

Introdução à Física Estatística

Francisco Assis Gois de Almeida



São Cristóvão/SE
2012

Introdução à Física Estatística

Elaboração de Conteúdo
Francisco Assis Gois de Almeida

Capa
Hermeson Alves de Menezes

Diagramação
Francisco Assis Gois de Almeida

Copyright © 2012, Universidade Federal de Sergipe / CESAD.
Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização por escrito da UFS.

Presidente da República
Dilma Vana Rousseff

Chefe de Gabinete
Ednalva Freire Caetano

Ministro da Educação
Fernando Haddad

Coordenador Geral da UAB/UFS
Diretor do CESAD
Antônio Ponciano Bezerra

Diretor de Educação a Distância
João Carlos Teatini Souza Clímaco

coordenador-adjunto da UAB/UFS
Vice-diretor do CESAD
Fábio Alves dos Santos

Reitor
Josué Modesto dos Passos Subrinho

Vice-Reitor
Angelo Roberto Antonioli

Diretoria Pedagógica
Clotildes Farias de Sousa (Diretora)

Núcleo de Serviços Gráficos e Audiovisuais
Giselda Barros

Diretoria Administrativa e Financeira
Edélzio Alves Costa Júnior (Diretor)
Sylvia Helena de Almeida Soares
Valter Siqueira Alves

Núcleo de Tecnologia da Informação
João Eduardo Batista de Deus Anselmo
Marcel da Conceição Souza
Raimundo Araujo de Almeida Júnior

Coordenação de Cursos
Djalma Andrade (Coordenadora)

Assessoria de Comunicação
Edvar Freire Caetano
Guilherme Borba Gouy

Núcleo de Formação Continuada
Rosemeire Marcedo Costa (Coordenadora)

Núcleo de Avaliação
Hérica dos Santos Matos (Coordenadora)
Carlos Alberto Vasconcelos

Coordenadores de Curso
Denis Menezes (Letras Português)
Eduardo Farias (Administração)
Haroldo Dorea (Química)
Hassan Sherafat (Matemática)
Hélio Mario Araújo (Geografia)
Lourival Santana (História)
Marcelo Macedo (Física)
Silmara Pantaleão (Ciências Biológicas)

Coordenadores de Tutoria
Edvan dos Santos Sousa (Física)
Geraldo Ferreira Souza Júnior (Matemática)
Ayslan Jorge Santos de Araujo (Administração)
Priscila Viana Cardozo (História)
Rafael de Jesus Santana (Química)
Gleise Campos Pinto Santana (Geografia)
Trícia C. P. de Sant'ana (Ciências Biológicas)
Laura Camila Braz de Almeida (Letras Português)
Lívia Carvalho Santos (Presencial)

NÚCLEO DE MATERIAL DIDÁTICO

Hermeson Menezes (Coordenador)
Marcio Roberto de Oliveira Mendonça

Neverton Correia da Silva
Nicolás Menezes Melo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
Cidade Universitária Prof. "José Aloísio de Campos"
Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze
CEP 49100-000 - São Cristóvão - SE
Fone(79) 2105 - 6600 - Fax(79) 2105- 6474

Sumário

Aula 1: Termodinâmica I: equilíbrio e conservação	11
1.1 Introdução	12
1.2 Conceitos básicos	12
1.3 Lei zero da termodinâmica	15
1.4 Primeira lei da termodinâmica	16
1.4.1 Trabalho realizado por um gás	17
1.4.2 Conservação de energia	19
1.5 Conclusão	20
1.6 Resumo	20
1.7 Atividades	21
1.8 Próxima aula	23
Aula 2: Termodinâmica II: processos	25
2.1 Introdução	26
2.2 Representação gráfica de processos	26
2.2.1 Reversibilidade de processos	27
2.2.2 Trabalho em um gráfico	30
2.3 Processos especiais	32
2.4 Conclusão	35
2.5 Resumo	35

