade de corrente elétrica é ampere sem acento. O nome do cientista é Ampère.

A dimensão de uma grandeza  $G$  qualquer pode ser escrita em função das grandezas de base:

$[G] = L^a.M^b.T^c.I^d.\theta^e.N^f.J^g$ . Os expoentes na expressão anterior, denominados expoentes

dimensionais, podem ser positivos, nulos ou negativos. Os colchetes em  $[G]$  indicam a

dimensão de  $G$ . Assim, quaisquer outras grandezas não apresentadas na Tabela 1.4 terão suas

dimensões e unidades escritas em função destas. Essas grandezas são chamadas de grandezas

derivadas e suas unidades de unidades derivadas. Como exemplo de grandezas derivadas

temos área ( $a = 2$  e  $b = c = d = e = f = g = 0$ ), volume ( $a = 3$  e  $b = c = d = e = f = g = 0$ ),

velocidade ( $a = 1, c = -1$  e  $b = d = e = f = g = 0$ ) e aceleração ( $a = 1, c = -2$  e  $b = d = e = f = g$

$= 0$ ). Na Tabela 1.5, essas e outras grandezas importantes para o nosso contexto são

apresentadas. Algumas não têm dimensão e, portanto, unidade; sendo chamadas de grandezas

adimensionais, na expressão anterior correspondem ao caso em que  $a = b = c = d = e = f = g$

$= 0$ .

Tabela 1.5 – Grandezas derivadas comuns em termodinâmica

Grandeza	Dimensões	Unidade no SI	Símbolo	Nome
área	$L^2$	$m^2$	—	—
volume	$L^3$	$m^3$	—	—
velocidade	$Lt^{-1}$	m/s	—	—

aceleração	$Lt^{-2}$	$m/s^2$	—	—
força	$MLt^{-2}$	$kg.m/s^2$	N	newtons
pressão	$ML^{-1}t^{-2}$	$N/m^2$	Pa	pascal
energia	$ML^2t^{-2}$	$N.m$	J	joule
potência	$ML^2t^{-3}$	$J/s$	W	watt
massa específica	$ML^{-3}$	$kg/m^3$	—	—

## 1.6 Medindo Propriedades

Nosso objetivo neste item é desenvolver meios baseados em princípios mecânicos para medição de três propriedades intensivas: volume específico (razão volume por massa), pressão e temperatura. Essas medições serão importantes em nossos futuros experimentos e gostaríamos de contar com formas de medições diretas e de fácil compreensão dos princípios envolvidos. Não faz parte do escopo do nosso texto apresentar todos os tipos de sensores empregados com essa finalidade ou discutir maneiras automáticas de se adquirir dados. Nas nossas análises, sempre do ponto de vista macroscópico, vamos considerar a hipótese de meio contínuo, isto é, as propriedades intensivas dentro do nosso sistema variam de forma contínua com a posição. Dessa forma, podemos falar em pressão e temperatura em um ponto  $(x, y, z)$  dentro do sistema.

### Volume Específico

Antes de apresentarmos o volume específico, vamos evocar outra propriedade intensiva com a qual estamos mais acostumados: a massa específica, representada pela letra grega  $\rho$ . A massa específica de uma substância em um dado ponto é definida pelo limite

$$\rho \equiv \lim_{\forall \rightarrow \forall'} \left( \frac{m}{\forall} \right) \quad (1.1)$$

sendo  $\forall$  o volume da amostra,  $m$  a massa nele contida e  $\forall'$  o volume mínimo para o qual existe o limite. Esse volume deve ser suficientemente pequeno para podermos tratar o resultado como referente a um ponto e, ao mesmo tempo, suficientemente grande de forma a conter um número adequado de partículas para conferir relevância estatística ao resultado.

O volume específico, indicado pela letra  $v$  minúscula ( $v$ ), é definido como o inverso da massa específica

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

No SI, a unidade da massa específica é  $\text{kg/m}^3$  e do volume específico,  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

Para medirmos o volume específico de uma determinada substância no estado líquido ou sólido precisamos de uma balança e de um recipiente aberto, transparente, graduado e de massa conhecida. Medimos o volume  $\nabla$  da amostra usando a escala e pesamos o conjunto recipiente-substância, depois subtraímos a massa do recipiente, obtendo-se a massa  $m$  da amostra. O volume específico será dado pela razão  $\nabla/m$ . Para medição desta propriedade em um gás podemos utilizar um balão inflável, um balança e um recipiente contendo um líquido. Ao submergir o balão no líquido, podemos medir o volume deslocado. Importante mencionar que o volume específico depende do estado termodinâmico, assim, concomitante deveremos impor uma temperatura e uma pressão à substância; conseqüentemente, será preciso medir estas grandezas, o que aprenderemos a fazer na seqüência.

Em geral, o volume específico varia de um ponto a outro no interior de um sistema. Para o caso mais geral, de um sistema em que o volume específico varia com a posição, como representado na Fig. 1.12, a massa do sistema é calculada pelas expressões

$$m = \int_{\nabla} \rho d\nabla \quad (1.3a)$$

ou

$$m = \int_{\nabla} \frac{1}{v} d\nabla \quad (1.3b)$$

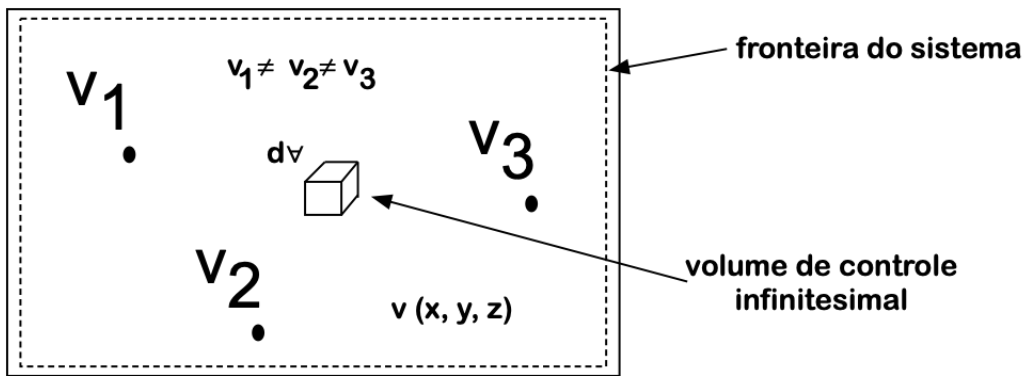


Fig. 1.12 – Sistema com volume específico variável com a posição

Frequentemente, consideramos em nossas análises o volume específico uniforme, assim as Eqs. 1.3a e 1.3b reduzem para

$$m = \rho \forall \quad (1.4a)$$

e

$$m = \frac{\forall}{v} \quad (1.4b)$$

sendo  $\forall$  o volume total do sistema.

Nota: quando dizemos que uma grandeza é uniforme, significa dizer que ela não varia com a posição, isto é, para qualquer ponto P (x, y, z) dentro do sistema a grandeza em questão assume o mesmo valor. O adjetivo constante, por outro lado, indica que, para cada ponto P, a grandeza não varia com o tempo, podendo variar entre posições.

Exemplo 1.1 – Determinação do volume específico a partir de uma tabela de propriedades termodinâmicas

A seguir é apresentada uma parte da tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água, contendo valores de volume específico do vapor em função de sua temperatura e pressão. Frequentemente, usamos tabelas desse tipo na determinação de propriedades. Esse exemplo serve para apresentar o procedimento, que é essencialmente mecânico, demandando, portanto, treino.

P = 500 kPa	
T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)

200	0,42492
250	0,47436
300	0,52256
350	0,57012

P = 600 kPa	
T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)
200	0,35202
250	0,39383
300	0,43437
350	0,47424

Utilizando as tabelas anteriores, estime o volume específico do vapor d'água a:

- (a) 500 kPa e 250 °C;
- (b) 600 kPa e 275 °C;
- (c) 600 kPa e 280 °C;
- (d) 530 kPa e 250 °C;
- (e) 550 kPa e 320 °C.

### SOLUÇÃO

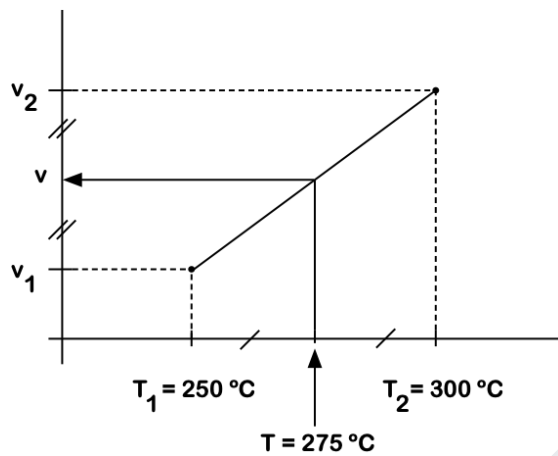
Observe que em cada um dos itens o estado está definido pois conhecemos duas propriedades intensivas independentes, pressão e temperatura no caso. Isto significa que através da tabela podemos determinar as propriedades faltantes, no caso, nos interessa apenas o volume específico.

(a) Lemos diretamente da 1ª tabela o volume específico correspondente ao estado caracterizado por 500 kPa e 250 °C:  $v = 0,47436 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

(b) Neste caso, o estado que procuramos avaliar não coincide com os valores tabelados, está entre o valor correspondente a 200 °C e 250 °C. Para situações similares é suficiente utilizar uma interpolação linear:

275 °C →	T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)
	250 (T <sub>1</sub> )	0,39383 (v <sub>1</sub> )
	300 (T <sub>2</sub> )	0,43437 (v <sub>2</sub> )

O gráfico a seguir serve para ilustrar o procedimento de interpolação linear. Nesse caso, em particular, a temperatura está na metade do intervalo



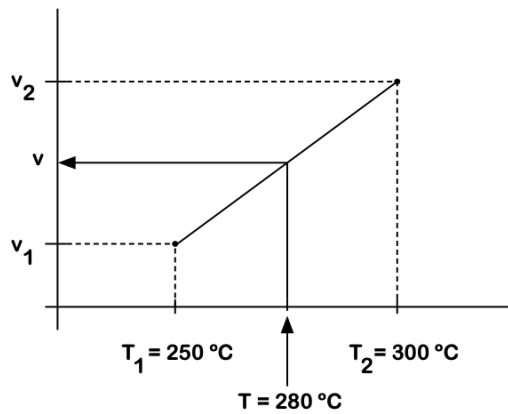
Portanto,

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} = 0,41410 \frac{m^3}{kg}$$

(c) Novamente, o estado não coincide com os valores tabelados e o gráfico é uma ferramenta útil na interpolação entre as linhas correspondentes a 250 e 300 °C na tabela referente à 600 kPa:

275 °C →	T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)
	250 (T <sub>1</sub> )	0,39383 (v <sub>1</sub> )
	300 (T <sub>2</sub> )	0,43437 (v <sub>2</sub> )



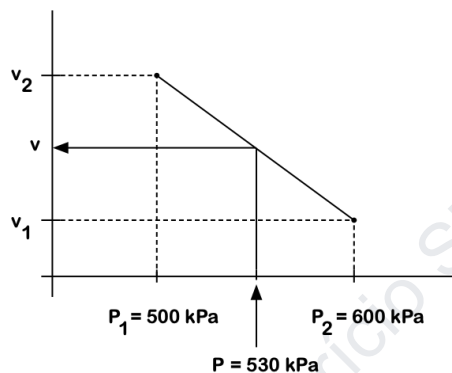


Por semelhança de triângulos:

$$\frac{v-v_1}{v_2-v_1} = \frac{T-T_1}{T_2-T_1} \Rightarrow \frac{v-0,39383}{0,43437-0,39383} = \frac{280-250}{300-250}$$

Fazendo a conta,  $v = 0,41815 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

(d) Agora, não há coincidência do valor da pressão (530 kPa) com os valores tabelados, vamos ter que interpolar entre tabelas. O gráfico a seguir nos ajuda a realizar a interpolação:



com  $v_1 = 0,39383 \text{ m}^3/\text{kg}$  (500 kPa e 250 °C) e  $v_2 = 0,47436 \text{ m}^3/\text{kg}$  (600 kPa e 250 °C).

$$\frac{v-v_1}{v_2-v_1} = \frac{P-P_1}{P_2-P_1} \Rightarrow \frac{v-0,39383}{0,47436-0,39383} = \frac{530-500}{600-500}$$

Portanto,  $v = 0,41799 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

(e) Precisamos interpolar tanto a temperatura, entre 300 e 350 °C, como a pressão, entre 500 e 600 kPa. Em situações como essa é mais fácil começar pela pressão, gerando uma coluna intermediária de valores de volume específico entre 500 e 600 kPa. Como a pressão está na metade do intervalo, facilita bastante a interpolação:

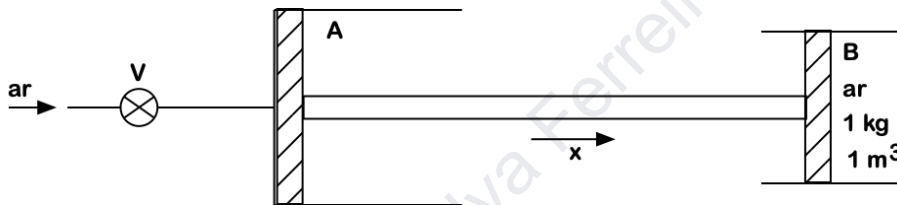
$$v@(550 \text{ kPa e } 300 \text{ }^\circ\text{C}) = \frac{0,52256 + 0,43437}{2} = 0,47847 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v@(550 \text{ kPa e } 350 \text{ }^\circ\text{C}) = \frac{0,57012 + 0,47424}{2} = 0,52218 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Agora, basta interpolarmos a temperatura:

$$\frac{v-0,47847}{0,52218-0,47847} = \frac{320-300}{350-300} \quad v = 0,49595 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Exemplo 1.2 – Dois conjuntos cilindro-pistão estão conectados por uma haste como ilustrado na figura. A área do pistão A é duas vezes maior que a área do pistão B,  $A_A = 2A_B$ . O conjunto A está conectado a uma linha de ar comprimido e uma válvula V fechada impede a entrada de ar no cilindro. Inicialmente, o conjunto B contém 1 kg de ar, ocupando um volume de  $1 \text{ m}^3$ . A válvula V é aberta, permitindo a lenta entrada de ar no conjunto A. A válvula é fechada quando o volume interno de A é igual a  $0,8 \text{ m}^3$ . Calcule o volume específico do ar em B no estado final.



