



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# PROPRIEDADES DO VAPOR

AFRÂNIO ROBERTO ZAMBEL

SÃO CARLOS  
2021

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
Departamento de Engenharia Mecânica



PROPRIEDADES DO VAPOR

Afranio Roberto Zambel

Sinópsse

A partir de uma transformação a pressão constante são apresentados definições e conceitos necessários ao desenvolvimento do Curso de Máquinas Térmicas e Frigoríficas dado na EESC. O princípio de funcionamento de um ar condicionado é usado como introdução motivadora.

Sumário

- 1 - Como funciona o ar condicionado de um automóvel
- 2 - Formação do vapor à pressão constante
- 3 - Volume específico do vapor úmido
- 4 - Calor, energia interna, entalpia e entropia do líquido
- 5 - Calor total, energia interna, entalpia e entropia do vapor saturado sêco
  - 5.1 - Equação de Clausius - Clapeyron
- 6 - Calor total, energia interna, entalpia e entropia do vapor úmido
- 7 - Vapor superaquecido
- 8 - Calor total, energia interna, entalpia e entropia do vapor superaquecido
- 9 - Tabelas de vapor
- 10 - Diagrama Ts para vapor
- 11 - Diagrama hs para vapor
- 12 - Bibliografia

## 1 - Como funciona o ar condicionado de um automóvel

### 1.1 - Princípios básicos da refrigeração:

Há duas espécies de calor: calor sensível e calor latente. O calor sensível pode-se sentir e medir com termômetro. É le ocasiona uma variação de temperatura. O calor latente, também chamado calor oculto, não pode ser medido com termômetro, mas pode ser calculado. Quando se remove a umidade do ar, sua temperatura sensível não se altera, entretanto o calor aumenta. O calor latente está presente embora não haja variação de temperatura.

O calor, sensível e latente, não pode ser desfeito, no entanto pode ser aproveitado no conforto pessoal, transferindo-o de um lugar para outro, de um objeto para outro.

O calor se transfere automaticamente de um objeto quente para outro mais frio; o contrário não acontece. No sistema de ar condicionado do automóvel não é o ar frio que é posto dentro do automóvel, mas, sim, o calor é retirado do ar interno e transferido para o ar externo.

O calor do interior do automóvel é absorvido pelo fluido frigorífico existente no sistema de ar condicionado. O fluido é bombeado pelo compressor para o condensador onde o calor é removido do fluido frigorífico e transferido para o ar externo.

Para compreender melhor como o calor é transferido por um sistema de ar condicionado de automóvel, é necessário associar temperatura com pressão. A transferência do calor é feita por (2) duas pressões e (2) duas temperaturas: uma alta pressão com alta temperatura, e uma baixa pressão com baixa temperatura. Quando a temperatura sobe a pressão aumenta; quando a temperatura desce a pressão baixa. Sempre que houver uma alteração de pressão poderá haver uma alteração de temperatura.

No ar condicionado de automóvel, a pressão é modificada por meio de um compressor que bombeia o fluido frigorífico do evaporador a uma baixa pressão para o condensador a uma alta pressão. De um lado do sistema o compressor é a linha divisória entre o lado de baixa pressão e o lado de alta pressão do sistema.

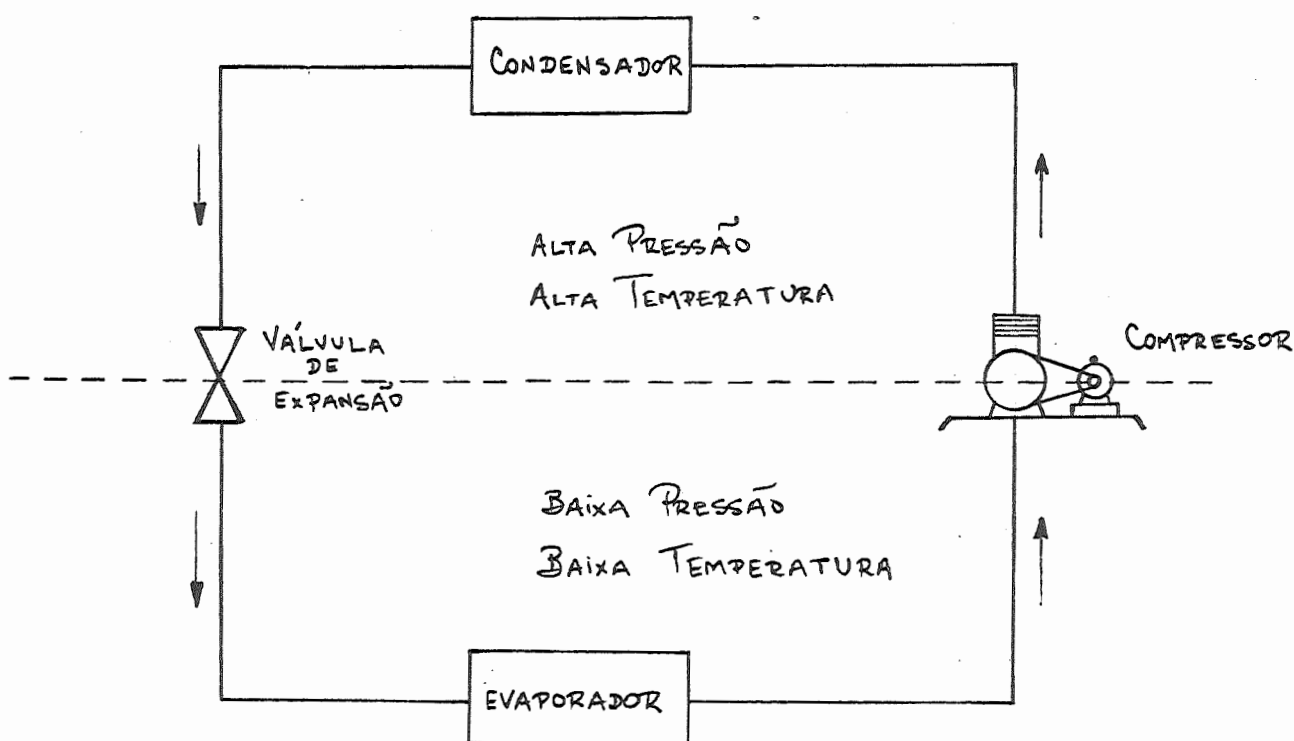
O fluxo do fluido frigorífico para o evaporador é regulado pela válvula de expansão. Antes de entrar nessa válvula, o fluido frigorífico está sob alta pressão. Ele é então vaporizado no evaporador através do orifício da válvula de expansão onde passa para baixa pressão. Portanto, no outro lado do sistema, a válvula de expansão é a

linha divisória entre o lado de alta pressão e o lado de baixa pressão do sistema.

Recordando a relação entre a pressão e a temperatura, deduz-se que, como o fluido refrigerante está sob uma baixa pressão no evaporador, a sua temperatura também é baixa. No condensador o fluido refrigerante está sob uma pressão mais elevada, e assim a sua temperatura também é elevada.

Resumindo: o ar condicionado de um automóvel trata da transferência do calor de um lugar para outro. Esta transferência é feita pelo fluido refrigerante. O calor no interior do automóvel transfere-se para o fluido refrigerante no evaporador e este calor conduzido pelo fluido refrigerante é transferido para o ar externo no condensador. Como existe cada vez menos calor no interior do automóvel, a temperatura do ar interior vai baixando cada vez mais

O fluido refrigerante utilizado no sistema de ar condicionado de um automóvel é geralmente o freon-12, que tem propriedades operacionais convenientes para permitir as transformações desejadas.



