



2. COMPRESSORES

2.1 INTRODUÇÃO.

Neste capítulo será feita uma análise individual do compressor. Esta análise individual será usada futuramente para verificar o equilíbrio funcional entre os demais componentes. Cada componente de um sistema de compressão de vapor apresenta um comportamento característico, sendo ao mesmo tempo, influenciado pelas condições impostas por outros componentes. O primeiro componente a ser analisado será o compressor.

2.2 COMPRESSOR ALTERNATIVO.

O elemento fundamental na indústria de refrigeração é o compressor alternativo fabricado com capacidade de refrigeração que varia desde uma fração até centenas de quilowatts. Acompanhando as tendências apresentadas pelas máquinas rotativas, a rotação dos compressores alternativos têm aumentado durante os últimos 20 anos, a rotação variou de 120 a 180 rpm nos primeiros compressores, até rotações da ordem de 3.000 rpm nos compressores mais modernos.

Os compressores alternativos podem ser montados de três formas distintas; abertos, herméticos e semiherméticos.

Compressores alternativos abertos são aqueles em que o eixo de acionamento sai para fora da carcaça para se acoplar o motor de acionamento. Compressores alternativos herméticos são normalmente de pequena capacidade e tanto o motor de acionamento (elétrico) como o compressor são encerrados dentro de um único invólucro. A grande vantagem da montagem hermética é que não há vazamento através da ponta de eixo, como pode ocorrer nos compressores abertos.

Para compressores de potência intermediária há os compressores semi-herméticos que têm uma carcaça única mas apresentam o cabeçote removível permitindo a manutenção das válvulas e dos êmbolos do compressor.

2.3 EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA.

A eficiência volumétrica é um parâmetro básico na análise do desempenho dos compressores alternativos. A eficiência volumétrica devida ao volume nocivo é chamada "eficiência volumétrica teórica" é



representada pelo símbolo η_v . A eficiência volumétrica real é aquela que associa todos os efeitos e é representada pelo símbolo η_{vr} .

Na fig. 2.1 está representada um ciclo teórico completo de compressão. Usando a fig. 2.1 podemos deduzir uma expressão para a eficiência volumétrica teórica em função das propriedades termodinâmicas do refrigerante e das características construtivas do compressor.

Da definição de eficiência volumétrica temos:

