

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.

A Termodinâmica estuda as relações entre as quantidades de calor trocadas e os trabalhos realizados num processo físico, envolvendo um corpo (ou um sistema de corpos) e o resto do Universo (que denominamos meio exterior). Por exemplo, um gás contido num cilindro provido de êmbolo (figura 1), ao ser aquecido, age com uma força \vec{F} sobre o êmbolo, deslocando-o. Assim, o sistema (gás) recebe calor (Q) do meio exterior e a força \vec{F} aplicada pelo sistema (gás) realiza um trabalho τ sobre o meio exterior.

Por condução, o calor se transfere de um corpo para outro ou entre partes de um corpo, em consequência de choques moleculares. Quanto maior a temperatura, maiores as velocidades das moléculas e mais freqüentes os choques entre elas, ocorrendo desse modo transferência de energia cinética para as moléculas de menor velocidade, isto é, para as regiões de menor temperatura. Podemos, portanto, considerar a temperatura uma propriedade que governa o sentido em que se propaga o calor.

O trabalho, do mesmo modo que o calor, também se relaciona com transferência de energia. No entanto, o trabalho corresponde a trocas energéticas sem influência de diferenças de temperatura e nesse aspecto se distingue do calor. O

trabalho é realizado por uma força \vec{F} , considerando-se o sistema como um todo, independentemente do movimento de suas moléculas, e, por isso, não dependendo da temperatura.

Quando o sistema como um todo produz um deslocamento ao agir com uma força sobre o meio exterior, o trabalho realizado é denominado trabalho externo. No exemplo da figura 1, o gás, ao se expandir deslocando o êmbolo, realiza um trabalho externo sobre o meio que o envolve.

O trabalho executado por uma parte do sistema sobre outra do mesmo sistema é chamado de trabalho interno. Assim, as forças de interação entre as moléculas do gás realizam um trabalho interno. No estudo da Termodinâmica só consideramos o trabalho externo, que chamaremos, de agora em diante, simplesmente de trabalho.

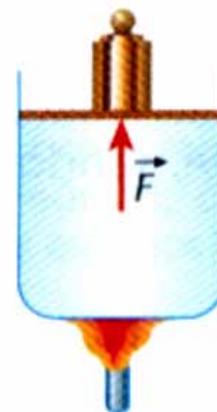


Figura 1 - O gás recebe calor do meio exterior, realiza trabalho sobre ele.

2. Trabalho Numa Transformação

Considere um gás contido num cilindro cujo êmbolo pode se movimentar livremente e sobre o qual há um peso de massa m (figura 2a). Durante qualquer transformação sofrida pelo gás, a pressão se mantém constante, pois o peso colocado sobre o êmbolo não varia. Sejam p a pressão, V o volume e T_1 a temperatura do gás na situação inicial.

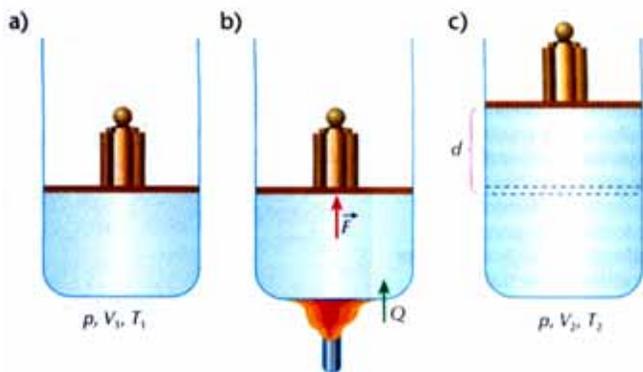


Figura 2 - O gás, inicialmente no estado p_1, V_1, T_1 , recebe calor Q da chama e passa para o estado p_2, V_2, T_2 , realizando o trabalho $p(V_2 - V_1)$

Fornecendo calor Q ao sistema, por meio de uma fonte térmica (figura 2b), o gás se expande, deslocando o êmbolo de uma distância d . Na situação final (figura 2c), o volume do gás é V_2 e a temperatura é T_2 , mantendo-se a pressão constante p .

O gás exerceu uma força \vec{F} sobre o êmbolo, provocando sobre ele um deslocamento de realizando um trabalho τ , dado por:

$$\tau = F \cdot D$$

Mas $F = p \cdot A$, sendo p a pressão do gás e A a área do êmbolo. Então:

$$\tau = p \cdot A \cdot D$$

O produto $A \cdot d = \Delta V$ é a variação de volume ocorrida. Assim, o trabalho realizado pelo gás sobre o meio exterior é dado por:

$$\tau = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) \quad (\text{trabalho numa transformação isobárica})$$

O trabalho é uma grandeza algébrica e assume, no caso, o sinal da variação de volume ΔV , uma vez que a pressão p é sempre positiva.

Numa expansão, a variação de volume é positiva e, portanto, o trabalho realizado é positivo. Como o trabalho representa uma transferência de energia, o gás, ao se expandir, está perdendo energia, embora a esteja também recebendo sob a forma de calor da fonte térmica.

Numa compressão, a variação de volume é negativa e, portanto, o trabalho realizado é negativo. Assim, quando um gás é comprimido, está recebendo energia do meio exterior.

$$\tau = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) \begin{cases} V_2 > V_1 \Rightarrow \Delta V > 0 \Rightarrow \tau > 0 \\ V_2 < V_1 \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow \tau < 0 \end{cases}$$

É usual dizer que, na expansão, o gás (sistema) realiza trabalho sobre o meio exterior e, na compressão, o meio exterior realiza trabalho sobre o gás (sistema).

No diagrama da pressão em função do volume (diagrama de trabalho), o produto $p \cdot \Delta V$ corresponde numericamente à área destacada na figura 3, compreendida entre a reta representativa da transformação e o eixo das abscissas.

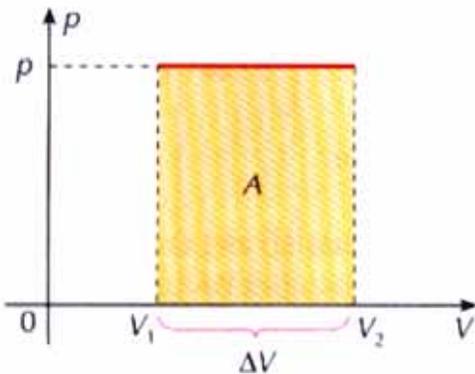


Figura 3. O trabalho realizado é dado numericamente pela área destacada.

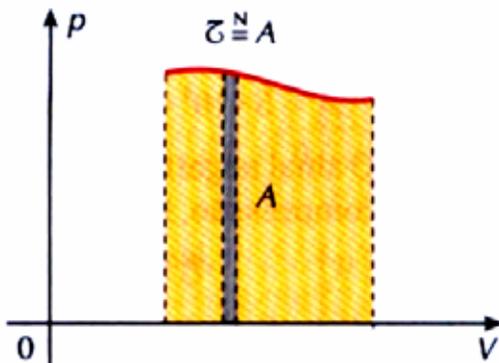


Figura 4. O trabalho realizado é dado numericamente pela área destacada, qualquer que seja a transformação entre dois estados do gás.

Podemos generalizar essa conclusão (figura 4), considerando uma transformação qualquer entre dois estados do gás. Admitamos uma série de pequenas transformações isobáricas elementares. Em cada uma delas, a área do retângulo indi-

vidualizado mede numericamente o trabalho realizado. A soma dos vários retângulos fornece o trabalho total realizado na transformação.

Entre dois estados quaisquer do gás, podemos considerar uma infinidade de processos e, portanto, uma infinidade de valores para o trabalho realizado. Portanto o trabalho realizado, numa transformação termodinâmica, depende não só dos estados inicial e final como também dos estados intermediários, isto é, do caminho entre os estados inicial e final. Por exemplo, entre os estados indicados por A e por B na figura 5, o maior trabalho é o realizado no caminho I e o menor, no caminho III. Então podemos escrever:

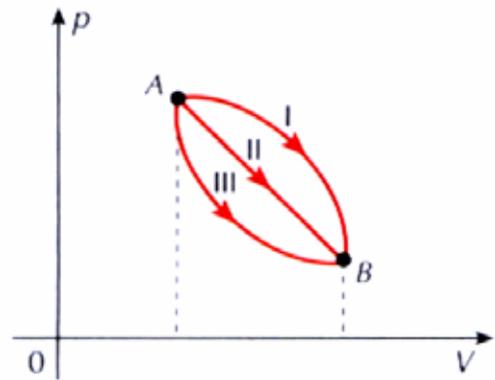


Figura 5. O trabalho realizado num processo termodinâmico depende do caminho entre os estados Inicial e final.

$$\zeta_I > \zeta_{II} > \zeta_{III}$$

3. Energia Interna. Lei De Joule Para Os Gases Perfeitos

A energia total de um sistema é composta de duas parcelas: a energia externa e a energia interna.

A energia externa do sistema é devida às relações que ele guarda com seu meio exterior: energia cinética e energia potencial.

A energia interna do sistema relaciona-se com suas condições intrínsecas. Num gás, corresponde às parcelas: energia térmica, que se associa ao movimento de agitação térmica das moléculas; energia potencial de configuração, associada às forças internas conservativas; energias cinéticas atômico-moleculares, ligadas à rotação das moléculas, às vibrações intramoleculares e aos movimentos intra-atômicos das partículas elementares.

Não se mede diretamente a energia interna U de um sistema. No entanto, é importante conhecer a variação da energia interna U do sistema durante um processo termodinâmico. Para os gases ideais monoatômicos, essa variação é determinada somente pela variação da energia cinética de translação das moléculas que constituem o sistema.

Há processos em que a energia interna varia e a temperatura permanece constante. É o que ocorre nas mudanças de estado de agregação. A energia recebida (calor latente) durante o processo aumenta a energia interna do sistema. Por exemplo, durante uma fusão, o estado líquido tem maior energia interna que o estado sólido, embora

durante o processo não esteja ocorrendo variação de temperatura. Contudo, nas transformações gasosas, a variação de energia interna (ΔU) é sempre acompanhada de variação de temperatura (ΔT), como veremos.

Retomemos a transformação isobárica descrita no item anterior (figura 2). Vimos que o gás recebeu a quantidade de calor Q e realizou o trabalho. Tendo ocorrido variação de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$, variou a energia cinética das moléculas do gás e, portanto, variou a energia interna. Como vimos na teoria cinética dos gases, sendo n o número de mols do gás:

Energia cinética molecular inicial:

$$Ec_1 = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T_1$$

Energia cinética molecular final:

$$Ec_2 = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T_2$$

Variação da energia cinética molecular:

$$\Delta E = U = Ec_2 - Ec_1$$

Essa variação ΔE corresponde à variação da energia interna U do gás, suposto ideal e monoatômico:

$$\Delta E = U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

Note que, se a temperatura final T_2 é maior que a temperatura inicial T_1 , a energia interna do gás aumenta. Se T_2 for menor que T_1 , a energia interna do gás diminui. No caso de a temperatura

final T_2 ser igual à inicial T_1 , a energia interna do gás não varia.

Situações possíveis	Energia Interna
$T_2 > T_1 \rightarrow \Delta T > 0$	Aumenta
$T_2 < T_1 \rightarrow \Delta T < 0$	Diminui
$T_2 = T_1 \rightarrow \Delta T = 0$	Não varia

Podemos, assim, enunciar a lei de Joule para os gases perfeitos:

A energia interna de uma dada quantidade de um gás perfeito é função exclusiva de sua temperatura.

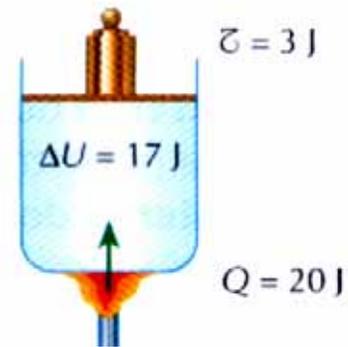
4. Primeira Lei Da Termodinâmica

Num processo termodinâmico sofrido por um gás, há dois tipos de trocas energéticas com o meio exterior: o calor trocado Q e o trabalho realizado ζ .

A variação de energia interna ΔU sofrida pelo sistema é conseqüência do balanço energético entre essas duas quantidades.

Por exemplo, se o gás, numa transformação isobárica como a da figura 2 recebeu do meio exterior uma quantidade de calor $Q = 20 \text{ J}$ e realizou um trabalho sobre o meio exterior $\zeta = 3 \text{ J}$, sua energia interna aumentou de $\Delta U = 17 \text{ J}$. Realmente o gás recebeu 20 J de energia do meio exterior (sob a forma de calor), perdeu 3 J de energia (sob a forma de trabalho), tendo absorvido

17 J de energia, que aumentaram a energia cinética de suas moléculas e, portanto, sua energia interna. Na figura 6, representam-se esquematicamente essas trocas energéticas.



Figuro 6. A variação de energia interna ΔU do gás é dada por $\Delta U = Q - \zeta$.

Portanto, sendo Q a quantidade de calor trocada pelo sistema, ζ o trabalho realizado é ΔU a variação de energia interna do sistema, podemos escrever:

$$\Delta U = Q - \zeta$$

Essa expressão traduz analiticamente a primeira lei da Termodinâmica:

A variação da energia interna de um sistema é dada pela diferença entre o calor trocado com o meio exterior e o trabalho realizado no processo termodinâmico.

A primeira lei da Termodinâmica é uma reafirmação do princípio da conservação da energia e, embora tenha sido estabelecida tomando-se como ponto de partida a transformação de um

gás, é válida para qualquer processo natural que envolva trocas energéticas.

5. Transformações Gasosas

Vamos reexaminar, neste item, as transformações de um gás ideal, considerando a primeira lei Termodinâmica.

5.1 Transformação Isotérmica (temperatura constante)

Como a temperatura não varia, a variação de energia interna do gás é nula:

$$\Delta T = 0 \rightarrow \Delta U = 0.$$

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \bar{c} = 0.$$

$$Q = \bar{c}$$

Numa transformação isotérmica, o calor trocado pelo gás com o meio exterior é igual ao trabalho realizado no mesmo processo.

Se o gás se expande, de modo que se mantenha sempre em equilíbrio térmico com o ambiente (temperatura constante), ele absorve calor do exterior em quantidade exatamente igual ao trabalho realizado. Por exemplo, se absorver 50 J de calor do ambiente, o trabalho realizado será exatamente 50J. No diagrama de trabalho

(figura 7), a área destacada é numericamente igual ao trabalho realizado.

Note que, no processo isotérmico, **não há variação de temperatura, mas há troca de calor.**

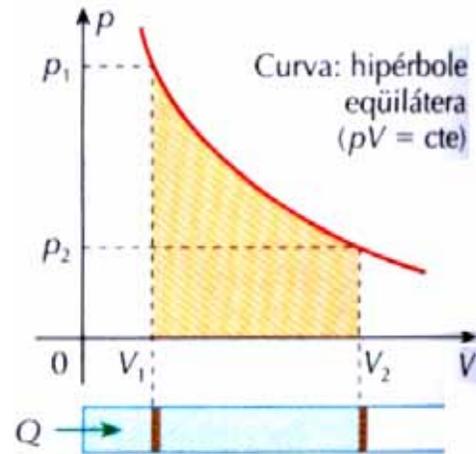


Figura 7. Expansão isotérmica $\Delta T = 0 \rightarrow \Delta U = 0.$

5.2 Transformação Isobárica (pressão constante)

Na transformação isobárica, o trabalho realizado é dado por:

$$\bar{c} = p \cdot \Delta V$$

Sendo m a massa do gás e c seu calor específico à pressão constante, o calor trocado pelo gás, ao sofrer a variação de temperatura ΔT numa transformação isobárica, é dado por:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Nessa fórmula, fazendo $m = nM$ (n é o número de mols e M a massa molar do gás), temos:

$$Q = n \cdot M \cdot c_p \cdot \Delta T$$

O produto da massa molar M do gás pelo seu calor específico c_p é denominado calor molar a pressão constante (C_p) do gás, sendo expresso em cal/mol.K ou J/mol.K.

$$C_p = M \cdot c_p$$

Então, a quantidade de calor trocada pode ser escrita como:

$$Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Pela lei de Charles, no processo isobárico, o volume V é diretamente proporcional à temperatura T : $V = KT$ ($K = \text{constante}$). Portanto, numa expansão isobárica (figura 8), o volume e a temperatura aumentam, ocorrendo também aumento da energia interna do gás:

$$\Delta T > 0$$

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \overline{C} \rightarrow Q > \overline{C}$$

Numa expansão isobárica, a quantidade de calor recebida é maior que o trabalho realizado.

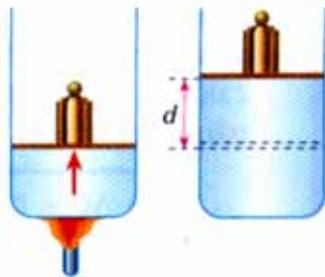


Figura 8. Expansão isobárico. O gás recebe calor e realiza trabalho ($Q > \overline{C}$).

5.3 Transformação Isocórica (volume constante)

Na transformação isocórica, o trabalho realizado é nulo, pois não há variação de volume ($\Delta V = 0$):

$$\overline{C} = 0$$

Sendo m a massa do gás e ΔT a variação de temperatura, o calor trocado é dado por:

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

Nessa fórmula, c_v é o **calor específico a volume constante** do gás.

Como $m = n \cdot M$, temos:

$$Q = n \cdot M \cdot c_v \cdot \Delta T$$

O produto da massa molar M do gás pelo seu calor específico c_v é o **calor molar a volume constante** C do gás, sendo expresso em cal/mol K ou J/mol K.

$$C_v = M \cdot c_v$$

Então, a quantidade de calor trocada pode ser escrita como:

$$Q = n \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Ao receber calor isocoricamente (figura 9), o calor recebido vai apenas aumentar a energia cinética das moléculas e, portanto, a temperatura, pois não há realização de trabalho.

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \overline{C} \text{ Como } \overline{C} = 0, \text{ temos:}$$

$$\Delta U > Q$$

Numa transformação isocórica, a variação da energia interna do gás é igual à quantidade de calor trocada com o meio exterior.