### SOLUÇÃO

Conforme o conjunto A é carregado com ar, a haste desloca-se  $\Delta x$  para a direita. Podemos calcular esse deslocamento a partir da variação de volume  $\Delta \nabla_A$  experimentada por A:

$$\Delta x = \frac{\Delta \nabla_A}{A_A} \quad (\text{i})$$

Ambos os pistões experimentam o mesmo deslocamento  $\Delta x$  em módulo, dessa forma, conseguimos escrever  $\Delta x$  também em função da variação de volume experimentada por B. Chamamos isto de *compatibilidade geométrica*. Observe que um aumento de volume em A resulta em uma diminuição do volume em B, daí o sinal negativo na expressão a seguir:

$$\Delta x = \frac{\Delta \nabla_A}{A_A} = -\frac{\Delta \nabla_B}{A_B} \quad (\text{ii})$$

Isolando  $\Delta \nabla_B$  da expressão anterior e estabelecendo a relação entre as áreas:

$$\Delta V_B = -\frac{A_B}{A_A} \Delta V_A \quad (\text{iii})$$

$$\Delta V_B = -\frac{A_B}{2A_B} \Delta V_A \quad \Delta V_B = -\frac{1}{2} \Delta V_A \quad \Delta V_B = -\frac{1}{2} 0,8 m^3$$

$$\therefore \Delta V_B = -0,4 m^3$$

Logo, o volume final de B é igual ao volume inicial mais a variação, isto é,  $1 m^3 - 0,4 m^3 = 0,6 m^3$ , o volume específico em B pode então ser calculado:

$$v_B = \frac{0,6 m^3}{1 kg} = 0,6 \frac{m^3}{kg}$$

### Pressão

Um fluido em repouso em contato com uma superfície infinitesimal  $dA$  exerce uma força de módulo  $dF$  sobre esta. A força atua na direção normal à superfície, com sentido apontando para ela (Fig.1.11). Define-se pressão como sendo o resultado do limite

$$P = \lim_{dA \rightarrow dA'} \left( \frac{dF}{dA} \right) \quad (1.5)$$

sendo  $dA'$  a menor área para a qual ainda possamos considerar o fluido como um meio contínuo.

Adicionalmente, mas não demonstraremos aqui, a pressão em um dado ponto de um fluido é a mesma em todas as direções quando o fluido está em repouso.

Para um fluido em movimento, a força atuante em uma superfície depende da *tensão normal* à área e das outras tensões paralelas à superfície, chamadas de *tensões de cisalhamento*, conforme ilustrado na Fig. 1.13.

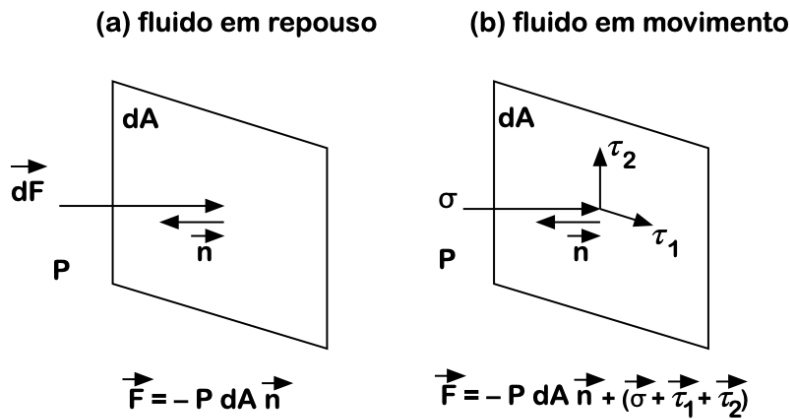


Fig. 1.13 – Força exercida por um fluido sobre uma superfície: (a) fluido em repouso e (b) fluido em movimento

### Unidades de pressão

Como vimos, a unidade de pressão no SI é o pascal (Pa), igual à pressão exercida por uma força de 1 N aplicada sobre uma superfície de área igual a 1 m<sup>2</sup>:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Por se tratar de uma unidade pequena, é comum trabalharmos com seus múltiplos:

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

Outras unidades frequentemente utilizadas no ambiente profissional são o bar (bar), a atm (atmosfera) e a lbf/in<sup>2</sup> (libra-força por polegada quadrada, em inglês psi):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 14,696 \text{ lbf/in}^2$$

Em termodinâmica, importa a chamada pressão absoluta, ou simplesmente pressão, como chamaremos nesse texto. Entretanto, dispositivos de medição indicam em geral a diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica no local da medição. Quando desejamos medir uma pressão maior que a atmosférica (absoluta), o dispositivo é chamado de manômetro e sua leitura, que é uma diferença, é chamada de pressão manométrica. Nas medições de pressões inferiores que a atmosférica, o dispositivo de medição é chamado de vacuômetro e sua leitura é chamada de pressão vacuométrica. Na Fig. 1.14 estão ilustrados os conceitos apresentados.

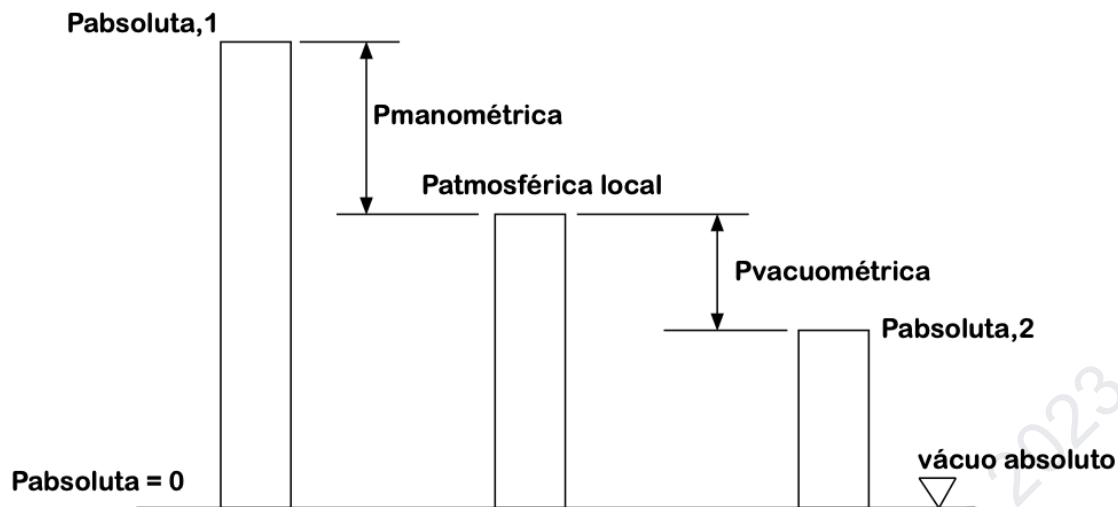
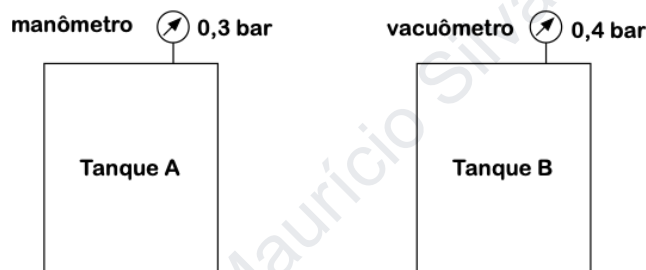


Fig. 1.14 – Conceitos de pressão absoluta, manométrica e vacuométrica

$$P_{\text{manométrica}} = P_{\text{absoluta},1} - P_{\text{atmosférica}}$$

$$P_{\text{vacuométrica}} = P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{absoluta},2}$$

Exemplo 1.3: Num local onde a pressão atmosférica absoluta, ou, simplesmente, pressão atmosférica, é igual a 1,0 bar, lê-se no manômetro do tanque A uma pressão de 0,3 bar, enquanto o vacuômetro B indica 0,4 bar. Determine a pressão absoluta em cada um dos tanques.



Para o tanque A, a  $P_{\text{abs},A}$  é dada por  $P_{\text{atm}} + P_{\text{man}} = 1,0 \text{ bar} + 0,3 \text{ bar} = 1,3 \text{ bar}$ .

Já a  $P_{\text{abs},B}$  é dada por  $P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}} = 1,0 \text{ bar} - 0,4 \text{ bar} = 0,6 \text{ bar}$ .

Note que um manômetro ou vacuômetro abertos para a atmosfera indicariam uma leitura nula. Observe, adicionalmente, que a menor pressão absoluta possível é zero, correspondendo à condição de vácuo – não há choques de moléculas contra uma superfície, então a força sobre ela é nula. Por fim, destaca-se que a maior leitura para um vacuômetro é igual à pressão atmosférica, o que corresponderia à condição de vácuo.

Medição de pressão: manômetro de coluna

Para um fluido em repouso, demonstra-se que a pressão, na presença de um campo gravitacional, varia unicamente com a profundidade (Fig. 1.15), de acordo com a relação:

$$P_2 - P_1 = \int_1^2 \rho g dz \quad (1.6)$$

sendo  $\rho$  a massa específica do fluido na profundidade  $z$  e  $g$  a aceleração da gravidade em  $z$ .

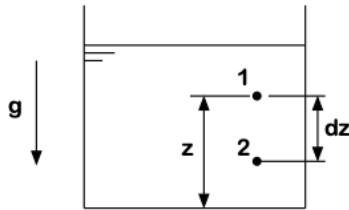


Fig. 1.15 – Figura auxiliar na explicação do cálculo da diferença de pressão hidrostática entre dois pontos em níveis diferentes em um líquido.

Exemplo 1.4: Estimativa da pressão no fundo da Fossa das Marianas

A Fossa das Marianas, localizada no Oceano Pacífico, próximo das Ilhas Marianas, é o ponto mais profundo dos oceanos, com uma profundidade de aproximadamente 11.000 m.

Deseja-se obter uma estimativa da pressão no fundo da Fossa, para isso, admita que a massa específica da água do mar é constante e igual a  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

SOLUÇÃO

Podemos usar a Eq. 1.6 para estimar a pressão no fundo da Fossa ( $P_2$ ) a partir da pressão conhecida na superfície livre do líquido ( $P_1$ ):

$$P_2 - P_1 = \int_1^2 \rho g dz$$

Assumindo que  $\rho$  e  $g$  são constantes, a equação anterior pode ser integrada diretamente

$$P_2 = P_1 + \rho g \Delta z$$

Considerando a pressão atmosférica ao nível do mar igual a 1 atm, temos  $P_1 = 1 \text{ atm}$ . Assim,

$P_2$  será dada por

$$P_2 = P_1 + \rho g \Delta z = 1 \text{ atm} \cdot 101,325 \text{ kPa/atm} + 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 11000 \text{ m} \cdot 10^{-3} \text{ kPa/Pa}$$

$$P_2 = 110,709 \text{ kPa ou } 1107 \text{ bar!}$$

Para pequenas variações de profundidade em um líquido, uma aproximação que fornece excelentes resultados consiste em considerar a massa específica uniforme (e a gravidade também), como fizemos nesse exemplo. A variação de pressão entre dois pontos 1 e 2 a profundidades diferentes é dada por

$$\Delta P = \rho g \Delta z \quad (1.7)$$

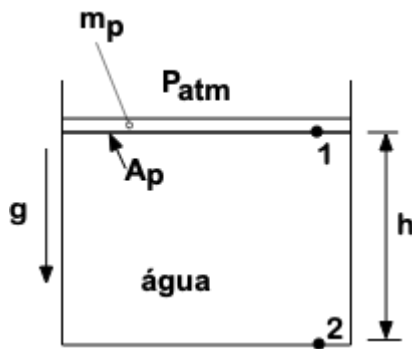
A Eq. 1.7 é usada na análise do chamado manômetro de coluna, como ilustrado no Exemplo 1.6.

Exemplo 1.5: Efeito do peso de um pistão na pressão interna de um cilindro

Um conjunto cilindro-pistão vertical contendo água a 20 °C é representado na figura a seguir.

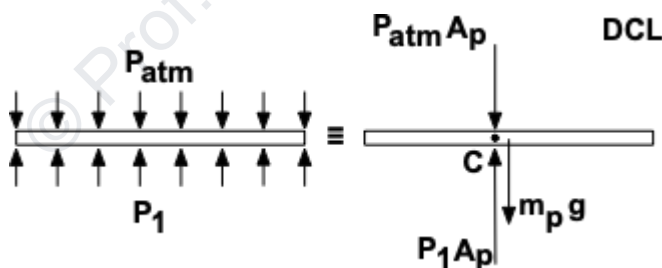
O pistão tem uma massa  $m_p = 18 \text{ kg}$  e área  $A = 0,025 \text{ m}^2$ . A pressão atmosférica local é de  $P_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$  e a altura da coluna de líquido é  $h = 1 \text{ m}$ . Considerando que a aceleração da gravidade é  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e o volume específico da água  $v = 0,001003 \text{ m}^3/\text{kg}$ , determine:

- a pressão em kPa na superfície do líquido em contato com o pistão;
- a pressão em kPa do líquido no fundo do cilindro.



Solução:

(a) a pressão  $P_1$  na superfície do líquido em contato com o pistão depende exclusivamente da pressão atmosférica e do peso e área do êmbolo. É mais fácil visualizar esta afirmação se desenharmos um diagrama de corpo livre do pistão.