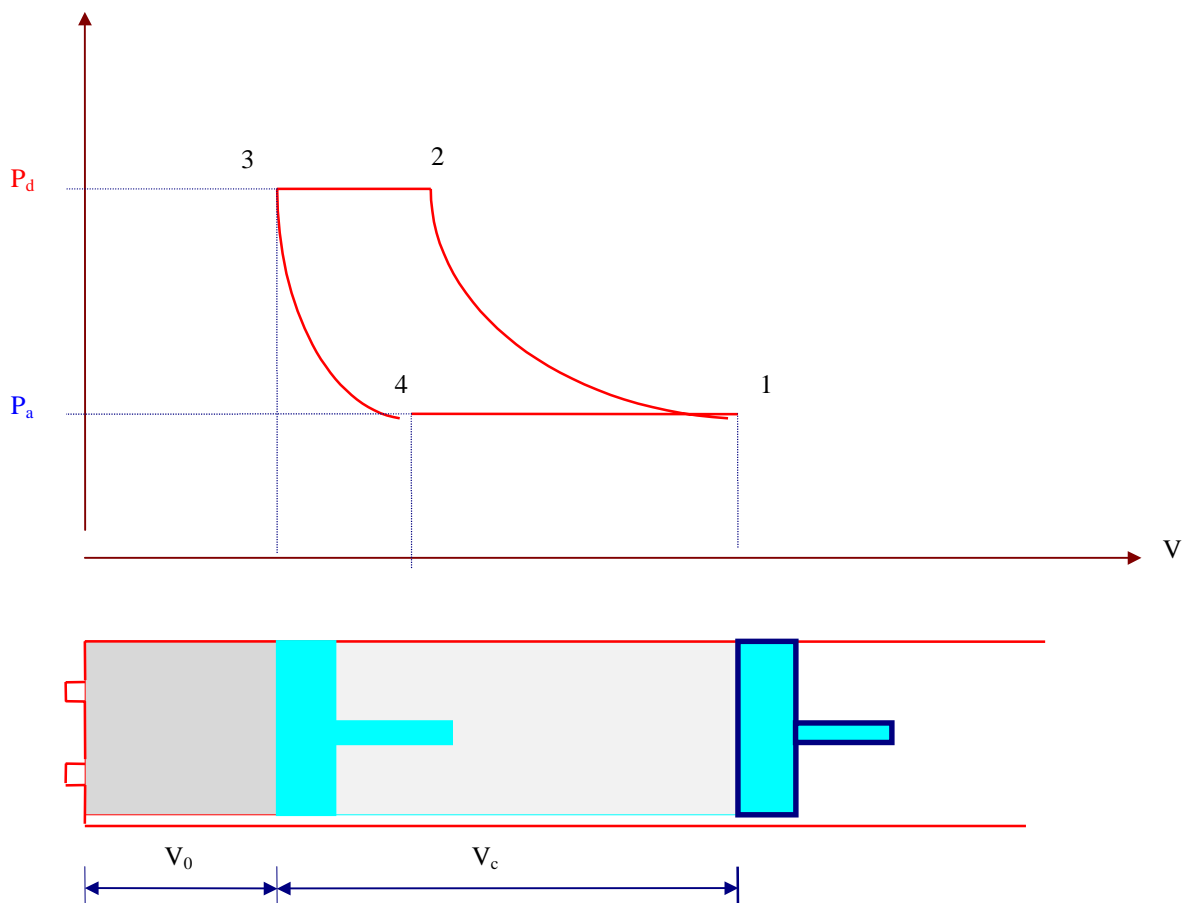


Fig. 2.1 - Diagrama indicado teórico de um ciclo completo de compressão-admissão.

$$\eta_v = \frac{V_1 - V_4}{V_c} \quad \text{eq. 2.1}$$

Manipulando a eq. 2.1 de acordo com a fig. 2.1 temos:



$$\eta_v = \frac{V_1 - V_0 + V_0 - V_4}{V_c} = \frac{V_c}{V_c} + \frac{V_0 - V_4}{V_c}$$

ou, ainda

$$\eta_v = 1 - \frac{V_0}{V_c} \left[\frac{V_4}{V_0} - 1 \right]$$

Para um processo de expansão isentrópico (teórico) a razão $V_4/V_0 \equiv v_a/v_d$, então a eq. 2.1 fica:

$$\eta_v = 1 - \frac{V_0}{V_c} \left[\frac{v_a}{v_d} - 1 \right] \quad \text{eq. 2.2}$$

ou ainda, considerando-se a expansão isentrópica, em que $P_4V_4^k = P_0V_0^k$ temos:

$$\eta_v = 1 - \frac{V_0}{V_c} \left[(P_d/P_a)^{1/k} - 1 \right] \quad \text{eq. 2.3}$$

onde V_0 é o volume nocivo, V_c é o volume da cilindrada do compressor, P_d é a pressão absoluta de descarga, P_a a pressão absoluta de admissão do compressor e k é o expoente da politrópica. O deslocamento volumétrico V_d pode ser calculado considerando-se as características do compressor, ou seja:

$$V_d = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot Z \cdot i \cdot N \cdot 60 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad \text{eq. 2.4}$$