Figura 9. Transformação isocórica ($\Delta V = 0$)

Observação:

Partindo de uma mesma temperatura inicial T_1 , n mols de um gás são aquecidos até uma temperatura final T_2 (figura 10) por dois processos: um isobárico AB e outro isocórico AC . Nos dois processos a variação de temperatura é a mesma e, portanto, a variação de energia interna ΔU é a mesma. Sendo Q_P o calor que o gás recebe no aquecimento isobárico e Q_V o calor recebido no isocórico, pela primeira lei da Termodinâmica podemos escrever:

$$Q_P = \Delta U + \bar{C} \quad \text{e} \quad Q_V = \Delta U$$

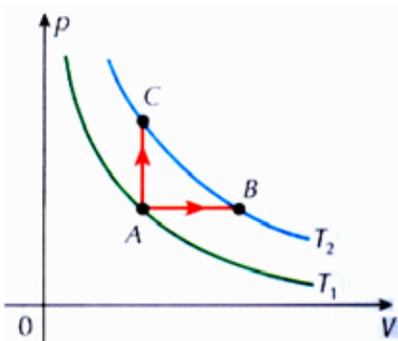


Figura 10. Nos processos AB e AC , a variação de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ é a mesma e, portanto, a variação de energia interna ΔU também é a mesma.

Como há o trabalho $\bar{C} \neq 0$ no processo isobárico, concluímos que o calor trocado sob pressão constante Q_P é maior que o calor trocado a volume constante Q_V . Sendo assim, temos:

$$Q_P > Q_V \Rightarrow C_P > C_V \Rightarrow C_P > C_V$$

Subtraindo membro a membro as duas expressões acima, vem: $Q_P - Q_V = \bar{C}$ ①

Por outro lado, temos: $Q_P = n \cdot C_P \cdot \Delta T$ ②;

$Q_V = n \cdot C_V \cdot \Delta T$ ③ e $\bar{C} = p \cdot \Delta V = n \cdot R \cdot \Delta T$ ④

Substituindo ②, ③ e ④ em ①, temos:

$$n \cdot C_P \cdot \Delta T - n \cdot C_V \cdot \Delta T = n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$C_P - C_V = R$$

Essa fórmula, válida para qualquer que seja a natureza do gás, é denominada **relação de Mayer**. O valor de R vai depender das unidades em que estiverem expressos os calores molares C_P e C_V . Assim, podemos ter:

$$R \approx 8,31 \text{ J/mol.K} \quad \text{ou} \quad 2 \text{ cal/mol.K}$$

5.4 Transformação Adiabática

Um gás sofre uma transformação adiabática quando não troca calor com o meio exterior, ou seja:

$$Q = 0$$

Essa transformação pode ocorrer quando o gás está contido no interior de um recipiente termicamente isolado do ambiente ou sofre expan-

sões e compressões suficientemente rápidas para que as trocas de calor com o ambiente possam ser consideradas desprezíveis. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \bar{C}, \text{ sendo } Q = 0, \text{ temos: } \Delta U = -\bar{C}.$$

Numa transformação adiabática, a variação de energia interna é igual em módulo e de sinal contrário ao trabalho realizado na transformação.

Considere um gás perfeito contido num cilindro termicamente isolado do exterior, como na figura 11, e provido de um êmbolo que pode deslizar sem atrito, aumentando e diminuindo o volume do gás. Observe que o gás não pode trocar calor com o ambiente, mas, havendo variação de ele pode trocar energia com o ambiente, **sob a forma**

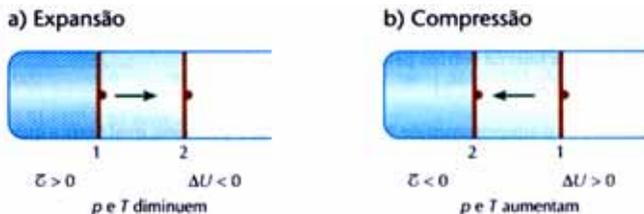


Figura 11. Transformações adiabáticas.

Numa expansão adiabática o trabalho é realizado pelo gás (figura 11a).

Por exemplo, seja 50 J o trabalho realizado por ele. Esse trabalho equivale uma perda de energia por parte do gás. Como não há trocas de calor, essa energia provém do próprio gás, isto é, a energia interna do gás diminui de 50J ($Q = 0$; $\bar{C} = 50J \rightarrow \Delta U = -50J$).

Note que na expansão adiabática o volume aumenta e a temperatura diminui, pois a energia interna diminui. Em consequência, a pressão também diminui, conforme a lei geral dos gases perfeito, ou seja:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{constante}$$

Numa compressão adiabática (figura 11 b) o trabalho é realizado sobre o gás. Portanto o gás recebendo energia do exterior. Assim, se o trabalho realizado sobre o gás é de 50 j, ele está recebendo do ambiente 50 J de energia. Como não há trocas de calor a considerar, a energia interna do gás aumenta de 50 J ($Q = 0$, $\bar{C} = -50 J$, $\Delta U = 50J$).

Na compressão adiabática o volume diminui e a temperatura aumenta, pois a energia interna aumenta e a pressão também aumenta.



Ao se comprimir rapidamente o ar para introduzi-lo no pneu, ele sofre um processo adiabático, pois a rapidez da compressão não permite a troca de calor com o ambiente.

A pressão p e o volume V do gás, num processo adiabático, relacionam-se pela chamada lei Poisson¹, que pode ser expressa por:

$$p \cdot V^\gamma = \text{constante}$$

Nessa fórmula, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é denominado ex-

poente de Poisson, sendo c_p e c_v os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante, respectivamente.

No diagrama de trabalho (figura 12) está esquematizada a curva representativa da transformação adiabática e as isotermas T_1 (temperatura inicial) e T_2 (temperatura final).

A área destacada em cinza entre a curva e o eixo das abscissas mede numericamente o trabalho realizado na transformação adiabática.

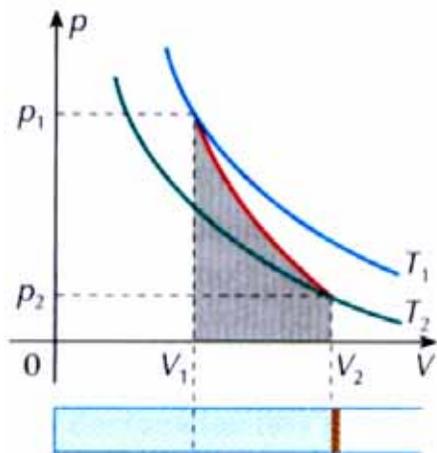


Figura 12. O trabalho na transformação adiabático é dado pelo área destacada em cinza.

¹ POISSON, Simeón Denis (1781-1840), matemático e físico francês, notabilizou-se principalmente por seus trabalhos nas áreas da Eletrostática e do Magnetismo.

Observação:

Como conseqüências da lei de Joule dos gases perfeitos podem concluir:

A variação de energia interna de um gás ideal só depende dos estados inicial e final da massa gasosa para quaisquer que sejam as transformações que levam o sistema do estado inicial ao estado final.

Desse modo, ao passar do estado 1 (temperatura T_1) para o estado 2 (temperatura T_2), representados na figura 13, a energia interna do gás variou de um valor U_1 para um valor U_2 . A variação de energia interna ΔU , qualquer que seja o conjunto de transformações que levam o sistema do estado 1 para o estado 2 (figura 13a), será dada pela diferença:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Como a variação de energia interna não depende do “caminho”, no diagrama pV podemos calcular ΔU para qualquer conjunto de transformações. Por facilidade, vamos escolher a transformação isocórica 1A seguida da isotérmica A2

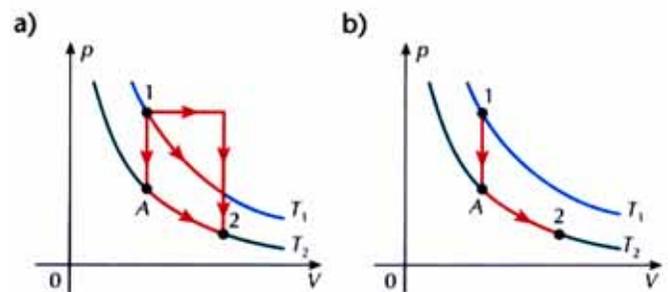


Figura 13. A variação de energia Interna $\Delta U = U_2 - U_1$ não depende do “caminho”.

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U_{1A} = Q_V = mc_V \cdot \Delta T = n \cdot C_V \cdot \Delta T$$

$$\Delta U_{A2} = 0 \text{ (Transformação isotérmica)}$$

Portanto, só há variação de energia interna na transformação 1A. Logo:

$$\Delta U = m \cdot c_V \cdot \Delta T = n \cdot C_V \cdot \Delta T$$

em que c_V , e C_V são, respectivamente, o calor específico e o calor molar do gás a volume constante.

6. Transformação Cíclica. Conversão De Calor Em Trabalho E De Trabalho Em Calor

Ciclo ou transformação cíclica de uma dada massa gasosa é um conjunto de transformações após as quais o gás volta a apresentar a mesma pressão, o mesmo volume e a mesma temperatura que possuía inicialmente. Em um ciclo, o estado final é igual ao estado inicial.

Sejam **A** e **C** dois estados de uma massa gasosa (figura 14). Imaginemos que o gás passa de **A** para **C**, realizando uma expansão isobárica **AB** seguida de uma diminuição isocórica de pressão **BC**. O trabalho realizado τ_1 é dado pela área destacada no gráfico, sendo positivo: $\tau_1 > 0$.

Considere que, na volta de **C** para **A** (figura 15), o gás realize uma compressão isobárica **CD**

seguida de um aumento isocórico de pressão **DA**. O trabalho realizado τ_2 é dado pela área destacada no gráfico, sendo negativo: $\tau_2 < 0$.

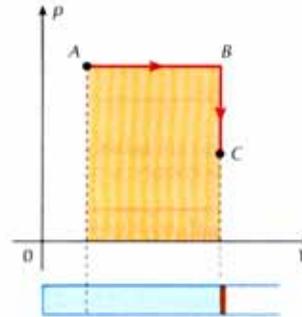


Figura 14. Expansão isobárica AB e transformação isocórica BC.

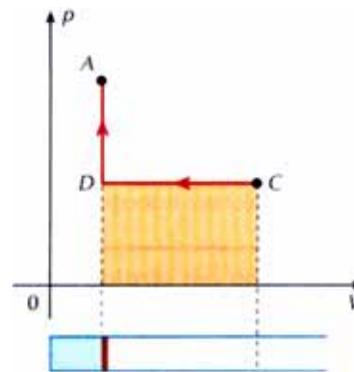


Figura 15. Compressão isobárica CD e transformação isocórica DA.

Considerando todo o ciclo ABCDA, o trabalho total realizado é dado pela soma algébrica dos trabalhos nas diferentes etapas do ciclo:

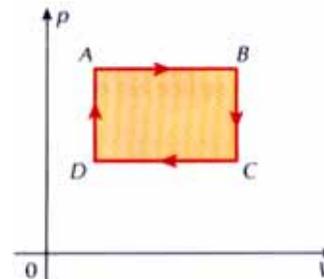


Figura 16. No ciclo ABCDA, a área destacada mede numericamente o trabalho realizado.

$$\bar{C} = \bar{C}_1 + \bar{C}_2$$

Esse trabalho é, no caso, positivo, pois $|\bar{C}_1| > |\bar{C}_2|$, sendo medido numericamente pela área do ciclo destacada na figura 16.

O calor trocado em todo o ciclo é também dado pela soma algébrica dos calores trocados em cada uma das etapas do ciclo:

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{DA}$$

Como o estado inicial é igual ao estado final, é nula a variação de energia interna no ciclo:

$$U_{final} = U_{inicial} \Rightarrow \Delta U = 0$$

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \bar{C} \Rightarrow 0 = Q - \bar{C} \Rightarrow \bar{C} = Q$$

Portanto:

No ciclo, há equivalência entre o calor total trocado Q e o trabalho total realizado \bar{C} .

No exemplo apresentado, o gás forneceu energia para o exterior, pois o trabalho total realizado é positivo (área do ciclo). No entanto o gás recebeu calor do exterior em igual quantidade.

Perceba que houve a transformação de calor em trabalho pelo gás ao se completar o ciclo: ele recebeu calor e forneceu trabalho. Nas máquinas térmicas essa transformação é contínua, já que os ciclos repetem continuamente. No estudo

da segunda lei da Termodinâmica analisaremos o funcionamento de tais máquinas.

Se o ciclo fosse realizado em sentido contrário ao apresentado, isto é, ADCBA, ocorreria a conversão de trabalho em calor. Isso ocorre nas máquinas frigoríficas.

De modo geral, se o ciclo for percorrido em sentido horário, há conversão de calor em trabalho (figura 17). Se o ciclo for percorrido em sentido anti-horário, há conversão de trabalho em calor (figura 18).

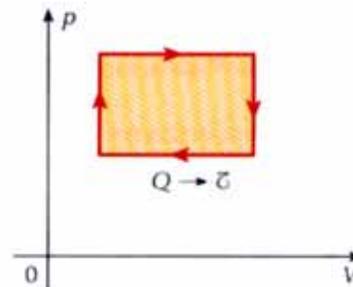


Figura 17. Ciclo em sentido horário: conversão de calor em trabalho.

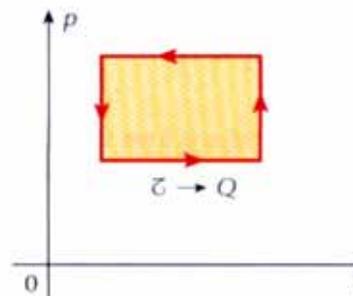


Figura 18. Ciclo em sentido anti-horário: conversão de trabalho em calor.

Ciclo em sentido horário: conversão de calor em trabalho ($Q \rightarrow \bar{C}$)
Ciclo em sentido anti-horário: conversão de trabalho em calor ($\bar{C} \rightarrow Q$)

7. Transformações Reversíveis E Irreversíveis

Chamamos de reversíveis as transformações que podem se efetuar em ambos os sentidos, de modo que, na volta, o sistema retorna ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram variações definitivas nos corpos que o rodeiam.

Geralmente as transformações puramente mecânicas, que se realizam sem atritos e sem que se produzam choques inelásticos, são reversíveis, como no exemplo ilustrado na figura 19.

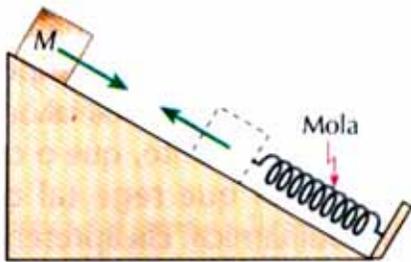


Figura 19. Descida reversível de um cubo num plano inclinado.

Considere um cubo de massa M no alto de um plano inclinado e, na base do plano, uma mola tida como ideal. Se deslizar sem nenhuma resistência plano abaixo, o cubo irá chocar-se elasticamente com a mola M e voltará a subir pelo plano até alcançar novamente sua posição inicial. Perceba que a transformação ocorrida não produziu nenhuma modificação nos corpos circundantes. Logo a descida é reversível.

No exemplo anterior, levando-se em conta as perdas de energia por atrito, para fazer o cubo retornar à posição primitiva, seria necessário um

fornecimento exterior de energia. Então a descida nesse caso seria irreversível.

Uma transformação é dita **irreversível** quando sua inversa só puder se efetuar como parte de processo mais complexo, envolvendo modificações nos corpos circundantes.

Durante uma transformação, um gás não está em equilíbrio, pois suas diferentes partes não apresentam a mesma temperatura e a mesma pressão. Em conseqüência, as relações que apresentamos como as leis dos gases, não são aplicáveis. No entanto, se a transformação for realizada lentamente, há uniformização de pressão e temperatura no sistema e no meio exterior. Nesse caso, em todo instante são válidas as relações entre pressão, volume e temperatura. Tal transformação é dita quase-estática ou reversível, pois o processo poderá ser invertido e o gás voltar ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram modificações no meio exterior.

O modelo quase-estático aplica-se com grande precisão a muitos fenômenos. No entanto há casos em que ele não é aplicável.

8. Segunda Lei Da Termodinâmica

Em todas as transformações naturais, as conversões energéticas são tais que a energia total permanece constante, de acordo com o princípio da conservação da energia. A primeira lei da Termodinâmica é uma reafirmação desse princípio, porém não prevê a possibilidade de se realizar uma dada transformação. Há muitos eventos

que satisfazem à primeira lei da Termodinâmica, mas eles são impossíveis, ou melhor, sua ocorrência é altamente improvável.

Por exemplo, um pêndulo, oscilando, pára ao fim de algum tempo em virtude dos choques com as moléculas do ar e outros atritos. A energia “organizada” do pêndulo se converte em energia térmica. A primeira lei não invalida a transformação recíproca, em que as moléculas se organizam e empurram o pêndulo, fazendo-o recuperar a energia inicial. No entanto a probabilidade de ocorrência de tal evento é íntima.

Outro exemplo: o calor passa espontaneamente de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura (figura 20a). No entanto a passagem contrária é altamente improvável, razão pela qual consideramos que não ocorre (figura 20b).

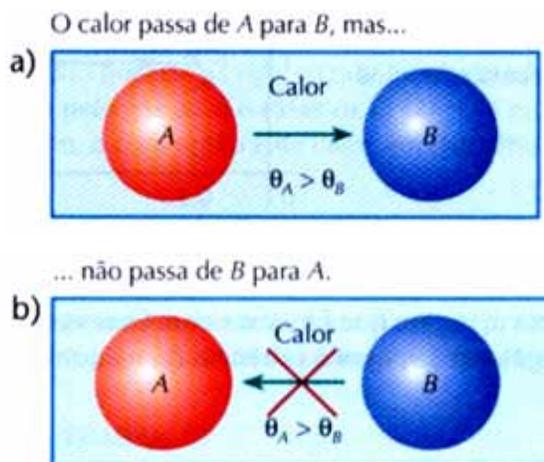


Figura 20.0 calor passa espontaneamente do corpo quente para o corpo frio

Ainda outro exemplo: uma gota de tinta colocada num líquido (figura 21) se espalha uniformemente por ele, de maneira espontânea. Mas é

quase impossível que as moléculas se reagrupem, restaurando a gota inicial.

Note, portanto, que o comportamento da Natureza é assimétrico. A lei que rege tal comportamento é a segunda lei da Termodinâmica. Ela apresenta um caráter estatístico, estabelecendo que os sistemas evoluem espontaneamente, segundo um sentido preferencial, tendendo para um estado de equilíbrio.

De acordo com a segunda lei da Termodinâmica, nas transformações naturais a energia se “degrada” de uma forma organizada para uma forma desordenada chamada energia térmica, como vimos no exemplo do pêndulo. Ainda conforme essa lei, a energia térmica passa de regiões mais quentes para regiões mais frias.

A transferência preferencial de calor do corpo quente para o corpo frio levou Clausius² a enunciar a segunda lei do seguinte modo:

O calor não passa espontaneamente de um corpo para outro de temperatura mais alta.