2.6	Atividades	36
2.7	Próxima aula	38
Aula 3: Termodinâmica III: entropia		41
3.1	Introdução	42
3.2	Ciclo de Carnot	42
3.3	A segunda lei da termodinâmica	48
3.4	Entropia	51
3.5	A terceira lei da termodinâmica	55
3.6	Conclusão	57
3.7	Resumo	58
3.8	Atividades	58
3.9	Próxima aula	61
Aula 4: Conceitos básicos de estatística		63
4.1	Introdução	64
4.2	Probabilidade	64
4.2.1	Regra da soma	69
4.2.2	Regra da multiplicação	70
4.3	Variáveis aleatórias e densidade de probabilidade	73
4.4	Momentos	74
4.5	Conclusão	75
4.6	Resumo	75
4.7	Atividades	76
4.8	Próxima aula	80
Aula 5: Mecânica estatística clássica		83
5.1	Introdução	84
5.2	Equilíbrio estatístico	84

5.3	Interpretação microscópica da entropia	86
5.4	Distribuição de Maxwell-Boltzmann	88
5.4.1	Contanto microestados	89
5.4.2	Maximizando o número de microestados	91
5.4.3	Interpretação estatística da temperatura	93
5.5	Aplicação ao gás ideal	97
5.6	Conclusão	99
5.7	Resumo	100
5.8	Atividades	100
5.9	Próxima aula	103

Aula 6: Propriedades térmicas dos gases I: equações

de estado		105
6.1	Introdução	106
6.2	Gás ideal	106
6.3	Gases reais	107
6.3.1	Energia total de um sistema de partículas isolado	108
6.3.2	Função de grande partição	109
6.3.3	Segundo coeficiente do virial	112
6.4	Conclusão	118
6.5	Resumo	119
6.6	Atividades	120
6.7	Próxima aula	122

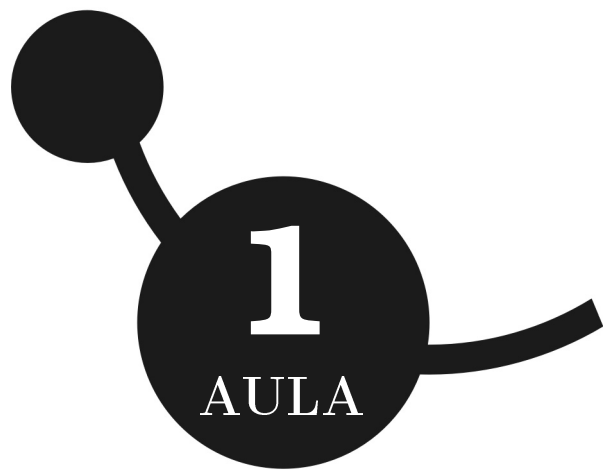
Aula 7: Propriedades térmicas dos gases II: calor es-

pecífico e equipartição da energia		123
7.1	Introdução	124
7.2	Calor específico de um gás ideal monoatômico	124

7.3	Calor específico de um gás ideal poliatômico	125
7.3.1	Efeito rotacional	128
7.3.2	Efeito vibracional	133
7.4	Princípio de equipartição da energia	136
7.5	Conclusão	139
7.6	Resumo	139
7.7	Atividades	141
7.8	Próxima aula	144
Aula 8: Mecânica estatística quântica I: férmions		145
8.1	Introdução	146
8.2	Distribuição de Fermi-Dirac	146
8.2.1	Contando microestados	147
8.2.2	Maximizando o número de microestados	148
8.2.3	Energia de Fermi	148
8.3	Gás ideal de elétrons	150
8.4	Conclusão	153
8.5	Resumo	153
8.6	Atividades	154
8.7	Próxima aula	156
Aula 9: Mecânica estatística quântica II: bósons		159
9.1	Introdução	160
9.2	Distribuição de Bose-Einstein	160
9.2.1	Contando microestados	160
9.2.2	Maximizando o número de microestados	162
9.3	Radiação do corpo negro: gás de fótons	162
9.4	Calor específico de sólidos: gás de fônons	167
9.5	Conclusão	170

9.6	Resumo	170
9.7	Atividades	171
9.8	Próxima aula	175
Aula 10: Comparação das três estatísticas		177
10.1	Introdução	178
10.2	Gás ideal quântico	178
10.2.1	Gás ideal bosônico	178
10.2.2	Gás ideal fermiônico	182
10.3	Comparação das três estatísticas	183
10.4	Conclusão	185
10.5	Resumo	185
10.6	Atividades	186

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação



META

Introduzir conceitos básicos de termodinâmica, sua lei zero e sua primeira lei.