onde D é o diâmetro do cilindro, em metros, L é o curso do êmbolo, em metros, Z é o número de cilindros do compressor, i indica simples ($i = 1$) ou duplo efeito ($i = 2$), N é o número de rotações do compressor, em rpm e 60 é o fator de conversão de rpm para rotações por hora.



A eficiência volumétrica real η_{vr} leva em consideração os efeitos de variação e temperatura do refrigerante ao entrar no cilindro λ_t , a variação da pressão que ocorre quando o refrigerante passa através da válvula de admissão λ_p e as fugas de refrigerante através das válvulas de admissão e descarga do compressor λ_f . Matematicamente a eficiência volumétrica real pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\eta_{vr} = \eta_v \cdot \lambda_t \cdot \lambda_p \cdot \lambda_f \quad \text{eq. 2.5}$$

onde os coeficientes λ tem valores entre;

$$0,90 \leq \lambda_t \leq 0,95$$

$$0,93 \leq \lambda_p \leq 0,97$$

$$0,95 \leq \lambda_f \leq 0,98$$

Considerando estes valores para os coeficientes λ podemos escrever:

$$0,79\eta_v \leq \eta_{vr} \leq 0,90\eta_v$$

As fig. 2.2 e 2.3 mostram a eficiência volumétrica teórica e real para compressores frigoríficos que utilizam refrigerantes halogenados em função da razão de compressão.