Sendo o calor uma forma inferior de energia (energia degradada), não é simples sua conversão em outra forma de energia, embora a primeira lei estabeleça essa possibilidade (figura 17). Sendo assim, Lorde Kelvin e Max Planck (1848-1947) enunciaram a segunda lei da Termodinâmica da seguinte maneira:

² **CLAUSIUS**, Rudolf (1822-1888), físico alemão, notável por seus trabalhos sobre a teoria cinética dos gases e a Termodinâmica. Introduziu o conceito de entropia em Termodinâmica.

É impossível construir uma máquina, operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e convertê-lo integralmente em trabalho.

9. Conversão De Calor Em Trabalho: Máquina Térmica

Vimos que, quando um sistema, por exemplo, um gás, realiza um ciclo em sentido horário no diagrama de trabalho, há transformação de calor em trabalho (item 6). Todavia, de acordo com a segunda lei, essa ocorrência não é possível, com o sistema retirando calor de uma fonte e convertendo-o completamente em trabalho.

As máquinas térmicas, como por exemplo, a máquina a vapor, foram inventadas e funcionavam antes que seu princípio teórico fosse estabelecido.

Estudando essas máquinas, Carnot³ evidenciou que uma diferença de temperatura era tão importante para uma máquina térmica quanto uma diferença de nível d'água para uma máquina hidráulica. Estabeleceu, então, que:

³ **CARNOT**, Nicolas Leonard Sadi (1796-1832), pioneiro do estudo da Termodinâmica, era filho de Lazare Carnot, ministro de Napoleão. Sua principal obra (1824) só foi apresentada à Academia de Ciências após sua morte prematura (aos 36 anos).

converter calor em trabalho de modo contínuo, deve operar em ciclo entre duas fontes térmicas, uma quente e outra fria: retira calor da fonte quente (Q_1), converte-o parcialmente em trabalho (τ) e o restante (Q_2) rejeita para a fonte fria.

Na figura 22 representa-se esquematicamente uma máquina térmica, sendo: Q_1 o calor retirado da fonte quente, τ o trabalho útil obtido e Q_2 o calor rejeitado à fonte fria.

O rendimento dessa máquina térmica pode ser expresso pela razão entre a energia útil (trabalho) e a energia total representada pelo calor retirado da fonte quente (Q_1):

$$\eta = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Total}} \Rightarrow \eta = \frac{\tau}{Q_1}$$

Como $\tau = Q_1 - Q_2$, temos: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Nas fórmulas acima, as quantidades de calor foram consideradas em módulo.

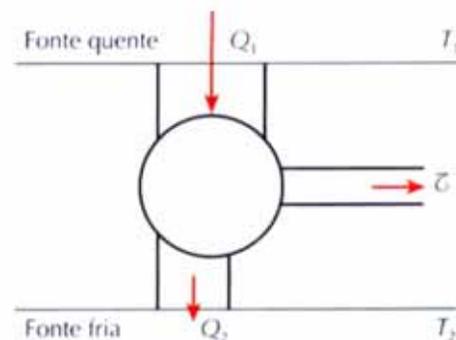
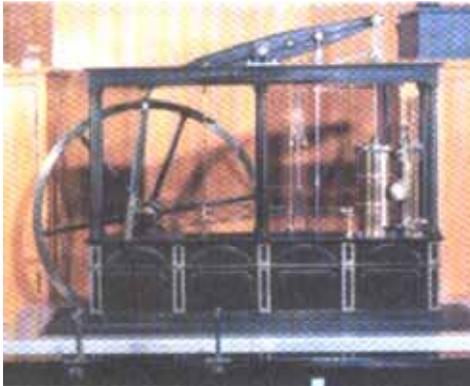


Figura 22. Esquema de uma máquina térmica.

Uma máquina térmica bem conhecida é a locomotiva a vapor (maria-fumaça). Nesta, a fonte quente é a caldeira (fornalha) e a fonte fria é o ar atmosférico. O calor retirado da caldeira é parcialmente transformado no trabalho motor que aciona a máquina e a diferença é rejeitada para a atmosfera.

Observe que, para que a máquina funcione, deve existir sempre um sistema (geralmente gasoso) realizando ciclos continuamente. Esse sistema constitui a substância “trabalhante” da máquina. No caso da locomotiva a vapor, a substância “trabalhante” é o vapor d’água.

As máquinas térmicas (ou motores térmicos) costumam apresentar rendimentos baixos, inferiores a 30%.



Réplica da máquina a vapor de James Watt (1736-1819), engenheiro escocês.



Veículos movidos o vapor ainda são utilizados em fazendas nos Estados Unidos.



Barcos fluviais movidos a vapor são ainda utilizados no transporte de cargas e passageiros.

O motor de explosão do automóvel

Como vimos, calor pode se transformar em trabalho. Desse modo, o motor de uma locomotiva a vapor (ou diesel), um motor de automóvel, uma turbina a vapor ou a gás, um reator de avião são chamados motores térmicos, porque produzem trabalho quando é fornecido calor.

No motor de automóvel, o carburador ou sistema de injeção eletrônica dosa convenientemente uma mistura de ar e vapor de combustível, que penetra num pequeno cilindro ou câmara de explosão, sendo a seguir comprimida e inflamada. O calor produzido pela combustão explosiva do combustível no ar comprimido aquece fortemente a mistura gasosa e, por conseguinte, conduz a pressão a um valor muito elevado. Então a mistura exerce sobre o pistão uma força de grande intensidade que o empurra, provocando a rotação do eixo motor. A **figura a** mostra, esquematicamente, a maneira pela qual o movimento de vaivém do pistão é transformado no movimento circular do eixo motor.

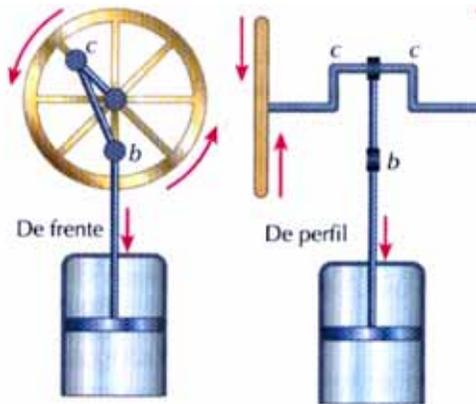


Figura a

O motor do automóvel é um motor de explosão de quatro tempos como mostrado na **figura b**.

1º TEMPO: ADMISSÃO

O pistão, que se encontrava no ponto superior, desce pelo movimento do eixo e a mistura de ar e vapor penetra na câmara de explosão (C) através da válvula de admissão (A), que se encontra aberta. Nesse tempo, a válvula de escape (E) se mantém fechada.

2º TEMPO: COMPRESSÃO

As válvulas de admissão (A) e de escape (E) estão fechadas. O pistão sobe e, à medida que diminui o volume ocupado pela mistura, a pressão aumenta. Como consequência ocorre aumento da temperatura.

3º TEMPO: EXPLOSÃO

Nesse tempo, o dispositivo denominado vela (V) emite uma faísca que inflama os gases comprimidos. Essa inflamação é extremamente

rápida e os gases se queimam totalmente, antes que o pistão tenha tempo de começar a descer. O calor desenvolvido aumenta consideravelmente a pressão e a temperatura, causando a expansão dos gases, que empurram fortemente o pistão para baixo. Este é o único tempo motor do ciclo, ou seja, o único tempo onde há realização de trabalho.

4º TEMPO: EXPULSÃO

A válvula de admissão (A) está fechada e a válvula de escape (E), aberta. Os gases queimados são expulsos para a atmosfera pela válvula aberta, por meio do movimento ascendente do pistão, determinado pelo eixo motor já em movimento. Ao final desse quarto tempo a válvula de escape se fecha e concomitantemente a válvula de admissão se abre, recomeçando o ciclo.

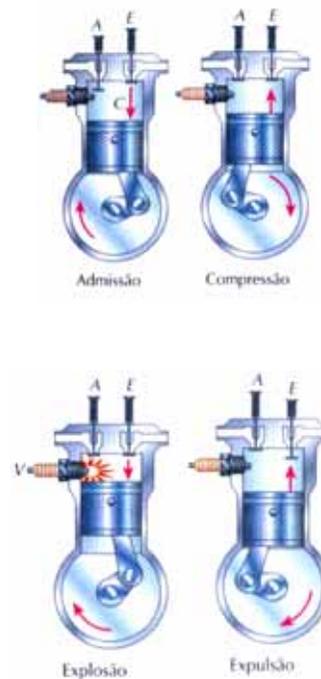


Figura b

Perceba, por essa descrição, que só há um giro motor, o da expansão, no terceiro tempo, e que, para obtê-lo, o motor necessita de quatro giros ou tempos do pistão.

O trabalho obtido nesse único giro deve ser maior que o gasto nos outros. A energia necessária para produzir o primeiro tempo do pistão deve ser fornecida pelo motor de arranque.

Para melhorar o rendimento dos motores, estes funcionam, comumente, com quatro, seis ou mais cilindros defasados, de modo que haja sempre um tempo motor. Na figura c, está representado o eixo de um motor de explosão com quatro cilindros em linha.

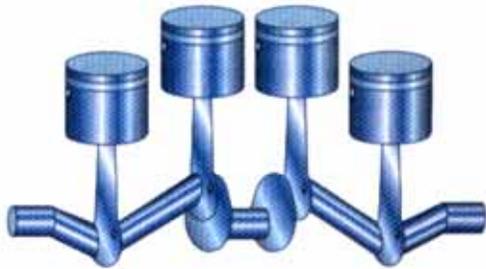


Figura c. Quatro cilindros em linha num motor de explosão.



Nos automóveis, os motores dispõem usualmente de quatro, seis ou mais cilindros e são constantemente aperfeiçoados, visando aumentar seu rendimento.

10. Conversão De Trabalho Em Calor: Máquina Frigorífica

Máquinas frigoríficas são dispositivos que, durante seu funcionamento, efetuam a transformação trabalho em calor.

Os refrigeradores são máquinas frigoríficas que, ao funcionarem, transferem calor de um sistema em menor temperatura (congelador) para o meio exterior, que se encontra a uma temperatura alta (figura 23). Evidentemente eles não contrariam o enunciado de Clausius da segunda lei, que a referida passagem não é espontânea, ocorrendo à custa de um trabalho externo (nas geladeiras comuns, o trabalho é feito pelo compressor). Na figura: Q_2 é a quantidade de calor retirada da fonte fria, τ é o trabalho externo e Q_1 é a quantidade de calor total rejeitada para a fonte quente.

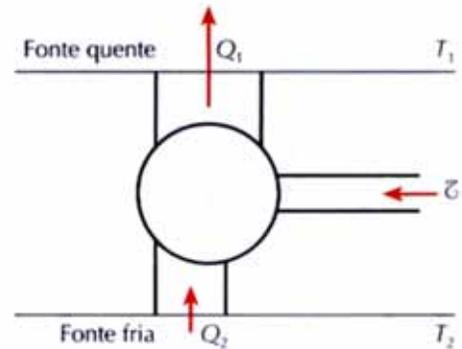


Figura 23. Máquina frigorífica.

A **eficiência (e)** de uma máquina frigorífica é expressa pela relação entre a quantidade de calor retirada da fonte fria (Q_2) e o trabalho externo envolvido nessa transferência (τ):

$$e = \frac{Q_2}{\tau}$$

A eficiência é adimensional (não possui unidade), não podendo ser expressa em porcentagem.

11. Ciclo De Carnot

Em 1824, Carnot idealizou um ciclo que proporcionaria rendimento máximo a uma máquina térmica.

O ciclo de Carnot (figura 24) consta de duas transformações adiabáticas alternadas com duas transformações isotérmicas, todas elas reversíveis, sendo o ciclo também reversível. Quando o ciclo é percorrido no sentido horário, \mathcal{C} o trabalho realizado é positivo e medido numericamente pela área do ciclo.

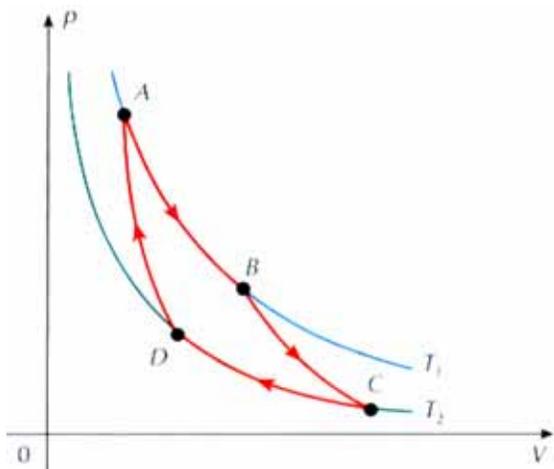


Figura 24. Ciclo de Carnot: AB e CD são isotérmicos; BC e DA são adiabáticas.

Imagine uma máquina térmica, na qual o gás sofra expansões e compressões, realizando o ciclo de Carnot (figura 25). Seja T_1 a temperatura da fonte quente e T_2 a temperatura da fonte fria.

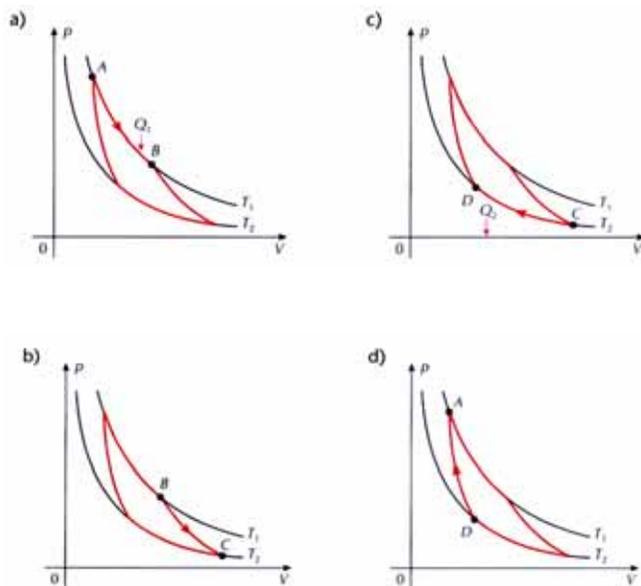
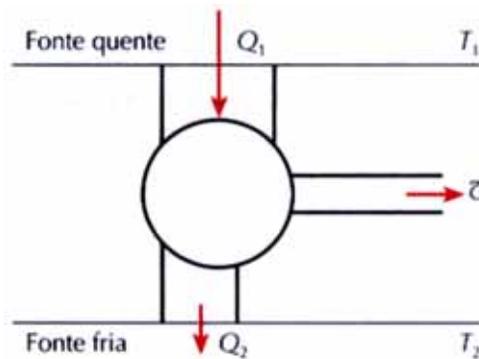


Figura 25. a) na expansão AB o gás retira Q_1 da fonte quente; b) na expansão BC não troca calor; c) na compressão CD rejeita Q_2 para a fonte fria; d) na compressão DA não troca calor.

Partindo do estado A, o gás realiza uma expansão isotérmica AB (figura 25a), recebendo a quantidade de calor Q_1 da fonte quente. A seguir ocorre a expansão adiabática BC (figura 25b), durante a qual não há troca de calor. A compressão isotérmica CD (figura 25c) se verifica a temperatura T_2 da fonte fria e, nessa etapa, o gás rejeita a quantidade de calor Q_2 que não se converte em trabalho. A compressão adiabática DA (figura 25d), que completa o ciclo, se realiza sem troca de calor.

Carnot demonstrou que, nesse ciclo, as quantidades de calor trocadas com as fontes quente e fria são proporcionais às respectivas temperaturas absolutas das fontes:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

O rendimento de uma máquina térmica que realiza o ciclo de Carnot (máquina de Carnot) pode então ser expresso por:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Como $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, temos $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Esta fórmula permite que se estabeleça uma importante conclusão:

O rendimento no ciclo de Carnot é função exclusiva das temperaturas absolutas das fontes quente e fria, não dependendo, portanto, da substância “trabalhante” utilizada.

Por outro lado, Carnot provou que essa fórmula corresponde ao máximo rendimento que pode ser por uma máquina térmica operando entre duas temperaturas T_1 (fonte quente) e T_2 (fonte fria).

MÁXIMO RENDIMENTO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Há ciclos teóricos reversíveis que podem ter rendimento igual ao do ciclo de Carnot, mas nunca maior

Observe que o rendimento do ciclo de Carnot é o máximo possível para uma máquina térmica, mas nunca pode alcançar 100% ($\eta = 1$). Realmente, para que isso ocorresse, deveríamos ter:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ se } \eta = 1 \text{ e } T_2 = 0 \text{ K}$$

Para uma máquina de Carnot ter rendimento 100% ($\eta = 1$), ela deveria operar entre uma fonte quente e uma fonte fria à temperatura do zero absoluto ($T_2 = 0 \text{ K}$), o que é irrealizável na prática. Além disso, tal máquina estaria contrariando a segunda lei da Termodinâmica, pois converteria integralmente em trabalho, ou seja:

$$\eta = \frac{\tau}{Q_1}, \text{ se } \eta = 1 \text{ e } Q_2 = 0$$

12. Escala Kelvin Termodinâmica

Ao definirmos as escalas termométricas (A medida da Temperatura — Termometria), foi necessário efetuar uma escolha arbitrária e convencional de um corpo termométrico e de uma grandeza termométrica, estabelecendo uma função do 1º grau entre a temperatura e a grandeza termométrica. Entretanto essa definição apresenta limitações e, muitas vezes, os resultados obtidos não correspondem aos valores reais.

Como o rendimento de uma máquina de Carnot não depende da natureza do agente térmico, podemos definir a escala absoluta de tempera-

turas de modo mais rigoroso, segundo proposta de Kelvin em 1848.

A máquina de Carnot pode ser considerada um verdadeiro termômetro energético, onde a grandeza termométrica é a quantidade de calor trocada com as fontes quente e fria (figura 26).

No ciclo de Carnot temos:

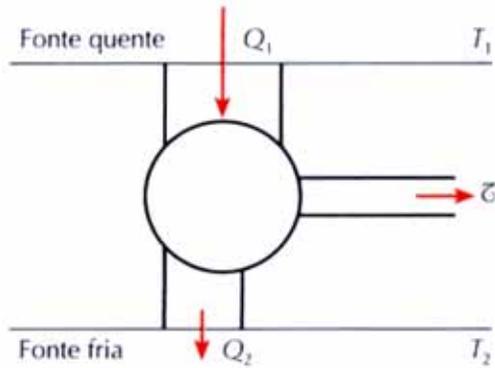


Figura 26

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

A escala Kelvin termodinâmica é a escala obtida nesse termômetro teórico constituído por uma máquina de Carnot. Nessa escala, adota-se como temperatura de referência a do ponto triplo da água, estado térmico onde coexistem gelo, água líquida e vapor d'água em equilíbrio. A esse estado térmico corresponde, para a temperatura, o valor 273,16 K.

