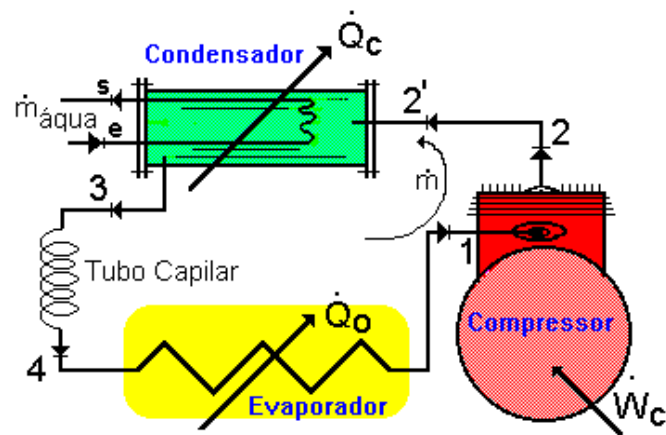
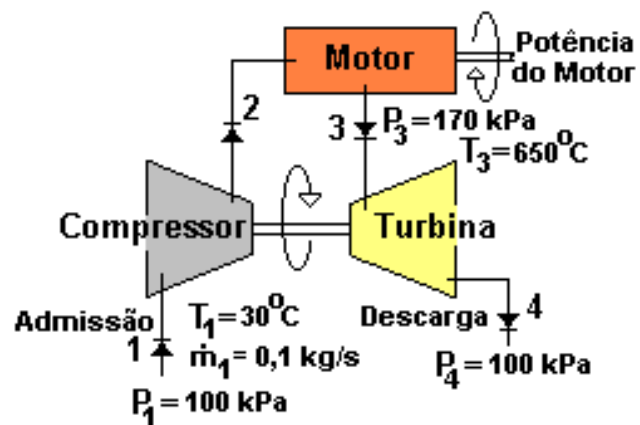


## Capítulo - 5

### SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA



REFRIGERADOR



## 5 - SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

O principal significado da 2ª lei da termodinâmica é que ela estabelece a direção na qual ocorre um determinado processo. Além disso, define o motor térmico, o refrigerador e a temperatura termodinâmica.

Assim, por exemplo, uma xícara de café quente esfria em virtude da troca de calor com o meio ambiente, mas o meio não pode ceder calor para a xícara.

A primeira lei, como vimos, não impõe a direção do processo, apenas estabelece que em um processo cíclico o calor é igual ao trabalho.

### 5.1 - Algumas definições

**Reservatório Térmico (ou Fonte de Calor)** - Chamamos de reservatório térmico qualquer sistema que possa fornecer ou receber calor sem alterar sua temperatura. (exemplos; oceano, atmosfera, combustíveis etc.)

**Motor térmico (Máquina térmica)** - Consideremos o sistema mostrado na figura 5.1-1. Seja o sistema constituído pelo gás, e façamos que este sistema percorra um ciclo no qual primeiramente realiza-se trabalho sobre o mesmo através das pás do agitador, mediante o abaixamento do peso e completamos o ciclo transferindo calor para o meio ambiente.

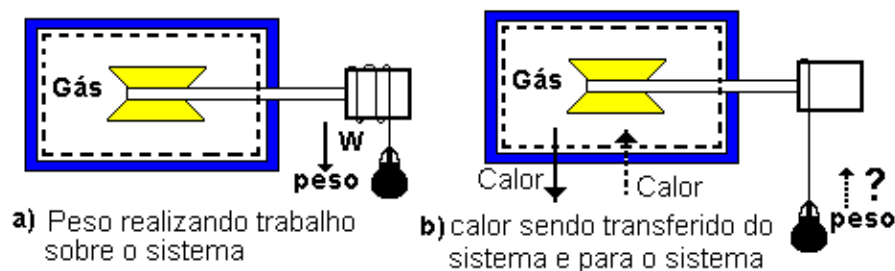


Figura 5.1-1 - sistema mostrando a restrição da segunda lei da termodinâmica à direção do processo.

Da experiência sabemos que não podemos inverter o ciclo. Isto é, fornecer calor ao gás e fazer com que ele levante o peso. Isto não contraria o primeiro princípio embora não seja possível.