2.4 CAPACIDADE DO COMPRESSOR.

O compressor, por si só, não possui qualquer capacidade frigorífica, mas sim, uma capacidade de deslocar uma dada massa de refrigerante, que é função das dimensões do compressor e do refrigerante que trabalha em um dado ciclo. Este fluxo de massa deslocado pelo compressor em um sistema frigorífico será convertido em potência frigorífica pelo evaporador do sistema.

O fluxo real de massa que um dado compressor pode deslocar é calculado pela seguinte equação:

$$G = V_d \cdot \eta_{vr} / v_1 \quad (\text{kg/h}) \quad \text{eq. 2.6}$$

onde V_d é o volume deslocado pelo compressor, em m^3/h , v_1 é o volume específico do refrigerante à entrada do compressor, em m^3/kg e G é a capacidade do compressor em kg/h .



Conhecendo-se o fluxo real de massa que o compressor pode deslocar, a potência frigorífica é facilmente determinada para uma dada condição de operação, ou seja:

$$P_f = G(h_1 - h_4) \text{ (fg/h)} \quad \text{eq. 2.7}$$

Eficiência volumétrica

η_v

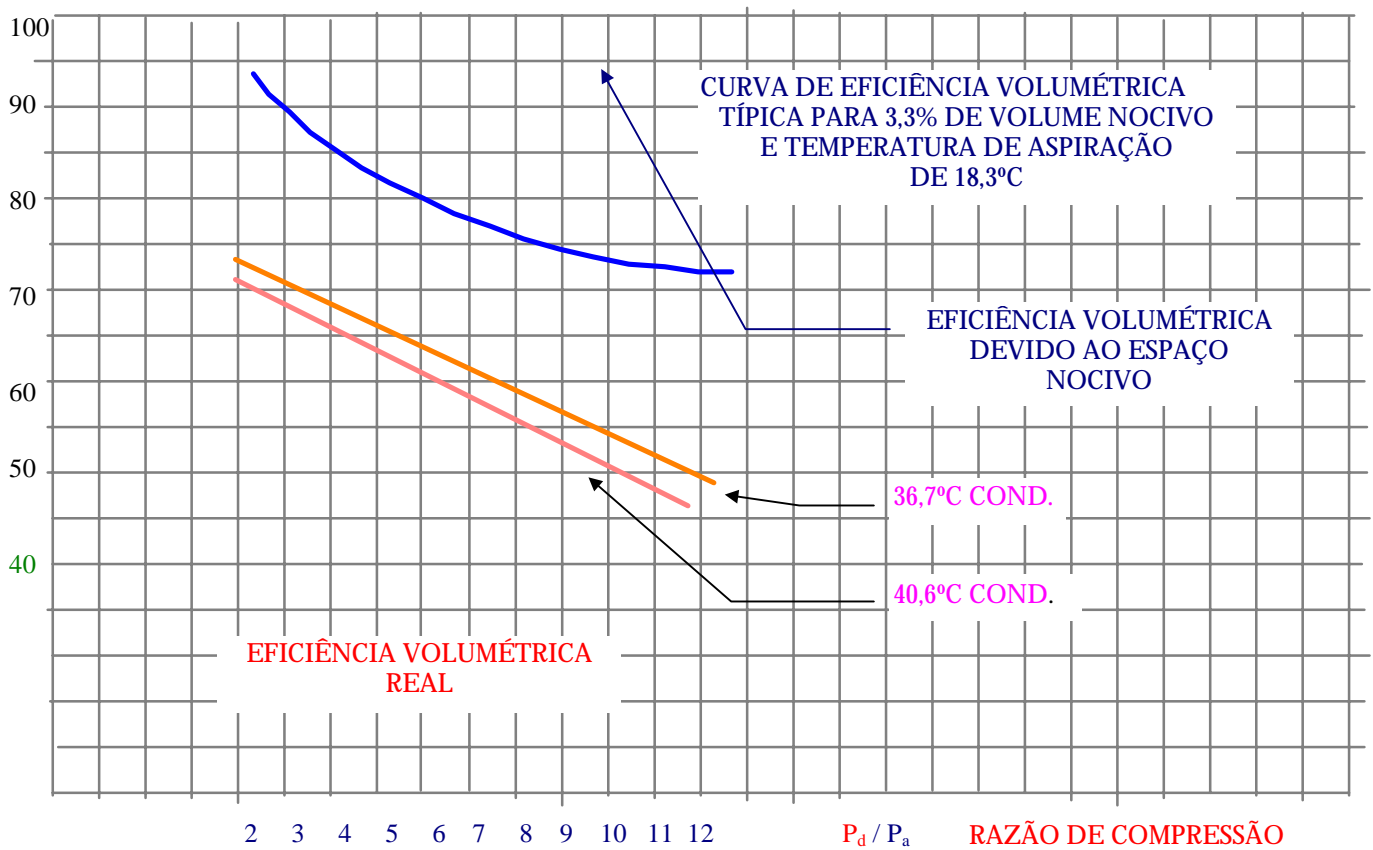


Fig. 2.2 - Eficiência volumétrica versus razão de compressão para compressores alternativos (Carrier Air Campany, com refrigerantes hlogenados).



Normalmente os fabricantes de compressores frigoríficos apresentam a potência frigorífica na forma de tabelas ou gráficos em função de T_C e de T_E para uma dada temperatura de admissão. A fig. 2.4 é um exemplo da apresentação da potência frigorífica de um compressor.

2.5 EFICIÊNCIA DE COMPRESSÃO.

A eficiência de compressão é definida como sendo a razão entre a potência teórica necessária ao compressor, para realizar o processo 1 - 2 do refrigerante em um dado ciclo, e a potência real consumida no eixo do compressor para realizar o ciclo real entre a mesma diferença de pressão, matematicamente temos:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{\text{eixo}}} \quad \text{eq. 2.8}$$