Desse modo, seja $T = 273,16 \text{ K}$ a temperatura da fonte quente e T a temperatura da fonte fria, que corresponde à temperatura que se deseja determinar (figura 27). A função termométrica da escala Kelvin termodinâmica será:

$$\frac{Q_T}{T_T} = \frac{Q}{T}$$

Mas $T_T = 273,16 \text{ K}$. Daí

$$\frac{Q_T}{273,16} = \frac{Q}{T}$$

$$T = 273,16 \cdot \frac{Q}{Q_T}$$

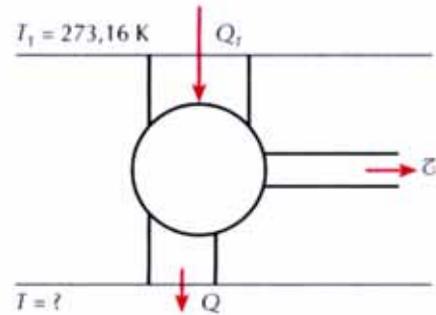


Figura 27. A escala absoluta termodinâmica é definida por meio de uma máquina de Carnot,

A escala Kelvin termodinâmica é de realização prática impossível, pois a máquina de Carnot é ideal. O termômetro cujas indicações mais se aproximam do termômetro energético descrito é o termômetro de gás a volume constante, denominado **termômetro legal**.

Adotando o zero absoluto (0 K) como a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot, o rendimento é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Sendo $T_2 = 0 \text{ K}$, temos $\eta = 1$ (100%)

Portanto:

O zero absoluto ou zero kelvin (0 K) é a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot que apresenta rendimento 100% ($\eta = 1$).

Como uma máquina térmica com 100% de rendimento converte integralmente calor em trabalho, contrariando a segunda lei da Termodinâmica, concluiu-se que o zero absoluto é inatingível.

Apesar de o zero absoluto (0 K) ser irrealizável, pesquisas recentes já permitiram atingir temperaturas incrivelmente baixas, como a obtida no laboratório criogênico da Universidade de Tecnologia de Helsinque, em 1993: $2,8 \cdot 10^{-10} \text{K}$, isto é, 0,00000000028 K!

13. Princípio Da Degradação Da Energia

As transformações naturais ocorrem preferencialmente num sentido, caracterizando-se pela irreversibilidade. Embora ocorra sempre conservação da energia, à medida que o Universo evolui, diminui a possibilidade de se conseguir energia útil ou trabalho de um sistema.

Se tivermos dois corpos inicialmente a temperaturas diferentes, poderemos aproveitar essa diferença de temperatura por meio de uma máquina térmica e obter trabalho. No entanto se os corpos forem colocados em contato térmico, o calor passa espontaneamente do corpo quente para o corpo frio, até o equilíbrio térmico. Deixa de haver diferença de temperatura entre os corpos e estes perdem a capacidade de produzir trabalho.

Todas as formas de energia (mecânica, elétrica, química, nuclear) tendem a se converter espontânea e integralmente na energia desordenada de agitação térmica. A transformação inver-

sa, embora possível (máquinas térmicas), se dá com baixo rendimento.

Há ainda a tendência de se estabelecer o equilíbrio térmico, reduzindo a possibilidade de transformação da energia térmica em outras formas de energia. Por isso, a energia térmica é denominada energia degradada, sendo possível considerar a **segunda lei da Termodinâmica como o princípio da degradação da energia**.

14. Desordem E Entropia

Coloquemos, num recipiente, cem esferas vermelhas na parte de baixo e cem esferas azuis sobre elas. Fechando o recipiente e agitando-o, as esferas irão se misturar. Seria possível voltarmos à situação inicial, com todas as esferas vermelhas embaixo e todas as azuis em cima? Pela lei das probabilidades, não é impossível, mas é um evento de baixíssima probabilidade, isto é, altamente improvável. Talvez tivéssemos de agitar o recipiente durante milhões de anos sem conseguir o desejado.

Tomemos agora um baralho em que as cartas estejam ordenadas por naipes e por valores. Ao embaralharmos as cartas, essas irão se misturar e se distribuir ao acaso. Será possível que, após um grande número de embaralhamentos, as cartas voltem a se ordenar? Impossível não é, mas é altamente improvável.

Os fenômenos naturais são irreversíveis exatamente por se realizarem sempre no sentido dos estados mais prováveis. Por isso mesmo, nos

processos naturais, há sempre a passagem espontânea de um estado ordenado para um estado desordenado.

Se ligarmos dois recipientes, um com hidrogênio e outro com oxigênio, os gases irão se misturar espontaneamente, ocorrendo uma distribuição mais ou menos uniforme dos dois gases nos recipientes. É altamente improvável, embora não impossível, que, sem a ação de nenhum agente externo, os gases se separem novamente, voltando à ordem inicial.

A degradação natural da energia também é uma evolução para a desordem. As energias ordenadas (mecânica, elétrica, química) tendem a se converter na energia desordenada de agitação térmica.

Portanto:

Em todos os fenômenos naturais, a tendência é uma evolução para um estado de maior desordem.

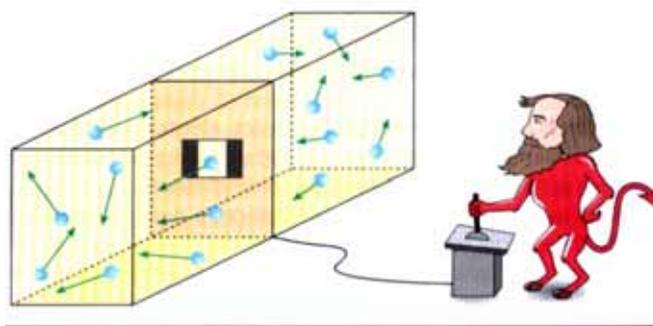
Ao conceito estatístico de desordem Clausius associou o conceito matemático de **entropia**. Assim, a entropia é uma propriedade intrínseca dos sistemas, caracterizada pelo fato de seu valor aumentar quando aumenta a desordem nos processos naturais.

Portanto:

As transformações naturais sempre levam a um aumento na entropia do Universo.

O demônio de Maxwell

O célebre físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) formulou, em 1871, um experimento teórico que violaria a segunda lei da Termodinâmica, indicando o caráter estatístico do conceito de entropia proposto por Clausius em 1864. Ele imaginou um ser microscópico inteligente que teria a capacidade de, por meio de uma portinhola entre dois recipientes contendo gás, controlar a passagem das moléculas, só deixando passar as moléculas rápidas num sentido e só as moléculas lentas em sentido contrário. Com isso, ele conseguiria, ao fim de certo tempo, ter, de um lado, apenas as moléculas rápidas (e portanto gás numa temperatura mais elevada) e, do outro, apenas as moléculas lentas (e portanto gás numa temperatura mais baixa). Esse ser hipotético, conhecido como demônio de Maxwell, estaria, sem dispêndio de energia, ordenando o sistema e, conseqüentemente, diminuindo sua entropia, indo de encontro a tendência natural para desordem, isto é para o aumento da entropia.



A variação de entropia pode ser entendida como a medida da ineficácia da energia do sistema em sua evolução natural. Realmente sabemos que o sistema evolui no sentido de diminuir a possibilidade de se conseguir energia útil ou trabalho dele.

Quando ocorre uma transformação natural, outras formas de energia se convertem em calor. Por tanto aumenta-se a ineficácia da energia total do sistema e aumenta-se sua entropia. Assim podemos dizer que a quantidade de calor Q que se desenvolve no sistema é uma medida parcial de seu aumento de entropia.

Por outro lado, a possibilidade de se obter trabalho a partir de determinada quantidade de calor Q depende da temperatura T em que essa quantidade é trocada.

Imagine duas máquinas de Carnot que retirem da fonte quente a mesma quantidade de calor Q (figura 28). Contudo a fonte quente da primeira está a uma temperatura T_1 maior que a da segunda T'_1 . Seja T_2 a temperatura da fonte fria de ambas. Os rendimentos são dados por:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{e} \quad \eta' = 1 - \frac{T_2}{T'_1}$$

Como $T_1 > T'_1$, $\eta > \eta'$

$$\eta = \frac{\bar{c}}{Q} \quad \text{e} \quad \eta' = \frac{\bar{c}'}{Q}$$

Portanto:

$$\bar{c} > \bar{c}'$$

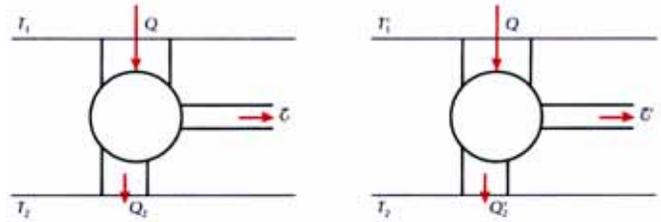


Figura 28. Obtém-se mais trabalho ($\bar{c} > \bar{c}'$) da máquina em que a fonte quente está a uma maior temperatura.

Assim, da mesma quantidade de calor Q obtém-se mais trabalho quando a troca é realizada em temperatura mais alta. Então, a incapacidade de realizar trabalho é tanto maior quanto menor a temperatura do sistema.

Seja Q a quantidade de calor que o sistema troca e T a temperatura dele durante uma transformação isotérmica reversível. Define-se a variação de entropia ΔS do sistema, nesse processo, através da relação:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

A unidade de variação de entropia no Sistema Internacional de Unidades é o joule por kelvin (símbolo: J/K).

A **variação de entropia ΔS** , do mesmo modo que a variação de energia interna ΔU , é uma função de estado, dependendo apenas dos estados inicial e final do sistema, e não das particulares transformações que levam o sistema de um estado ao outro.

A definição acima foi estabelecida para um processo reversível. Numa transformação natural irreversível, a medida da variação da entropia é feita de modo indireto, como mostramos a seguir, na expansão livre de um gás.

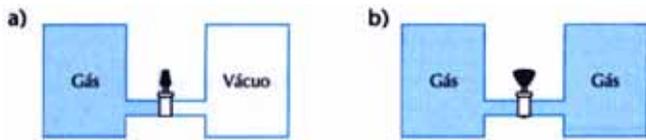


Figura 29. Na expansão livre de um gás perfeito, há aumento de entropia.

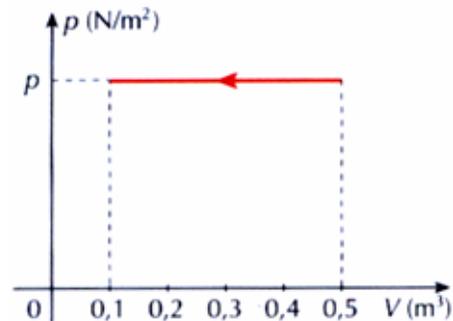
Imaginemos um sistema, termicamente isolado do meio exterior, constituído por dois recipientes inicialmente separados, como mostra a figura 29a: em um deles, há um gás perfeito e, no outro, vácuo. Retirando-se a separação, o gás se expande, passando a ocupar também o segundo recipiente (figura 29b). A transformação ocorrida é adiabática ($Q = 0$) e não há realização de trabalho ($\mathcal{C} = 0$), pois não houve resistências contra a expansão do gás. Pela primeira lei da Termodinâmica, a variação de energia interna também é nula ($\Delta U = \mathcal{C} - Q = 0$), não havendo, portanto, variação de temperatura: o processo é isotérmico. Note que o gás, ao se expandir, realiza uma transformação irreversível e, em consequência, diminui sua capacidade de realizar trabalho. A entropia do sistema aumenta.

Para medir esse aumento de entropia, imaginemos um processo reversível inverso, isto é, que leve o sistema do estado final de volta ao estado inicial. Para isso, deve ser realizado um trabalho sobre o gás e, como o processo é isotérmico, o gás deve perder uma equivalente quantidade

de calor Q . Como a temperatura T é constante, há nessa transformação uma diminuição de entropia ΔS dada por $\Delta S = \frac{Q}{T}$. Sendo a variação de entropia uma função de estado, só dependendo dos estados inicial e final, o módulo do ΔS calculado mede o aumento da entropia ocorrida na expansão.

Atividades de Sala

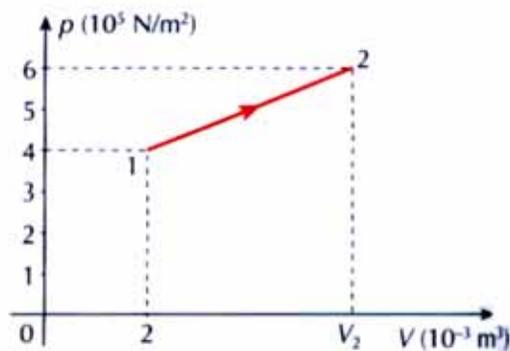
01. Cinco mols de um gás perfeito se encontram à temperatura de 600 K, ocupando um volume de $0,5 \text{ m}^3$. Mediante um processo isobárico, o gás é submetido à transformação indicada no gráfico:



- Determine a pressão exercida pelo gás durante o processo.
- Qual a temperatura final do gás?
- Calcule o trabalho realizado na transformação, indicando como esse cálculo pode ser feito por meio do gráfico.
- O trabalho em questão é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique. (Dado: $R = 8,31 \text{ J/mol K}$.)

Resp.: (a) $5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$; (b) 120 K; (c) $-2 \cdot 10^4 \text{ J}$; (d) Sobre o gás.

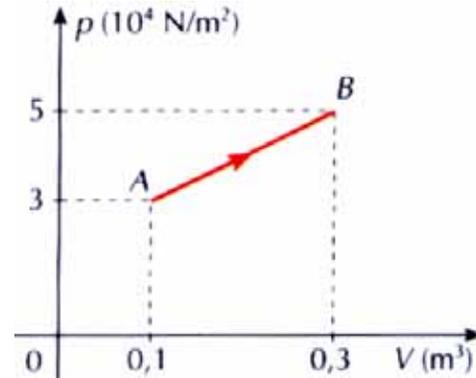
02. Certa massa de um gás ideal sofre o processo termodinâmico indicado no gráfico ao lado. Sendo $T_1 = 200$ K a temperatura inicial do gás no processo e $T_2 = 900$ K a temperatura final:



- Qual o volume final da massa gasosa?
- Calcule o trabalho realizado no processo, indicando se ele é realizado pelo gás ou sobre o gás.

Resp.: (a) $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; (b) $2 \cdot 10^3 \text{ J}$; Pelo o gás.

03. Seis mols de um gás ideal monoatômico sofrem o processo termodinâmico AB indicado no gráfico. Sendo $R = 8,31 \text{ J/mol K}$, determine:



- as temperaturas inicial e final do gás;
- a variação de energia interna do gás no processo AB;
- o trabalho realizado pelo gás ao passar do estado A para o estado B;
- a quantidade de calor trocada pelo gás na transformação de A para B.

Resp.: (a) 60 K e 301 K; (b) $1,8 \cdot 10^4 \text{ J}$; (c) $0,8 \cdot 10^4 \text{ J}$ (d) $2,6 \cdot 10^4 \text{ J}$.

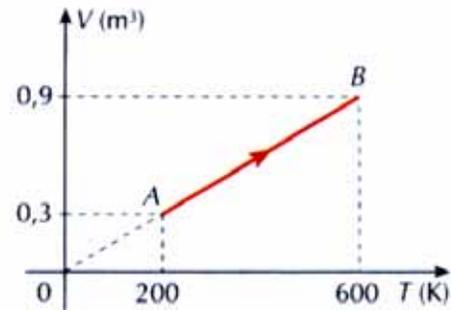
04. Numa transformação isotérmica de um gás ideal, o produto pV é constante e vale 33.240 J. A constante dos gases perfeitos é 8,31 J/mol.K e o número de mols do gás é $n = 5$. Durante o processo, o gás recebe do meio exterior 2.000 J do calor. Determine:

- a) se o gás está sofrendo expansão ou compressão;
- b) a temperatura do processo;
- c) a variação da energia interna do gás;
- d) o trabalho realizado na transformação.

Resp.: (a) 800 K; (b) 0; (c) 2000 J.

05. Amassa de 20 g de hélio (massa molar $M = 4$ g/mol), considerado um gás ideal, dilata-se isobaricamente como mostra o gráfico. Sendo $R = 8,31$ J/mol.K a constante universal dos gases perfeitos, $c_p = 1,25$ cal/g.K o calor específico do hélio sob

pressão constante e 1 cal 4,18 J, determine:



- a) a pressão sob a qual se realiza o processo;
- b) a quantidade de calor que o gás recebe durante o processo;
- c) o trabalho realizado pelo gás nessa dilatação;
- d) a variação de energia interna sofrida pelo gás.

Resp.: (a) $2,77 \cdot 10^4$ N/m²; (b) $4,18 \cdot 10^4$ J; (c) $1,66 \cdot 10^4$ J; (d) $2,52 \cdot 10^4$ J.

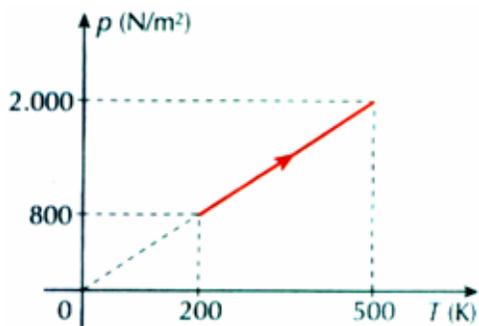
06. Admita que o aquecimento do mesmo gás do exercício anterior (de 200 K para 600 K) tivesse sido realizado isocoricamente. Determine, para essa situação:

- a) a quantidade de calor recebida pelo gás;
- b) o trabalho realizado pelo gás nesse processo;

- c) a variação de energia Interna sofrida pelo gás.

Resp.: (a) $2,51 \cdot 10^4$ J; (b) zero; (c) $2,51 \cdot 10^4$ J.

07. Um gás sofre certa transformação cujo gráfico $p = f(T)$, ao lado, está representando. Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 8,31$ J/mol.K o número de mols do gás $n = 5$; o calor molar a volume constante do gás $C_v = 2,98$ cal/mol.K e 1 cal = $4,18$ J, determine:



- a) a transformação sofrida pelo gás;
b) o volume de gás durante o processo;
c) a quantidade de calor que o gás recebe durante a transformação;
d) a variação da energia Interna do gás, nessa transformação.

Resp.: (a) Isocórica; (b) $10,4$ m³; (c) $1,87 \cdot 10^4$ J; (d) $1,87 \cdot 10^4$ J.

08. Um gás perfeito sofre um processo adiabático no qual realiza um trabalho de 300 J.
- a) O gás está se expandindo ou se contraindo? Por quê?
b) Qual a quantidade de calor que o gás está trocando com o ambiente?
c) De quanto é a variação de energia Interna do gás nesse processo?
d) Explique como se modificam as variáveis de estado (volume, temperatura e pressão) do gás nessa transformação.