OBJETIVOS

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Compreender o papel da termodinâmica e seus conceitos básicos.

Entender a lei zero e a primeira lei da termodinâmica.

Resolver problemas envolvendo estes conceitos.

PRÉ-REQUISITOS

Cálculo diferencial e integral.

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

1.1 Introdução

*Equilíbrio térmico é a situação na qual as grandezas macroscópicas de um sistema observado deixam de variar no tempo. Apesar da mecânica estatística também tratar de sistemas fora do equilíbrio (mecânica estatística de não equilíbrio), iremos apenas abordar sobre a mecânica estatística de equilíbrio.

Caro aluno, antes de introduzirmos conceitos de física estatística, é importante conhecermos alguns fundamentos de termodinâmica. Apesar destas serem áreas correlatas, a física estatística é uma teoria reducionista, pois estuda as propriedades macroscópicas de sistemas em equilíbrio térmico* através de uma abordagem estatística das propriedades microscópicas dos constituintes do sistema. Por outro lado, a termodinâmica é uma teoria fenomenológica que descreve sistemas macroscópicos em equilíbrio térmico. Neste caso, o sistema passa a ser caracterizado por grandezas macroscópicas que retratam efetivamente os efeitos microscópicos, sem se referir a estes. Já imaginou se sempre que precisássemos definir o estado de um gás, fosse necessário saber as posições e as velocidades de todas as inúmeras partículas que o constituem? Para nosso alívio, um gás é macroscopicamente caracterizado por grandezas efetivas como pressão, volume e temperatura, sem ser necessário recorrer a detalhes de cada uma das partículas que o constituem.

Nesta aula iremos apreciar conceitos básicos de termodinâmica e enunciar duas de suas quatro leis.

1.2 Conceitos básicos

Vamos agora introduzir alguns conceitos fundamentais de termodinâmica.

Sistema termodinâmico: sistema macroscópico caracterizado por propriedades macroscópicas. Um sistema termodinâmico pode ser classificado de três formas:

- Isolado: não troca energia e nem matéria com o meio externo.
- Fechado: troca energia, porém não troca matéria com o meio externo.
- Aberto: troca energia e matéria com o meio externo.

Equilíbrio térmico ou equilíbrio termodinâmico: situação em que as propriedades macroscópicas de um sistema termodinâmico não variam no tempo. Este conceito também pode estar associado entre dois sistemas distintos, onde dizemos que dois sistemas estão em equilíbrio térmico entre si quando as propriedades macroscópicas de ambos deixam de variar no tempo. É importante notar que a maneira com a qual um sistema alcança o equilíbrio térmico não é relevante para sua atual situação.

Estado termodinâmico: estado em equilíbrio térmico de um sistema termodinâmico.

Variáveis de estado: são grandezas macroscópicas que caracterizam um estado termodinâmico.

- Extensiva: seu valor varia proporcionalmente com a variação das dimensões do sistema.
- Intensiva: seu valor não se modifica com a variação das dimensões do sistema.

Para exemplificar estes conceitos, observe a fig. 1.1, onde temos dois recipientes idênticos de volume V , contendo o mesmo gás com pressão P e temperatura T . Ao