- Figura 1 -

Diagrama em bloco de um sistema de refrigeração

## 1.2 - O ciclo do sistema de ar condicionado de um automóvel.

Tendo em mente os princípios básicos da refrigeração apresentados é fácil seguir as explicações enumeradas na figura 22, que mostram o que acontece em cada parte do sistema.

O ciclo tem início na válvula de expansão, onde o fluido refrigerante entra em estado líquido a alta pressão. A válvula de expansão é regulada por um bulbo sensitivo que "sente" a temperatura do refrigerante saindo da serpentina do evaporador. À medida que a temperatura deste fluido refrigerante se altera, a válvula de expansão abre e fecha para regular a quantidade de fluido refrigerante que entra na serpentina do evaporador.

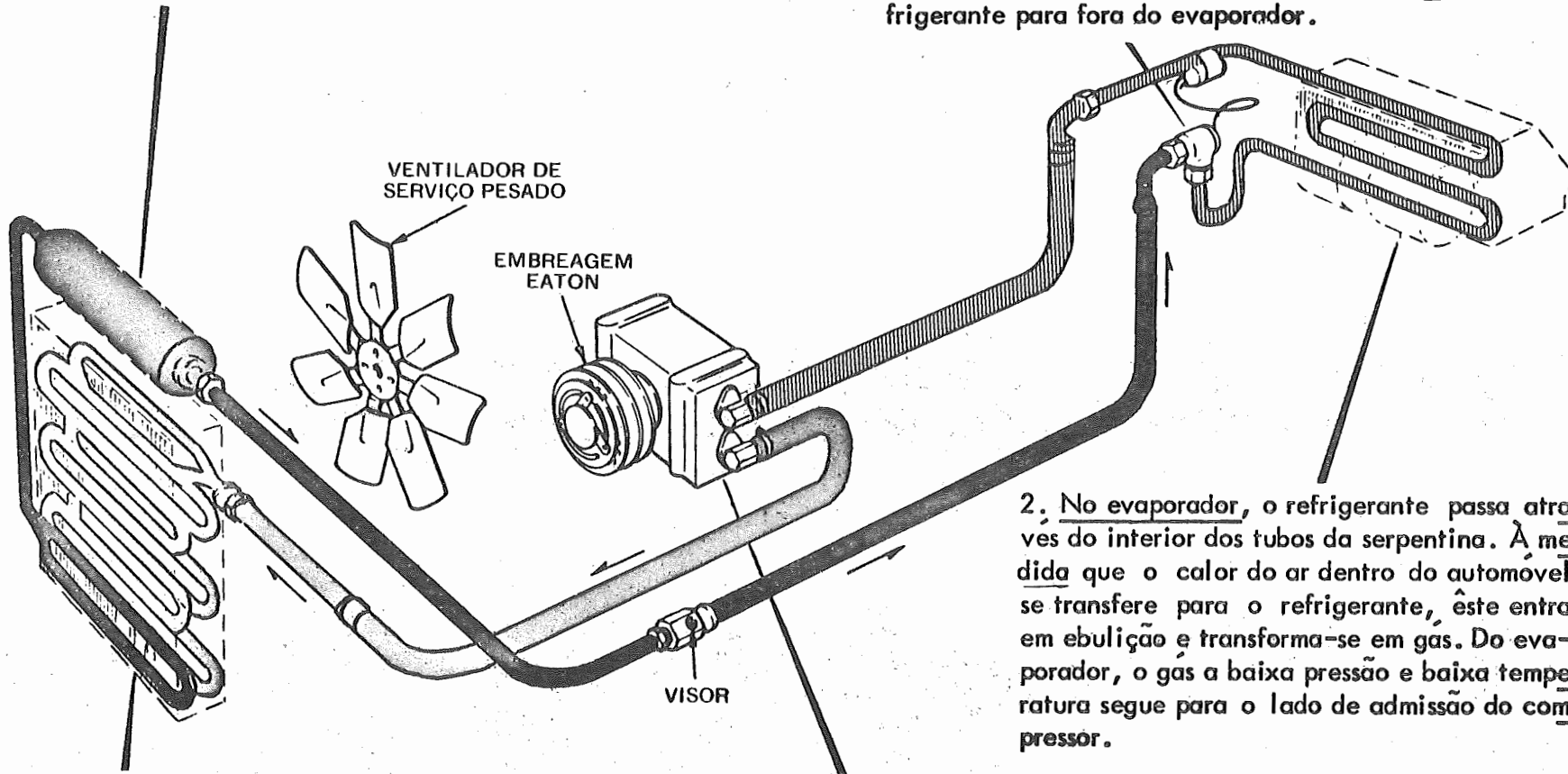
O ar dentro do automóvel é soprado sobre as aletas e serpentina do evaporador. O calor do ar transfere-se para estas aletas e serpentina e, depois, para o fluido refrigerante dentro da serpentina. O fluido refrigerante dentro da serpentina do evaporador está a baixa pressão, por que ele foi vaporizado no evaporador através do pequeno orifício da válvula de expansão, e porque o compressor está aspirando o mesmo para fora do evaporador. Quando o fluido refrigerante a baixa temperatura absorve o calor da serpentina do evaporador, ele entra em ebulição e se transforma em gás. Como o calor foi tirado do ar interno do automóvel, a sua temperatura é mais baixa, tornando o interior do carro mais confortável. À medida que o ar continua passando pela serpentina do evaporador, mais calor é extraído, e o ar continua a se tornar mais fresco.

O fluido refrigerante sai como um gás sob baixa pressão, contendo tanto calor quanto possa transferir, conforme sua relação entre pressão e temperatura. Ele segue para o compressor pelo lado de baixa pressão, ou de sucção, e é, então, comprimido transformando-se em gás sob alta pressão, e bombeado para fora pelo lado de descarga do compressor.

O fluido refrigerante entra no condensador a alta pressão e temperatura. Ao passar através da serpentina do condensador, o ar externo que flui pela serpentina absorve o calor do refrigerante. Isto ocorre porque o ar externo neste ponto tem menos calor do que o fluido refrigerante na serpentina do condensador. Logo que o calor deixa o fluido refrigerante, este se transforma de gasoso em líquido, mantendo-se, porém, sob alta pressão.

O fluido refrigerante líquido a alta pressão en

5. Quando o refrigerante sai do condensador, ele vai para o tanque-filtro-secador, onde fica guardado até que a válvula de expansão exija mais refrigerante líquido, e as pequenas quantidades de umidade que possam ter entrado no sistema durante a instalação sejam absorvidas.



1. O refrigerante entra na Válvula de Expansão em estado líquido a uma alta pressão e a temperatura do ar ambiente. Ele passa pelo pequeno orifício da válvula, onde se transforma em vapor úmido e é reduzido a uma pressão mais baixa. A pressão mais baixa é também causada pelo compressor ao aspirar o refrigerante para fora do evaporador.

2. No evaporador, o refrigerante passa através do interior dos tubos da serpentina. À medida que o calor do ar dentro do automóvel se transfere para o refrigerante, este entra em ebulição e transforma-se em gás. Do evaporador, o gás a baixa pressão e baixa temperatura segue para o lado de admissão do compressor.