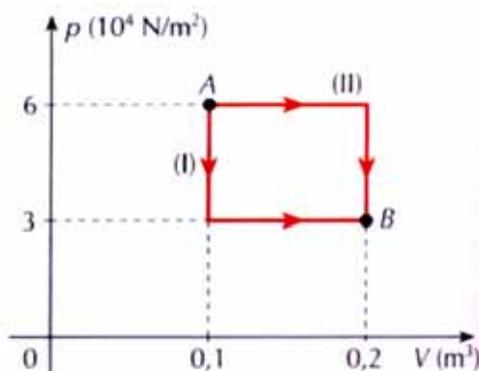
Resp.: (a) Está expandindo por que ele está realizando um trabalho. (b) zero; (c) -300 J; (d) V aumenta, enquanto a T e P diminui.

09. Sob pressão de 3 atm, o volume de um gás ideal será 9 litros. Esse volume diminui para 1 litro quando o gás sofre um processo adiabático. Considere que o expoente de Poisson para esse gás seja $\gamma = 1.5$.
- Qual a pressão final do gás?
 - Se a temperatura no estado inicial era 600 K, qual seu valor no estado final?

Resp.: (a) 81 atm; (b) 1800 K.

10. Certa quantidade de gás perfeito pode passar de um estado A para um estado B por dois “caminhos” possíveis:
- transformação isocórica seguida de uma isobárica;
 - transformação isobárica seguida de uma isocórica.

Resposta:



- A que estado, A ou B, corresponde maior temperatura?
- Qual a variação de energia interna do gás no “caminho” (I) e no “caminho” (II)?
- Em qual dos “caminhos” é maior o trabalho realizado pelo gás? Calcule esses trabalhos.
- Em qual dos “caminhos” é maior a quantidade de calor trocada pelo gás? Quanto valem essas quantidades de calor?

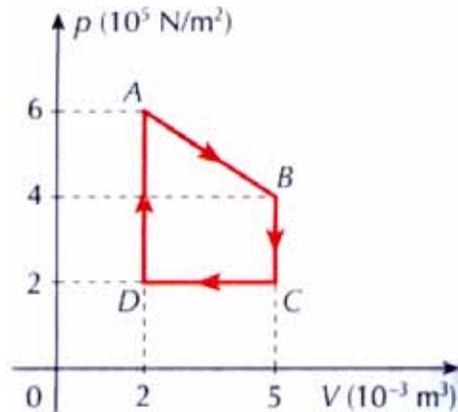
Resp.: (a) $T_A = T_B$; (b) Zero; (c) $3 \cdot 10^3$ J e $6 \cdot 10^3$ J; (d) $3 \cdot 10^3$ J e $6 \cdot 10^3$ J.

11. Numa expansão adiabática, a temperatura de um mol de gás perfeito diminui 200 K. O calor molar a volume constante do gás é igual a 12,5 J/mol.K. Determine:
- a quantidade de calor trocada com o meio externo;
 - a variação de energia interna do gás;

- c) o trabalho realizado pelo gás durante o processo.

Resp.: (a) Zero; (b) -2500 J; (c) 2500 J.

12. O gráfico representa a transformação cíclica sofrida por um gás perfeito no sentido ABCDA. Pergunta-se:



- a) Há conversão de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?
b) Qual a quantidade de calor e trabalho no ciclo em questão?

Resp.: (a) Sim (b) 900J e 900 J.

13. Uma caldeira, a temperatura de 600 K (fonte quente), fornece vapor, correspondente a 1.000 kcal em cada segundo, a uma turbina. O vapor, depois de passar pela turbina, cede ao condensador (fonte fria) 800 kcal por segundo a uma temperatura de 293 K. Considerando 1 cal = 4 J, determine a potência produzida por essa máquina em kW e calcule seu rendimento.

Resp.: $Q = 800$ kJ; Pot = 800 kW; $\eta = 0,2$ (20%)

14. Numa máquina frigorífica, em cada ciclo do gás utilizado, são retirados 120 J do congelador. No processo a atmosfera (fonte quente) recebe 150 J. Determine:

- a) o trabalho do compressor em cada ciclo;
b) a eficiência dessa máquina térmica.

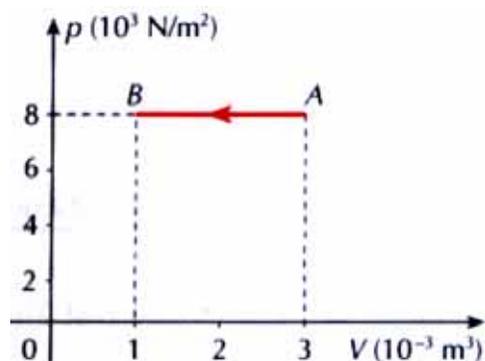
Resp.: (a) $Q = 30$ J; (b) $e = 4,0$

15. Certa máquina térmica ideal funciona realizando o ciclo de Carnot. Em cada ciclo o trabalho útil fornecido pela máquina é de 1.000 J. Sendo as temperaturas das fontes térmicas 127 °C e 27 °C, respectivamente, determine:
- o rendimento da máquina referida;
 - a quantidade de calor retirada da fonte quente;
 - a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria.

Resp.: (a) 25%; (b) 4000 J; (c) 3000 J.

Exercícios Propostos

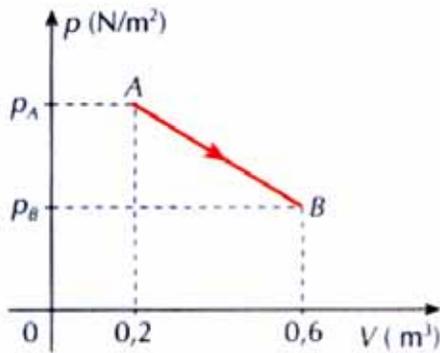
01. Um gás ideal é comprimido isobaricamente como indica o gráfico. Sejam A o estado inicial e B o estado final da massa gasosa. A temperatura Inicial do gás é $T_A = 300\text{K}$.



- Determine a temperatura final T_B do gás.
- Calcule, pelo gráfico, o trabalho realizado no processo.
- Esse trabalho é realizado pelo gás ou sobre o gás? Por quê?

Resp.: (a) 100 K; (b) -16 J; (c) Sobre o gás.

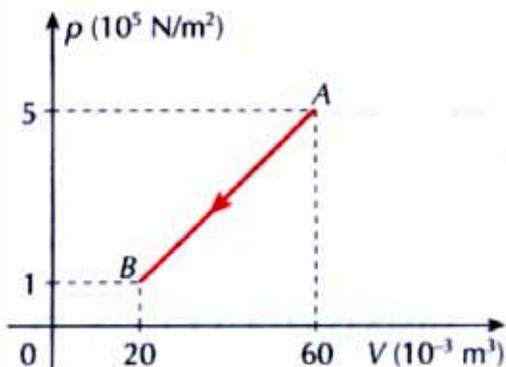
02. O gráfico mostra uma transformação sofrida por 4 mols de um gás perfeito a partir de um estado A, em que a temperatura é 500 K, até outro estado B, em que a temperatura vale 600K.



- Determine as pressões Inicial (P_A) e final (P_B) do gás.
- Calcule o trabalho realizado no processo.
- Esse trabalho é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique.
(Dado: $R = 8,31 \text{ J/mol K}$.)

Resp.: (a) $8,31 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$; $3,32 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$; (b) $2,33 \cdot 10^4 \text{ J}$; (c) Pelo o gás.

03. A massa de 56 g de um gás de massa molar $M = 28 \text{ g/mol}$, suposto ideal, sofre a transformação AB indicada no gráfico.

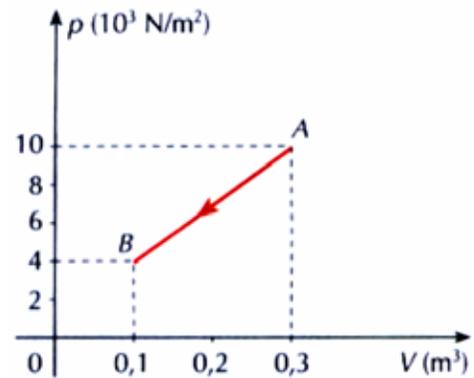


- Determine as temperaturas T_A e T_B dos estados Inicial e final da massa.
- Calcule o trabalho realizado no processo AB.

- O trabalho em questão é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique. (Dado: $R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.)

Resp.: (a) 1805 K e 120,3 K; (b) $-1,2 \cdot 10^4 \text{ J}$; (c) Sobre o gás.

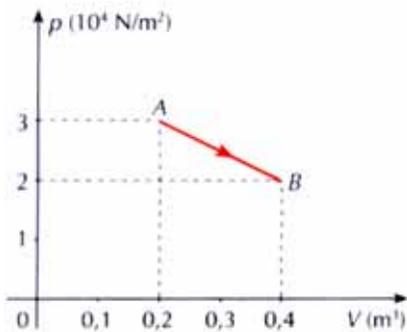
04. Certa quantidade de um gás ideal monoatômico sofre o processo termodinâmico $\hat{A}B$ indicado no gráfico. Sendo $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$ e $T_A = 600 \text{ K}$ a temperatura inicial do gás, determine:



- o número de mols do gás;
- a temperatura final T_B ;
- a variação de energia interna que o gás sofre no processo;
- o trabalho realizado sobre o gás na compressão do estado A para o estado B;
- a quantidade de calor que o gás troca com o ambiente no processo AB.

Resp.: (a) 0,6; (b) 80 K; (c) $-3,9 \cdot 10^3 \text{ J}$; (d) $-1,4 \cdot 10^3 \text{ J}$; (e) $-5,3 \cdot 10^3 \text{ J}$.

05. O gráfico Indica uma transformação AB sofrida por 2 mols de um gás ideal monoatômico. Sendo $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, determine:



- as temperaturas inicial e final do gás;
- a variação de energia interna do gás no processo AB;
- o trabalho realizado pelo gás ao passar do estado A para o estado B;
- a quantidade de calor trocada pelo gás durante a transformação AB.

Resp.: (a) 361 K e 481 K; (b) $3 \cdot 10^3$ J; (c) $5 \cdot 10^3$ J; (d) $8 \cdot 10^3$ J.

06. Numa compressão isotérmica, o trabalho realizado sobre o gás é 600 J. Determine o calor cedido pelo gás no processo e a variação da energia interna.

Resp.: -600 J e Zero

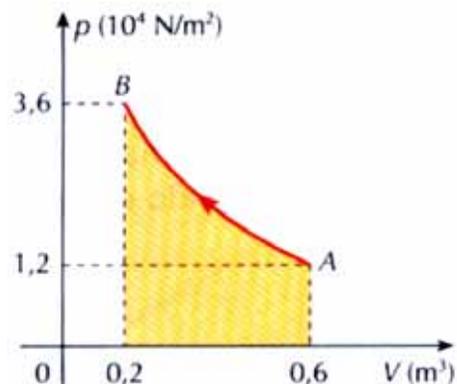
07. Um gás encontra-se inicialmente sob pressão de 10^5 N/m² e à temperatura de 500 K, ocupando um volume de 1,66 m³. O gás se expande isotermicamente ao receber 400 J de calor do meio exterior. Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 8,3$ J/mol K, determine:

- o número de mols do gás que sofre o processo;

- o trabalho realizado durante a transformação;
- a variação de energia interna do gás.

Resp.: (a) 40 mols; (b) 400 J; (c) Zero.

08. Três mols de um gás ideal monoatômico sofrem um processo termodinâmico representado graficamente pela hipérbole equilátera AB indicada na figura. A área destacada no gráfico vale, numericamente, $9,5 \cdot 10^4$.



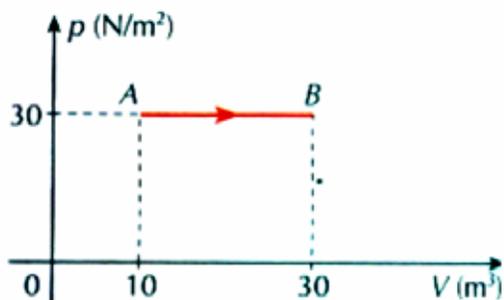
- Qual o processo que o gás está sofrendo? Explique o porquê de sua conclusão.
- Em que temperatura o processo se realiza?
- Qual a variação de energia interna do gás no processo? Por quê?
- Qual o trabalho realizado sobre o gás nesse processo AB?
- Durante o processo AB, o gás recebe ou perde calor? Por quê? Qual a quantidade de calor trocada pelo gás?

(Dado: $R = 8,31$ J/mol.K.)

Resp.: (a) compressão isotérmica ($p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B$); (b) 288,8 K; (c) zero; (d) $-9,5 \cdot 10^4$ J; (e)

perde calor para compensar a energia que recebe na forma de trabalho; $Q = W = 9,5 \cdot 10^4 \text{ J}$.

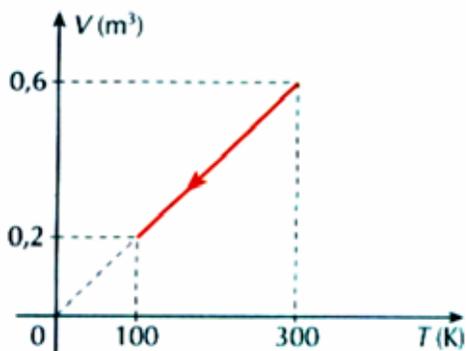
09. No processo isobárico indicado no gráfico ao lado, o gás recebeu 1.000 J de energia do ambiente. Determine:



- o trabalho realizado na expansão;
- a variação de energia interna do gás.

Resp.: (a) 600 J; (b) 400 J.

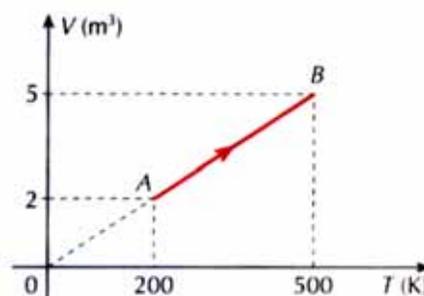
10. O gráfico representa uma compressão isobárica de um gás sob pressão de $2,0 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$. Sabendo que no processo o gás perdeu $2,0 \cdot 10^3 \text{ J}$ de calor, determine:



- o número de mols do gás que sofre o processo;
- o trabalho realizado sobre o gás;
- a variação de energia interna sofrida pelo gás. (Considere $R = 8,31 \text{ J/mol K}$.)

Resp.: (a) 0,48 mol; (b) $-8 \cdot 10^2 \text{ J}$; (c) $-1,2 \cdot 10^3 \text{ J}$.

11. A quantidade de 3 mols de um gás ideal monoatômico sofre a expansão isobárica AB representada no gráfico. Sendo o calor molar sob pressão constante desse gás $C_P = 5 \text{ cal/mol.K}$ e adotando $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, determine:



- a pressão sob a qual o gás se expande;
- a quantidade de calor recebida pelo gás;
- o trabalho que o gás realiza na expansão;
- a variação de energia interna sofrida pelo gás. (Considere $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.)

Resp.: (a) $2,5 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$; (b) $7,5 \cdot 10^3 \text{ J}$; (c) $1,88 \cdot 10^4 \text{ J}$; (d) $1,13 \cdot 10^4 \text{ J}$.

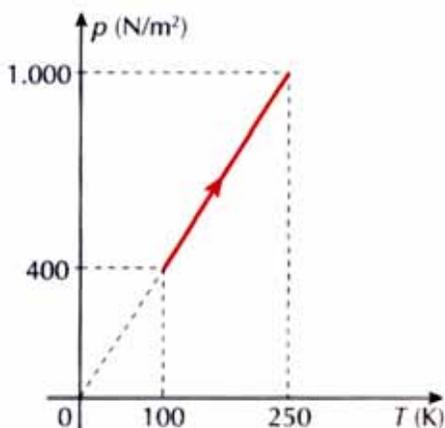
12. No exercício anterior, se o aquecimento de 200 K a 500 K fosse isocórico, qual seria a quantidade de calor recebida pelo gás? Considere $R = 2 \text{ cal/mol.K}$.

Resp.: $1,13 \cdot 10^4 \text{ J}$.

13. Numa transformação a volume constante, um gás recebe 500 J de calor do ambiente. Qual o trabalho realizado e a variação de energia interna do gás?

Resp.: Zero e 500J

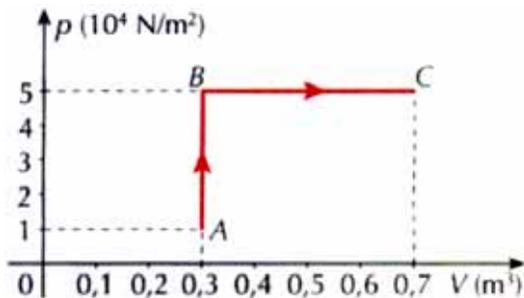
14. O gráfico corresponde ao aquecimento isocórico de 1 mol de um gás perfeito, cujo calor molar a volume constante é 2,98 cal/mol. K. Sendo a constante universal dos gases ideais $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$ e sabendo que $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$, determine:



- o volume do gás durante o processo;
- a quantidade de calor recebida pelo gás;
- a variação de energia interna do gás.

Resp.: (a) $2,08 \text{ m}^3$; (b) $1,87 \cdot 10^3 \text{ J}$; (c) $1,87 \cdot 10^3 \text{ J}$.

15. Durante o processo termodinâmico ABC indicado no gráfico ao lado, certa massa de gás ideal recebe do meio externo $8 \cdot 10^4 \text{ J}$ na forma de calor. Determine:



- o trabalho realizado na etapa AB do processo;
- o trabalho realizado na etapa BC do processo;

- o trabalho realizado em todo o processo ABC;
- a variação de energia interna sofrida pelo gás no processo ABC.

Resp.: (a) Zero; (b) $2 \cdot 10^4 \text{ J}$; (c) $2 \cdot 10^4 \text{ J}$; (d) $6 \cdot 10^4 \text{ J}$.

16. Um gás perfeito é comprimido adiabaticamente, realizando-se sobre ele um trabalho de módulo 500 J.

- Qual a quantidade de calor que o gás troca com o meio externo durante o processo?
- Qual a variação de energia interna sofrida pelo gás nessa transformação?
- Como se modificam o volume, a temperatura e a pressão do gás no processo adiabático em questão? Justifique.

Resp.: (a) Zero; (b) 500 J; (c) o volume diminui, a pressão e a temperatura aumentam.

17. Estabeleça, em termos de trocas energéticas e de variação das variáveis de estado, as diferenças entre a expansão isobárica e a expansão adiabática.