No diagrama de corpo livre do pistão (DCL),  $P_1 A_p$  representa a força que o líquido exerce sobre o pistão para mantê-lo em repouso,  $P_{\text{atm}} A_p$  a força que a atmosfera aplica sobre a superfície do êmbolo, e  $m_p g$  o peso do pistão. As duas primeiras forças são aplicadas no centróide da área – para um pistão de seção transversal circular, C corresponde ao centro do

círculo. A força peso é aplicada no centro de gravidade do êmbolo. Como o pistão está em repouso, pela 2ª lei de Newton do movimento, a força resultante sobre o pistão deve ser nula:

$$P_1 A_p = P_{atm} A_p + m_p g$$

$$P_1 = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p} = 100 \text{ kPa} + \frac{18 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{0,0250 \text{ m}^2} \left( \frac{10^{-3} \text{ kPa}}{\text{Pa}} \right)$$

$$P_1 = 107 \text{ kPa}$$

Observação: note que na análise admitimos que a força de atrito entre o pistão e o cilindro é desprezível em comparação com as demais forças que agem sobre ele.

(b) A pressão no fundo do cilindro ( $P_2$ ) depende adicionalmente da contribuição do peso da coluna de líquido, assim, pela Eq. 1.6 com a massa específica admitida uniforme na direção vertical:

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho g h}{A_p} = P_1 + \frac{g h}{v} = 107 \text{ kPa} + \frac{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m}}{0,001003 \text{ m}^3/\text{kg}} \left( \frac{10^{-3} \text{ kPa}}{\text{Pa}} \right)$$

$$P_2 = 118 \text{ kPa}$$

A ideia por trás deste exemplo é utilizada na calibração de manômetros (ver explicação em Tubo de Bourdon). O dispositivo é chamado de balança de peso morto. Trata-se de um equipamento que utiliza massas conhecidas com elevada exatidão para aplicar pressões conhecidas, conforme ilustrado na Fig. 1.15.

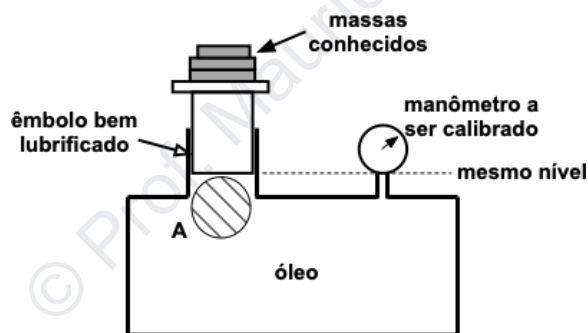


Fig. 1.15 – Esquema ilustrativo do funcionamento de uma balança de peso morto. A massa do êmbolo é  $m_e$  e de cada massa adicionada  $m_i$ . A posição do pistão é ajustada pela remoção ou adição de óleo de forma a manter o nível indicado constante.

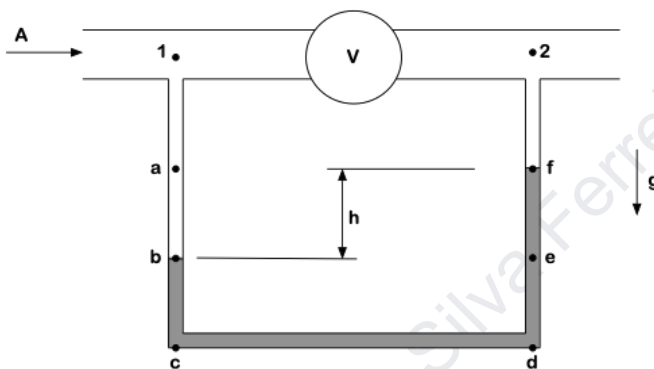


A pressão manométrica no interior do óleo no nível da superfície inferior do êmbolo é dada pela expressão:

$$P = \frac{m_e g + \sum m_i g}{A}$$

A pressão pode ser ajustada pela adição ou remoção de massas calibradas. Observe que como a conexão do manômetro e a superfície inferior do êmbolo estão no mesmo plano horizontal, a pressão aplicada ao instrumento também é P. O valor da aceleração da gravidade deve ser determinado com exatidão para o lugar de instalação da balança de peso morto.

Exemplo 1.6: Queda de pressão em uma válvula – medição usando um manômetro de coluna. Um fluido A escoava através de uma válvula V, conforme ilustrado na figura. De forma a medir a queda de pressão na válvula, um manômetro de coluna com um fluido B é utilizado. Os fluidos A e B devem ser imiscíveis. Dadas as massas específicas dos fluidos ( $\rho_A$  e  $\rho_B$ ), deduza uma expressão para a queda de pressão na válvula em função da leitura h do manômetro.



### SOLUÇÃO

Desejamos determinar  $\Delta P = P_1 - P_2 > 0$ , para isso aplicaremos a Eq. 1.12 ao longo do caminho 1abcdef2, lembrando que quando mergulhamos na coluna de líquido a pressão aumenta ( $P_c > P_b > P_a > P_1$ ) e quando subimos ela diminui ( $P_d > P_e > P_f > P_2$ ). Primeiramente, notemos que  $P_c = P_d$ , pois ambos os pontos estão à mesma profundidade. Observe que se  $P_c$  fosse maior que  $P_d$ , por exemplo, haveria movimento do fluido manométrico de c para d, o que não acontece, pois este fluido está em repouso. Vamos indicar as diferenças de cotas desconhecidas entre os pontos i e j por  $h_{ij}$ , veremos, ao final, que elas não afetam o resultado. Vamos calcular a pressão em c caminhando pelo ramo esquerdo e, depois, em d, seguindo pelo ramo direito

$$P_c = P_1 + \rho_A g h_{1a} + \rho_A g h + \rho_B g h_{bc} \quad P_c = P_1 + \rho_A g h_{1a} + \rho_A g h + \rho_B g h_{bc}$$

$$P_c = P_2 + \rho_A g h_{2f} + \rho_B g h + \rho_B g h_{ed}$$

Subtraindo a segunda equação da primeira e observando que  $h_{1a} = h_{2f}$  e  $h_{bc} = h_{ed}$

$$0 = P_1 - P_2 + \rho_A gh - \rho_B gh$$

Isolando a diferença de pressão

$$P_1 - P_2 = (\rho_B - \rho_A) gh \therefore$$

$$P_1 - P_2 = \rho_B gh \left( 1 - \frac{\rho_A}{\rho_B} \right)$$

Para o caso do fluido A ser um gás, B deve ser um líquido. Nesse cenário,  $\rho_B \gg \rho_A$  e podemos simplificar a expressão anterior para

$$P_1 - P_2 = \rho_B gh$$

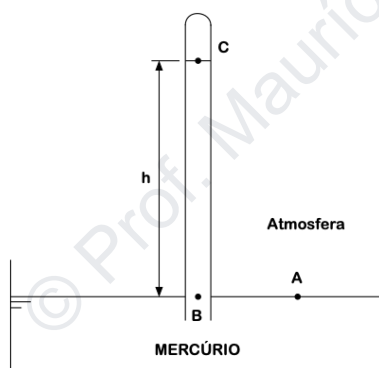
Quando o gás é ar, costuma-se empregar água ou um tipo de óleo como fluido manométrico.

Em outro cenário em que A é água, costumava-se utilizar mercúrio como fluido

manométrico. Nesse caso,  $\rho_B \approx 14\rho_A$  e  $\left( 1 - \frac{\rho_A}{\rho_B} \right) \approx 0,93$ .

Exemplo 1.7: Barômetro

O barômetro é um instrumento utilizado para medir a pressão atmosférica. Um tubo com mercúrio fechado em uma das extremidades é invertido e simultaneamente imerso em um reservatório também contendo mercúrio. Uma coluna de líquido será formada no interior do tubo e sua altura dependerá da pressão atmosférica local, como ilustrado na figura. A pressão na cavidade superior é aproximadamente igual a zero – não é nula pois o espaço é preenchido com vapor de mercúrio, como veremos no Capítulo 2.



Considerando que a pressão atmosférica local é de 101325 Pa, determine a altura  $h$  da coluna de líquido. Admita que a massa específica do mercúrio ( $\rho_{Hg}$ ) é igual a 13595 kg/m<sup>3</sup> e  $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ .

SOLUÇÃO

A pressão no ponto A ( $P_A$ ) localizado na superfície do líquido é igual à pressão atmosférica.

A pressão em B ( $P_B$ ) por sua vez é igual a  $P_A$  (por que?), assim

$$P_B = P_{atm} = \rho_{Hg}gh + P_c (\approx 0)$$

Logo

$$h = \frac{P_{atm}}{\rho_{Hg}g} = \frac{101325 N/m^2}{13595 kg/m^3 \cdot 9,807 m/s^2} = 0,75998 m$$

ou  $\sim 760$  mm.

Uma unidade de pressão frequentemente utilizada na medicina é o *mmHg* (*milímetro de mercúrio*), definida como a *pressão exercida por uma coluna de mercúrio com 1 mm (milímetro) de altura considerando  $\rho_{Hg} = 13591,1 kg/m^3$  (massa específica avaliada a  $0^\circ C$ ) e  $g = 9,80665 m/s^2$* . Dessa forma,  $1 \text{ mmHg} = 133,3224 \text{ Pa}$ . Faça você mesmo a conta e verifique!

No barômetro, se usássemos água ao invés do mercúrio, a altura da coluna de líquido seria de  $10,33 \text{ m}$  (considerando  $\rho = 1000 kg/m^3$  a  $4^\circ C$ ). Analogamente, define-se uma unidade chamada de *m.c.a.* (*metro de coluna d'água*), assim  $1 \text{ m.c.a} = 9806,65 \text{ Pa}$ .

### Medição de pressão: Tubo de Bourdon

Um instrumento frequentemente utilizado para medir pressão relativa é o Tubo de Bourdon. Trata-se de um tubo curvo de seção elíptica com uma das extremidades conectadas ao ponto onde se deseja medir a pressão e a outra a um mecanismo que acopla o deslocamento do tubo com o movimento do ponteiro indicador (Fig. 1.15). A pressão no tubo faz com que o tubo se deforme - a seção elíptica tende a se aproximar de uma seção circular e o tubo a ficar reto, aumentando de comprimento. Através de um processo de calibração, isto é, comparação das medições do Bourdon com valores de pressão conhecidos, é possível correlacionar a indicação do ponteiro a valores em uma escala na unidade desejada. Essa calibração pode ser conduzida utilizando-se uma Balança de Peso Morto, apresentada no Exemplo 1.5.

Um Tubo de Bourdon geralmente mede pressão manométrica, assim, um instrumento “aberto” para a atmosfera indicaria uma pressão nula. Existem também instrumentos adaptados para medir pressão absoluta, nesse caso a câmara onde está contido o tubo deformável é evacuada.



ID da imagem : 58804278

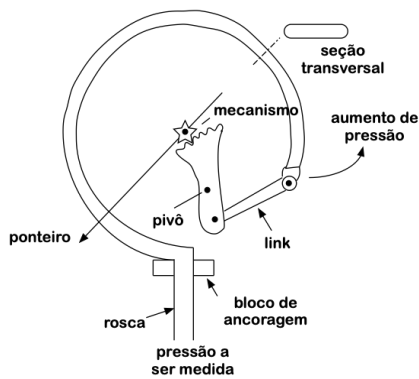
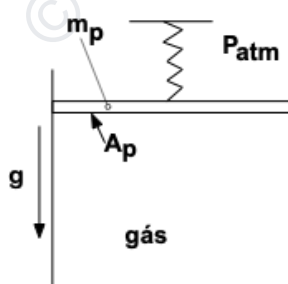


Fig. 1.15 – (a) Tubo de Bourdon, (b) Esquema de funcionamento de um tubo de Bourdon

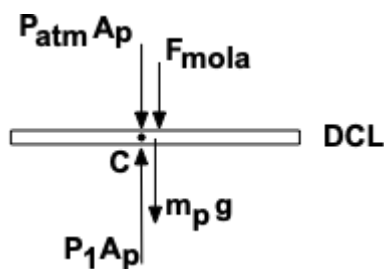
Exemplo 1.8: Efeito de uma mola sobre a pressão interna de um cilindro

Um conjunto cilindro-pistão contém  $V_1 = 1 \text{ m}^3$  de um gás. O pistão tem uma massa  $m_p = 18 \text{ kg}$  e área  $A_p = 0,025 \text{ m}^2$ . Uma mola inicialmente relaxada toca a superfície superior do êmbolo sem exercer nenhuma força sobre ele. O gás passa a ser lentamente aquecido, seu volume aumenta, o pistão se move para cima comprimindo a mola. O processo cessa quando o volume final é  $V_2 = 2 \text{ m}^3$ . Considere a mola linear, com constante  $k = 100 \text{ N/m}$ . Determine a pressão final no gás.