Essa ilustração nos leva a considerar a máquina térmica. Com uma máquina térmica (ou motor térmico) é possível operar em um ciclo termodinâmico realizando um trabalho líquido positivo e recebendo um calor líquido.

O conceito de motor térmico corresponde a um sistema ou instalação que opere segundo um ciclo termodinâmico trocando calor com dois reservatórios térmicos (recebendo calor líquido) e realizando trabalho mecânico. A figura 5.1-2 mostra o esquema de uma instalação a vapor, que funciona segundo o ciclo de

Rankine e é uma das máquinas térmicas mais importantes do desenvolvimento industrial.

O trabalho útil de uma máquina térmica como a da Figura 5.2-1 pode ser obtido aplicando-se a primeira lei da termodinâmica sobre todo o sistema como indicado na figura, ou seja

$$\dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{\text{útil}} \quad (5.1-1)$$

onde, trabalho útil ( $\dot{W}_{\text{útil}}$ ), é a diferença;

$$\dot{W}_{\text{útil}} = \dot{W}_T - \dot{W}_B \quad (5.1-2)$$

**Rendimento Térmico** - Para uma máquina térmica define-se um parâmetro chamado rendimento térmico, representado pelo símbolo,  $\eta_T$ , como:

$$\eta_T = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia Gasta}} = \frac{W_{\text{útil}}}{Q_H} \quad (5.1-3)$$

Como mostra a Eq. 5.1-3 o rendimento térmico expressa o aproveitamento da máquina térmica ao transformar a energia térmica para energia mecânica no eixo da turbina da Fig. 5.1-2

Na análise genérica dos motores térmicos faz-se uso do esquema mostrado na figura 5.1-3. O esquema da fig. 5.1-2 é específico para o sistema operando segundo o ciclo de Rankine como dito anteriormente.

Observe-se que ao aplicarmos o balanço de energia no sistema definido pela fronteira na Fig. 5.1-3, obtemos imediatamente o resultado da Eq. 5.1-1.

O motor de combustão interna não opera segundo um ciclo termodinâmico, como já foi dito. Entretanto, os modelos termodinâmicos de motores de combustão interna, com o objetivo de análise térmica, trabalham com ar em um ciclo termodinâmico. A Fig. 5.1-4 mostra o esquema de um ciclo teórico padrão ar de motor de combustão interna.

A Fig.5.1-4a é o ciclo teórico para o motor por ignição (motor Otto) e a Fig.5.1-4b é de um motor Diesel.

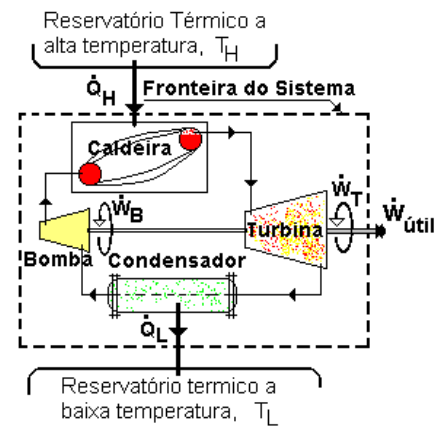


Figura 5.1-2 - Esquema de uma máquina térmica operando em um ciclo

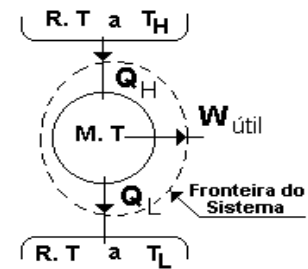


Fig. 5.1-3 - Esquema genérico de um motor térmico

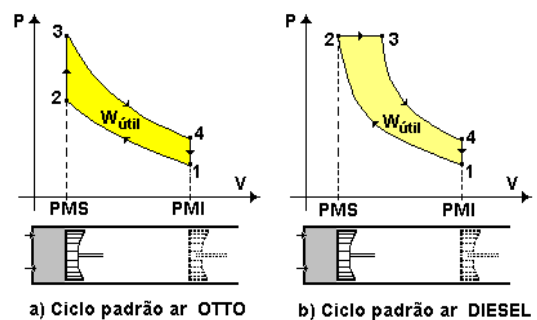


Figura 5.1-4 - Ciclo padrão ar Otto e Diesel

**Refrigerador ou Bomba de Calor** - Consideremos um outro ciclo como mostra a Fig. 5.1-5, o qual sabemos experimentalmente ser impossível na prática,

embora a 1ª lei da termodinâmica não imponha qualquer restrição. Para estes dois sistemas o calor pode ser transferido do sistema de alta temperatura para o de baixa temperatura de forma espontânea, mas o inverso não é possível de ocorrer.