4. No condensador, o calor do gás refrigerante transfere-se para o ar de fora do automóvel, à medida que este ar passa sobre as serpentinas do condensador. À medida que o refrigerante perde o calor, passa para o estado do líquido.

3. O compressor bombeia o refrigerante, transformando-o em gás de alta pressão. Do lado de descarga do compressor, o refrigerante segue para o lado de admissão do condensador.

Fig. 22 - Ciclo do sistema de ar condicionado para automóvel

tra agora no tanque-filtro-secador, onde fica guardado até que a válvula de expansão exija mais. O ciclo do sistema de ar condicionado está completo.

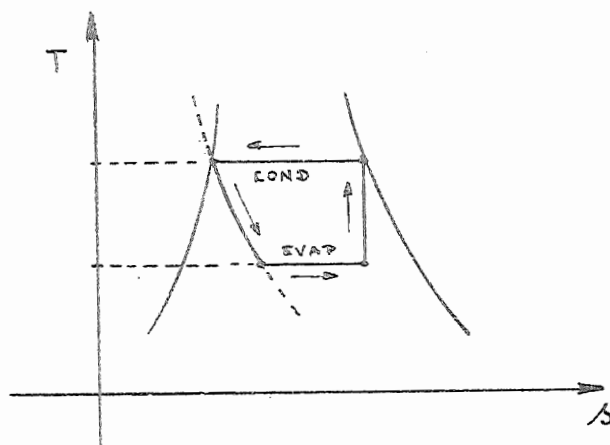
Durante este ciclo do sistema, tanto o calor sensível como o latente foram transferidos do ar interno do carro para o ar externo. Isto foi feito pela transformação do fluido frigorífico de líquido, a alta pressão, para gasoso a baixa pressão, e volta líquido, a alta pressão. Cada vez que a pressão é modificada, o fluido frigorífico absorve ou cede calor.

### 1.3 - Considerações

As transformações sofridas pelo fluido frigorífico durante o ciclo de refrigeração ocorrem principalmente na região de vapor úmido. Nesta região as transformações isobáricas são também isotérmicas. No curso de Termodinâmica da EESC além dos princípios da Termodinâmica, dos conceitos básicos e do estudo das variáveis de estados, são estudados os ciclos das máquinas térmicas, cujos fluidos que os percorrem não sofrem mudança de estados e foram, por aproximação, considerados gases perfeitos.

No curso de Máquinas Térmicas e Frigoríficas, são estudados os ciclos que envolvem fluidos em duas fases. Além dos conceitos já vistos na disciplina Termodinâmica é necessário introduzir aqueles que se referem às propriedades dos vapores. A mesma técnica é seguida: passa-se do diagrama em blocos para o ciclo nos diagramas termodinâmicos, calculam-se os calores trocados, os trabalhos produzidos e fornecidos, analisam-se os rendimentos, etc.

Um ciclo de refrigeração que pode corresponder ao diagrama de blocos da figura 1 é apresentado na figura 2.



- Figura 2 -

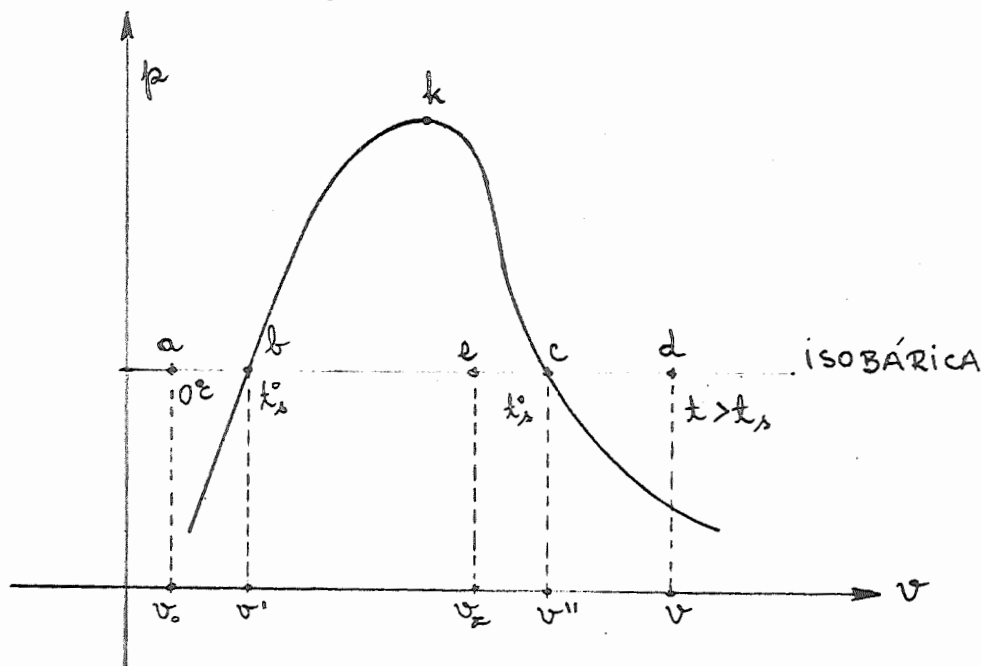
Um ciclo de refrigeração no diagrama Ts.

As transformações no condensador e no evaporador envolvem mudanças de estados. Os valores das variáveis termodinâmicas podem ser determinados analiticamente. Na maioria dos casos, os cálculos são complicados e trabalhosos. Adota-se, então, o critério de utilizar os valores tomados nos diagramas termodinâmicos usuais que embora menos precisos conduzem a bons resultados.

O curso de Máquinas Térmicas e Frigoríficas segue o seguinte desenvolvimento: propriedades dos vapores, transformações termodinâmicas nos sistemas de duas fases, ciclos das máquinas a vapor, ciclos frigoríficos, psicrometria e condicionamento de ar, e, aplicações industriais do frio que serão apresentadas sob a forma de palestras.

Deve-se ressaltar que o estudo das propriedades dos vapores é básico e fundamental para entendimento dos assuntos tratados durante o curso. Por essa razão o desenvolvimento feito a seguir deve ser acompanhado com atenção pelo estudante.

2 - Formação do vapor à pressão constante



- Figura 3 -

Transformação isobárica no diagrama pv

Toma-se 1 kg\* de líquido a  $0^\circ\text{C}$  e pressão p. No diagrama pv da figura 3, corresponderá ao ponto a, cujo volume  $v_0$  será também o volume específico, uma vez que se tomou 1 kg\* de substância.



Se a pressão é mantida constante e calor é introduzido no líquido, a sua temperatura vai subindo, não indefinidamente, mas sim até o ponto b, isto é, até atingir o ponto de ebulição (para a dada pressão) quando a temperatura chega a  $t_g$ . Como regra o volume do líquido aumentará simultaneamente de  $v_0$  até  $v'$  (a água constitui exceção; sua maior densidade, e portanto seu menor volume ocorre a  $4^\circ\text{C}$ ).

Quando mais calor é introduzido, o líquido evapora-se e é transformado em vapor. Se a pressão  $p$  for mantida constante, ocorre um fenômeno comum a todos os líquidos: a temperatura da mistura de vapor e líquido permanece inalterada em  $t_g$ , até que toda a mistura esteja vaporizada e atinja o volume específico  $v''$ , consideravelmente maior que  $v'$ . Tal estado é indicado por c no diagrama  $p-v$  da figura.