Solução:

Lembrando do Exemplo 1.5, a pressão inicial do gás depende apenas da pressão atmosférica e da contribuição do peso do pistão – note que o enunciado informa que inicialmente a mola não exerce força sobre o pistão. Como os valores são os mesmos do referido exemplo, a pressão inicial do gás  $P_1 = 107 \text{ kPa}$ . Para calcular a pressão final,  $P_2$ , devemos acrescentar ao nosso diagrama de corpo livre a contribuição adicional da força exercida pela mola sobre o pistão.



$$P_1 A_p = P_{atm} A_p + m_p g + F_{mola}$$

$$P_1 = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p} + \frac{F_{mola}}{A_p} = P_1 + \frac{F_{mola}}{A_p} \quad (i)$$

A força exercida pela mola pode ser calculada aplicando-se a Lei de Hooke,

$$F_{mola} = k \Delta x \quad (ii),$$

mas antes teremos que calcular a sua deformação  $\Delta x$ , que pode ser imediatamente relacionada com a variação de volume do gás ( $\Delta \nabla$ ):

$$\Delta \nabla = \Delta x A_p \quad (iii)$$

Combinando as Eqs. i, ii e iii, obtém-se:

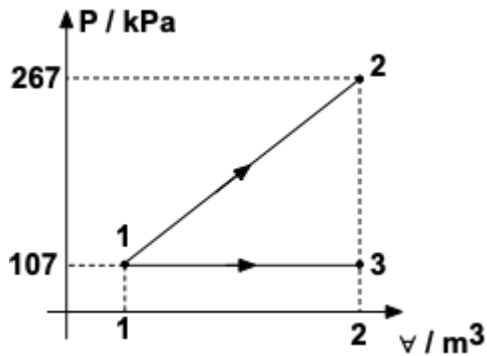
$$P_2 = P_1 + \frac{\Delta \nabla}{A_p^2}$$

Substituindo-se os valores:

$$P_2 = 107 \text{ kPa} + \frac{100 \text{ N/m} \cdot 1 \text{ m}^3}{0,0250 \text{ m}^2} \left( \frac{10^{-3} \text{ kPa}}{\text{Pa}} \right)$$

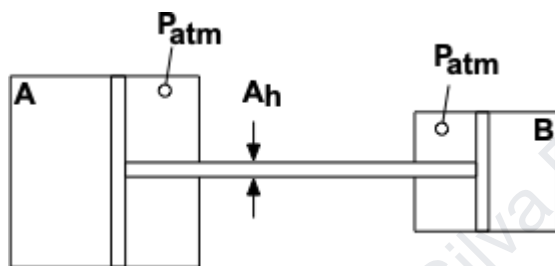
$$P_2 = 267 \text{ kPa}$$

Comentários: observe que a pressão no gás varia linearmente ao longo do processo (1→2), conforme o volume aumenta. Observe o diagrama  $P-\nabla$ .



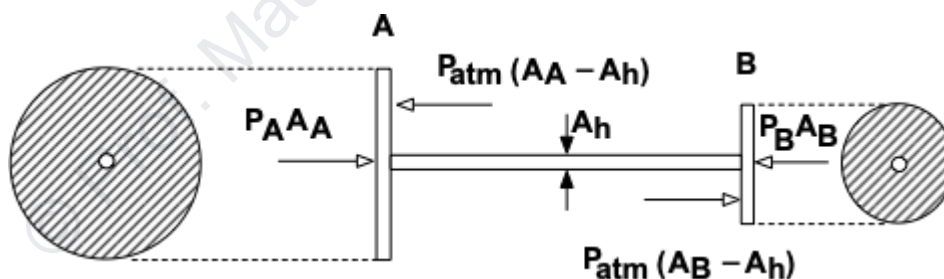
Caso não houvesse a mola, a pressão final correspondente, chamada de  $P_3$  para diferenciarmos da situação original, seria igual à inicial  $P_1$  (Por que?).

Exemplo 1.9: Dois conjuntos cilindro-êmbolo estão conectados por meio de uma haste cuja área da seção transversal é  $A_h$ , conforme a figura. A área do pistão A é  $A_A$  e a do pistão B é  $A_B$ , com  $A_A > A_B$ . As câmaras do lado da haste estão abertas e sob pressão atmosférica,  $P_{atm}$ . Sabendo que a pressão no cilindro A é  $P_A$  e que o conjunto está em repouso, determine a pressão em B,  $P_B$ .



Solução:

Para resolver o problema vamos começar desenhando um diagrama de corpo livre do conjunto pistão A, haste h, e pistão B:



A área hachurada em ambos os lados da figura representa o espaço anular dos pistões exposto à pressão atmosférica. No equilíbrio, a resultante das forças que agem sobre o conjunto é nula:

$$P_A A_A - P_B A_B + P_{atm}(A_B - A_h) - P_{atm}(A_A - A_h) = 0 \quad (i)$$

$$P_A A_A - P_B A_B + P_{atm}(A_B - A_A) = 0 \quad (\text{ii})$$

Note que o termo entre parênteses é negativo. Isolando  $P_B$  da equação anterior:

$$P_B = P_A \frac{A_A}{A_B} - P_{atm} \frac{A_A - A_B}{A_B} \quad (\text{iii})$$

É sempre vantajoso expressar o resultado final na forma literal, quando possível. Recomendamos analisar o resultado, verificando se está dimensionalmente correto e explorando cenários alternativos. Podemos fazer com que algum parâmetro tenda a zero ou a um valor muito grande, por exemplo. Vamos começar considerando que todas as unidades na equação anterior estão no Sistema Internacional, assim:

$$Pa = Pa \frac{m^2}{m^2} - \frac{Pa(m^2 - m^2)}{m^2}$$

Observe que a equação é dimensionalmente homogênea.

Vamos explorar agora cenários alternativos, consideremos, primeiro, que  $A_A = A_B$ . Neste caso, a Eq. iii nos diz que  $P_A = P_B$ , de acordo com nossa expectativa. Agora, admitamos que  $P_{atm} = 0$ , a equação reduz a:

$$P_B = P_A \frac{A_A}{A_B}$$

Como  $A_A > A_B$ , concluímos que  $P_B > P_A$ , isto é, é preciso uma pressão maior no gás do cilindro B para manter ambos os pistões em repouso –  $P_B$  será tão maior quanto maior for a razão  $A_A / A_B$ .

Reforçamos a importância da adoção de procedimento similar não apenas na análise de problemas de termodinâmica, mas também na análise de problemas de engenharia como um todo. A utilização deste procedimento não garante que a resposta está correta, mas permite a identificação de erros e nos fornece uma visão, um "insight", sobre o comportamento físico da situação-problema em questão.

## Temperatura

Para nos equiparmos para realização de experimentos, precisamos de uma maneira baseada em princípios mecânicos para medição de temperatura. Para este fim, utilizaremos o chamado termômetro de líquido em vidro (TLV), Fig. 1.16. A medição é baseada na dilatação térmica de um líquido contido em um conjunto tubo-bulbo selado, chamado de líquido termométrico. Na verdade, medimos o comprimento da coluna de líquido, quanto maior a temperatura, maior a coluna.

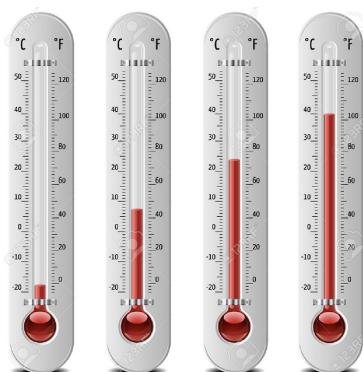


Figura 1.16 – Termômetro de líquido em vidro ID 16784410

A pergunta natural que surge neste momento é como atribuir valores para a escala? Primeiro, devemos destacar que o comprimento da coluna dependerá do líquido termométrico escolhido e das características geométricas do tubo-bulbo. Segundo, os valores atribuídos serão arbitrários. Porém, precisamos nos valer de padrões que nos permitam comparar medições feitas com instrumentos diferentes. Para que isso seja possível, utilizaremos a ideia por trás da chamada *Lei Zero da Termodinâmica*:

*Se um sistema A está em equilíbrio térmico com dois outros sistemas, B e C, então B e C estão em equilíbrio térmico entre si.*

Podemos imaginar que o sistema A é o nosso termômetro, que B é o padrão de comparação e que C é o sistema que desejamos medir a temperatura.

Em termodinâmica e na vida profissional frequentemente lidamos com outras unidades de temperatura além do kelvin, unidade básica do Sistema Internacional. Por exemplo, no nosso dia-a-dia é comum utilizarmos a *escala Celsius* de temperatura. Originalmente, no século XVIII, a escala tinha como pontos fixos de referência os pontos de congelamento e ebulição da água a 1 atm. Foram atribuídos os valores 0 °C e 100 °C para esses pontos, respectivamente. Pronuncia-se zero grau Celsius e 100 graus Celsius. Mais recentemente, no



século XX, o grau Celsius e a Escala Celsius foram redefinidos com base no zero absoluto (-273,15) e no ponto triplo da água (0,01 °C, ver Item 2.1).

Outras escalas bastante utilizadas são a escala Kelvin e a Fahrenheit. Para convertermos entre Celsius e Kelvin podemos usar as expressões:

$$K = ^\circ\text{C} + 273,15 \quad (1.8a)$$

$$^\circ\text{C} = K - 273,15 \quad (1.8b)$$

Assim, 26,85 °C é igual a 300 K. Pronuncia-se 300 kelvins e não 300 graus kelvin.

Para conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit são utilizadas as expressões:

$$^\circ\text{F} = 32,0 + (9/5) ^\circ\text{C} \quad (1.9a)$$

$$^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32,0) (5/9) \quad (1.9b)$$

### 1.7 Metodologia para Solução de Problemas Termodinâmicos

Termodinâmica clássica, em sua maior parte, é uma disciplina matematicamente simples, porém conceitualmente complexa – quase sempre usamos apenas as quatro operações aritméticas básicas. A dificuldade aparece quando de sua aplicação na solução de problemas. Apresentamos aqui uma metodologia, evoluída com base em nossa experiência lecionando o assunto, que se mostrou uma ferramenta eficaz, capaz de nos guiar na aplicação da teoria em situações práticas. Esta metodologia não vai transformar um problema difícil num problema fácil, porém nos auxiliará a estruturar nosso pensamento e evitará que cometamos os erros mais comuns. Recomendamos que essa metodologia seja utilizada na solução de qualquer problema termodinâmico, mesmo naqueles aparentemente mais simples; é por isso que nós a apresentamos logo no início da jornada! Com a prática, vocês vão observar que sua aplicação se tornará praticamente automática.

Começaremos exercitando a metodologia em um problema fora do escopo da Termodinâmica, mas com o qual estamos bem familiarizados. Na sequência, a aplicaremos a um problema simples de mecânica, para então apresentarmos sua forma final customizada para problemas termodinâmicos. Ao mesmo tempo, será uma ótima oportunidade para adquirirmos uma visão geral dos conceitos e leis fundamentais a serem abordados.

Exemplo 1.10: Calcular o saldo da nossa conta bancária ao fim do mês.

Solução

Este é um ótimo exemplo para desenvolvimento da metodologia, trata-se de uma situação bastante simples, em que nos sentimos confortáveis, e porque os passos necessários à sua solução são os mesmos a serem seguidos na análise de problemas termodinâmicos! O mais

incrível é que nós já sabemos fazer isso, de fato, o fazemos de forma automática. Este exemplo servirá para sistematizarmos o procedimento de solução. O método será apresentado na forma de tópicos numerados, como um algoritmo, indicando a sequência de passos a ser seguida:

**1º) Definir o objeto de estudo** – neste caso é a conta bancária. É conveniente utilizar um esquema e delimitar o objeto de estudo por uma linha pontilhada, conforme Fig 1.17;



Fig. 1.17 – Objeto de estudo deve estar claramente definido e indicado por linha pontilhada  
ID: 94908520

**2º) Isolar o objeto de estudo** – significa identificar quais as interações possíveis entre ele e o mundo exterior. No exemplo, as interações podem ser o salário, juros de aplicações financeiras, pagamentos de impostos, gastos com alimentação e transporte. Em resumo, são as entradas e saídas de valores da conta. Observe que estes valores cruzam a fronteira (linha pontilhada) e representam a interação do objeto de estudo com o que é externo a ele (Fig. 1.18);

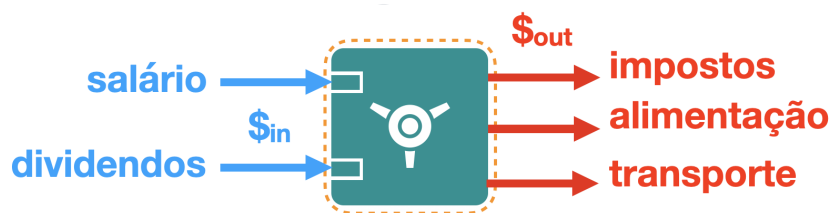


Fig. 1.18 – Isolar o objeto significa identificar as interações entre ele e o exterior, as interações cruzam a fronteira.

**3º) Verificar que informações são conhecidas**, ou não, sobre a conta bancária no início e fim do mês.

Início – saldo é conhecido

Fim – saldo a determinar

Precisamos entender o que acontece durante o mês para determinar o saldo final – o "durante" fará a ponte entre o fim do mês e seu início (Fig. 1.19);



Fig. 1.19 – A avaliação do saldo final exige que identifiquemos o que aconteceu durante o período, esta informação fará a ponte entre o fim e o início.

4º) **Realizar um balanço de "dinheiro"** (fluxo de caixa) – o balanço, Eq. 1.10, é a ponte entre a condição inicial e a final. O saldo no fim e no início do mês se refere ao que acontece dentro do objeto de estudo, enquanto as entradas ( $\$_{in}$ ) e saídas ( $\$_{out}$ ) têm haver com o que acontece na fronteira. Os somatórios indicam que devemos somar todas as contribuições nas entradas e saídas. Nota: usaremos os termos em inglês para indicar entradas (in) e saída (out) por uma questão de conveniência, são compactos e vão aparecer sempre subscritos.

$$\text{Saldo}_f - \text{Saldo}_i = \sum \$_{in} - \sum \$_{out}$$

**dentro do  
objeto de estudo**

**fronteira**

(1.10)

As contas bancárias costumam ser divididas em partes: conta corrente, conta poupança, etc. Existem movimentações financeiras entre essas partes, porém como estamos interessados em entender o que acontece com a conta como um todo, todas essas movimentações são internas ao objeto de estudo e, portanto, não são consideradas na análise. O saldo ao fim do mês depende apenas do saldo inicial e dos aportes e retiradas da conta – as transações internas à conta não afetam o valor do saldo final. Observação: juros de investimentos significam aportes à nossa conta e, portanto, devem ser tratados como entradas.

**Importante:** não realizamos nenhum cálculo neste momento, apenas esboçamos a solução!

5º) **Consultar o holerite, documentos e anotações com valores de ganhos e gastos** – neste passo devemos buscar as informações numéricas relativas ao saldo inicial e a todos os nossos ganhos e gastos.