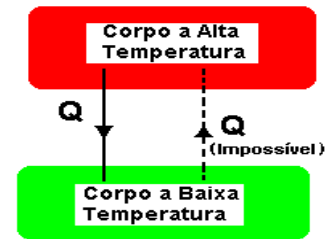


Figura - 5.1-5 Esquema da troca espontânea de calor

Esse sistema nos leva a considerar uma outra máquina térmica, também de grande importância industrial, — O refrigerador ou a bomba de calor. O refrigerador ou a bomba de calor é um sistema (ou instalação) que opera segundo um ciclo termodinâmico recebendo trabalho (potência) e transferindo calor da fonte fria (do reservatório de baixa temperatura) para a fonte quente (reservatório de alta temperatura). A Fig. 5.1-6 mostra o esquema de um sistema de refrigeração ou bomba de calor que opera por compressão de vapor (o mesmo sistema será um refrigerador se estivermos interessados no calor retirado da fonte fria e será uma bomba de calor se nosso interesse for o calor transferido à fonte quente).

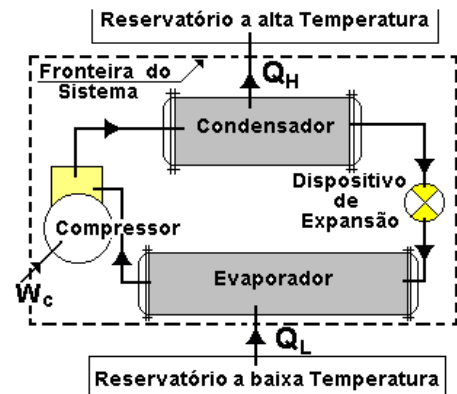


Fig. 5.1-6 - Esquema de um refrigerador ou bomba de calor por compressão de vapor

Existem refrigeradores e bombas de calor operando segundo outro princípio, entretanto nosso interesse aqui é mostrar o refrigerador que recebe potência e transfere calor da fonte fria para a fonte quente como mostrados no esquema da figura 5.1-6.

Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica para o sistema demarcado na Fig. 5.1-6, temos;

$$Q_L + (-Q_H) = -W_C \quad \text{ou} \quad W_C = Q_H - Q_L \quad (5.1-4)$$

Para um refrigerador ou bomba de calor não se define o parâmetro rendimento mas um outro equivalente chamado de **Coefficiente de eficácia**,  $\beta$ , **Coefficiente de desempenho**, ou **Coefficiente de Performance**, COP, como segue

$$\beta = COP = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia gasta}} \quad (5.1-5)$$

a equação 5.1-5 se aplicada ao refrigerador, fica:

$$(\beta = COP)_{\text{Refrigerador}} = \frac{Q_L}{W_C} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \quad (5.1-6)$$

e para a bomba de calor, resulta

$$(\beta = COP)_{\text{Bomba de Calor}} = \frac{Q_H}{W_C} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \quad (5.1-7)$$

Pode-se mostrar combinando a Eq. 5.1-6 com a Eq. 5.1-7 que:

$$(\beta = COP)_{\text{Bomba de Calor}} = (\beta = COP)_{\text{Refrigerador}} + 1 \quad (5.1-8)$$

## 5.2 - Enunciados da Segunda lei da Termodinâmica

*Enunciado de Kelvin e Planck* (refere-se ao motor térmico) "É impossível a um motor térmico operar trocando calor com uma única fonte de calor"

Este enunciado referente à máquina térmica nos diz que é impossível uma máquina térmica com rendimento de 100 %, pois pela definição de rendimento térmico

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

o rendimento seria 100% se  $Q_L = 0$ , (apenas uma fonte de calor) ou se  $Q_H$  fosse infinito (o que não é possível!). Assim, uma máquina térmica tem que operar entre dois reservatórios térmicos — recebendo calor, rejeitando uma parte do calor e realizando trabalho.