A seção ab da isobárica do diagrama representa o aquecimento do líquido de  $0^\circ\text{C}$  a  $t_g$ , a pressão constante, e a seção bc representa o processo de ebulição à temperatura constante  $t_g$  correspondente à dada pressão  $p$ . A isobárica bc é também uma isoterma.

O vapor no estado indicado pelo ponto c recebe o nome de vapor saturado seco; entre os pontos b e c da isobárica há uma mistura de líquido e vapor saturado seco; como o vapor contém partículas de líquido em suspensão, ele é chamado vapor saturado úmido.

Se, mais calor é introduzido no vapor saturado seco do ponto c, mantida a pressão constante, tanto o volume como a temperatura aumentarão e o vapor se tornará superaquecido. Como exemplo, tem-se o ponto d em que a temperatura é maior que o ponto de ebulição à pressão dada. A seção cd, não é uma isotérmica.

A temperatura na qual o líquido evapora é também a temperatura do seu vapor saturado à pressão considerada. Pode-se definir vapor saturado como sendo o vapor em contato e equilíbrio térmico com o líquido do qual ele é formado.

Se o vapor saturado é resfriado à pressão constante ele gradualmente retorna ao seu estado líquido enquanto sua temperatura for constante, isto é, ele condensa. A temperatura da mistura não pode abaixar enquanto vapor se transforma em líquido. A temperatura do vapor saturado à uma dada pressão não pode ser abaixada por que é a temperatura mais baixa do vapor que é possível na dada pressão.

Por aquecimento do vapor saturado sêco à pressão constante sua temperatura pode subir a qualquer nível (como vapor superaquecido). É impossível qualquer partícula do líquido permanecer suspensa no vapor porque o calor que for introduzido será utilizado para converter esta partícula em vapor.

Vapor superaquecido pode ser definido como vapor à temperatura maior que aquela do vapor saturado à mesma pressão.

O vapor saturado sêco é um estado de grande instabilidade : uma pequena perda de calor à pressão constante leva-o a uma condensação parcial; uma pequena introdução de calor leva-o a condição de superaquecido.

Deve aqui ser mencionado que em condições especiais ocorrem desvios das leis acima, isto é, o líquido pode ser "aquecido" à temperatura maior que o ponto de ebulição (ou seja, acima da temperatura de vapor saturado a dada pressão) ou o vapor "resfriado" à temperatura mais baixa que o ponto de ebulição sem sofrer mudança de estado. Em ambos os casos trata-se de situações instáveis.

Um líquido sempre se transforma em vapor em temperaturas mais baixas do que ponto de ebulição para uma dada pressão, se a pressão parcial do vapor sobre a superfície do líquido é menor que a do vapor saturado correspondente à temperatura do líquido. Em tais casos ocorre evaporação na superfície do líquido até que a pressão parcial do vapor atinja a pressão de saturação.

A formação de vapor no ponto de ebulição ocorre em toda a massa do líquido, enquanto a evaporação só ocorre na sua superfície livre.

Quando o líquido está sendo aquecido a evaporação sempre precede a ebulição e aumenta com a temperatura.

Voltando-se à figura pode-se plotar outros pontos correspondentes à a b c d ... para outros valores de  $p_1$   $p_2$  e etc. Serão obtidas as três curvas:

- I - volume específico do líquido a  $0^{\circ}\text{C}$  (isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  do líquido)
- II - volume específico do líquido no ponto de ebulição
- III - volume específico do vapor saturado sêco.

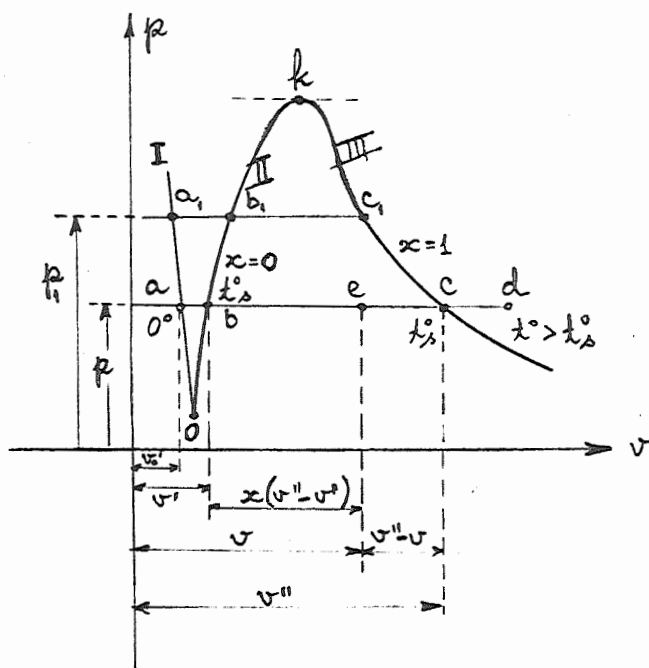


figura 4

Resumindo o que foi dito: há uma temperatura de finida para um dado líquido ferver para cada pressão; esta pressão tam bém é a pressão do vapor saturado; o ponto de ebulição de todos os lí- quidos crescem com a pressão. A pressão e a temperatura do vapor satu- rado são interdependentes, o que pode ser expresso pela função:

$$p = f(t_s)$$

que tem sido obtida e determinada por ajuste de fórmulas empíricas e resultados experimentais.

Na prática os valores  $p = f(t_s)$  são encontra- dos nas tabelas de vapor, ou nos diagramas termodinâmicos para cada substância usual. As mais usuais são:

- |          |                           |          |
|----------|---------------------------|----------|
| água     | amônia (NH <sub>3</sub> ) | freon 12 |
| mercúrio | SO <sub>2</sub>           |          |
|          | CO <sub>2</sub>           |          |

Um fato importante que tem que ser destacado : quando a pressão cresce diminui a diferença entre os volumes específi- cos v'' - v'.

Numa certa pressão e temperatura definidas pa- ra uma dada substância, a diferença reduz-se a zero, as curvas II e III

se encontram no ponto k. É o ponto crítico de pressão  $p_{cr}$  e temperatura  $t_{cr}$  e volume  $v''_{cr} = v'_{cr} = v_{cr}$ , valores que descrevem o estado crítico do vapor: êste é o estado no qual a diferença entre vapor e líquido desaparece. A temperatura crítica é a temperatura acima da qual somente pode existir vapor superaquecido.

Os gases são vapores superaquecidos em alto grau.

### 3 - Volume específico do vapor úmido

O vapor úmido é uma mistura de vapor saturado sêco e líquido.

Sua composição é determinada pelo pêso do vapor  $x$ , contido em 1 kg\* da mistura, chamado título da mistura ou por  $(1-x)$ , chamado grau de umidade.

Na figura o ponto e representa um estado de vapor úmido de volume específico  $v_x$ .

O volume específico  $v_x$  é a soma do volume de  $x$  kg\* de vapor sêco de volume específico  $v''$  e  $(1-x)$  kg\* de líquido

$$v_x = x v'' + (1 - x) v' = v' + x (v'' - v')$$

$$x (v'' - v') = be$$

$$(v'' - v') = bc$$

$$x = \frac{be}{bc}$$

ver na figura 4

Da equação

$$v_x = v' + x (v'' - v')$$

$$v_x - v' = x (v'' - v')$$

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{be}{bc}$$

Assim: para determinar a qualidade do vapor no ponto e num diagrama pv é necessário somente plotar na horizontal um segmento proporcional e compará-lo com o segmento bc correspondente.