6º) **Calcular** – apenas após termos compreendido o problema e esboçarmos a solução, realizamos os cálculos.

Em resumo, seguimos os seguintes passos: 1º) Definir o objeto de estudo, 2º) Isolar o objeto de estudo do exterior, 3º) Verificar as informações conhecidas, 4º) Aplicar um balanço, 5º) Buscar valores de parâmetros e 6º) Calcular.

Como se trata de uma situação com a qual estamos bastante familiarizados, normalmente já começamos no 5º passo, percorremos os passos anteriores sem nos darmos conta do que fizemos. Vamos testar a aplicação desta metodologia a um problema mais complexo, em outro domínio, mas, novamente, uma situação com a qual já tenhamos alguma experiência.

Exemplo 1.11: O bloco da Fig. 1.20, inicialmente em repouso, passa a sofrer a ação da força  $F$  constante por um período de tempo  $\Delta t$ . A força de atrito,  $f_{at}$ , não pode ser desprezada, podendo ser calculada a partir da força normal  $N$  e do coeficiente de atrito dinâmico  $\mu$ . Calcule a velocidade final do bloco ( $v$ ). Considere que  $g$  é a aceleração da gravidade.

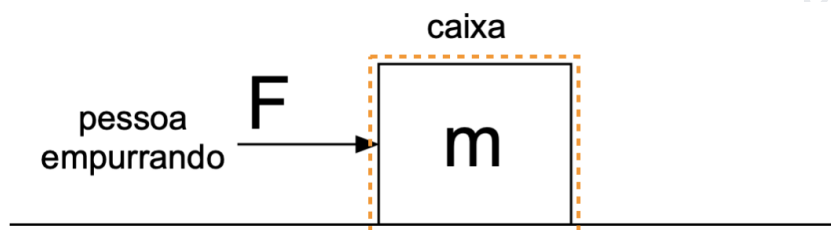


Fig. 1.20 – Bloco sendo movido sobre um plano horizontal com atrito pela ação da força  $F$

Solução:

**1º) Definir o objeto de estudo** – o problema pede para que calculemos a velocidade do bloco e por isso o escolhemos como objeto de estudo (Fig. 1.20) – a fronteira foi representada por uma linha pontilhada;

**2º) Isolar o objeto de estudo** – no caso significa identificar todas as interações do objeto com o exterior, composto pelo agente responsável pela força  $F$ , o plano horizontal e a Terra. Em se tratando de um problema de mecânica, as interações possíveis com o exterior são forças.

Vamos desenhar o diagrama de corpo livre, isto é, um esboço do objeto de estudo no qual identificamos todas as forças externas que agem sobre ele. (Fig. 1.21). Adicionalmente, convém definirmos um sistema de coordenadas, pois força é uma grandeza vetorial.

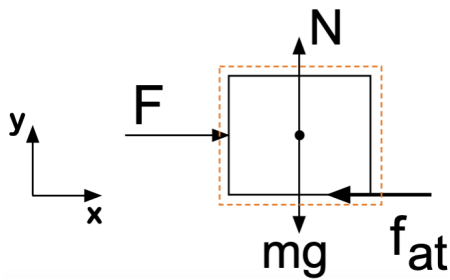


Fig. 1.21 – Diagrama de corpo livre do bloco mostrando o bloco em um instante  $t > 0$

**3º) Verificar que informações são conhecidas.**

No início (instante  $t = 0$ ), temos que  $v = 0$  e  $x = 0$ ;

No fim ( $t = \Delta t$ ), não sabemos quanto vale  $v$  nem  $x$ .

Não conhecemos também a aceleração, esta fará a ponte entre o instante inicial e o final.

Nota: evitamos, propositalmente, a apresentação de unidades, subentende-se, neste exemplo, que todas as unidades são compatíveis entre si.

**4º) Realizar um balanço de quantidade de movimento** – em outras palavras, aplicamos a segunda lei de Newton do movimento para calcular a aceleração (Fig. 1.22). A aceleração fará a "ponte" entre a condição inicial e final.



Fig. 1.22 – A aceleração estabelece a ligação entre os instantes de tempo inicial e final

A segunda lei de Newton diz que a soma vetorial das forças externas que agem sobre o bloco é igual à taxa de variação da quantidade de movimento do bloco, que pode ser calculada pelo produto de sua massa pelo vetor aceleração. A taxa líquida com que quantidade de movimento cruza a fronteira (in – out) é igual a resultante das forças que agem sobre o bloco. Dessa forma, o balanço de quantidade de movimento é igual a:

$$\underbrace{\text{Taxa de variação da QM}}_{\text{dentro do objeto de estudo}} = \underbrace{\sum \dot{Q}M_{in} - \sum \dot{Q}M_{out}}_{\text{fronteira}} = \sum \mathbf{F}_{ext} \tag{1.11}$$

Como a quantidade de movimento é uma grandeza vetorial, é preciso analisar as forças nas direções x e y, respectivamente:

$$m \frac{dv}{dt} = ma = F - f_{at}$$
$$x \quad f_{at} = \mu N$$
$$y \quad N = mg$$

Separando as variáveis e integrando entre o instante inicial ( $t = 0$  e  $v = 0$ ) e o final ( $v(t)$ ), obtemos:

$$\Rightarrow \int_0^v m \, dv = \int_0^t (F - f_{at}) \, dt$$

Como massa e as forças são constantes:

$$mv = m \cdot 0 + (F - f_{at})t$$

ou, numa forma mais compacta :

$$v = v_0 + at$$

Com  $v_0 = 0$  (velocidade inicial) e:

$$a = \frac{F - f_{at}}{m}$$

Como  $F - f_{at}$  é constante, concluímos que a aceleração também o é. Temos, nesse caso, Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV), e a velocidade na condição final  $v$  ( $t = \Delta t$ ) pode ser obtida a partir da velocidade inicial  $v_0$  ( $t = 0$ ) através da aceleração.

Conseguimos responder à pergunta do enunciado sem realizarmos uma única conta, focando apenas na análise conceitual do problema.

Observe que a velocidade final do bloco foi obtida a partir da velocidade inicial com o auxílio de um balanço de quantidade de movimento. No exemplo do saldo bancário também realizamos um balanço! No primeiro exemplo, o balanço foi escrito em termos de um intervalo, entre o início e o fim do mês, no exemplo do bloco, o balanço foi escrito em termos instantâneo, ou em termos de taxas.

**5º) Consultar os valores das grandezas  $g$  e  $\mu$**  – para realizarmos os cálculos finais, vamos precisar desses valores. Podemos admitir que nesse problema em particular eles foram informados no enunciado;

6º) **Calcular a velocidade final** – só nesta etapa nós realizamos as contas.

Note que, em paralelo à solução, tecemos hipóteses. Por exemplo, admitimos (de forma não declarada) que a velocidade final era suficientemente baixa, de tal forma que a força de arrasto aerodinâmico contrária ao movimento pôde ser desprezada em face das demais forças horizontais presentes ( $F$  e  $f_{at}$ ). Esse comentário nos sugere acrescentar um 7º **passo: Listar as hipóteses consideradas**, muito importante para apresentar as limitações da análise desenvolvida. Do ponto de vista do estudante, consideramos muito mais natural coletar todas as simplificações adotadas ao longo da solução do problema e agrupá-las ao final, em contraste com a metodologia usual de listá-las logo no início. As hipóteses nos ajudam a simplificar a análise, mas devem respeitar os aspectos físicos fundamentais do problema.

Agora precisamos estender a nossa análise a problemas no domínio da termodinâmica. Fazendo isso neste momento, seremos apresentados, ainda que superficialmente, aos conceitos fundamentais e ferramentas a serem utilizados.

São estes os passos da metodologia para solução de problemas em termodinâmica:

1º) Definir o sistema ou volume de controle – devemos sempre representá-lo por um esquema e destacá-lo por uma linha pontilhada, representando sua fronteira, vide Fig. 1.23.

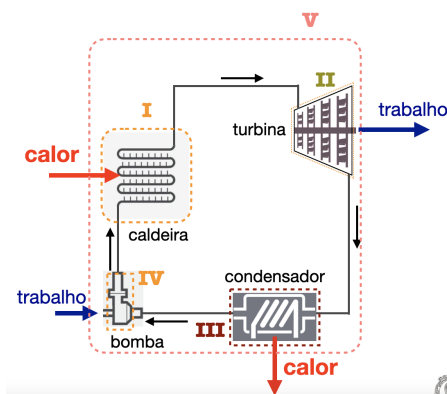


Fig. 1.23 – Volumes de controle I, II e III, sistema IV, todos destacados com suas fronteiras identificadas por linhas pontilhadas. As interações energéticas com a vizinhança estão destacadas

2º) **Isolar o sistema ou volume de controle** – o que significa identificar as interações do sistema com a vizinhança. As interações entre o sistema e a vizinhança podem ser de dois tipos, interações mássicas e interações energéticas, isto é, pode haver entrada ou saída de massa (apenas nos volumes de controle) e energia, o que implica, naturalmente, em massa e

energia cruzando a fronteira. Por sua vez, as interações energéticas podem ser de dois tipos, calor e trabalho, devemos identificá-las nesta etapa. No Cap. 3, definiremos estas duas grandezas e aprenderemos a distingui-las. Por enquanto, é suficiente identificarmos e destacarmos as entradas e saídas de energia.

**3º) Verificar que informações são conhecidas nos estados inicial, intermediários (se for o caso) e final** – a meta desta etapa é determinar quais propriedades estão faltando em cada um dos estados. O postulado de estado será nosso aliado, procuraremos sempre identificar duas propriedades intensivas independentes para cada estado. Nos exemplos 1.12 e 1.13, pela aplicação de um balanço, determinamos as informações que faltavam no estado final. Em termodinâmica, não será diferente, realizaremos balanços (vide 4º passo) e analisaremos se no processo entre dois estados alguma propriedade permaneceu constante. Em síntese, nesta etapa temos que responder às seguintes perguntas:

- a) alguma propriedade permaneceu constante no processo?
- b) alguma propriedade pode ser determinada por um balanço?
- c) temos as informações necessárias para o cálculo das interações energéticas?

Nota: para sistemas com restrições internas, o postulado de estado tem que ser aplicado para cada subsistema. Adicionalmente, devemos buscar por equações de compatibilização, por exemplo, qual a relação entre a pressão, temperatura e a variação de volume entre subsistemas que compartilhem a mesma restrição;

**4º) Realizar um ou mais balanços** – os balanços aplicáveis em termodinâmica são os balanços de massa, energia e entropia. Uma outra forma de expressar a mesma ideia é dizer que aplicaremos as leis fundamentais de conservação da massa, 1ª lei da termodinâmica ou conservação da energia) e 2ª lei da termodinâmica. A lista de leis fundamentais será ampliada ao falarmos de reações químicas. Os balanços podem ser escritos em dois formatos, de acordo com a informação desejada: em termos de um intervalo (Eq. 1.12) ou instantâneo (Eq. 1.13). Utilizamos o primeiro formato na solução do Exemplo 1.12, e o intervalo era de um mês – estávamos calculando a variação do nosso saldo neste período. Já no Exemplo 1.#, utilizamos o segundo para calcular a aceleração instantânea do bloco. Posteriormente, integramos nosso resultado para obter a velocidade final (avaliada ao término do intervalo de tempo  $\Delta t$ ). Veja, podemos passar de um formato a outro: integrando a expressão 1.12 ao longo do intervalo desejado, chegamos em 1.13. Em ambos os formatos, aparece um termo




referente à geração da propriedade em questão, se analisarmos o saldo do país inteiro, o termo representaria o que acontece, quando, por exemplo, a Casa da Moeda imprime dinheiro ou, quando alguém inutiliza uma nota ("geração negativa" ou chamado de sorvedouro). Nas equações de conservação da massa e energia o termo de geração é sempre nulo, isto é, massa e energia não são criadas ou destruídas (não trataremos de reações nucleares ou efeitos relativísticos), mas no balanço de entropia pode haver geração desta grandeza.

**intervalo** 

$$\underbrace{\text{Propriedade}_f - \text{Propriedade}_i}_{\text{dentro do sistema}} = \underbrace{\sum_{\text{in}} - \sum_{\text{out}}}_{\text{fronteira}} + \underbrace{\text{Geração}}_{\text{dentro}}$$

Eq. 1.12

**instantânea** 

$$\underbrace{\text{Taxa de variação da propriedade}}_{\text{dentro do volume de controle}} = \underbrace{\dot{\sum}_{\text{in}} - \dot{\sum}_{\text{out}}}_{\text{fronteira}} + \underbrace{\text{Geração}}_{\text{dentro}}$$

Eq. 1.13

**5º) Determinar os valores de propriedades** – precisamos determinar valores de propriedades para cada estado, a partir de um conjunto mínimo de propriedades, suficientes para definir um estado. Usaremos como ferramenta de apoio o chamado postulado de estado. Relações entre propriedades como pressão, temperatura, volume e massa podem ser expressas em termos de equações ou tabelas de propriedades termodinâmicas, conforme veremos no Capítulo 2.

**6º) Cálculo** – apenas após esboçarmos o exercício é que devemos realizar os cálculos necessários, destacamos a importância de escrevermos as unidades de todas as grandezas!

**7º) Listar as hipóteses simplificadoras consideradas** – tradicionalmente, hipóteses costumam ser listadas no início dos exercícios, porém, enquanto aprendemos, o que acontece na prática é irmos considerando simplificações de acordo com a necessidade, à medida que resolvemos o exercício – dificilmente temos no início uma visão completa do conjunto de hipóteses! Dessa forma, consideramos mais natural coletarmos as hipóteses empregadas e as agruparmos no final do exercício.

Vamos ter inúmeras oportunidades de exercitar esta metodologia para solução de problemas em termodinâmica, a seguiremos na solução de todos os nossos exemplos. Como ressaltado, a aplicação da metodologia nos ajuda bastante na solução, apoiando-os em sua sistematização e organização das nossas ideias e recursos.