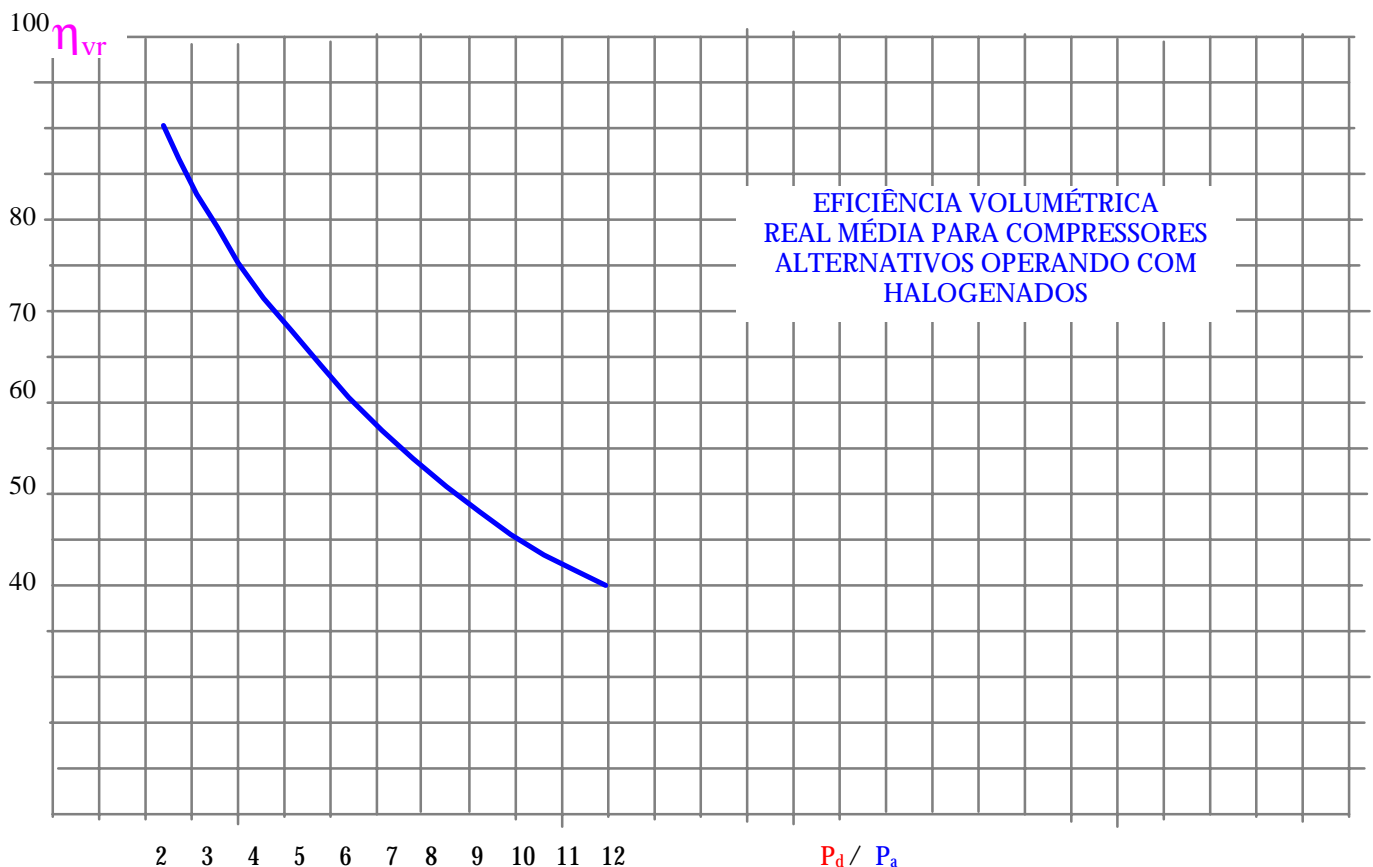


Fig. 2.3 - Efeito da taxa de compressão na eficiência volumétrica de compressores alternativos (com refrigerantes halogenados). (Principles of Refrigeration - Dossat).



P_f (kcal/h)