O título do vapor pode variar de 0 a 1 para vapor saturado sêco,  $x = 1$ ; para líquido,  $x = 0$ . Nos pontos intermediários aplica-se a proporção. Em alguns casos

$$v_x = x v'' \quad \text{sem cometer erro considerável}$$

4 - Calor, energia interna, entalpia e entropia do líquido.

Quando a temperatura de 1 kg\* do líquido é acrescida de um infinitéssimo de grau,  $dt$ , a quantidade de calor trocada é:

$$dq = c dt = du + p dv$$

A quantidade de calor necessária para elevar de  $0^\circ\text{C}$  a  $t_s^\circ\text{C}$  é dada por:

$$q' = \int_0^{t_s} c' dt = u' - u_0 + \int_{v_0}^{v'} p dv$$

Como a variação do volume específico do líquido é insignificante, resulta que o segundo membro da equação básica, o trabalho de expansão, é muito pequeno comparado com o primeiro membro, a variação da energia interna.

Assumindo que  $u_0 = 0$  quando a temperatura é  $0^\circ\text{C}$ , tem-se

$$q' = u'$$

isto é, a energia interna do líquido é igual ao calor do líquido. Isto é verdadeiro quando  $v' = v_0 = \text{cte}$ , o que não é preciso.

A entalpia do líquido é dada pela equação:

$$h' = u' + pv'$$

ou

$$h' = q' - p(v' - v_0) + pv' = q' + pv_0$$

A pressões baixas o segundo membro da equação é muito pequeno comparado com o primeiro, o que permite admitir-se  $h \approx q$ . A pressões elevadas da ordem de 200 ata, quando se procede a cálculos precisos o membro  $p v_0$  não pode ser ignorado.

Na prática é permissível fazer-se:

$$h' \approx q' \approx u'$$

A entropia do líquido, admitindo o processo reversível será  $ds = \frac{dq}{T}$

No ponto b será  $s' = \int_{273}^{T_s} \frac{dq'}{T} = \int_{273}^{T_s} \frac{c' dT}{T}$

Considerando  $c'$  constante

$$s' = c' \ln \frac{T_s}{273}$$

5 - Calor total, Energia Interna, Entalpia e Entropia do vapor saturado sêco.

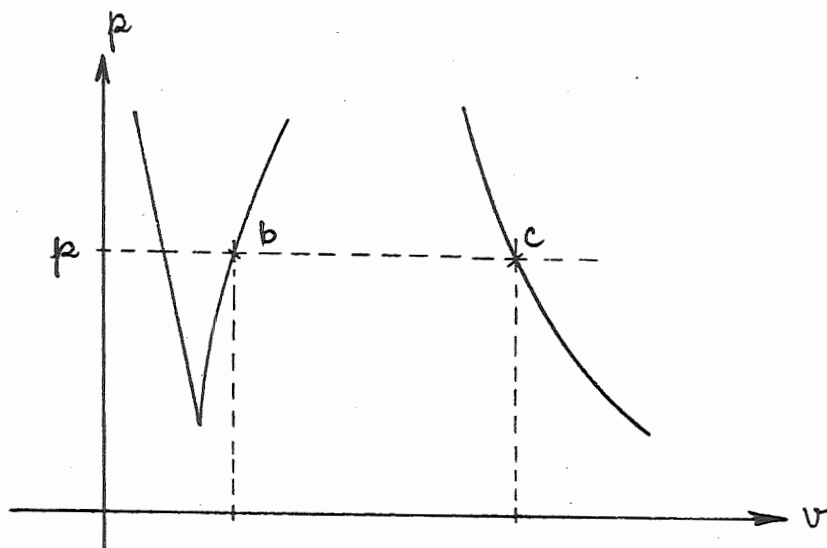


Figura - 5

O processo bc correspondente a uma secção da iso**b**árica é um processo de formação de vapor em que há uma gradual trans**formação** de líquido em vapor saturado sêco, acompanhada de uma expan**são**. Além da transformação ocorrer à pressão constante, ela é também

isotérmica.

A quantidade de calor dispensada no processo bc, isto é, a quantidade necessária para converter 1 kg\* de líquido a quecido (no ponto de ebulição) em vapor saturado sêco, a pressão constante (e temperatura constante) é conhecida calor de formação de vapor e indicada pela letra r.

A equação da 1ª lei da Termodinâmica toma a seguinte forma aplicada ao processo bc:

$$r = u'' - u' + p (v'' - v')$$

Assim, uma parte do calor de formação do vapor é dispensada para modificar a energia interna (trabalho de dissipação gasto para vencer a atração molecular das partículas transformando o líquido no vapor) e outra parte utilizada na expansão dada pela área do retângulo entre bc e o eixo dos v na figura. Não há variação na energia cinética durante o processo bc uma vez que a temperatura se mantém constante.

Chamando o trabalho de dissipação de  $\phi = u'' - u'$  e o trabalho de expansão de  $\psi = p (v'' - v')$  a equação pode ser escrita na forma mais simples:

$$r = \phi + \psi$$

O trabalho de dissipação é igual a zero nos gases ideais. Nos vapores saturados seu valor é significativo. A maior parte de r é dispensado no trabalho  $\phi$  de dissipação. No caso estudado é acompanhado da mudança da estrutura física do corpo; a menor parte é utilizada como trabalho de expansão. Na formação do vapor d'água tem-se as seguintes relações em função das pressões:

pressão	1	10	50	100	200ata
$\frac{\phi}{\psi} = \frac{\text{formação}}{\text{expansão}}$	12,4	9,5	7,6	7,0	6,6

A relação  $\frac{\phi}{\psi}$  diminui a medida que a pres

são aumenta e conseqüentemente a medida que a temperatura aumenta. Na pressão e temperatura críticas  $r = 0$ ,  $\varphi = 0$  e  $\psi = 0$  pois nessas condições não há processo de formação de vapor, a diferença entre líquido e vapor desaparece.

### 5.1 - Equação de Clausius - Clapeyron

Relação entre  $r$ ,  $(v''-v')$ ,  $p$  e  $T$ .

Considerando-se o ciclo de Carnot elementar da figura 6 dado por abcd em que

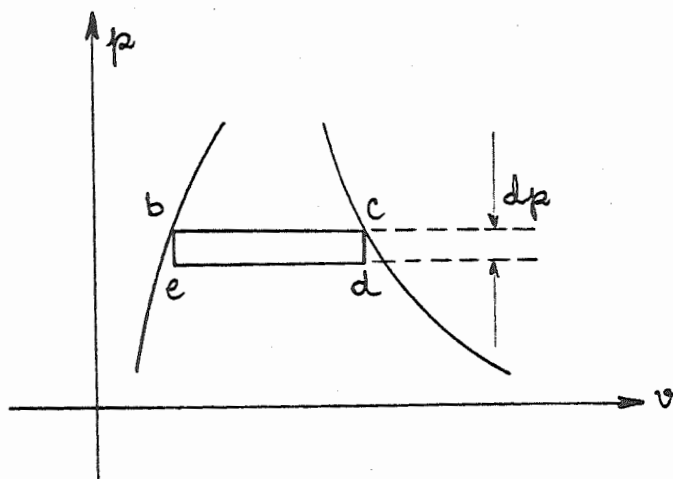


Figura - 6 "Ciclo de Carnot elementar"

- dTs - é um salto infinitéssimo de temperatura
- dp - é a variação da pressão
- b - é o ponto inicial da expansão isotérmica
- c - é o ponto final da expansão isotérmica
- d,e - os correspondentes na transformação inferior, compressão isotérmica.