Resp.: Consulte o conteúdo

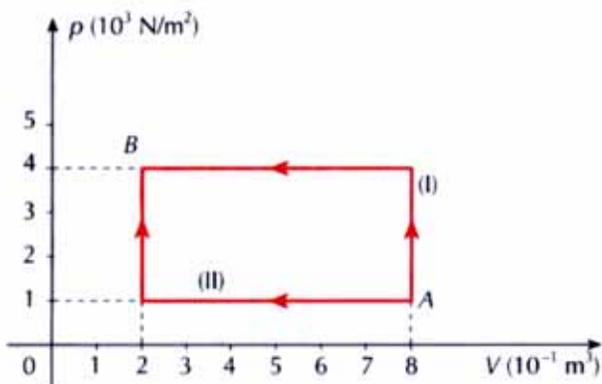
18. Um gás perfeito ocupa um volume de 2 litros exerce uma pressão de 16 atm num recinto de volume variável isolado termicamente do meio externo. Qual a pressão que será exercida pelo gás se o volume for aumentado para 8 litros? O expoente de Poisson para esse gás é $\gamma = 1,5$.

Resp.: 2 atm.

19. Retome o exercido anterior. Se a temperatura inicial do gás era 400 K, qual será sua temperatura ao fim da expansão sofrida?

Resp.: 200 K.

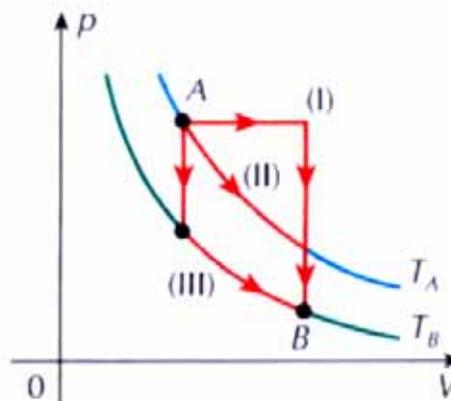
20. Certa quantidade de gás perfeito deve ser levada de um estado inicial A para um estado final B. Há dois “caminhos” possíveis para isso. Pelo “caminho” (I) é realizada uma transformação isocórica seguida de uma isobárica; pelo “caminho” (II) é realizada uma transformação isobárica e em seguida uma isocórica, conforme está indicado no gráfico.



- Compare as temperaturas T_A e T_B dos estados inicial e final da massa gasosa.
- Qual a variação de energia interna do gás nos processos (I) e (II) descritos?
- Quanto ao trabalho realizado nos dois processos, ele depende do “caminho” seguido? Em qual dos casos o trabalho tem módulo maior? Calcule esses trabalhos.
- Em qual dos “caminhos” a quantidade de calor trocada tem maior módulo? Calcule essas quantidades de calor.

Resp.: (a) $T_A = T_B$; (b) zero nos dois processos; (c) o trabalho é maior no caminho I $-2,4 \cdot 10^3 \text{ J}$ e $-6 \cdot 10^3 \text{ J}$; (d) o calor trocado é maior no caminho I $-2,4 \cdot 10^3 \text{ J}$ e $-6 \cdot 10^3 \text{ J}$.

21. No gráfico, A e B são, respectivamente, os estados Inicial e final de certa massa de gás perfeito. São representadas ainda as isotermas correspondentes às temperaturas T_A e T_B desses estados. Considere os seguintes processos entre os estados inicial e final:



- transformação isobárica seguida de isocórica;
 - transformação isotérmica seguida de isocórica;
 - transformação isocórica seguida de isotérmica.
- Qual das temperaturas é maior, T_A ou T_B ? Por quê?
 - Sendo ΔU_I , ΔU_{II} e ΔU_{III} as variações de energia interna nos três processos, coloque-as em ordem crescente. Justifique.

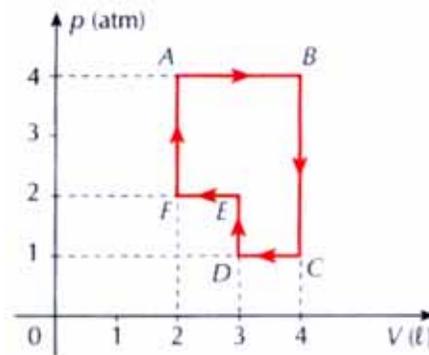
- c) Sendo, τ_I , τ_{II} e τ_{III} os trabalhos realizados pelo gás nos três processos, coloque-os em ordem crescente. Justifique.
- d) Sendo Q_I , Q_{II} e Q_{III} as quantidades de calor recebidas pelo gás nos três processos, coloque-as em ordem crescente. Justifique.

Resp.: (a) T_A Isotema mais afastada do eixo; (b) $\Delta U_I = \Delta U_{II} = \Delta U_{III}$; (c) $\tau_{III} < \tau_{II} < \tau_I$ (d) $Q_{III} < Q_{II} < Q_I$.

22. A temperatura de 2 mols de um gás perfeito aumenta de 300 K para 450K, num processo adiabático. O calor molar sob pressão constante do gás vale 20,75 J/mol . K e a constante universal dos gases perfeitos é $R = 8,3$ J/mol.K. Determine a variação de energia interna sofrida pelo gás e o trabalho realizado no processo.

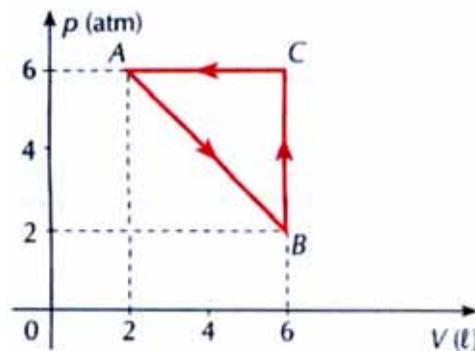
Resp.: 3735 J e -3735 J.

23. Um gás perfeito sofre uma série de transformações, passando pelos estados representados pelos pontos A, B, C, D, E e F, voltando ao estado A, como indica o diagrama. Sendo $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$ e $1 \text{ litro} = 10^{-3} \text{ m}^3$, qual o trabalho realizado, expresso em joules?



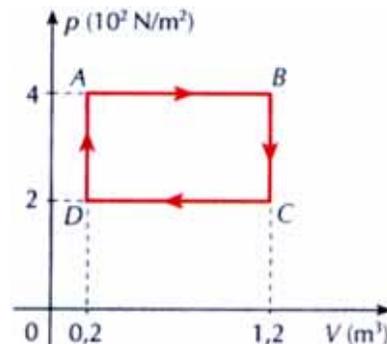
Resp.: $5 \cdot 10^2$ J

24. Um gás perfeito realiza o ciclo esquematizado no diagrama de trabalho no sentido ABCA. Determine o trabalho realizado e o calor trocado no processo, indicando se há conversão de calor em trabalho ou vice-versa. (Dados: $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$ e $1 \text{ litro} = 10^{-3} \text{ m}^3$.)



Resp.: $-8 \cdot 10^2$ J e $-8 \cdot 10^2$ J; Trabalho em calor.

25. Uma certa quantidade de gás ideal realiza o ciclo esquematizado no gráfico.



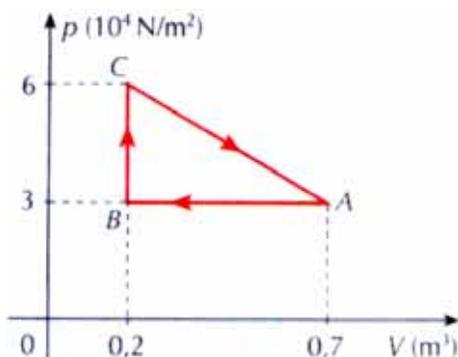
- a) Calcule o trabalho realizado em cada uma das fases do ciclo (AB, BC, CD e DA), indicando se foi realizado pelo gás ou sobre o gás.
- b) Quais as transformações em que há aumento da energia interna e quais aquelas em que há diminuição? Justifique.
- c) Ao completar cada ciclo, há conversão de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?
- d) Calcule a quantidade de calor e de trabalho que se interconvertem em cada ciclo.

Resp.: (a) $\bar{Q}_{AB} = 4 \cdot 10^2 \text{ J}$ (pelo gás); $\bar{Q}_{BC} = 0$; $\bar{Q}_{CD} = -2 \cdot 10^2 \text{ J}$ (sobre gás); $\bar{Q}_{DA} = 0$; (b) aumento de energia interna AB e DA; diminuição de energia interna BC e CD; (c) Calor em trabalho; (d) $2 \cdot 10^2 \text{ J}$.

26. Admita que o ciclo do exercício anterior seja utilizado em uma máquina, de modo em que o gás realize quatro ciclos em cada segundo. Qual a potência dessa máquina?

Resp.: 800 W

27. A figura representa o ciclo ABCA realizado por certa massa de gás ideal.



- a) Calcule o trabalho realizado nas etapas AB, BC e CA do ciclo.

- b) Qual a conversão energética que ocorre ao final de cada ciclo: de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?
- c) Calcule a energia convertida.
- d) Se uma máquina que funciona com base nesse ciclo realiza 8 ciclos pelo gás em 5s, qual a potência da máquina?

Resp.: (a) $\bar{Q}_{AB} = -1,5 \cdot 10^2 \text{ J}$; $\bar{Q}_{BC} = 0$; $\bar{Q}_{CA} = 2,25 \cdot 10^2 \text{ J}$; (b) converte calor em trabalho; (c) $7,5 \cdot 10^3 \text{ J}$; (d) $1,2 \cdot 10^4 \text{ W}$.

28. Em um segundo, o vapor fornece 1.600 kcal ao cilindro de uma máquina a vapor. Durante o mesmo tempo, são perdidas no escape 1.400 kcal. Calcule o rendimento térmico dessa máquina a vapor.

Resp.: 0,125 ou 12,5 %

29. Uma máquina térmica transforma em energia útil $\frac{1}{4}$ do calor que ela retira da fonte quente da máquina. Se a potência útil da máquina vaie 800 kW, qual é, por segundo:

- a) a quantidade de calor retirada da fonte quente?
- b) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria?

Resp.: (a) $3,2 \cdot 10^3 \text{ kJ}$; (b) $2,4 \cdot 10^3 \text{ kJ}$;

30. Calcule o trabalho externo envolvido em cada ciclo e a eficiência de uma máquina frigorífica que retira 50 cal por ciclo do

congelador, rejeitando para o ambiente 75 cal por ciclo. (Dado: 1 cal = 4,18 J.)

Resp.: 104,5 J ou 25 cal ; e = 2.

31. Calcule o rendimento de uma máquina de Carnot que trabalha entre as temperaturas de 27 °C e 327 °C.

Resp.: 50%.

32. (PUC - RJ) Uma máquina de Carnot é operada entre duas fontes, cujas temperaturas são, respectivamente, 100°C e 0°C. Admitindo-se que a máquina recebe da fonte quente uma quantidade de calor igual a 1.000 cal por ciclo, pede-se:

- a) o rendimento térmico da máquina;
- b) o trabalho realizado pela máquina em cada ciclo (expresso em joules);
- c) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria. (Use: 1 cal 4,18J.)

Resp.: (a) 26,8%; (b) 1120 J; (c) 3060 J ou 732 cal.

33. Uma máquina térmica trabalha entre as temperaturas de 127 °C e 327°C. Em cada ciclo a substância trabalhante” dessa máquina retira 200 J de calor da fonte quente e rejeita 160 J de calor para a fonte fria.

- a) Qual a energia útil obtida nessa máquina por ciclo?
- b) Determine o rendimento dessa máquina.
- c) Qual o máximo rendimento que essa máquina poderia ter com as temperaturas entre as quais opera?

Resp.: (a) 40 J; (b) 0,2 ou 20%; (c) 0,33 ou 33%.

34. (Mackenzie-SP) Um motor térmico funciona segundo o ciclo de Carnot. A temperatura da fonte quente é 400K e da fonte fria é 300 K. Em cada ciclo o motor recebe 600 cal da fonte quente. Determine:

- a) a) o rendimento desse motor;
- b) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria em cada ciclo.

Resp.: (a) 0,25 ou 25%; (b) 450 cal.

35. Um inventor informa ter construído uma máquina térmica que recebe, em certo tempo, 10^5 cal e fornece, ao mesmo tempo, $5 \cdot 10^4$ cal de trabalho útil. A máquina trabalha entre as temperaturas de 177 °C e 227 °C.

- a) Que rendimento tem a máquina que o inventor alega ter construído?
- b) Comente a possibilidade de existir essa máquina.

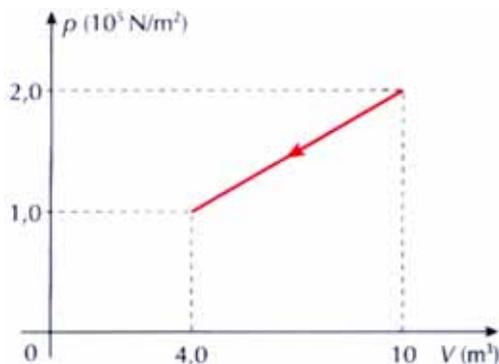
Resp.: (a) 0, 5 ou 50%; (b) Impossível, pois o rendimento máximo entre essas temperaturas é 0,1 (10%).

36. (Vunesp) Transfere-se calor a um sistema, num total de 200 calorias. Verifica-se que o sistema se expande, realizando um trabalho de 150 J, e que sua energia interna aumenta.

- a) Considerando $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$, calcule a quantidade de energia transferida ao sistema, em joules.
- b) Utilizando a primeira lei da Termodinâmica, calcule a variação da energia interna desse sistema.

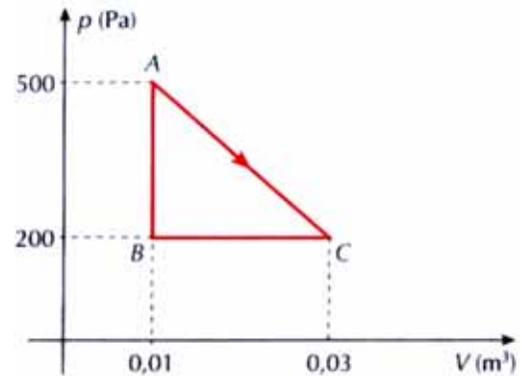
Resp.: (a) 800 J; (b) 650 J.

37. (UFPE) Numa transformação termodinâmica uma certa quantidade de gás ideal se contrai de um volume inicial V 10 m^3 até um volume final $V_1 = 4,0 \text{ m}^3$, de acordo com o diagrama ao lado. Sabe-se que nessa transformação o gás perdeu uma quantidade de calor $Q = 1,0 \cdot 10^5 \text{ cal}$. Determine a variação de sua energia interna em unidades de 10^4 J . Considere $1 \text{ cal} = 4,0 \text{ J}$.



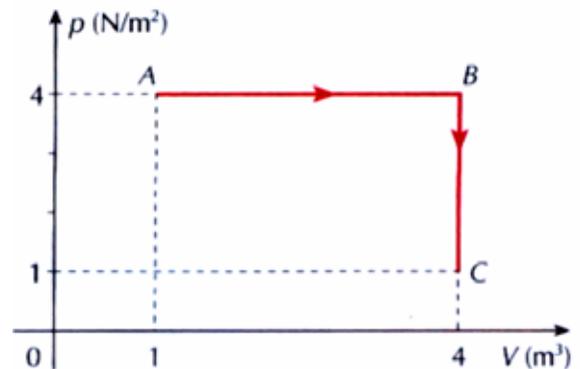
Resp.: $5,0 \cdot 10^4 \text{ J}$.

38. (UnB-DF) No diagrama ao lado, a energia interna do sistema em joules é dada por $U = 10 + 2 pV$, em que p é a pressão, em Pa, e V , o volume, em m^3 . Calcule, em joules, a quantidade de calor envolvida no processo AC.



Resp.: 9 J.

39. (Fuvest-SP) O gráfico da figura representa uma transformação reversível sofrida por uma determinada massa de gás perfeito.



- a) Qual é a variação de temperatura do gás entre o estado inicial A e o estado final C?
- b) Qual a quantidade de calor, em joules, recebida pelo gás na transformação ABC?

Resp.: (a) zero; (b) 12 J.

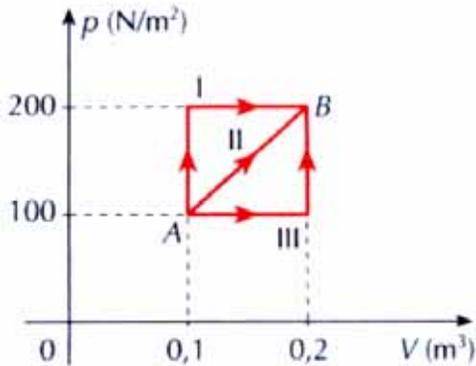
40. (ITA - SP) Uma certa quantidade de gás expande-se adiabaticamente e quase estaticamente desde uma pressão inicial de $2,0 \text{ atm}$ e volume de $2,0 \text{ litros}$ na temperatura de 21°C até atingir o dobro de seu volume. Sabendo-se que para esse gás

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 2,0, \text{ calcule a pressão final e a}$$

temperatura final expressa em graus Celsius.

Resp.: 0,5 atm; - 126°C.

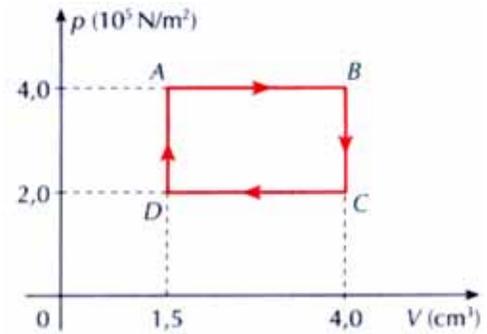
41. (Ufla-MG) Um gás sofre uma série de transformações com estado inicial A e estado final B, como mostra a figura. A energia interna do estado A é $U_A = 1.000 \text{ J}$ e a do estado B é $U_B = 2.000 \text{ J}$. Calcule para cada uma das transformações indicadas:



- a) a variação da energia interna.
- b) o trabalho realizado (diga também se foi feito pelo gás ou sobre o gás).
- c) a quantidade de calor trocado.

Resp.: (a) $\Delta U_I = \Delta U_{II} = \Delta U_{III} = 1000 \text{ J}$ (b) $\bar{c}_I = 20 \text{ J}$ (pelo gás); $\bar{c}_{II} = 15 \text{ J}$ (pelo gás); $\bar{c}_{III} = 10 \text{ J}$ (pelo gás); (c) $Q_I = 1020 \text{ J}$; $Q_{II} = 1015 \text{ J}$; $Q_{III} = 1010 \text{ J}$

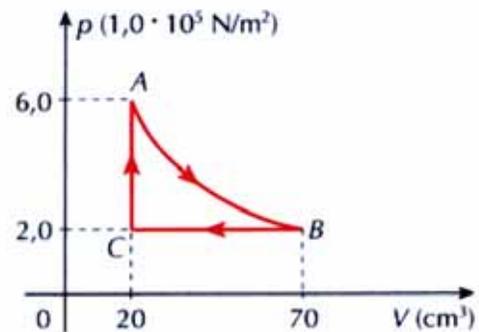
42. (Fuvest-SP) O diagrama pV da figura refere-se a um gás ideal passando por uma transformação cíclica através de um sistema cilindro-pistão.