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

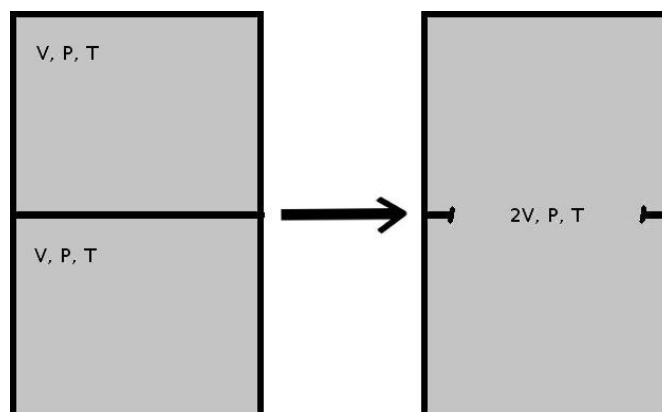


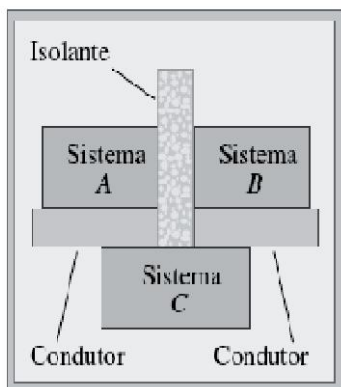
Figura 1.1: Conexão de recipientes idênticos com o mesmo gás às mesmas condições. A pressão e a temperatura permanecem iguais, enquanto o volume de gás dobra. Isto justifica o fato de que P e T são variáveis de estado intensivas, enquanto V é extensiva.

conectarmos os dois recipientes, passamos a ter um recipiente único de volume $2V$, onde o gás continua tendo pressão P e temperatura T . Visto que o volume do sistema dobrou com a duplicação do sistema, V é uma variável de estado extensiva. No entanto, a pressão e a temperatura não mudaram com o aumento do sistema e, portanto, são variáveis de estado intensivas.

Processo termodinâmico: mecanismo de mudança do estado termodinâmico.

Temperatura: variável de estado intensiva, associada intuitivamente com a noção de quente (temperatura alta) e frio (temperatura baixa). Quando dois sistemas estão em equilíbrio térmico entre si, dizemos que estes possuem a mesma temperatura. É importante destacar que a temperatura é uma propriedade definida apenas em situações de equilíbrio térmico.

(a) Se os sistemas A e B estão em equilíbrio térmico com o sistema C , então...



(b) ... os sistemas A e B estão em equilíbrio térmico entre si.

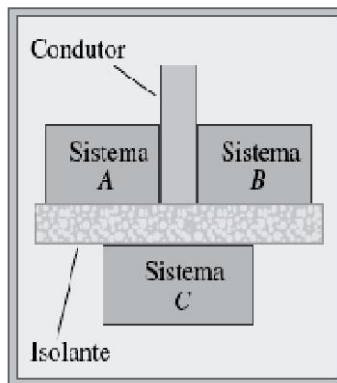


Figura 1.2: Ilustração conceitual da lei zero da termodinâmica. Figura adaptada da ref. [3].

A temperatura está associada com a energia mecânica média das partículas que constituem o sistema termodinâmico.

Calor: energia de trânsito entre sistemas termodinâmicos. É importante enfatizar que, diferente da temperatura, o calor não é uma variável de estado, pois não caracteriza um estado termodinâmico. Além disso, o calor se propaga espontaneamente sempre do sistema mais quente para o mais frio.

1.3 Lei zero da termodinâmica

Sejam A , B e C três sistemas termodinâmicos. O enunciado da lei zero da termodinâmica diz:

se A está em equilíbrio térmico com B e, por outro lado, B e C também estão em equilíbrio térmico, então A está em equilíbrio térmico com C .

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

Esta lei pode ser ilustrada pela fig. 1.2, onde vemos em (a) que A está em equilíbrio térmico com C, pois estão ligados por um condutor térmico. Sendo assim, existe a passagem de calor de A para C até que os dois estejam em equilíbrio térmico, ou seja, quando as grandezas macroscópicas dos dois sistemas deixam de variar no tempo. Neste caso, não há mais transmissão de calor e, portanto, as temperaturas de A e C se igualam

$$T_A = T_C. \quad (1.1)$$

O mesmo acontece entre B e C e, conseqüentemente,

$$T_B = T_C. \quad (1.2)$$

No entanto, existe um isolante térmico entre A e B impedindo a passagem de calor diretamente entre eles. Isso poderia nos levar a pensar que, em geral, A e B não estão em equilíbrio térmico, o que não é verdade. Efetivamente, existe um contato térmico entre A e B mediado por C e, desta forma, os três sistemas estão em equilíbrio térmico, como pode ser verificado através eqs. (1.1) e (1.2)

$$T_A = T_B,$$

concordando, portanto, com a lei zero da termodinâmica. Ainda nesta figura, perceba que em (b), não há contato térmico de C nem com A e nem com B, implicando que A está em equilíbrio térmico com B, mas C não está em equilíbrio com nenhum dos dois.