O rendimento do ciclo de Carnot percorrido por 1 kg\* da substância que trabalha é dado por:

$$\eta = \frac{L}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



No ciclo elementar em estudo, indicado na figura pelo retângulo abcd, para uma variação infinitesimal de pressão dp ocorre uma produção de trabalho dL dado por:

$$dL = (v'' - v') dp$$

sendo  $q_1 = r$  e  $T_1 - T_2 = dT_s$  tem-se:

$$\frac{(v'' - v') dp}{r} = \frac{dT_s}{t_s}$$

ou  $\frac{r}{T_s} = (v'' - v') \frac{dp}{dT_s}$ , equação conhecida como equação de Clausius - Clapeyron.

Tal equação permite a determinação analítica dos valores  $v''$  se os valores de  $v'$ ,  $r$  e  $\frac{dp}{dT_s}$  são conhecidos. A determinação experimental de  $v''$  é extremamente difícil.

Os valores de  $v'$  e  $r$  podem ser obtidos experimentalmente por processos fáceis e precisos, tão simples quanto a dependência da pressão e temperatura na forma da equação  $p=f(T_s)$ , cuja derivada primeira é  $\frac{dp}{dT_s}$

A quantidade de calor que deve ser dispensada para converter  $1 \text{ kg}^*$  de líquido a  $0^\circ\text{C}$ , a pressão constante, em vapor saturado sêco ( $x=1$ ) seguindo o processo abc é dada por:

$$\lambda'' = q' + r = q' + \varphi + \psi$$

que é o calor total do vapor saturado sêco.

A figura 7 ilustra a variação de  $\lambda''$  com a temperatura d'agua.

A  $0^\circ\text{C}$  ;  $q' = 0$  ;  $\lambda'' = r = 597,3 \text{ kcal/kg}$  ;  $\varphi = 567,3$  ;  $\psi = 30$

A  $233^\circ\text{C}$  ( $p = 30 \text{ ata}$ )  $\lambda''_{\text{max}} = 669 \text{ kcal/kg}$

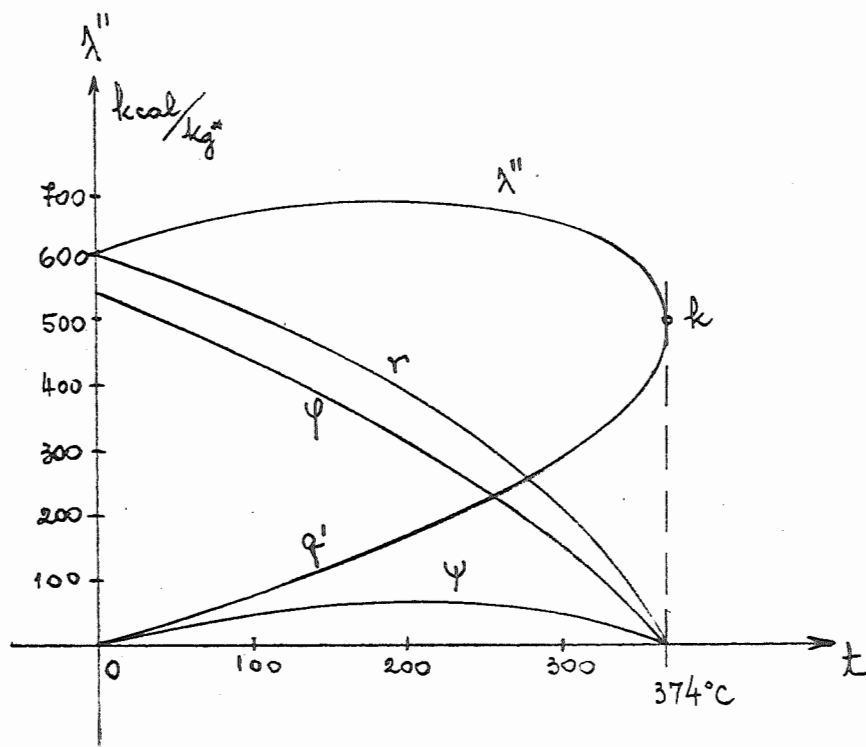


Figura 7 - Variação de  $\lambda''$

$$\Psi_{\max} = 47$$

$$q' = 239$$

$$r = 430$$

$$\psi = 383$$

$$\text{A } t_{\text{cr}} = 374,15^{\circ}\text{C} \longrightarrow r = 0$$

$$p_{\text{cr}} = 225,65 \text{ ata} \longrightarrow \psi = 0$$

$$\Psi = 0$$

$$\lambda' = q' = 496 \text{ kcal/kg}^*$$

O mercúrio nos limites de 0,015 e 4,5 ata, o calor de formação varia de 72 a 70 kcal/kg\* e o calor total de 78 a 85 kcal/kg\*

A energia interna do vapor saturado sêco é da da por

$$u'' = u' + \psi$$

$$\text{Ou } u'' = q' - p(v' - v_0) + \psi$$

$$\text{E } u'' \approx q' + \psi$$

A entalpia obtida pelo desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
 h'' &= u'' + pv'' = q' - p(v' - v_0) + \psi + pv'' = \\
 &= q' + p(v'' - v') + \psi + pv_0 = \\
 &= q' + \Psi + \psi + pv_0 = \\
 &= q' + r + pv_0 = \lambda'' + pv_0 = h' + r
 \end{aligned}$$

Se a pressão não é muito elevada  $pv_0$  por ser desprezado e então

$h'' = \lambda''$ , isto é, a entalpia do vapor saturado sêco é aproximadamente igual ao seu calor total.

O aumento da entropia no processo bc é dado por:

$$s'' - s' = \int_b^c \frac{dq}{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_b^c dq = \frac{r}{T_s}$$

Então, a entropia do vapor saturado sêco é :

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}$$

## 6 - Calor total, Energia interna, Entalpia e Entropia do Vapor Úmido.

Se  $r$  kcal/kg\* são requeridas para converter 1 kg\* de líquido do estado b em vapor saturado sêco, então  $xr$  kcal/kg\* serão requeridas para atingir o estado e de uma mistura de título  $x$ .

O calor total do vapor saturado úmido, quantidade de calor necessária para converter, à pressão constante 1 kg\* de líquido a  $0^\circ\text{C}$  em vapor úmido é dado por:

$$\lambda_x = q' + xr$$

O calor de dissipação dado por

$$u_x - u = x \psi \quad \text{e portanto a energia interna}$$

$$\begin{aligned} u_x &= u' + x \psi = q' - p(v' - v_0) + x \psi \\ &= q' + x \psi \quad \text{admitindo } v' = v_0 \end{aligned}$$

A variação correspondente da entalpia será:

$$h_x - h' = xr$$

E portanto

$$h_x = h' + xr$$

$$h_x = q' + pv_0 + xr = \hat{\lambda}_x + pv_0$$

A baixa pressão o segundo membro  $pv_0 = h_0$  é muito pequeno e então  $h_x = \hat{\lambda}_x$ .