- a) Qual o trabalho realizado pelo gás no processo AB? E no ciclo ABCDA?
- b) Em que ponto do ciclo a temperatura do gás é menor?

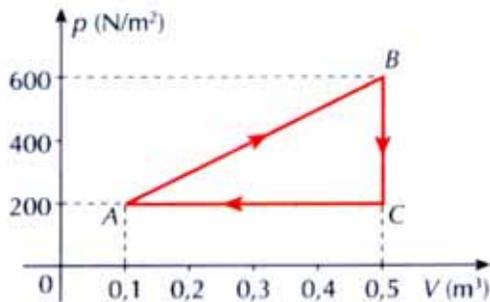
Resp.: (a) 1,0 J e 0,50 J; (b) D.

43. (IJFPE) Um gás Ideal absorve 64 J de calor ao se expandir isotermicamente, de um volume inicial de 20 cm^3 , a $6,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ até um volume final de 70 cm^3 , a $2,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (trecho AB do diagrama a baixo). Qual o trabalho total, em Joules, produzido pelo gás durante o ciclo ABCA?



Resp.: 54 J.

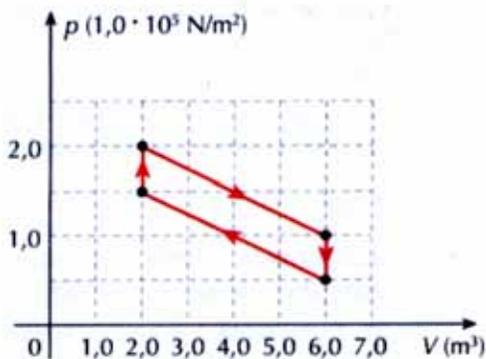
44. (UFG-OO) Um gás sofre a transformação cíclica ABCÂ indicada no gráfico. Determine:



- a) a variação de energia Interna;
- b) o trabalho realizado pelo gás;
- c) a quantidade de calor trocada em cada ciclo.

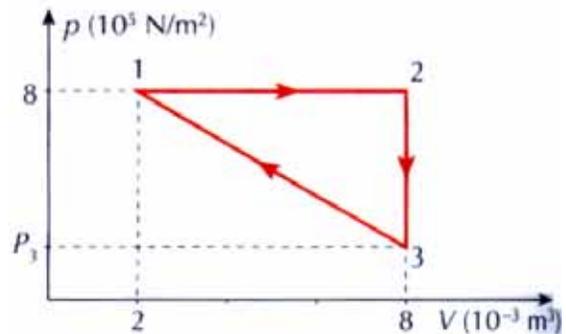
Resp.: (a) zero; (b) 80 J; (c) 80J.

45. (UFPE) A variação da pressão e do volume de vapor d'água a cada ciclo de operação de uma máquina a vapor pode ser aproximada pelo gráfico a baixo. Calcule o trabalho total em unidades 10^6 joules efetuado por essa máquina ao longo de 50 ciclos de operação.



Resp.: $10 \cdot 10^6$ J.

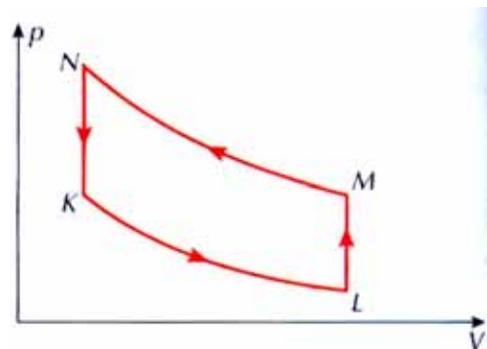
46. (Esal-MG) 0,32 mol de um gás diatômico ideal é submetido ao ciclo termodinâmico mostrado no gráfico, sendo $T_3 = 300,84$ K.



- Calcular T_1 , T_2 e p_3 .
- Calcular o trabalho líquido envolvido no ciclo.
- Calcular a quantidade de calor envolvida no processo $3 \rightarrow 1$. (Dados: $R = 8,31$ J/mol.K, $C_v = 20,775$ J/mol.K.)

Resp.: (a) 601,7 K; 2406,7 K; $1 \cdot 10^5$ N/m² (b) $2,1 \cdot 10^3$ J; (c) $-7,0 \cdot 10^2$ J.

47. (UFMG) A figura mostra o diagrama pressão p versus volume V , que representa as transformações sofridas por um gás ideal dentro de uma câmara. A seqüência de transformações sofridas é KLMN e está indicada pelas setas. As transformações de K para L e de M para N se realizam sem variação da temperatura.



- Indique, explicando seu raciocínio, o(s) trecho(s) em que
 - o gás realiza trabalho positivo;

II. o gás absorve calor.

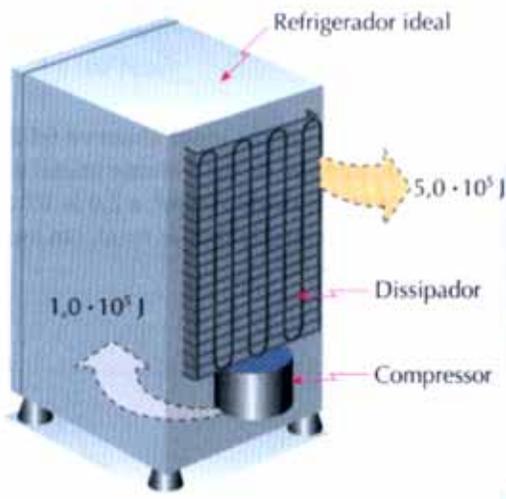
b) Responda e justifique sua resposta:

- I. A temperatura no ponto N é maior, menor ou igual à temperatura no ponto L?
- II. A seqüência de transformações KLMN corresponde ao ciclo de funcionamento de um motor ou de um refrigerador?

Resp.: consulte o conteúdo fornecido.

48. Em um refrigerador ideal, o dissipador de calor (serpentina traseira) transferiu $5,0 \cdot 10^5 \text{ J}$ de energia térmica para o meio ambiente, enquanto o compressor produziu $1,0 \cdot 10^5 \text{ J}$ de trabalho sobre o fluido refrigerante. Calcule:

- a) a quantidade de calor retirada da câmara interna;
- b) a temperatura da câmara interna, supondo que a temperatura ambiente fosse $30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Resp.: (a) $4 \cdot 10^5 \text{ J}$ (b) $30,6^\circ\text{C}$.

49. (Ufla-MG) Uma empresa propõe construir um motor térmico projetado para operar entre dois reservatórios de calor, sendo o quente a temperatura $T_1 = 1.600 \text{ K}$ e o frio a $T_2 = 400 \text{ K}$. O projeto prevê para o motor uma potência de 4 cv com absorção de 1.480 cal/s do reservatório quente. (Dados: $1 \text{ cv} = 740 \text{ W}$ e $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$.)

- a) Calcule o rendimento do referido motor.
- b) Calcule o rendimento de um motor de Carnot operando entre os mesmos reservatórios de calor.
- c) O motor proposto é viável teoricamente? Justifique sua resposta.

Resp.: (a) 0,5 (50%); (b) 0,75 (75%); (c) sim, pois tem rendimento menor que o máximo teoricamente é possível (motor de Carnot).

50. (Unicamp-SP) Com a instalação do gasoduto Brasil - Bolívia, a quota de participação do gás natural na geração de energia elétrica no Brasil será significativamente ampliada. Ao se queimar $1,0 \text{ kg}$ de gás natural obtêm-se $5,0 \times 10^7 \text{ J}$ de calor, parte do qual pode ser convertido em trabalho em uma usina termoelétrica. Considere uma usina queimando 7.200 quilogramas de gás natural por hora, a uma temperatura de $1.227 \text{ }^\circ\text{C}$. O calor não aproveitado na produção de trabalho é cedido para um rio de vazão 5.000 litros/s, cujas águas estão inicialmente a 27°C . A maior eficiência teórica da conversão de calor em trabalho é

dada por $\eta = \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$, sendo T_{\min} e T_{\max} as

temperaturas absolutas das fontes quente e fria, respectivamente, ambas expressas em Kelvin. Considere o calor específico da água $c = 4.000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ e a densidade $d = 1,0 \text{ kg/litro}$.

- Determine a potência gerada por uma usina cuja eficiência é metade da máxima teórica.
- Determine o aumento de temperatura da água do rio ao passar pela usina.

Resp.: (a) 4.10^7 W ; (b) 3°C ,

Testes Propostos

01. (UFU-MG) Num recipiente A existe um determinado gás perfeito que se encontra no estado definido pelos valores p , V e T da pressão, do volume e da temperatura, respectivamente. Em um recipiente B um outro gás perfeito encontra-se no estado definido pelos valores p da pressão, $2V$ do volume e $2T$ da temperatura. Os dois gases têm o mesmo número de mols. Sejam respectivamente U_1 e U_2 as energias internas dos gases nos recipientes A e B.

A razão $\frac{U_1}{U_2}$ vale:

- a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{3}{2}$ c) 6 d) $\frac{3}{4}$ e) 2

02. (Vunesp) A energia Interna U de uma certa quantidade de gás, que se comporta como gás Ideal, contida em um recipiente, é proporcional à temperatura T , e seu valor pode ser calculado utilizando a expressão $U = 12,5 T$. A temperatura deve ser expressa em Kelvins e a energia, em joules. Se Inicialmente o gás está à temperatura $T = 300 \text{ K}$ e, em uma transformação a volume constante, recebe 1.250 J de uma fonte de calor, sua temperatura final será:

- a) 200 K c) 400 K e) 800 K
b) 300 K d) 600 K

03. (Mackenzle-SP) Um gás, contido em um recipiente dotado de um êmbolo que pode se mover, sofre uma transformação. Nessa transformação fornecemos 800 cal ao gás e ele realiza o trabalho de 209 J . Sendo $1 \text{ cal} = 4,18\text{J}$, o aumento da energia interna desse gás foi de:

- a) 209 J c) 3344 J e) 3762 J
b) 3135 J d) 3553 J

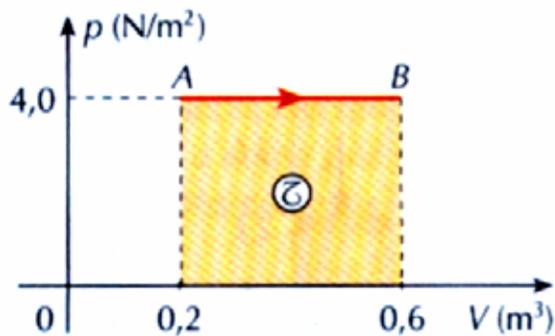
04. (Uema) Sobre um sistema realiza-se um trabalho de 3.000 J e, em resposta, ele fornece 500 cal de calor durante o mesmo intervalo de tempo. A variação de energia interna do sistema durante esse processo é:

- a) 2500 J c) 900 J e) - 2100 J
b) - 900 J d) 2100 J

(Dado: $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ .J.}$)

05. (UFSM-RS) Quando um gás ideal sofre uma expansão isotérmica,
- a energia recebida pelo gás na forma de calor é igual ao trabalho realizado pelo gás na expansão.
 - não troca energia na forma de calor com o meio exterior.
 - não troca energia na forma de trabalho com o meio exterior.
 - a energia recebida pelo gás na forma de calor é igual à variação da energia interna do gás.
 - o trabalho realizado pelo gás é igual à variação da energia interna do gás.

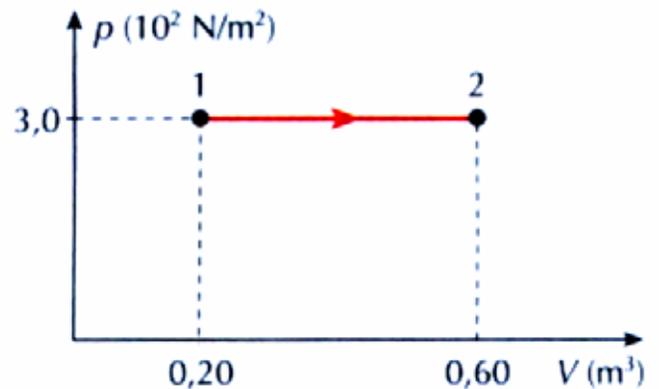
06. (UEPB) Um gás encerrado por um cilindro com êmbolo móvel recebe de uma fonte térmica a quantidade de calor $\Delta Q = 5 \text{ cal}$, submetido a uma pressão constante, provocando uma expansão isobárica desse gás, que varia seu volume, como mostra o gráfico.



Pode-se afirmar que a variação da energia interna desse gás de acordo com a primeira lei da Termodinâmica, considerando $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$, vale:

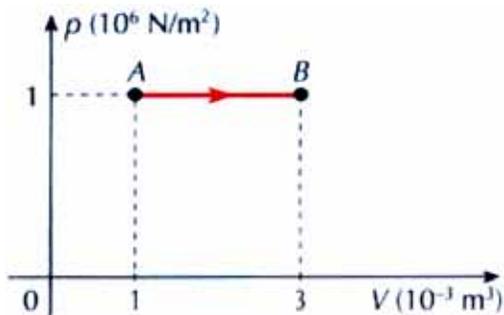
- 19,4 J
- 10,4 J
- 14,2 J
- 12,6 J
- 8,2 J

07. (PUC-MG) A transformação de um certo gás ideal, que recebeu do meio exterior 75 calorias, está representada no gráfico abaixo.



A respeito dessa evolução, assinale a afirmativa incorreta. (Dado: $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$.)

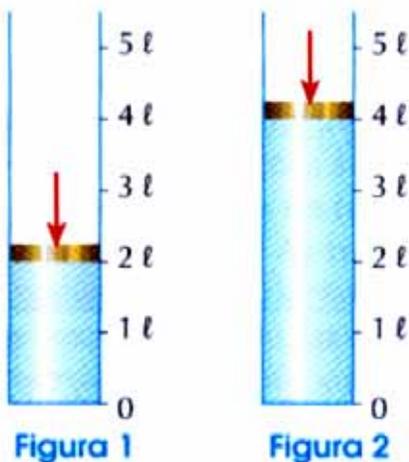
- A transformação foi isobárica.
 - O trabalho realizado pelo gás é igual a 120 J.
 - A energia interna do gás aumentou 45 cal.
 - Se a temperatura do gás, no estado 1, era de 27°C , no estado 2 será de 627°C .
 - Durante a transformação, a velocidade média das moléculas do gás permaneceu constante.
08. (Ufla-MG) O diagrama pV abaixo mostra uma transformação sofrida por 0,4 mol de um gás monoatômico ideal.



Considerando $T_A = 300\text{ K}$ e $T_B = 900\text{ K}$, a quantidade de calor envolvida na transformação será: (Considere $1\text{ cal} = 4\text{ J}$ e $R = 2\text{ cal/mol}\cdot\text{K}$.)

- a) 220 cal c) 2500 cal e) 1220 cal
- b) -1220 cal d) -2500 cal

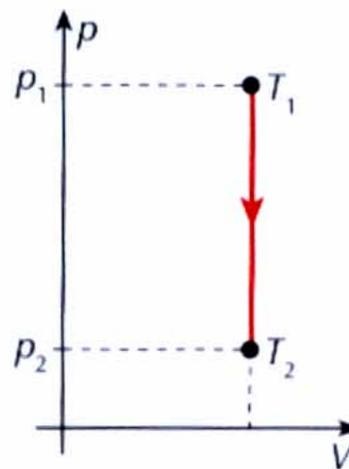
09. (UCSal-BA) Um gás perfeito está aprisionado, em um recipiente cilíndrico e graduado em litros, por um êmbolo que exerce uma pressão constante de $1,1 \cdot 10^5\text{ Pa}$, conforme o esquema representado pela figura 1. Esse gás recebe $5,5 \cdot 10^2\text{ J}$ de calor e empurra o êmbolo para a posição representada pela figura 2.



Nessa expansão, o trabalho realizado pelo gás e o aumento da energia interna, em joules, são, respectivamente,

- a) $2,2 \cdot 10^3$ e $2,5 \cdot 10^2$
- b) $5,5 \cdot 10^3$ e zero
- c) $3,3 \cdot 10^2$ e $3,3 \cdot 10^2$
- d) $2,2 \cdot 10^2$ e $3,3 \cdot 10^2$
- e) $2,2 \cdot 10^5$ e $2,5 \cdot 10^{-2}$

10. (EsaI-MG) Um sistema composto por n mols de um gás Ideal sofre a transformação mostrada no gráfico. Apresentamos a seguir três proposições.



- I. O trabalho envolvido na transformação é positivo.
- II. Durante a transformação o sistema cedeu calor para o meio.
- III. A energia interna do gás na condição 2 é menor do que a energia interna do gás na condição 1.

Assinale a alternativa correta.

- a) Apenas a proposição II é verdadeira.
- b) Apenas a proposição III é verdadeira.
- c) Apenas as proposições I e II são verdadeiras.

- d) Apenas as proposições II e III são verdadeiras.
- e) As proposições I, II e III são verdadeiras.

11. (Uepa) Um estudante verifica a ação do calor sobre um gás perfeito inserido em uma seringa de vidro, aquecendo-a com uma vela e mantendo fechada a sua saída (ver figura).

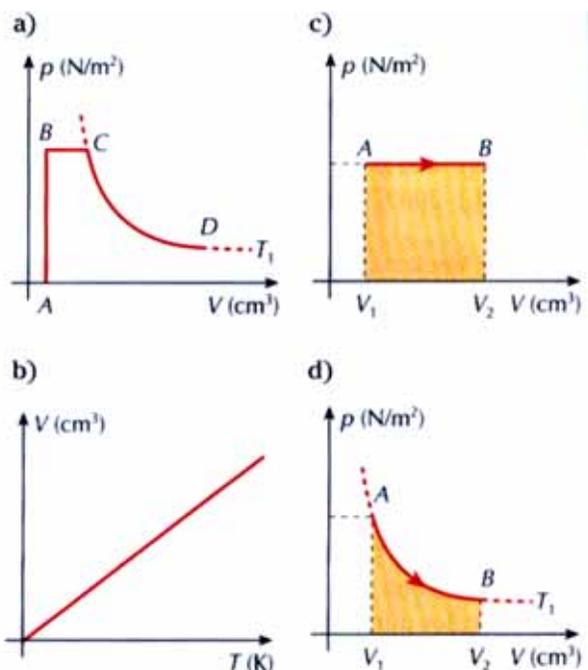


Desprezando-se o atrito entre o êmbolo da seringa e o vidro, pode-se afirmar que, durante o aquecimento:

- a) o gás se tornará mais denso. Com isso, a pressão do ar atmosférico empurrará o êmbolo da seringa, comprimindo o gás.
- b) se a pressão do gás se mantiver constante, a energia interna do sistema aumenta, fazendo com que o gás realize trabalho, deslocando o êmbolo da seringa.
- c) se a pressão do gás se mantiver constante, o sistema gasoso recebe trabalho, diminuindo o volume interno da seringa.