*Enunciado de Clausius* (refere-se ao refrigerador) "É impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da passagem de calor da fonte fria para a fonte quente"

Este enunciado está relacionado ao refrigerador ou bomba de calor e estabelece ser impossível construir um refrigerador que opere sem receber energia (trabalho). Isto indica ser impossível um, coeficiente de eficácia (COP) infinito.

### Observações Relativas à Segunda Lei da Termodinâmica

a) Os dois enunciados são negativos - Assim não é possível uma demonstração. Estes enunciados são baseados na observação experimental e no fato de não terem sido refutados até os dias de hoje.

b) Os dois enunciados são equivalentes

c) A terceira observação é que a segunda lei da termodinâmica tem sido enunciada como a impossibilidade de construção de um **"Moto-Perpétuo de Segunda Espécie"**

Moto perpétuo de 1ª espécie - Produziria trabalho do nada ou criaria massa e energia - violaria a 1ª lei da termodinâmica.

Moto perpétuo de 2ª espécie - Violaria a segunda lei da termodinâmica (rendimento 100% ou COP =  $\infty$ )

Moto perpétuo de 3ª espécie - Motor sem atrito, conseqüentemente se moveria indefinidamente mas não produziria trabalho

**Processo Reversível** - A pergunta que logicamente aparece é a seguinte: Sendo impossível um motor térmico com rendimento 100% qual o máximo

rendimento possível. O primeiro passo para responder esta pergunta é definir um processo ideal chamado "**Processo Reversível**"

Definição - "Processo reversível para um sistema é aquele que tendo ocorrido pode ser invertido sem deixar vestígios no sistema e no meio".

As causas mais comuns da irreversibilidade (contrário de reversível) nos processos reais são: ATRITO, EXPANSÃO NÃO RESISTIVA, TROCA DE CALOR COM DIFERENÇA FINITA DE TEMPERATURA, MISTURA DE SUBSTÂNCIAS DIFERENTES, EFEITO DE HISTERESE, PERDAS ELÉTRICAS DO TIPO  $RI^2$ , COMBUSTÃO, ETC.

Assim, para que um processo real se aproxime de um processo IDEAL REVERSÍVEL, ele deve ser lento, sofrer transformações infinitesimais, equilíbrio contínuo, trocar calor com diferenças mínimas de temperatura, mínimo de atrito, etc. Todos os processos reais são IRREVERSÍVEIS.

Quando todos os processos que compõem um ciclo são ditos reversíveis, o ciclo também será reversível.

### 5.3 - Ciclo de Carnot (ou Motor de Carnot)

(Engenheiro Francês Nicolas Leonard Sadi Carnot , 1796-1832)

O ciclo de Carnot (ou motor de Carnot) é um ciclo ideal reversível (Motor Térmico Ideal), composto de dois processos adiabáticos reversíveis e de dois processos isotérmicos reversíveis. O ciclo de Carnot independe da substância de trabalho, e qualquer que seja ela, tem sempre os mesmos quatro processos reversíveis. O ciclo de Carnot está mostrado na Fig. 5.3-1, no plano T x S.

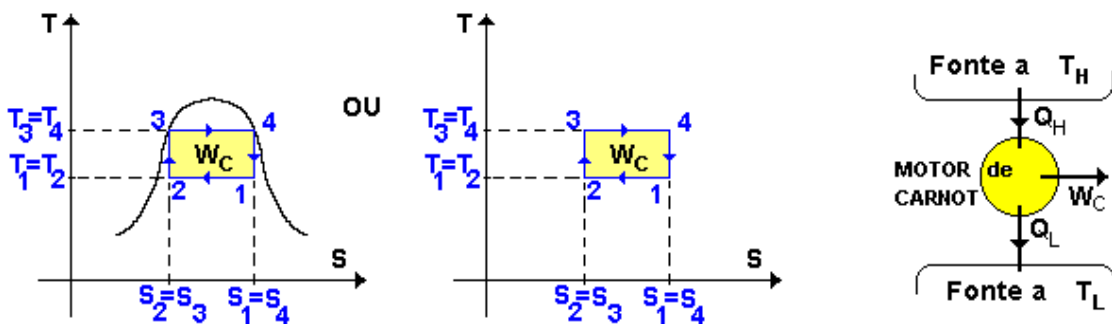


Figura 5.3-1 - O ciclo de Carnot e o esquema de uma máquina térmica

Existem dois teoremas importantes sobre o rendimento térmico do ciclo de Carnot:

1º Teorema - "É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios térmicos e tenha rendimento térmico maior que um motor reversível (motor de Carnot) operando entre os mesmos reservatórios"

2º Teorema - "Todos os motores que operam segundo um ciclo de Carnot, entre dois reservatórios à mesma temperatura, têm o mesmo rendimento"

**Escala Termodinâmica de Temperatura** - A lei zero da termodinâmica fornece a base para a medida de temperatura, mas também que a escala termométrica deve ser definida em função da substância e do dispositivo usado na medida. O mais conveniente seria uma escala de temperatura independente de qualquer substância particular, a qual possa ser chamada de "**Escala Absoluta de Temperatura**".

Da segunda lei da termodinâmica vimos a definição do ciclo de Carnot, que só depende da temperatura dos reservatórios térmicos, sendo independente da substância de trabalho. Assim, o ciclo de Carnot fornece a base para a escala de temperatura que Chamaremos de "*Escala Termodinâmica de Temperatura*".

Pode-se mostrar que o rendimento térmico do ciclo de Carnot é função somente da Temperatura, isto é;

$$\eta_{T\text{CARNOT}} = \frac{W_C}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \propto \phi(T_L, T_H) \quad (5.3-1)$$

Existem inúmeras relações funcionais,  $\phi(T_L, T_H)$ , ( $T_H$  é a temperatura da fonte quente e  $T_L$  da fonte fria), que satisfazem essa equação. A função escolhida originalmente, proposta por Lord Kelvin, para a escala termodinâmica de temperatura, é a relação

$$\left( \frac{Q_L}{Q_H} \right)_{\text{reversível}} = \frac{T_L}{T_H} \quad (5.3-2)$$

As temperaturas  $T_H$  e  $T_L$  são em Kelvin. Com a *Escala de Temperatura Absoluta* definida pela equação 5.3-2 o rendimento térmico do ciclo de Carnot, para um motor térmico, resulta:

$$\eta_{T\text{CARNOT}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \rightarrow \eta_{T\text{CARNOT}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5.3-3)$$

A medida do rendimento térmico do ciclo de Carnot, todavia, não é uma maneira prática para se abordar o problema de medida da temperatura termodinâmica. A abordagem real usada é baseada no termômetro de gás ideal e num valor atribuído para o ponto triplo da água. **Na Décima conferência de Pesos e Medidas que foi realizada em 1954, atribui-se o valor de 273,16 K para a temperatura do ponto triplo da água (o ponto triplo da água é aproximadamente 0,01 °C acima do ponto de fusão do gelo.** O ponto de fusão do gelo é definido como sendo a temperatura de uma mistura de gelo e água líquida à pressão de 1(uma) atmosfera, (101,325 kPa) de ar que está saturado com vapor de água. [1]

## Exemplo 5.3-1

Calcular o rendimento térmico de um motor de Carnot que opera entre 500 °C e 40 °C

*Solução:*

Como sabemos, o rendimento de um motor de Carnot é função somente

de temperatura, ou seja  $\eta_{T\text{CARNOT}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

onde,

$$T_H = (500\text{ °C} + 273,15) = 773,15\text{ K} \text{ e } T_L = (40\text{ °C} + 273,15) = 313,15\text{ K}$$

$$\eta_{T\text{CARNOT}} = 1 - \frac{313,15}{773,15} = 0,595 \text{ ou } 59,5\%$$

## Exemplo 5.3-2

Calcular o coeficiente de eficácia,  $\beta$  (ou coeficiente de desempenho ou COP) de uma bomba de calor de Carnot que opera entre 0 °C e 45 °C