O aumento de entropia no processo bc é:

$$s_x - s' = \int_b^c \frac{dq}{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_b^c dq = \frac{xr}{T_s}$$

E a entropia do vapor úmido:

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_s}$$

## 7 - Vapor Superaquecido

Se calor é introduzido no vapor saturado sêco, a pressão constante, seu volume e sua temperatura aumentam e êle se transforma no que se chama vapor superaquecido. Parte do calor intro-

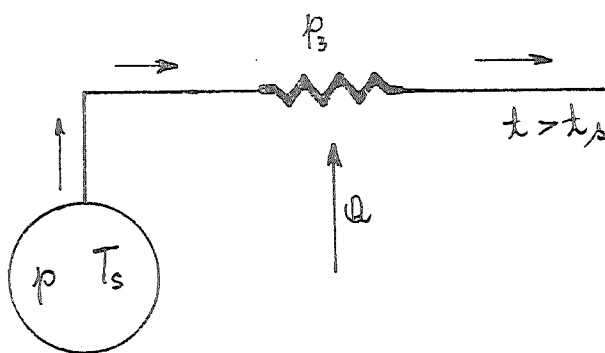
duzido será utilizado para aumentar a temperatura, parte no trabalho de dissipação e parte para aumentar o volume, isto é, no trabalho de expansão.

As propriedades do vapor superaquecido diferem grandemente daquelas do vapor saturado e se aproximam muito das dos gases. A experiência mostra que tanto mais superaquecido o vapor tanto mais suas propriedades se aproximam das dos gases. Na prática o vapor d'água fortemente superaquecido funciona como um gás.

Os gases reais são vapores superaquecidos dos seus líquidos. Eles se desviam das leis dos gases perfeitos quanto me nos superaquecidos eles estão.

Muitas equações tem sido proposta para corrigir os desvios das propriedades dos gases reais e dos vapores da equação  $p v = RT$  dos gases ideais. Dentre elas destacam-se a de Van der Waals e a de Vukalovich que é a mais complicada mas a mais precisa. Os valores das variáveis termodinâmicas são hoje tabelados facilitando grandemente os cálculos.

O vapor superaquecido são usualmente obtidos nas instalações de geração de vapor por um reaquecimento do vapor saturado sêco, obtido na caldeira. Esquemáticamente a figura indica o processo. O aparelho recebe o nome de superaquecedor



A quantidade de calor requerida para converter 1 kg\* de vapor saturado sêco a pressão constante em vapor superaquecido a temperatura t segue a fórmula usual:

$$q_s = \int_{t_s}^t C_p dt$$

$c_p$  = calor específico a pressão constante

Para determinar  $q_g$  é necessário conhecer  $c_p$  de superaquecimento que depende da temperatura e da pressão. A expressão analítica da dependência, baseada em observações empíricas e experimentais é bastante complicada. Os cálculos são simplificados no caso dos gases pela introdução do calor específico médio ou pela utilização de valores tabelados.

### 8 - Calor total, Energia interna, Entalpia e Entropia do Vapor superaquecido.

Para obter vapor superaquecido a temperatura  $t$ , a partir de um líquido a  $0^\circ\text{C}$  e pressão constante  $p$ , deve ser introduzido em cada  $\text{kg}^*$  de substância a quantidade de calor dada por:

$$\lambda = \lambda'' + q_g = q' + r + c_{pm} (t - t_g)$$

$$q_g = (u - u'') + p (v - v'')$$

$$u = u'' + q_g - p (v - v'')$$

$$\begin{aligned} h &= u + pv = u'' + q_g - p (v - v'') + pv \\ &= u'' + pv'' + q_g = h'' + q_g \end{aligned}$$

$$h = \lambda'' + pv_{g0} + q_g = \lambda + pv_{g0} \approx \lambda$$

O aumento da entropia pode ser calculado a partir de:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_p dT}{T}$$

No processo cd de superaquecimento

$$s - s'' = \int_{T_g}^T \frac{c_p dT}{T}$$

Desde que no caso do vapor, há a dependência de  $c_p$  da temperatura, o cálculo da integral envolve dificuldade. Preferese-se então, tomar os valores de tabelas e diagramas.

## 9 - Tabelas de vapor

As propriedades do vapor saturado são muito mais intrincadas que aquelas dos gases ideais para os quais duas das três variáveis  $p$   $v$   $t$  determinariam a terceira através da equação:

$$pv = RT$$

A pressão do vapor saturado é uma função da temperatura de tal maneira que as variáveis  $p$  e  $t_g$  não definem o estado; a uma temperatura definida corresponde uma pressão definida, mas o volume específico  $v_x$  pode assumir valores entre  $v'$  e  $v''$  dependendo do título  $x$  do vapor.

O valor de  $v_x$  é determinado para um par de valores  $(p, x)$  ou  $(t_g, x)$  por meio da relação já vista:

$$v_x = v' + x (v'' - v')$$

Para o vapor saturado tem-se relações do tipo:  $p = f(t_g)$   $v' = f(t_g)$   $v'' = f(p)$  que no geral implicam em cálculos mais complicados.

Para evitar tais cálculos, na prática existem tabelas para os vapores saturados que dão os valores de  $p$   $t_g$   $v'$   $v''$   $h'$   $h''$   $x$   $s'$   $s''$ ; os volumes específicos do vapor úmido são determináveis facilmente pela expressão  $v_x = v' + x (v'' - v')$  que as vezes pode ser aproximada  $v_x \sim x v''$ .

Para o caso de vapores superaquecidos existe uma equação que relaciona  $p$ ,  $v$  e  $T$ , equação de Vukalovich que no entanto é trabalhosa. Foi preparada uma tabela usando tal equação na qual com alto grau de precisão são dados os valores de  $v$ ,  $h$  e  $s$  para várias temperaturas e pressões. O valor da energia interna precisa ser calculada pela expressão  $u = h - pv$ . Outra tabela usual é a de Koch.

10 - Diagrama T - s para vapor

As transformações na região dos vapores como as transformações dos gases perfeitos (vistas no curso de Termodinâmica) podem ser graficamente representadas tanto no diagrama pv como no diagrama Ts. O último é mais largamente utilizado porque a área abaixo da curva de um processo reversível indica o calor trocado e uma transformação adiabática reversível é representada por uma vertical ( $s = \text{constante}$ ).

Como cada ponto de ambos os sistemas de coordenadas correspondem ao mesmo estado da substância, por transferência ponto por ponto da curva  $x = 0$  do diagrama pv se obtém no diagrama Ts a curva correspondente. Se a entropia do líquido a  $0^\circ\text{C}$  for zero, o ponto correspondente será o ponto de coordenada  $T = 273^\circ\text{C}$ . As abscissas dos pontos da curva  $x = 0$  dão os valores da entropia  $s'$ .

Semelhantemente, os pontos sobre a curva  $x = 1$  podem ser plotados no diagrama Ts; as suas abscissas correspondem às entropias dos vapores saturados secos  $s''$ .

Para maior clareza as ilustrações a seguir mostram a correspondência entre a transformação isobárica usada neste desenvolvimento e indicada pelas letras minúsculas abcd no diagrama pv (figura 8) e a mesma transformação no diagrama Ts (figura 9) indicada pelas maiúsculas ABCD.