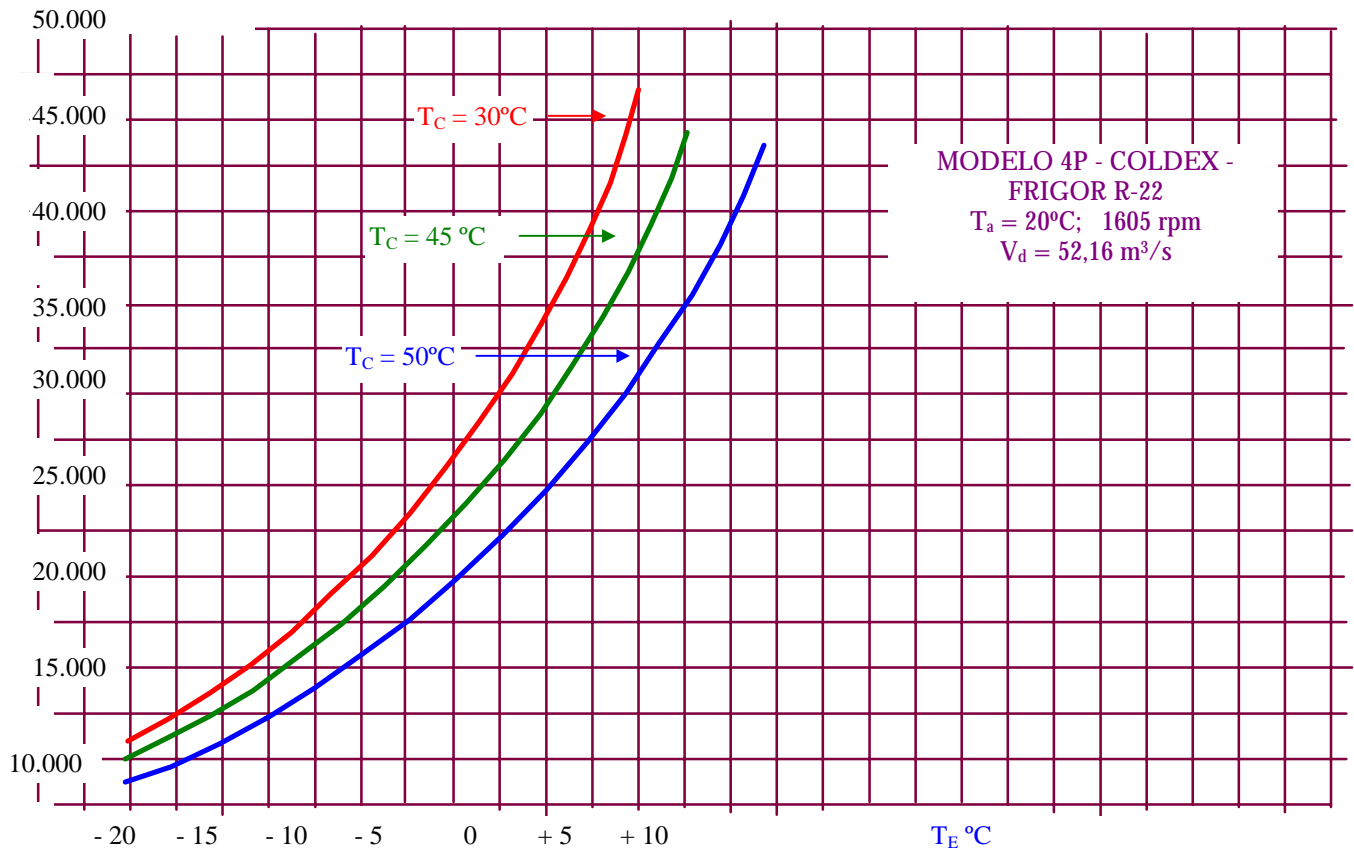


Fig. 2.4 - Potência Frigorífica do Compressor Coldex-Frigor Aberto - Modelo 4 - Dados do Fabricante.

A eficiência de compressão varia para cada compressor. Para compressores alternativos abertos, a eficiência de compressão varia entre 65 a 70% dependendo do compressor. Assim, através da eq. 2.8 pode-se estimar a potência que será consumida por um dado ciclo. A fig. 2.5 representa a potência de eixo para o compressor 4P indicado na fig. 2.4.

2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ADMISSÃO NA POTÊNCIA FRIGORÍFICA

A forma mais adequada para mostrar a influência da T_{ad} na P_f é considerar um exemplo. Consideremos o compressor indicado no item 2.4, ou seja o compressor Coldex-Frigor 4P. Faremos uma análise da capacidade, variando a T_{ad} para um sistema que trabalha com $T_c = 40^\circ\text{C}$ e $T_E = 0^\circ\text{C}$. Esta análise está mostrada nas fig(s). 2.6 e 2.7. do compressor.



P_{eixo} (KW)