### Considerações sobre a Seleção do Sistema

Como dito anteriormente, toda análise termodinâmica começa com a seleção do sistema. Um dos erros mais comuns cometidos é pular essa etapa, tornando ambígua a aplicação das leis fundamentais, o que frequentemente evolui para uma análise incorreta do problema. Esse comportamento resulta provavelmente do fato de que, no início, os exercícios e problemas que enfrentamos são simples, e a escolha do sistema costuma ser um tanto quanto óbvia. Vamos, entretanto, nos acostumar desde cedo a definir claramente o sistema a ser utilizado. A escolha do sistema ou do volume de controle não altera o resultado da análise, porém, pode torná-la mais complexa e trabalhosa ou nos conduzir a um caminho sem saída. De forma a ilustrar esse ponto, vamos considerar mais uma vez um exemplo de Mecânica com o qual já estamos mais familiarizados. Considere a situação representada na Fig. 1.24a, em que dois blocos encostados um no outro são empurrados por uma força  $F$  horizontal conhecida sobre um plano também horizontal sem atrito.

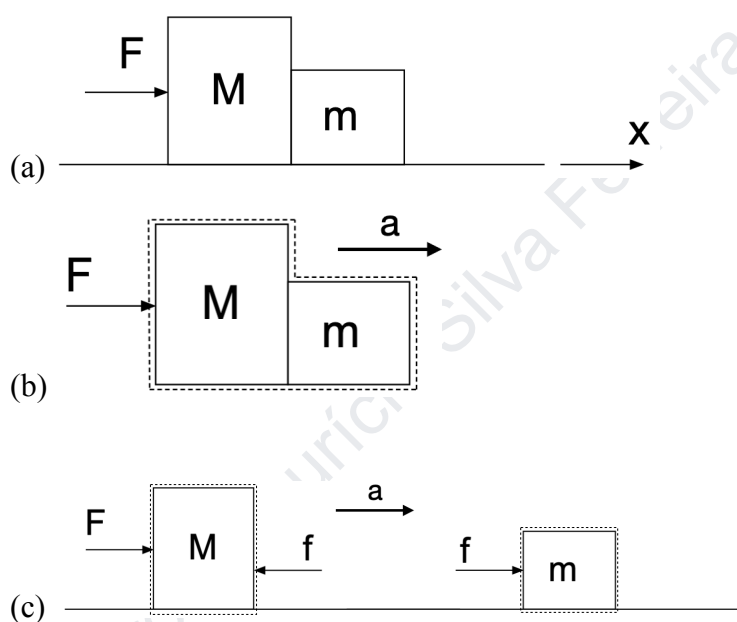


Fig. 1.24 – (a) Bloco inicialmente em repouso, passa a sofrer a ação da força  $F$  e desliza sem atrito sobre o plano horizontal, (b) Sistema que inclui ambas as massas e (c) Sistemas separados.

Desejamos calcular a aceleração  $a$  do conjunto. Vamos resolver esse exemplo de duas formas, cada uma partindo de uma escolha diferente de sistema. Vamos começar considerando um sistema formado pelos dois blocos, Fig. 1.24b e aplicar a 2ª Lei de Newton para calcular a aceleração. De acordo com esta, a força resultante que age sobre o sistema é igual ao produto

de sua massa pela aceleração; diz, ainda, que a aceleração terá a mesma direção e sentido da resultante. Nesse caso, a resultante sobre o sistema é igual a  $F$  e sua massa  $M + m$ :

$$(M + m)a = F$$
$$a = \frac{F}{M + m} \quad (1.12)$$

De forma direta, fomos capazes de determinar a aceleração do conjunto, isto foi possível pois conhecíamos as interações do sistema com a vizinhança, no caso, apenas a força  $F$ .

Agora, resolveremos o problema considerando um novo sistema formado apenas pelo bloco maior, Fig. 1.24c. Note que agora devemos considerar a força  $f$  que o bloco menor exerce sobre o maior. Podemos escrever:

$$F - f = ma \quad (1.13)$$

Como a força  $f$  é desconhecida, não conseguimos calcular a aceleração. Somos forçados a olhar para o outro bloco, o que equivale a dizer que vamos considerá-lo como um novo sistema. A 2ª Lei de Newton pode então ser escrita como:

$$f = ma \quad (1.14)$$

Substituindo a Eq. 1.14 na 1.13, chegamos à mesma expressão 1.12 obtida anteriormente a partir do sistema formados pelos dois blocos:

$$a = \frac{F}{M + m}$$

Chegamos, assim, ao mesmo resultado, porém através de um caminho mais longo.

Inicialmente, quando colocamos a fronteira em torno de todo o conjunto, Fig. 1.24b, a força  $f$ , desconhecida, passou a ser uma força interna ao sistema, não sendo mais um obstáculo para a solução. No contexto de termodinâmica, como podemos então selecionar um sistema adequado para uma análise? Considere, em primeiro lugar, o objetivo da análise. No exemplo anterior, desejávamos saber qual era a aceleração do conjunto, o que sugere considerar um sistema que engloba os dois corpos. Assim, a definição do sistema (sistema fechado ou volume de controle) está relacionada diretamente à pergunta que desejamos responder. Nem sempre a seleção do sistema será tão direta assim, podendo haver mais de uma possibilidade; para esses casos, posicione a fronteira como lhe parecer mais conveniente, identifique quais variáveis necessárias à solução do problema são desconhecidas ou sobre as quais você não

está seguro de como obtê-las. Se houver variáveis nessas condições, expanda a fronteira do sistema de forma a torná-las internas ao sistema. Em termos da nossa metodologia para solução de problemas termodinâmicos, significa avançarmos até o 3º passo, verificar se os estados termodinâmicos podem ser identificados e as interações calculadas, e, em se identificando lacunas, retornar ao 1º passo, selecionando um nova fronteira. No exemplo anterior, caso tivéssemos começado a análise pelo sistema da Fig. 1.24c, identificaríamos que a força  $f$  na fronteira, indispensável para a análise, era desconhecida. De acordo com a dica, expandiríamos a fronteira de forma a torná-la uma força interna, e chegaríamos ao sistema da Fig. 1.24b. Conforme resolvemos exercícios, aumentamos nossa experiência e habilidade em posicionar a fronteira. É bastante instrutivo tentar resolver o mesmo exercício utilizando-se outras opções de sistema.

### 1.7 Ferramentas da termodinâmica

Neste capítulo introdutório apresentamos praticamente todas as definições e leis fundamentais que precisaremos. Como complemento da metodologia para solução de problemas, agrupamos o ferramental em duas categorias:

- 1) *Análise termodinâmica* – conjunto de ferramentas utilizadas para a análise conceitual do problema, compreende as leis fundamentais, o postulado de estado e os diagramas de propriedades. São empregadas nas etapas de 1 a 4 da nossa metodologia. As leis fundamentais, ou balanços, são utilizadas, em geral, para determinação de propriedades faltantes de um dado estado ou cálculo das interações energéticas. O postulado de estado, como vimos, nos permite avaliar quais estados estão definidos, ou não. A representação dos processos em diagramas de propriedades – por enquanto utilizamos apenas o diagrama pressão por volume – nos ajuda a visualizar o que está acontecendo e a identificar como definir os estados remanescentes, preparando o terreno para a avaliação das propriedades, etapa 5.
- 2) *Cálculo de propriedades termodinâmicas* – conjunto de tabelas de propriedades termodinâmicas, equações de estado ou ferramentas digitais que nos permitem avaliar numericamente propriedades faltantes em cada estado a partir do conhecimento de duas propriedades intensivas independentes. Trabalharemos com três modelos para representar o comportamento termodinâmico das substâncias, explicados no Cap. 2 – Substância Pura: substância pura com ou próxima da mudança de fase, gás ideal e substância incompressível.

Achamos importante fazer esta distinção entre esses dois grupos de ferramentas pois elas requerem habilidades diferentes na sua utilização. Assim sendo, devemos nos preparar de formas diferentes para usar cada tipo. As ferramentas de análise termodinâmica são conceituais e para utilizá-las com desenvoltura e segurança precisamos sempre resolver exercícios de forma reflexiva, entendendo o que está por trás de cada passo e sem buscar memorizar "tipos" similares de problemas e imitar a solução. Pensamos em problemas e em sequências de exercícios para apoiá-los nesta sua jornada de aprimoramento. Sempre iniciamos a solução de um problema utilizando estas ferramentas. Em contraste, as ferramentas de cálculo de propriedades termodinâmicas são sempre as últimas a serem utilizadas, logo após termos "derrotado moralmente" o exercício. Hoje existem programas de computador e "apps" que nos permitem calcular as propriedades, basta conhecermos duas propriedades intensivas independentes relativas a cada estado – teremos elencados estes pares de propriedades ao seguirmos os passos 1 a 4. Neste livro, avaliamos estas propriedades utilizando tabelas de propriedades termodinâmicas e equações de estado, o que nos permitirá ter uma visão completa do processo e nos dará independência. O cálculo de propriedades, como o próprio nome indica, é um processo mecânico, e, portanto, para que adquiramos fluência é preciso repetição, isto é, o que implica em resolver muitos exercícios. Para maior aproveitamento e usufruto da metodologia, recomendamos visitar novamente os itens 1.6. e 1.7 sempre que finalizar a leitura de um novo capítulo.

Na Tabela 1.7, é apresentado um resumo com as ferramentas disponíveis agrupadas nestas duas categorias.

Tabela 1.7 – Quadro resumo com as ferramentas da termodinâmica

<b>Análise termodinâmica</b>	<b>Cálculo de propriedades termodinâmicas</b>
<p>– <i>Postulado de Estado</i></p> <p>– <i>Balanços de</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Massa (conservação da massa);</li> <li>● Energia (conservação da energia - 1ª lei da termodinâmica);</li> <li>● Entropia (2ª lei da termodinâmica).</li> </ul> <p>– <i>Representação de processos em diagramas de propriedades</i></p>	<p>– <i>Modelos do comportamento termodinâmico de substâncias puras</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Substância pura com ou próxima da mudança de fase;</li> <li>● Gás ideal;</li> <li>● Substância incompressível.</li> </ul>

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão x volume, temperatura x volume, temperatura x entropia, entalpia x entropia e pressão x entalpia</li> </ul> |  |
|--|--|

### 1.8. Componentes Básicos de Sistemas Termofluidos

Neste item são apresentados alguns componentes básicos frequentemente encontrados em sistemas termofluidos: tubo, bomba, compressor, turbina hidráulica, turbina a vapor, trocador de calor, caldeira e válvula. O objetivo nesta seção é descrever resumidamente o comportamento termodinâmico geral destes dispositivos, não serão discutidos os tipos de cada equipamento. Por enquanto, serão analisados apenas como pressão e volume específico variam entre a(s) entrada(s) e saída(s) desses componentes. Posteriormente, visitaremos novamente o tema, ampliando a lista e avaliando como se comportam temperatura, entalpia e entropia específicas.

#### Tubo

Componente utilizado para transporte de fluido (gás, líquido ou uma mistura líquido-gás) entre duas seções, representado esquematicamente por uma linha. Possuem uma única entrada e saída, tendo, normalmente, seção circular uniforme ao longo de seu comprimento, podendo ser de diversos materiais, como aço, cobre ou algum polímero, por exemplo. O conjunto de tubos que compõem a instalação é chamado de *tubulação*. Para um tubo horizontal de seção transversal uniforme, a pressão diminui linearmente entre a entrada e saída por causa do atrito no escoamento do fluido. Esta queda de pressão, comumente expressa em termos da perda de carga\*, é, frequentemente, bem menor que os valores de pressão no tubo. Sendo assim, ela costuma ser desprezada em uma primeira análise termodinâmica (vide Fig. 1.25). Neste livro, devemos apenas nos preocupar com a perda de carga quando o enunciado de algum problema explicitamente ressaltar a sua importância. Em síntese, para fins didáticos, podemos considerar que o tubo não altera o estado do fluido – o estado na saída é igual ao da entrada.

\*Queda de pressão ( $\Delta P$ ) e perda de carga ( $h_L$ ) são conceitos diferentes, mas um pode ser escrito em função do outro:

$$\Delta P = \rho g h_L \quad (1.15)$$

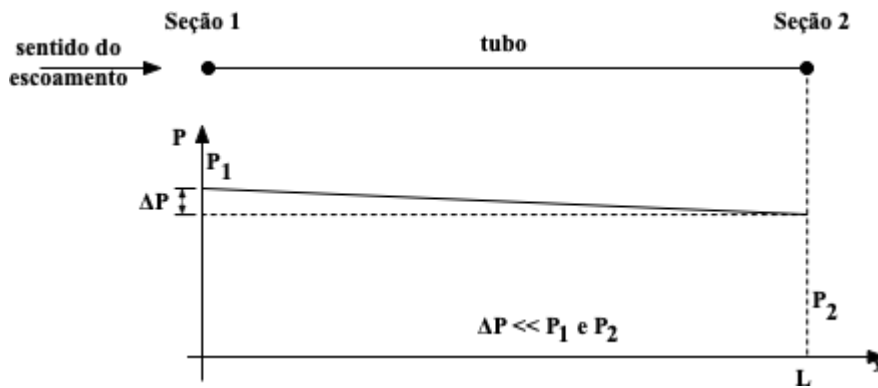


Fig. 1.25 – Variação de pressão ao longo de um tubo horizontal de seção uniforme: ilustração da importância relativa da queda de pressão por causa do atrito no escoamento.

### Bomba

Dispositivo utilizado para transporte de líquidos através de uma tubulação, vencendo a perda de carga. Uma bomba é composta por uma entrada e uma saída, sendo representada conforme Fig. 26. Para seu funcionamento é necessário fornecer energia, o que é feito por intermédio de um eixo rotativo acoplado, usualmente, em um motor elétrico não representado na figura.