1.4 Primeira lei da termodinâmica

Como em termodinâmica estamos em busca de grandezas macroscópicas efetivas, é comum termos, basicamente, três formas de energias.

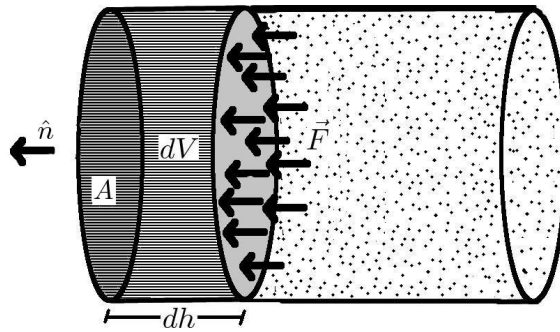


Figura 1.3: Expansão infinitesimal dV de um recipiente contendo um gás de pressão $P = \vec{F} \cdot \hat{n}/A$, onde A é a área do êmbolo cinza móvel e \hat{n} é o vetor normal unitário à área do êmbolo. O deslocamento longitudinal infinitesimal é dh .

Uma delas é o calor, que, como já foi visto na sec. 1.2, é a energia que transita entre sistemas termodinâmicos, do mais quente para o mais frio. Outra delas é a energia interna de um sistema termodinâmico, a qual está relacionada à média das energias cinética* e potencial dos seus constituintes microscópicos. Por fim, temos também o trabalho como forma de energia.

1.4.1 Trabalho realizado por um gás

Devemos lembrar que, por definição, o trabalho infinitesimal de uma força \vec{F} que realiza um deslocamento $d\vec{r}$ é

$$dW \equiv \vec{F} \cdot d\vec{r}. \quad (1.3)$$

O uso do símbolo d é para representar que o trabalho não é uma variável de estado e, portanto, possui uma diferencial não exata**.

Considerando a ilustração representada pela fig. 1.3, podemos calcular o trabalho infinitesimal realizado por um gás para uma

*Lembre-se de que a energia cinética está associada ao movimento de uma forma geral, como por exemplo, à translação, à rotação e à vibração. Por outro lado, a energia potencial está relacionada à interação entre corpos.

**Uma diferencial não exata df , é aquela cuja integral depende do caminho e, matematicamente, implica que, em geral, $\oint df \neq 0$. Mais detalhes na ref. [4].

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

expansão infinitesimal do seu volume. Desta forma, identificamos $d\vec{r} = \hat{n} dh$ e, portanto, temos

$$dW = \vec{F} \cdot \hat{n} dh = \frac{\vec{F} \cdot \hat{n}}{A} A dh.$$

Perceba que, por definição, a pressão é $P \equiv \vec{F} \cdot \hat{n} / A$ e que, o volume infinitesimal é $dV = A dh$. Portanto, o trabalho infinitesimal neste caso pode ser escrito como

$$dW = P dV. \quad (1.4)$$

A eq. (1.4) em estudo dos gases é mais útil do que a definição tradicional do trabalho dada pela eq. (1.3), pois num gás é comum trabalharmos com pressão e volume, ao invés de força e posição. Fazendo uma analogia entre estas equações, é comum chamarmos a pressão e o volume de, respectivamente, força e deslocamento generalizados. Desta mesma forma, existem outros tipos de forças e deslocamentos generalizados, que produzem trabalho em sistemas diversos como, por exemplo, a aplicação de um campo magnético em um meio magnético pode ser interpretada como uma força generalizada e seu deslocamento generalizado é a magnetização, onde o trabalho é $dW = -\vec{H} \cdot d\vec{M}$ [4].