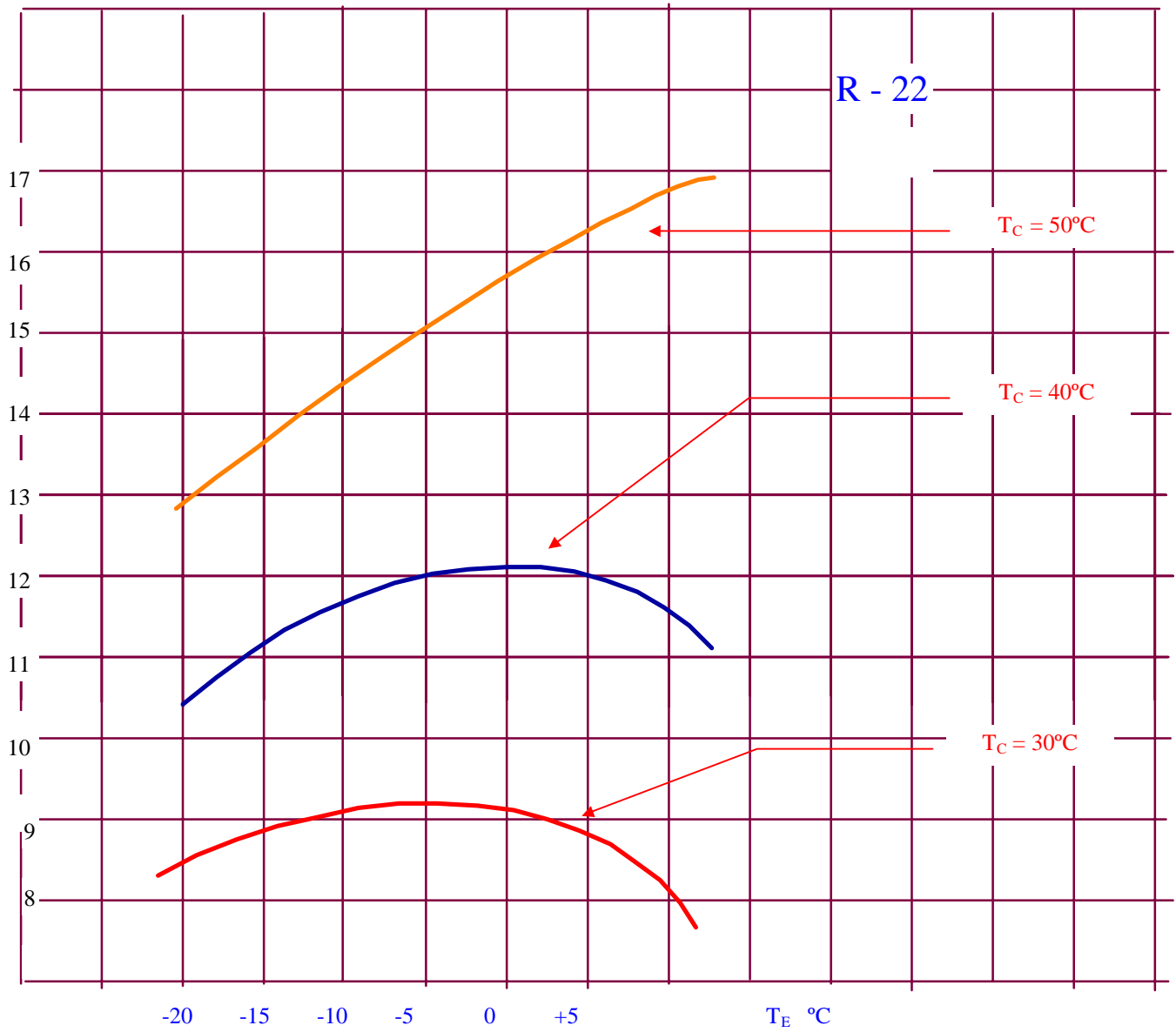


Fig. 2.5 - Potência de eixo média para compressor 4P com $T_a = 20^\circ\text{C}$ e superaquecimento útil de 10°C