- d) se a energia interna do sistema aumenta, certamente o gás sofrerá uma transformação isométrica.
- e) toda a energia recebida será integralmente utilizada para deslocar o êmbolo, tratando-se, portanto, de uma transformação isobárica do gás.

12. (UFG-GO) Os gráficos abaixo mostram transformações a que foi submetido um gás ideal.



Analisando esses gráficos é correto afirmar-se que:

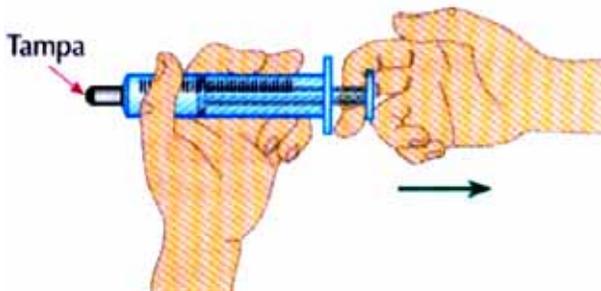
- 01) no gráfico (a) observam-se três transformações: uma isovolumétrica, de A para B, uma isobárica, de B para C, e uma isotérmica, de C para D.
- 02) o gráfico (b) representa uma transformação isobárica.

04) a área destacada no gráfico (c) representa o trabalho realizado pelo gás, para Ir do estado A para o estado B.

08) se o gráfico (d) representar uma transformação isotérmica, a área destacada representará o calor recebido pelo gás, na transformação de A para B.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

13. (UFMG) Uma seringa, com a extremidade fechada, contém uma certa quantidade de ar em seu interior. Sampaio puxa, rapidamente, o êmbolo dessa seringa, como mostrado nesta figura:



Considere o ar como um gás ideal. Sabe-se que, para um gás ideal, a energia interna é proporcional à sua temperatura.

Com base nessas informações, é correto afirmar que, no interior da seringa:

- a) a pressão do ar aumenta e sua temperatura diminui.
- b) a pressão do ar diminui e sua temperatura aumenta.
- c) a pressão e a temperatura do ar aumentam.

d) a pressão e a temperatura do ar diminuem.

14. (UFSCar-SP) Uma pequena quantidade de um gás Ideal é mantida hermeticamente fechada dentro de um cilindro rígido dotado de um êmbolo. Puxando-se rapidamente o êmbolo, verifica-se uma diminuição na temperatura do gás. Em relação à transformação sofrida por esse gás, é verdadeiro afirmar que:

- a) o volume aumentou, num processo isobárico.
- b) a pressão diminuiu, num processo isovolumétrico.
- c) o volume aumentou, num processo isotérmico.
- d) o volume aumentou proporcionalmente mais do que a pressão diminuiu.
- e) a pressão diminuiu proporcionalmente mais do que o volume aumentou.

15. (UFRN) José brincava com uma bomba manual de encher bola de futebol. Mantendo o orifício de saída de ar tampado com seu dedo, ele comprimiu rapidamente o êmbolo da bomba e observou que o ar dentro da bomba era aquecido. A explicação para esse fenômeno é:

- a) Devido à rapidez da compressão, não há tempo para troca de calor entre o ar dentro da bomba e o meio externo; assim o trabalho realizado sobre o ar dentro da bomba aumenta a sua energia interna.

- b) A rapidez da compressão favorece a troca de calor entre o ar dentro da bomba e o meio externo; assim o trabalho realizado sobre o ar dentro da bomba diminui a sua energia interna.
- c) Em qualquer compressão de um gás, a temperatura do gás sempre aumenta.
- d) Em qualquer transformação isovolumétrica, o trabalho realizado pelo gás é nulo.

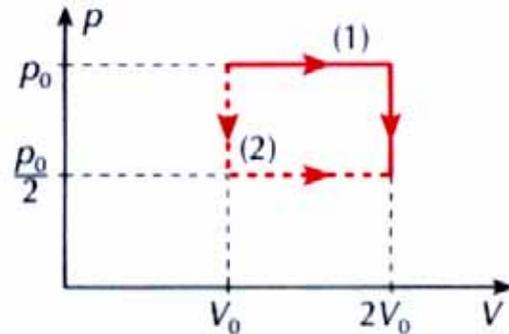
16. (UFG-GO) Um gás ideal está encerrado em um cilindro provido de um êmbolo, que pode se deslocar livremente. Se o gás sofrer uma expansão rápida:

- 01) a pressão p e o volume V variam de tal modo que o produto pV permanece constante.
- 02) sua energia interna diminuirá.
- 04) a quantidade de calor, trocada entre ele e a vizinhança, será desprezível.
- 08) a velocidade média das moléculas aumentará.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

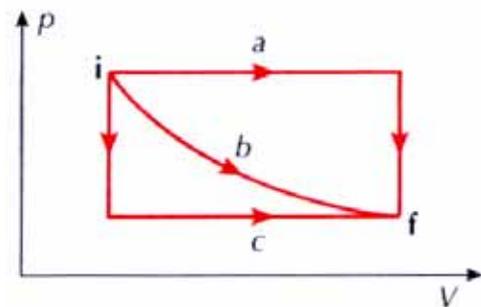
17. (Vunesp) Dois gases idênticos são submetidos a processos reversíveis diferentes, como mostra o gráfico. O gás 1 segue os processos indicados pela linha cheia do gráfico e o gás 2, pela linha tracejada. Ambos partem do ponto (p_0, V_0) e

terminam no ponto $(\frac{p_0}{2}, 2V_0)$ no diagrama p versus V . É incorreto afirmar que:



- a) 1 recebeu mais calor que 2.
- b) 2 realizou menos trabalho que 1.
- c) a energia interna no ponto inicial é a mesma para os dois.
- d) a energia interna de 1 é maior que a energia interna de 2 no ponto final.
- e) 2 cedeu calor no primeiro trecho.

18. (UFMS-RS) No gráfico, representam-se, em função do volume, as pressões exercidas por uma massa de gás quando esta passa do mesmo estado inicial, i , a um mesmo estado final, f , através de três processos diferentes, a , b , e c .



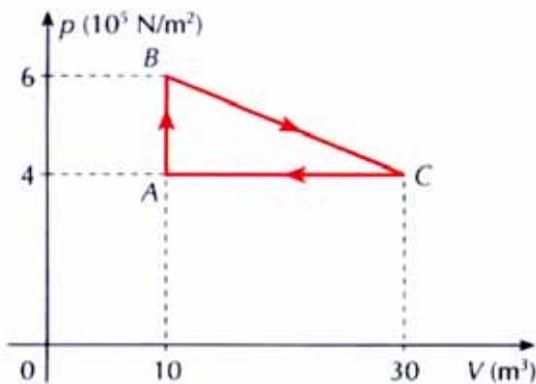
Afirma-se, então, que, nos três processos, a

- I. energia trocada na forma de calor é a mesma.
- II. energia trocada na forma de trabalho é a mesma.
- III. variação de energia interna do sistema gasoso é a mesma.

Está(ão) correta(s):

- a) apenas I.
- b) apenas II.
- c) apenas I e II.
- d) apenas III.
- e) apenas I e III.

19. (UFBA) Uma certa massa de gás ideal sofre a transformação cíclica reversível ABCA, conforme o diagrama de pressão versus volume apresentado abaixo.



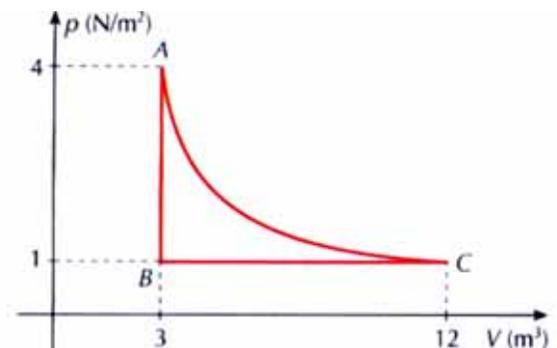
Nessas condições, é correto afirmar:

- 01) Ao passar do estado A para o estado B, há um acréscimo na temperatura do gás.
- 02) Ao passar do estado B para o estado C, a temperatura da massa gasosa se mantém constante.

- 04) Ao passar do estado C para o estado A, a variação da energia interna do gás é igual a zero.
- 08) No ciclo a quantidade de calor trocada com o meio externo vale $2 \cdot 10^6$ J.
- 16) O trabalho realizado na expansão BC vale $2 \cdot 10^7$ J.
- 32) Na etapa AB há uma equivalência entre a variação da energia interna do gás e a quantidade de calor trocada com o meio externo.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

20. (PUC-MG) Uma amostra de gás ideal sofre as transformações mostradas no diagrama pressão versus volume ilustrado abaixo. Sabe-se que a linha AC é uma isoterma.

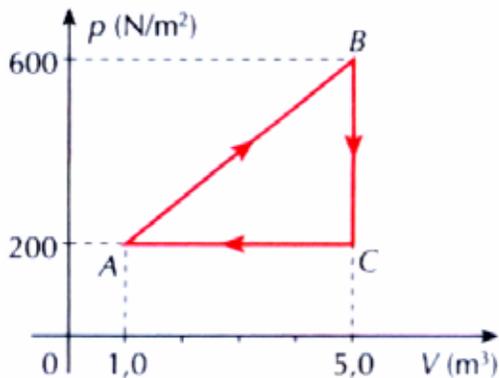


Observe-o bem e analise as afirmativas abaixo, apontando a opção correta:

- a) Na transformação $A \rightarrow B$ a temperatura da amostra aumenta.
- b) O trabalho feito pelo gás do ciclo $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ é positivo.

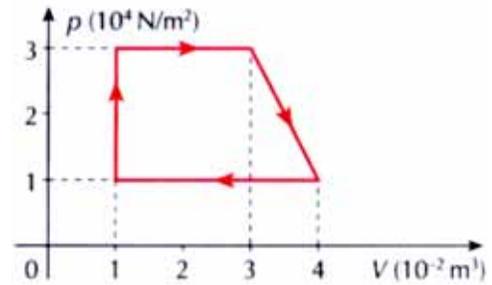
- c) O trabalho realizado pelo gás na etapa $A \rightarrow B$ foi de 9 J.
- d) No decorrer da transformação $C \rightarrow A$, quando a pressão for de 3 N/m^2 , o volume será de $4,5 \text{ m}^3$.
- e) A energia interna da amostra diminui ao longo da transformação $A \rightarrow B$.

21. (Unirio-RJ) Um gás sofre a transformação cíclica ABCA, indicada no gráfico.



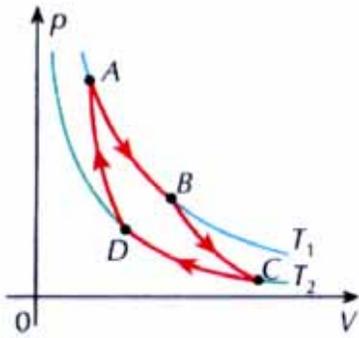
A variação da energia interna e o trabalho realizado pelo gás valem, respectivamente:

- a) $\Delta U = 0 \text{ J}$ e $\mathcal{C} = 0 \text{ J}$
- b) $\Delta U = 0 \text{ J}$ e $\mathcal{C} = 8,0 \cdot 10^2 \text{ J}$
- c) $\Delta U = 0,5 \cdot 10^2 \text{ J}$ e $\mathcal{C} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ J}$
- d) $\Delta U = 8 \cdot 10^2 \text{ J}$ e $\mathcal{C} = 0 \text{ J}$
- e) $\Delta U = 8,5 \cdot 10^2 \text{ J}$ e $\mathcal{C} = 8,0 \cdot 10^2 \text{ J}$
22. (UCS-RS) Certa máquina térmica executa o ciclo da figura, efetuando 20 revoluções por segundo.



A potência da máquina, em quilowatts, é igual a:

- a. 100
- b. 10
- c. 1,0
- d. 0,5
- e. 0,20
23. (Uesb-BA) Em um segundo, o vapor fornece 1.600 kcal para uma máquina térmica. Nesse mesmo tempo, são perdidas 1.200 kcal para a atmosfera. Nessas condições, o rendimento dessa máquina térmica vale:
- a) 0,10
- b) 0,15
- c) 0,20
- d) 0,25
- e) 0,75
24. (UFBA) A figura representa o ciclo de Carnot para um gás ideal. Nessas condições, é correto afirmar:



- 01) Na compressão adiabática a energia interna do gás diminui.
- 02) Na expansão isotérmica o gás recebe calor de uma das fontes.
- 04) Na expansão adiabática a temperatura do gás diminui.
- 08) Na compressão isotérmica a energia interna do gás diminui.
- 16) Na transformação cíclica o gás atinge o equilíbrio térmico com a fonte quente, ao reiniciar novo ciclo.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

25. (Mackenzie-SP) A importância do ciclo de Carnot reside no fato de ser:
- o ciclo da maioria dos motores térmicos.
 - o ciclo de rendimento igual a 100%.
 - o ciclo que determina o máximo rendimento que um motor térmico pode ter entre duas dadas temperaturas.
 - o ciclo de rendimento maior que 100%.
 - nenhuma das anteriores.

26. (Univali-SC) Uma máquina térmica opera segundo o ciclo de Carnot entre as temperaturas de 500 K e 300 K recebendo 2.000 J de calor da fonte quente. O calor rejeitado para a fonte fria e o trabalho realizado pela máquina, em J, são respectivamente:

- 1.200 e 800
- 1.000 e 1.000
- 500 e 1.500
- 1.400 e 600
- 700 e 1.300

27. (UFC-CE) A eficiência de uma máquina de Carnot que opera entre a fonte de temperatura alta (T_1) e a fonte de temperatura baixa (T_2) é dada pela expressão

$$\eta = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right), \text{ (em que } T_1 \text{ e } T_2 \text{ são medidas na escala absoluta ou de Kelvin. Suponha que você dispõe de uma máquina dessas com uma eficiência } \eta = 30\% \text{. Se você dobrar o valor da temperatura da fonte quente, a eficiência da máquina passará a ser igual a:}$$

- Suponha que você dispõe de uma máquina dessas com uma eficiência $\eta = 30\%$. Se você dobrar o valor da temperatura da fonte quente, a eficiência da máquina passará a ser igual a:
- 40%
 - 45%
 - 50%
 - 60%
 - 65%

28. (UFV-MG) De acordo com a segunda lei da Termodinâmica, a entropia do Universo:

- a) não pode ser criada nem destruída.
- b) acabará transformada em energia.
- c) tende a aumentar com o tempo.
- d) tende a diminuir com o tempo.
- e) permanece sempre constante.

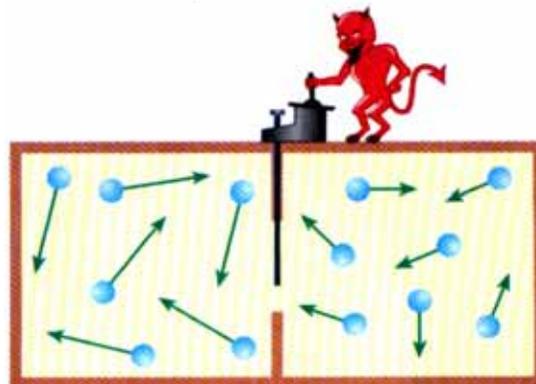
29. (UFBA) Com base nos conhecimentos sobre Termodinâmica, é correto afirmar:

- 01) Quando um gás ideal é comprimido rapidamente, a energia interna do gás aumenta.
- 02) O ciclo de Carnot é composto por transformações Isométricas e isobáricas.
- 04) O rendimento de uma máquina térmica depende exclusivamente da temperatura da fonte quente.
- 08) No refrigerador o gás refrigerante remove calor da fonte fria, evaporando-se, e transfere calor à fonte quente, condensando-se.
- 16) Admitindo-se o Universo como sistema físico isolado, a entropia do Universo sempre aumenta.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

30. (UFSCar-SP) Maxwell, notável físico escocês da segunda metade do século XIX, inconformado com a possibilidade da

morte térmica do Universo, consequência inevitável da segunda lei da Termodinâmica, criou o “demônio de Maxwell”, um ser hipotético capaz de violar essa lei. Essa fictícia criatura poderia selecionar as moléculas de um gás que transitassem entre dois compartimentos controlando a abertura que os divide, como ilustra a figura.



Por causa dessa manipulação diabólica, as moléculas mais velozes passariam para um compartimento, enquanto as mais lentas passariam para o outro. Se isso fosse possível:

- a. esse sistema nunca entraria em equilíbrio térmico.
- b. esse sistema estaria em equilíbrio térmico permanente.
- c. o princípio da conservação da energia seria violado.
- d. não haveria troca de calor entre os dois compartimentos.
- e. haveria troca de calor, mas não haveria troca de energia.

31. (Olimpíada Brasileira de Física) Uma lâmpada é embalada numa caixa fechada e isolada termicamente. Considere que no interior da lâmpada há vácuo e que o ar dentro da caixa seja um gás I-deal. Em um certo instante, a lâmpada se quebra. Se desprezarmos o volume e a massa dos componentes da lâmpada (vidro, suporte, filamento, ...) e a variação de energia associada à sua quebra, é **incorreto** afirmar que:

- a) a energia Interna do gás permanecerá a mesma após a quebra da lâmpada.
- b) a entropia do gás aumentará após a quebra da lâmpada.
- c) a temperatura do gás permanecerá a mesma após a quebra da lâmpada.
- d) a pressão do gás diminuirá após a quebra da lâmpada.
- e) após a quebra da lâmpada, o gás realizará um trabalho positivo para se expandir e ocupar o volume onde anteriormente havia vácuo.

Gabarito

	A	B	C	D	E
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12	Soma é 15 (1 + 2 + 4 + 8)186				
13					
14					
15					
16	Soma é 06 (2 + 4)190				
17					
18					
19	Soma é 41 (1+8 + 32)193				
20					
21					
22					
23					
24	Soma é 22 (2+4+ 16)				
25					
26					
27					
28					
29	Soma é 25 (1+8 + 16)				
30					
31					