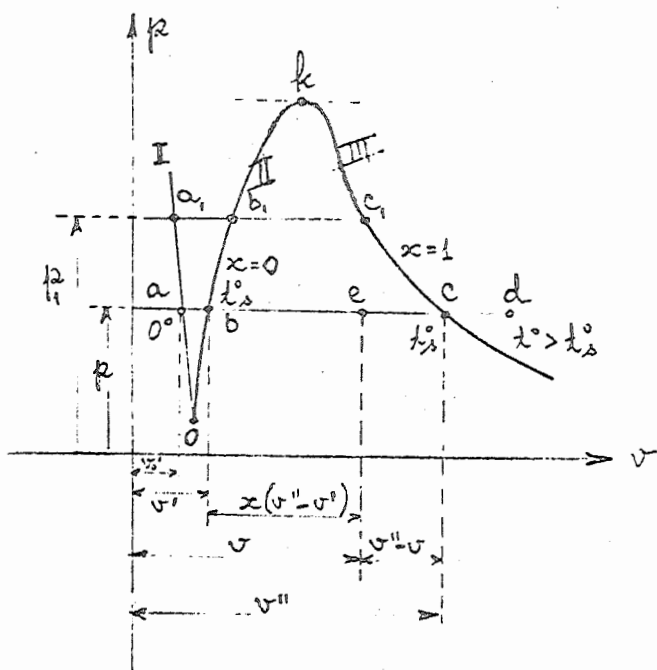


figura 8 - Diagrama pv

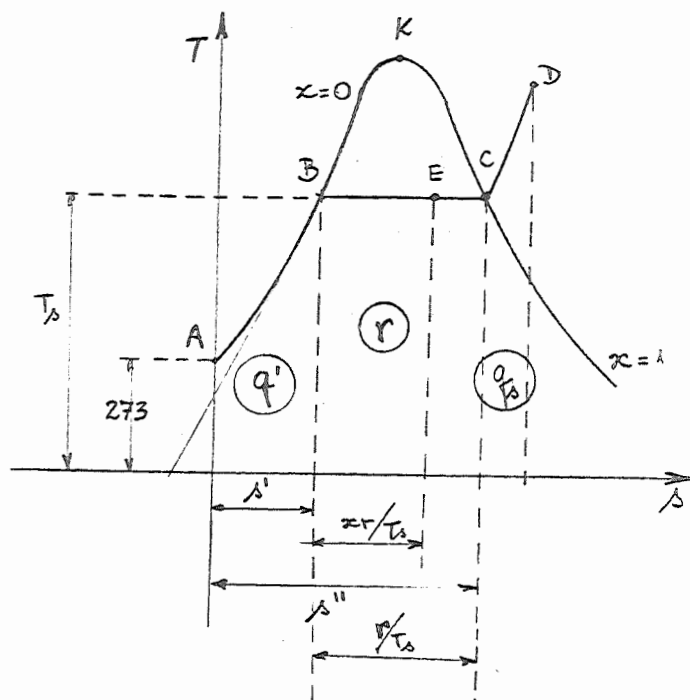


Figura 9 - Diagrama Ts



As áreas hachuradas no diagrama Ts indicam os calores trocados  $q'$ ,  $r$  e  $q_g$  numa certa escala.

Da mesma figura tira-se:

$$\frac{B E}{E C} = \frac{\frac{xr}{T_s}}{\frac{r}{T_s}} = x = \frac{b e}{b c}$$

Isto é, na área de saturação do diagrama Ts também o título do vapor corresponde a um segmento proporcional comparado com o segmento BC da transformação do líquido em vapor saturado seco.

#### 11 - Diagrama h - s para vapor

Uma transformação adiabática reversível é representada no sistema hs da mesma maneira que no Ts por uma vertical. A quantidade de calor trocada numa transformação isobárica é representada pela diferença das ordenadas dos pontos inicial e final da transformação. Estas duas propriedades do diagrama hs aplicadas convenientemente no decorrer do curso farão dele não só o mais importante como o mais largamente utilizado no estudo das máquinas térmicas à vapor.

A figura <sup>10</sup> ilustra o diagrama hs correspondente aos diagramas pv e Ts que foram comentados nos itens anteriores. A linha BCD que representa a transformação isobárica em estudo não é mais horizontal como nos anteriores. A distância vertical entre os pontos B e C, corresponde ao calor de formação  $r$ ; a horizontal é igual a  $\frac{r}{T_s}$ . De acôrdo com observações anteriores para os vapores saturados úmidos:

$$h_x = h' + xr \quad \text{e} \quad s_x = s' + \frac{xr}{T_s}$$

Substituindo  $xr$  vem:

$$s_x = s' + \frac{hx - h'}{T_s}$$

A  $p$  constante  $T_s$ ,  $s'$  e  $h'$  são também constantes, então a equação de  $s_x$  é do primeiro grau, equação de uma reta no diagrama  $hs$ . Graficamente como se fez para os outros dois diagramas, à partir da figura se pode escrever:

$$\frac{BE}{BC} = \frac{B'E'}{B'C'} = \frac{\frac{xr}{T_s}}{\frac{r}{T_s}} = x$$

Ou seja o título do vapor determina segmentos proporcionais na secção da isobárica entre as curvas  $x = 0$  e  $x = 1$  do diagrama  $hs$ . As curvas de mesmo título podem ser traçadas pela subdivisão das secções de várias isobáricas

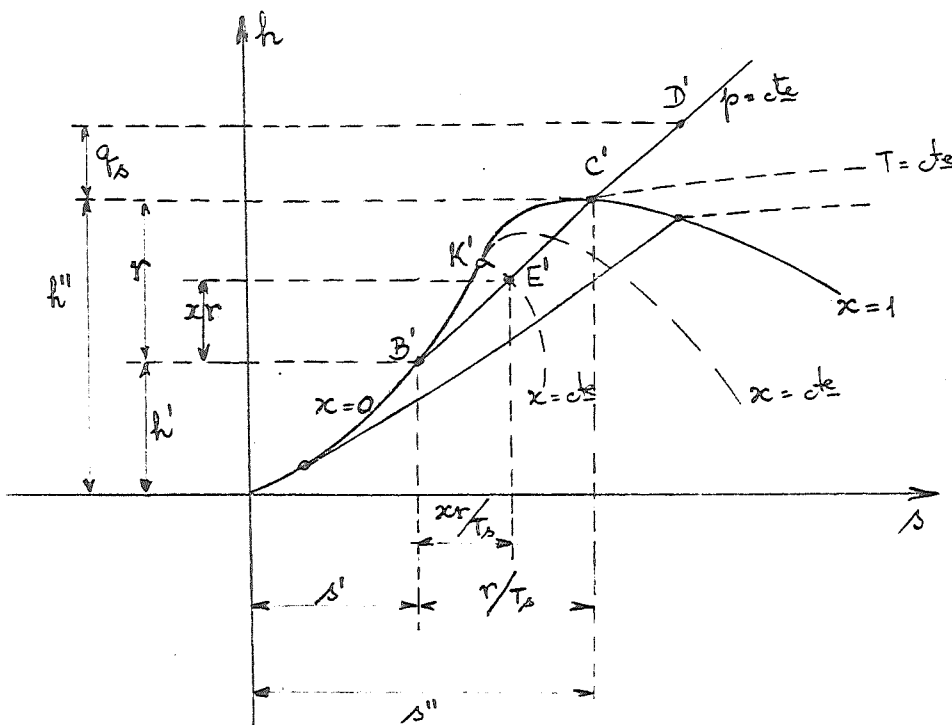


Figura 10 - Diagrama  $hs$

12 - Bibliografia

SUSHKOV, V.V. - Technical Thermodynamics.  
 Moscow, Peace Publishers, s.d.

EATON, - Manual de Serviço Eaton.