Podemos concluir que o trabalho realizado por um gás para variar seu volume de V_0 a V é

$$W = \int_{V_0}^V P dV. \quad (1.5)$$

Exemplo 1.4.1. Um gás ocupando um volume de $0,30 \text{ m}^3$ exerce uma pressão de $2 \times 10^5 \text{ Pa}$. O gás se expande até um volume de $0,45 \text{ m}^3$, mantendo a pressão constante. Calcule o trabalho realizado pelo gás. (Exemplo retirado da ref. [2].)

Solução: Usando a eq. (1.5) com P sendo constante e lembrando que Pascal, $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$, é a unidade de pressão do S.I., temos

$$\begin{aligned} W &= P \int_{V_0}^V dV = P(V - V_0) & (1.6) \\ &= 2 \times 10^5(0,45 - 0,30) = 3 \times 10^4 \text{J}. \end{aligned}$$

Exemplo 1.4.2. Um gás se expande cumprindo a relação $PV = C$ (constante). Esta relação requer que a temperatura do gás seja constante e constitui a lei de Boyle. Encontre o trabalho realizado quando o volume se expande de V_1 até V_2 . (Exemplo retirado da ref. [2].)

Solução: Usando a eq. (1.5) com $P = C/V$, obtemos

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = C \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right).$$

1.4.2 Conservação de energia

Da mesma forma que um sistema pode realizar ou sofrer trabalho, também pode receber ou liberar calor. Analogamente, o calor possui diferencial não exata, dQ , pois não é uma variável de estado.

É fundamental que levemos em conta que, independente da forma que o sistema troque energia com o meio externo, esta deve ser conservada. Sendo assim, podemos interpretar que, infinitesimalmente, o calor recebido por um sistema pode ser convertido em trabalho ou em aumento de energia interna. Matematicamente, esta propriedade de conservação de energia pode ser expressa como

$$dQ = dW + dU \quad \text{ou} \quad dU = dQ - dW. \quad (1.7)$$

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

Podemos também integrar a eq. (1.7) de um estado inicial a um final, obtendo

$$\Delta U \equiv U - U_0 = Q - W. \quad (1.8)$$

Esta lei de conservação de energia em sistemas termodinâmicos é conhecida como a primeira lei da termodinâmica, a qual pode ser enunciada como:

a variação de energia interna de um sistema termodinâmico é igual ao calor absorvido pelo sistema menos o trabalho exercido por este.

1.5 Conclusão

Os conceitos básicos de termodinâmica são fundamentais para o domínio do conteúdo. Através da lei zero é que se consegue compreender a relação entre temperatura e equilíbrio térmico. Além disso, as energias observadas macroscopicamente devem sempre respeitar o fundamento de conservação de energia como enuncia a primeira lei da termodinâmica.

1.6 Resumo

Iniciamos esta aula apresentando a visão geral do papel da termodinâmica como uma teoria fenomenológica, a qual é focada em estudar sistemas macroscópicos em equilíbrio térmico, observando as propriedades macroscópicas que os caracterizam (variáveis de estado), sem entrar em detalhes microscópicos do sistema. Vimos conceitos fundamentais de termodinâmica como: sistema termodinâmico, equilíbrio térmico ou termodinâmico, estado termodinâmico, processo termodinâmico, variáveis de estado, temperatura