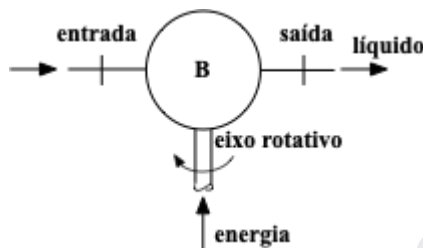


Fig. 1.26 – Representação esquemática de uma bomba.

Usualmente, o estado na entrada é conhecido e o estado na saída deve ser determinado. A pressão na saída costuma ser conhecida e é maior que a da entrada. O volume específico de um líquido, como vimos, praticamente não se altera com a variação de pressão. Dessa forma, assumimos que o volume específico na saída é aproximadamente igual ao da entrada.

### Compressor

Dispositivo utilizado para mover um gás por uma tubulação ou para encher um reservatório. Assim como na bomba, o estado na saída não está, em geral, determinado; apenas a pressão na saída costuma ser conhecida. Novamente, é necessário fornecer energia para seu funcionamento, através de um eixo acoplado a um motor elétrico. O gás sofre uma

compressão ao passar pela máquina, isto é, seu volume específico diminui. Representaremos o compressor conforme Fig. 1.26.

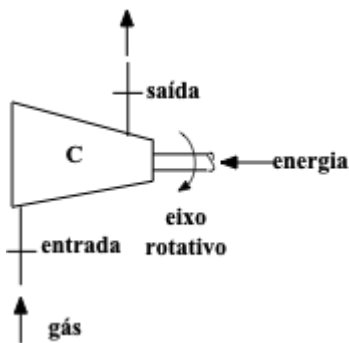


Fig. 1.26 – Representação esquemática de um compressor.

### Turbina Hidráulica

Dispositivo mecânico que se utiliza do movimento de um líquido para mover seu eixo de saída (girá-lo), que por sua vez, está conectado a um gerador elétrico (Fig. 1.27). Essa definição será melhorada quando aprendermos sobre trabalho e energia. O estado na entrada e na saída costuma ser conhecido. Pelo fluido de trabalho ser um líquido, podemos considerar que o volume específico na saída é igual ao da entrada.

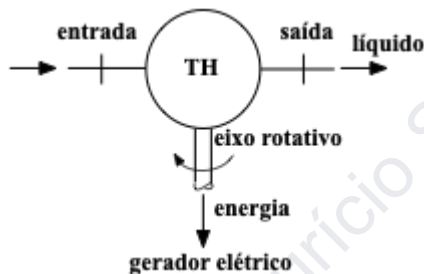


Fig. 1.27 – Representação esquemática de uma turbina hidráulica.

### Turbina a vapor

Dispositivo mecânico que se utiliza de vapor, usualmente de água, ou com menor frequência de um fluido orgânico, para produzir rotação de seu eixo de saída (Fig. 1.28). O estado na entrada é conhecido e o estado na saída deve ser determinado; em geral, tem-se uma mistura líquido-vapor. A pressão na entrada é maior que na saída, pois o vapor se expande ao atravessar a turbina – seu volume específico aumenta.



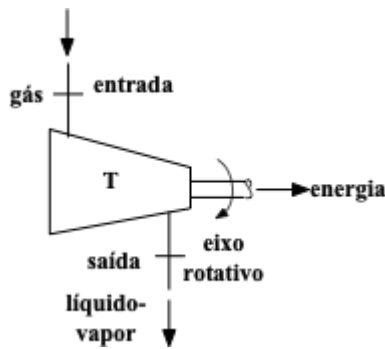


Fig. 1.28 – Representação esquemática de uma turbina a vapor.

### Trocador de calor

Dispositivo utilizado para aquecer ou resfriar um fluido. Um trocador de calor é composto por duas correntes de fluidos (em geral diferentes), um dito quente e o outro frio; as duas correntes não se misturam (Fig. 1.29). Energia é transferida do fluido quente para o frio. Um exemplo de trocador de calor é o chamado radiador de um carro movido a motor de combustão interna. O fluido quente é o líquido que refrigerou o motor (uma mistura de água com etileno-glicol). Este fluido, por sua vez, também deve ser resfriado, pela ação do fluido frio, o ar externo.

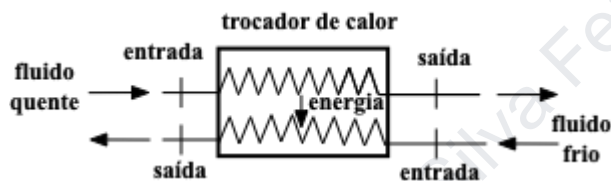


Fig. 1.29 – Representação esquemática de um trocador de calor.

De forma a aumentar a área de contato entre os fluidos, intensificando a troca de calor entre ambos, as correntes percorrem um longo e sinuoso trajeto dentro do trocador de calor, resultando em uma diminuição da pressão ocasionada pelo atrito no fluido ao longo do percurso. Assim, a pressão de saída de ambos os fluidos, quente e frio, é menor do que a respectiva pressão na entrada. Da mesma forma que nos tubos, estas variações de pressão costumam ser bem menores do que os valores das pressões em si; a menos que informado o contrário, consideraremos cada corrente isobárica.

Trocadores de calor podem ser usados para promover a mudança de fase de um líquido ou vapor. Quando isso acontece, recebem nomes especiais e autoexplicativos: condensadores e evaporadores, respectivamente. Em um condensador, o fluido "quente" na entrada do equipamento é um gás e na saída um líquido. Já no evaporador, o fluido "frio" entra como

líquido e deixa o trocador como gás. As considerações anteriores sobre a pressão nas correntes continuam válidas.

### Válvula

Dispositivo utilizado para restringir, controlar ou direcionar a passagem de uma corrente de fluido. Existem diversos tipos de válvulas, mas aqui não vamos nos ater aos aspectos construtivos ou aplicações de cada, focaremos apenas nas características comuns a todas. Essencialmente, uma válvula executa sua função através da alteração da área de passagem do fluido, com a abertura ou fechamento da válvula. Quando totalmente fechada, impede o escoamento do fluido e, quando totalmente aberta, permite a máxima vazão mássica. A *vazão mássica* é definida como a massa de matéria que atravessa uma determinada área por unidade de tempo (no SI tem unidade de kg/s). De forma análoga, *vazão volumétrica* é definida como o volume de matéria que atravessa a mesma área (no SI tem unidade de m<sup>3</sup>/s).

No arranjo mais comum, uma válvula é montada em série com a tubulação, isto é, a mesma vazão que atravessa o tubo também atravessa a válvula, conforme representado na Fig. 1..

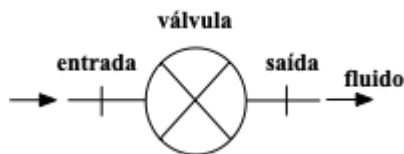


Fig. 1.30 – Esquema de válvula montada em série com tubo.

Ao contrário da simplificação adotada para tubos, a diferença de pressão entre a entrada e a saída da válvula não pode ser desprezada em face do valor da pressão na entrada. Aliás, é justamente esta diferença, ajustada através da variação da área de restrição à passagem do fluido, que regula a vazão mássica da corrente. Em síntese, a pressão na saída será sempre menor que a pressão na entrada.

Uma válvula pode ser utilizada para limitar a pressão, sendo chamada, neste caso, de *válvula limitadora de pressão* (Fig. 1.31). Um exemplo deste tipo é encontrado em uma panela de pressão (Fig. 1.32), estamos falando daquele bloco metálico flutuante e rotativo sobre a tampa da panela, que abre quando uma determinada pressão interna é atingida; nesta condição, há a liberação de gotículas de líquido e vapor d'água, com a emissão daquele ruído característicos destas panelas. A pressão para abertura da válvula é ajustada através da seleção de uma massa adequada para o contrapeso.

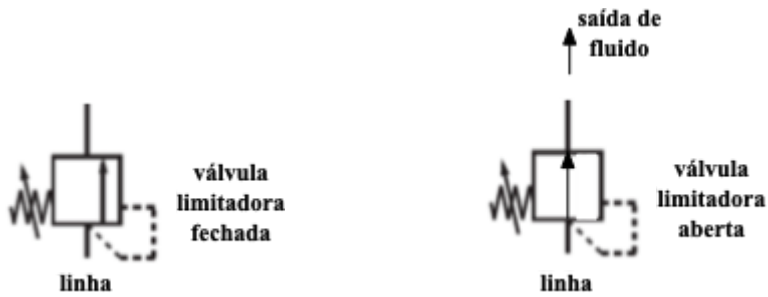


Fig. 1.31 – Representação esquemática de uma válvula limitadora de pressão: (a) válvula fechada, (b) válvula aberta. A linha pontilhada indica a tomada de pressão a montante e a mola com seta a resistência regulável à abertura da válvula.



Fig. 1.32 – Panela de pressão e suas válvulas limitadoras de pressão.

Uma *válvula reguladora de pressão* (Fig. 1.33a) tem a função de manter a pressão do fluido a jusante em um determinado valor; quando a função é manter a pressão a montante do dispositivo, a válvula é chamada de *válvula de contrapressão* (back-pressure, Fig. 1.33b).

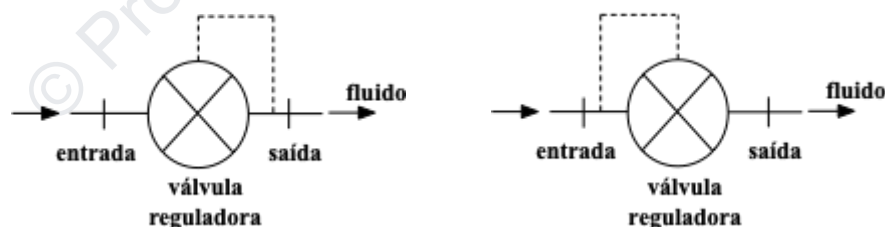


Fig. 1.33 – Representação esquemática de válvulas reguladoras de pressão: (a) regula a pressão a jusante, (b) regula a pressão a montante. A linha pontilhada indica qual pressão é usada para referência no controle.

Devemos observar as diferenças entre a válvula reguladora e a limitadora. A primeira é montada em série com a tubulação e está sempre em operação, mantendo aproximadamente constante a pressão a montante ou a jusante; para que funcione é preciso que haja escoamento. Já a limitadora opera apenas quando a pressão atinge o valor máximo, abrindo uma passagem para o fluido para que ele deixe o circuito, sendo liberado para o ambiente ou tanque.

Existem também as válvulas de retenção (Fig. 1.34), que são dispositivos que permitem o escoamento do fluido em apenas uma direção.

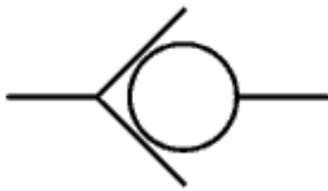


Fig. 1.34 – Representação esquemática de uma válvula de retenção.

Outros tipos de válvulas são encontrados na prática de engenharia, como válvulas direcionais (direcionam o fluxo) e válvulas reguladoras de vazão, porém destacamos apenas aquelas que mais comuns nos circuitos que analisaremos.

### **Caldeira**

Dispositivo dedicado à produção de vapor, em geral, a pressão elevada. A caldeira é alimentada com líquido, sendo água a substância mais comum, produzindo vapor a custa da queima de combustível, reação de fissão nuclear ou energia solar. O equipamento nada mais é do que um trocador de calor dedicado, sendo o fluido a substância vaporizada e o fluido quente, gases resultantes da combustão, por exemplo. Conta com uma entrada de líquido e uma saída de vapor, sendo que não costuma-se representar a corrente quente, há, apenas uma indicação da energia transferida entre as correntes (Fig. 1.35). Em se tratando de um trocador de calor, a pressão do vapor na saída é igual à de entrada, porém o volume específico é maior – além de haver um gás na saída, sua temperatura é maior que a do líquido na entrada. Dentre os tipos de caldeira, destacam-se as aquatubulares, empregadas quando se deseja produzir grandes quantidades de vapor (elevada vazão mássica) a alta pressões. Nesse arranjo, o fluido de trabalho escoo pelo interior de diversos tubos de pequeno diâmetro, proporcionando uma elevada área para troca térmica, enquanto os gases de combustão aquecidos escoam em torno dos tubos.

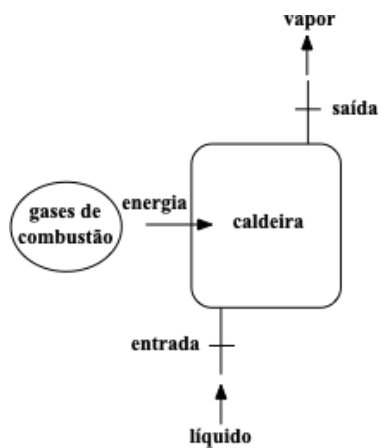


Fig. 1.35 – Representação esquemática de uma caldeira

## Referências

- H. B. Callen, “Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics,” 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1960.
- Eastop, T. D., Croft, D. R., 1996, Energy Efficiency for Engineers and Technologists, Addison Wesley Longman Limited.
- Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. – Rio de Janeiro : EPE, 2021.
- J.W. Tester and M. Modell, Thermodynamics and its applications, 3rd Edition, Prentice-Hall, 1997.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), Sistema Internacional de Unidades, 1a edição brasileira da 8a edição do BIPM, 2012.
- Sadiq J. Zarrouk, Hyungsul Moon, Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review, Geothermics, Volume 51, Pages 142-153, 2014.
- Ragone, D., "Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles," SAE Technical Paper 680453, 1968, <https://doi.org/10.4271/680453>.
- Levi, G. and Foschi, E. Indication of anomalous heat energy production in a reactor device containing hydrogen loaded nickel powder, 2013.
- International Energy Agency. Projected costs of generating electricity, 2020.
- Lalande, A. Vocabulário de Técnico e Crítico de Filosofia, Martins Fontes, 1999.
- INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012), 2012.