*Solução:*

*Da definição do coeficiente de eficácia para uma bomba de calor, temos:*

$$\beta_{\text{BOMBA de CALOR}} = \frac{Q_H}{W_C} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \quad (1)$$

*como se trata de uma máquina de Carnot, sabemos que*

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$$

*substituindo na equação (1) temos*

$$\beta_{\text{BOMBA de CALOR}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

*substituindo os valores numéricos obtemos*

$$\beta_{\text{BOMBA de CALOR}} = \frac{(45 + 273,15)}{[(45 + 273,15) - (0 + 273,15)]} = \frac{318,15}{(318,15 - 273,15)} = \frac{318,15}{45} = 7,07$$

**Obs.** O valor do coeficiente de eficácia (ou COP) de um refrigerador, (mesmo o sistema real que funciona por compressão de vapor, a sua geladeira, por exemplo), é em geral, maior que 1 (um), enquanto o rendimento térmico de uma máquina térmica é sempre menor que 1 (um)

## Exercícios

5.1)- Propõem-se aquecer uma residência durante o inverno usando uma bomba de calor. A residência deve ser mantida a  $20^{\circ}\text{C}$ . Estima-se que quando a temperatura do meio externo cai a  $-10^{\circ}\text{C}$  a taxa de perda de calor da residência seja de  $25\text{ kW}$ . Qual é a mínima potência necessária para acionar essa unidade de bomba de calor ?

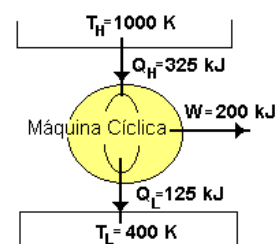
5.2)- Um ciclo de refrigeração de Carnot opera em uma sala onde a temperatura é  $20^{\circ}\text{C}$ . Necessita-se de uma taxa de transferência de calor do espaço refrigerado de  $5\text{ kW}$  para manter a sua temperatura a  $-30^{\circ}\text{C}$  Qual a potência do motor necessária para operar esse refrigerador

5.3)- Propõe-se construir um motor térmico para operar no oceano, num local onde a temperatura na superfície é de  $20^{\circ}\text{C}$  e a grande profundidade é de  $5^{\circ}\text{C}$ . Qual é o rendimento térmico máximo possível de tal motor .

5.4)- Um inventor alega ter desenvolvido uma unidade de refrigeração que mantém o espaço refrigerado a  $-10^{\circ}\text{C}$ , operando numa sala onde a temperatura é de  $35^{\circ}\text{C}$ . e que tem um COP de  $8,5$ . Como você avalia a alegação de um COP de  $8,5$  ?

5.5)- Um determinado coletor solar produz uma temperatura máxima de  $100^{\circ}\text{C}$ , a energia coletada deve ser usada como fonte térmica num motor térmico. Qual é o máximo rendimento do motor se ele opera num meio à temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$  ? O que aconteceria se o coletor fosse projetado para focalizar e concentrar a energia solar de modo a produzir uma temperatura máxima de  $300^{\circ}\text{C}$ .

5.6)- Uma máquina cíclica é usada para transferir calor de um reservatório térmico de alta temperatura para outro de baixa temperatura conforme mostrado na figura. determinar se esta máquina, para os valores de troca de energia mostrados na figura, é reversível, irreversível ou impossível.



5.7)- Uma bomba de calor deve ser usada para aquecer uma residência no inverno, e depois é colocada em operação reversa para resfriar a residência no verão. A temperatura interna deve ser mantida a  $20^{\circ}\text{C}$  no inverno e  $25^{\circ}\text{C}$  no verão. A troca de calor, através das paredes e do teto é estimada em  $2\,400\text{ kJ}$  por hora e por grau de diferença de temperatura entre o meio interno e externo da residência.

a) Se a temperatura externa no inverno é  $0^{\circ}\text{C}$  qual é a mínima potência necessária para acionar a bomba de calor ?

b) Se a potência fornecida é a mesma da parte a), qual é a máxima temperatura externa no verão para a qual o interior da residência possa ser mantido a  $25^{\circ}\text{C}$  ?