e calor. Enunciamos a lei zero da termodinâmica a qual estabelece que se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, estes estão em equilíbrio térmico entre si e, portanto, possuem a mesma temperatura. Mostramos que o trabalho para variar volume pode ser calculado pela integral $W = \int_{V_0}^V P dV$, onde fizemos analogia de P com uma força generalizada e de dV como um deslocamento generalizado. O trabalho pode ser definido de outras formas, de acordo com o sistema que está sendo estudado. Por exemplo, o trabalho de um campo elétrico \vec{H} para variar a magnetização \vec{M} de um sistema termodinâmico com propriedades magnéticas é $W = - \int_{M_0}^M \vec{H} \cdot d\vec{M}$, onde, por analogia, o campo magnético e a magnetização são, respectivamente, a força e o deslocamento generalizados. O trabalho possui uma diferencial não exata, pois sua integração depende do caminho (processo termodinâmico) que segue o sistema. Por este motivo, o trabalho não pode ser uma variável de estado, pois ele depende do processo termodinâmico que guia o sistema e não caracteriza um estado. Da mesma forma, o calor possui diferencial não exata e não pode ser uma variável de estado. Além disso, vimos que o princípio de conservação de energia é estabelecido pela primeira lei da termodinâmica, a qual enuncia que a variação de energia interna de um sistema termodinâmico deve ser igual ao calor recebido pelo sistema menos o trabalho que este realiza.

1.7 Atividades

ATIV. 1.1. Qual a importância da lei zero da termodinâmica no processo de medição da temperatura, ou seja, como esta lei está

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

relacionada com a existência do termômetro?

Comentário: No enunciado da lei zero da termodinâmica que fizemos nesta aula, imagine uma situação em que o corpo C é um termômetro e o corpo B é uma sistema com uma temperatura de referência para calibração do termômetro. Uma leitura na ref. [4] pode auxiliar nesta interpretação.

ATIV. 1.2. Por que numa expansão o trabalho realizado por um gás é positivo, enquanto numa compressão é negativo? Como este trabalho negativo pode ser relacionado com o trabalho realizado pelo meio externo?

Comentário: Note que sempre $P \geq 0$ e que numa expansão $V > V_0$ e numa compressão $V < V_0$. Uma leitura na ref. [1] ou [2] pode auxiliar na interpretação do trabalho do meio externo.

ATIV. 1.3. Um gás é mantido a uma pressão constante de 20 atm enquanto se expande de um volume de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ a um volume de $9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Calcule a quantidade de calor que deve ser fornecida ao gás para

- (a) manter constante sua energia interna;
- (b) aumentar sua energia interna pelo mesmo valor do trabalho realizado.

Expresse os resultados em cal e em J. (Atividade adaptada da ref. [2].)

Comentário: O trabalho para pressão constante pode ser calculado como foi feito no exemplo 1.4.1. A relação entre calor, variação de energia interna e trabalho é dada pela primeira lei da termodinâmica [eq. (1.8)]. Dados:

$$1 \text{ cal} \approx 4,186 \text{ J}$$

$$1 \text{ atm} \approx 101325 \text{ Pa.}$$

ATIV. 1.4. Um gás se expande a partir de um estado A caracterizado por um volume V_0 e uma pressão P_0 , até um estado B correspondente a um volume V_1 . Nesta expansão, a pressão varia com o volume de acordo com*

$$P = P_0(V_0/V)^{5/3}. \quad (1.9)$$

(a) Determine a pressão P_1 correspondente ao estado B . (b) Calcule o trabalho realizado pelo gás, quando ele se expande do estado A até o estado B . (c) Supondo que não houve troca de calor durante esta expansão, qual é a variação de energia interna? (d) O gás teve sua energia aumentada ou diminuída? Justifique sua resposta. (Atividade adaptada da ref. [5].)

*Esta é uma expansão adiabática e reversível (isentrópica). Maiores detalhes serão vistos na resolução da ativ. 7.4.

Comentário: A eq. (1.9) representa P em função de V .

1.8 Próxima aula

Na próxima aula, estudaremos com maiores detalhes os processos termodinâmicos, representando-os graficamente e estudando alguns casos especiais.

Termodinâmica I: equilíbrio e conservação

Referências

- [1] ALONSO, M; FINN, E. J. *Physics*. 2.ed. Addison-Wesley, 1986.
- [2] ALONSO, M; FINN, E. J. *Física. Volumen III: Fundamentos Cuánticos y Estadísticos*. Edición Revisada y Aumentada. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- [3] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Sears e Zemansky Física II: Termodinâmica e Ondas*. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.
- [4] REICHL, L. E. *A Modern Course in Statistical Physics*. 2.ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [5] OLIVEIRA, M. J. *Termodinâmica*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.