## Problemas - Introdução e Conceitos Fundamentais

*volume específico*

1.1\*) A seguir é apresentada uma parte da tabela de vapor de amônia contendo valores de volume específico em função da temperatura e pressão.

P=150 kPa	
T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)
-20	0,7977
-10	0,8336
0	0,8689

P=100 kPa	
T / °C	v / (m <sup>3</sup> /kg)
-20	1,2101
-10	1,2621
0	1,3136

Estime o volume específico do vapor de amônia nos seguintes estados:

- (a) 150 kPa e -10°C (Resp.0,8336m<sup>3</sup>/kg)
- (b) 150 kPa e -5°C (Resp.0,8513m<sup>3</sup>/kg)
- (c) 125 kPa e -20°C (Resp.1,004m<sup>3</sup>/kg)
- (d) 100 kPa e -17°C (Resp.1,226m<sup>3</sup>/kg)
- (e) 130 kPa e -15 °C

1.2\*) Utilizando a tabela do exercício anterior, estime a temperatura do vapor de amônia em:

- (a) P=100 kPa e v=1,2101m<sup>3</sup>/kg (Resp.-20°C)
- (b) P=150 kPa e v=0,8m<sup>3</sup>/kg (Resp.-19,63°C)
- (c) P=125 kPa e v=0,95m<sup>3</sup>/kg (Resp.)

1.3\*\*) Deseja-se comprimir uma determinada massa de ar de 1 bar para 10 bar. Em análise estão dois processos diferentes:

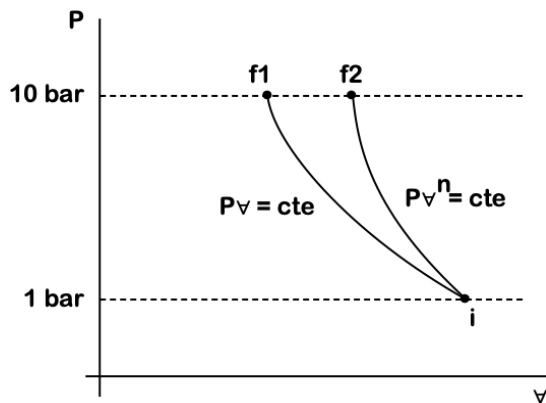
- 1) A relação pressão-volume durante a compressão obedece a relação  $Pv = \text{constante}$ ;

2) A relação pressão-volume durante a compressão obedece a relação  $Pv^n = \text{constante}$ , sendo  $n = 1,4$ .

Represente os processos em um diagrama  $P-v$ . Qual dos processos resulta em um menor volume específico do ar no final?

Solução

Diagrama  $P-v$ :



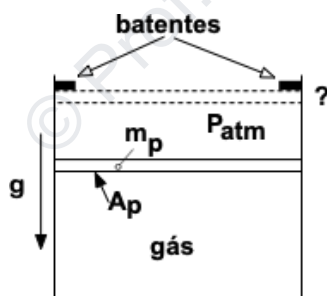
Processo 1:  $P_1 V_1 = P_2 V_2 \Rightarrow V_2 = V_1 P_1 / P_2 = V_1 / 10$  Portanto  $v_2 = v_1 / 10$

Processo 2:  $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \Rightarrow V_2 = V_1 (P_1 / P_2)^{1/n}$  Portanto  $v_2 = v_1 / 5,2$

O processo que conduz ao menor volume específico é o primeiro.

pressão

1.4\*\*) Um conjunto cilindro-êmbolo conta com batentes superiores que limitam o movimento do pistão, vide figura. O gás no interior do cilindro está  $P_1 = 120 \text{ kPa}$  e ocupa um volume  $v_1 = 0,01 \text{ m}^3$ . A pressão atmosférica local é de  $100 \text{ kPa}$ . A massa do pistão é  $m_p = 31 \text{ kg}$  e sua área  $A_p = 0,05 \text{ m}^2$ . O pistão está encostado nos batentes? Justifique sua resposta.



Solução:

Pressão exercida pela contribuição do pistão + atmosfera:

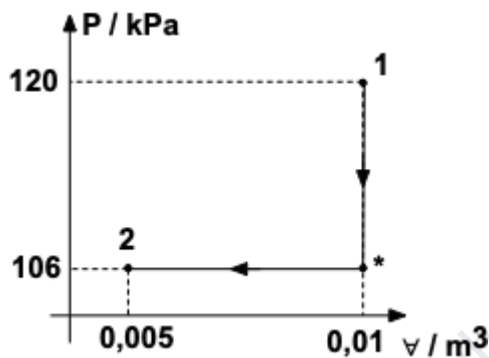
$$P = P_{atm} + m_p \cdot g / A_p = 100 \text{ kPa} + 31 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 / 0,05 \text{ m}^2 \cdot (10^{-3} \text{ kPa/Pa}) = 106 \text{ kPa}$$

Como a pressão no gás é maior que 106 kPa, conclui-se que o pistão encosta nos batentes, sendo estes responsáveis por aplicar a força adicional sobre o pistão.

1.6\*\*) No exercício 1.5, o gás é resfriado até que seu volume seja metade do anterior ( $v_2 = 0,5 v_1$ ). No estado 2, a pressão do gás é  $P_2 = 106$  kPa. Represente o processo de 1 para 2 no diagrama P- $v$ .

Solução:

No exercício 1.5 o pistão estava encostado nos batentes, como houve redução de volume, o pistão não toca mais os limitadores. Vamos representar no diagrama um estado intermediário (\*), delimitando o fim de um processo a volume constante (enquanto a pressão cai, mas o pistão ainda está encostado nos batentes) e início de outro a pressão constante (a partir do momento em que o pistão toca levemente nos batentes, sem que estes apliquem uma força sobre o primeiro).



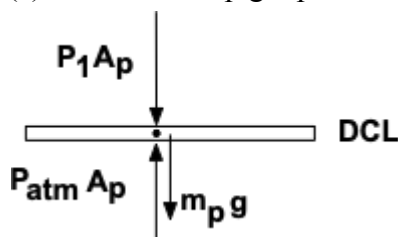
1.7\*\*) Um conjunto cilindro-êmbolo vertical contém ar. A massa do pistão é  $m_p = 31$  kg e sua área  $A_p = 0,05$  m<sup>2</sup>. A pressão atmosférica é  $P_{atm} = 100$  kPa. Considerando em todos os casos a condição de equilíbrio, determine (a) a pressão do ar, (b) a pressão do ar se o conjunto for rotacionado em 90°, (c) e se for rotacionado em 180°.

Solução:

(a)  $P = P_{atm} + m_p \cdot g / A_p = 106$  kPa

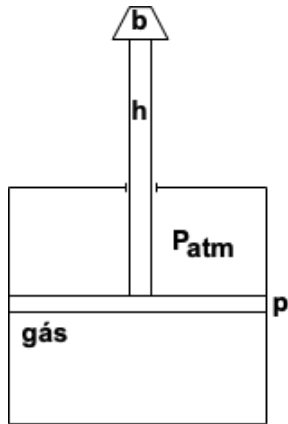
(b)  $P = P_{atm} = 100$  kPa

(c)  $P = P_{atm} - m_p \cdot g / A_p = 94$  kPa

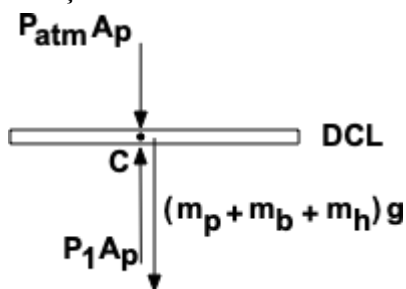




1.8\*\*\*) O pistão (p) representado na figura sustenta o bloco (b) por intermédio da haste (h). A massa do pistão é  $m_p$ , do bloco  $m_b$  e da haste  $m_h$ . A área do pistão é  $A_p$  e da haste  $A_h$ . O espaço anular entre a haste e o cilindro é aberto, de modo que a pressão é igual à atmosférica ( $p_{atm}$ ). Determine a pressão do gás no interior do cilindro. Repita a análise considerando que o espaço anular está evacuado.



Solução:



$$P A_p = P_{atm} A_p + (m_p + m_h + m_b) g$$

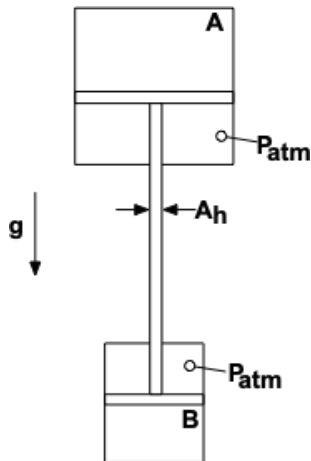
$$P = P_{atm} + (m_p + m_h + m_b) g / A_p$$

Para o caso em que o espaço anular está evacuado:

$$P A_p = P_{atm} A_h + (m_p + m_h + m_b) g$$

$$P = P_{atm} A_h / A_p + (m_p + m_h + m_b) g / A_p$$

1.9\*\*\*) Considere o sistema ilustrado na figura. (a) Determine a pressão do gás no cilindro B para que os pistões permaneçam na configuração ilustrada. (b) Determine novamente  $P_B$ , considerando que o conjunto rotaciona  $90^\circ$  no sentido horário. Considere que a massa total dos pistões e haste é  $M$ .



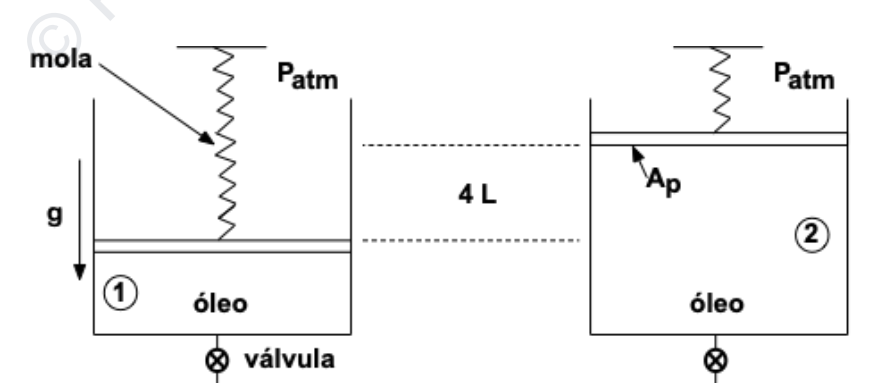
Solução:

$$P_A \cdot A_A - P_B \cdot A_B + P_{atm}(A_B - A_A) + Mg = 0$$

$$P_B = P_A \cdot A_A / A_B - P_{atm} \cdot (A_A - A_B) / A_B + Mg / A_B$$

1.10\*\*\*) Um acumulador hidráulico é um dispositivo empregado em hidráulica industrial com diversas funções: suprir a demanda extra de fluido para uma máquina, manter a pressão na linha hidráulica ou absorver flutuações de pressão. O fluido é chamado de fluido hidráulico, sendo normalmente um óleo derivado do petróleo ou sintético. Dentre os diversos tipos de acumuladores, nos interessa analisar o acumulador de mola, representado na figura. No estado inicial (1), o fluido no acumulador está a 1,2 bar e a mola está relaxada. Quando carregado (2), a pressão deve ser de pelo menos 250 bar e o dispositivo deve armazenar um adicional de 4 L em relação ao volume inicial. O pistão tem um diâmetro de 200 mm.

- Determine o valor da constante da mola para atender à demanda;
- Por questão de custo, desejamos trabalhar com um modelo de mola facilmente encontrado no mercado – provavelmente não acharemos uma mola com a exata especificação calculada em (a). Sendo assim, pergunta-se: devemos escolher uma mola com constante elástica menor ou maior? Justifique sua resposta.



## Solução

(a)  $P_2 = P_1 + kdx/A_p$ , note que  $P_1$  já incorpora o efeito da pressão atmosférica e a contribuição do peso do pistão.

Escrevendo a contribuição da mola em função da variação de volume:

$$P_2 = P_1 + kdV/A_p^2$$

Podemos isolar  $k$  da equação anterior:

$$k = dP \cdot A_p^2 / dV$$

$$A_p = \pi \cdot D_p^2 / 4 = 3,142 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$k = (250 - 1,2) \cdot 100 \cdot (3,142 \times 10^{-3} \text{ m}^2)^2 / 0,004$$

$$k = 6139 \text{ kN/m}$$

(b) Devemos escolher uma mola com constante maior. Se impusermos no cálculo o volume a ser armazenado, a pressão final será uma consequência. Escolhendo uma mola com  $k$  maior, teremos uma pressão maior que 250bar, atendendo aos requisitos de projeto.

1.11) Na figura a seguir é ilustrado um tanque contendo combustível e parte do sistema auxiliar de esvaziamento. Quando é necessário esvaziar o tanque rapidamente, nitrogênio ( $N_2$ ) a 10 bar é alimentado pela parte superior do tanque. Durante o processo, a pressão na câmara superior é mantida constante pela ação da válvula (v), que recebe  $N_2$  de um grande tanque de armazenamento em que o gás é mantido a 50 bar. Admitindo que a massa específica do combustível é igual a  $800 \text{ kg/m}^3$ , determine a diferença de pressão em kPa entre as seções 1 e 2 imediatamente antes da abertura da válvula.

## 2 – Propriedades Termodinâmicas

### 2.1 – Comportamento de uma Substância Pura

Relação  $P - v - T$

Diagrama  $T - v$

Diagrama  $P - v$

Ponto crítico

Diagrama  $P - T$  e Ponto Triplo

Superfície  $P - v - T$

### 2.2 – Determinação de Propriedades Termodinâmicas de uma Substância Pura

Programas de Computador

Tabelas de Propriedades Termodinâmicas

### 2.3 – Determinação de Propriedades Termodinâmicas de Líquidos e Sólidos

### 2.4 – Gás Ideal

Equações do Gás Ideal

Tabelas de Gás Ideal

### 2.5 – Resumo

### 2.6 – Referências

Problemas