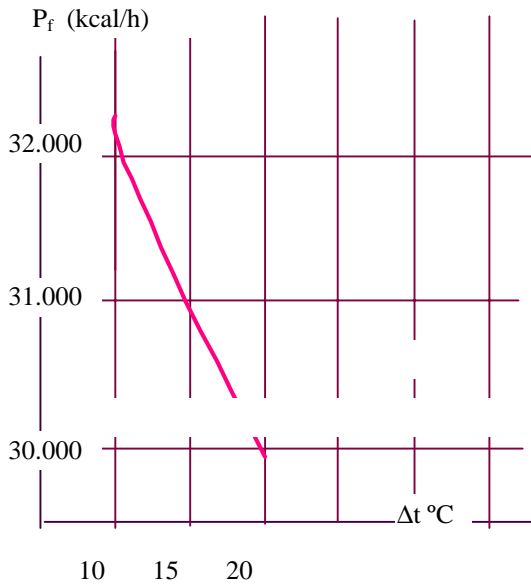


Fig. 2.6 - Influência do superaquecimento na capacidade

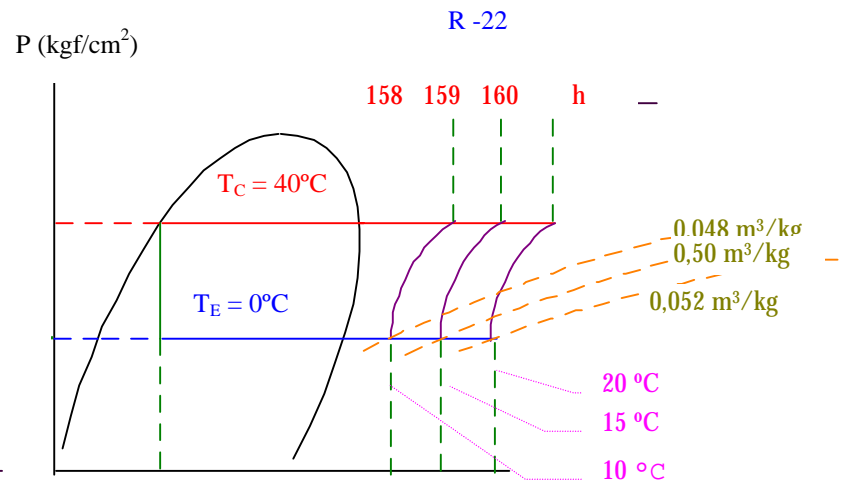


Fig. 2.7 - Ciclo Frigorífico indicando diversos superaquecimentos.



4. REFRIGERANTES

Refrigerantes primários são aqueles usados em sistemas de compressão de vapor.

Refrigerantes secundários são líquidos usados para transportar energia térmica a baixa temperatura de um local para outro, conhecidos como anticongelantes e salmouras.

Os sistemas de absorção utilizam duas substâncias que formam a combinação de refrigerantes.

4.1 REFRIGERANTES PRIMÁRIOS

4.1.1 COMPOSTOS HIDROCARBONETOS HALOGENADOS.

Os hidrocarbonetos halogenados são compostos formados por hidrogênio, carbono e um ou mais dos seguintes elementos da família química dos halogênicos: cloro, fluor ou bromo. A nomenclatura é composta, basicamente, por um nome (ou pela letra R) e um número. Segundo a norma internacional (ANSI/ASRAE 34-1989 - Number Designation and Safety Classification of Refrigerantes), a numeração dos hidrocarbonetos halogenados segue as seguintes regras:

1 - *O primeiro algarismo representa o número de átomos de carbono (C) do composto, menos um.* Assim os derivados de metano terão, como primeiro dígito, o zero, enquanto que os derivados de etano terão o número um.

2 - *O segundo algarismo representa o número de átomos de hidrogênio (H) do composto, mais um,* indicando a combustibilidade do refrigerante.

3 - *O terceiro algarismo representa o número de átomos de flúor (F) do composto.*

4 - *Nos casos onde o bromo está presente, no lugar de parte ou de todo o cloro, as mesmas regras são aplicadas. A exceção é que a letra B, após a designação do número de átomos de carbono, hidrogênio e flúor, indica a presença de bromo. O número de átomos de carbono, hidrogênio e flúor, indica a presença de bromo. O número imediatamente depois da letra B indica o número de átomos de bromo (Br) do composto.*



O número de identificação do refrigerante deve ser precedido pela letra R ou utilizado em combinação com a palavra *Refrigerante*.

O número de identificação pode também ser precedido pela marca registrada do fabricante ou nome comercial. Por exemplo: R - 12, Refrigerante 12, Freon 12 (marca registrada da Dupont).

Usualmente o R - 12 é também chamado de CFC 12. Esta nomenclatura não está de acordo com a norma ANSI/ASHRAE 34 - 1989, mas também bastante utilizada. A nomenclatura CFC é uma abreviação de CloroFlúorCarbono - principais elementos que compõem estes fluidos refrigerantes. O principal objetivo da utilização desta nomenclatura é informar ao usuário destas substâncias que elas destroem a camada de ozônio. Portanto, devem ser manuseadas de modo a evitar ou minimizar desperdícios e/ou liberação para a atmosfera. A siglas CFC sempre esteve muito ligada à destruição da camada de ozônio.

HFC, HCFC E HC.

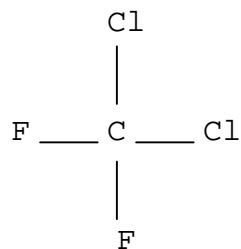
HCFC é a sigla do termo HidroCloroFlúorCarbono, substâncias menos agressivas do que CFCs em relação à cada de ozônio. No HCFC um átomo de cloro foi substituído por um hidrogênio, que é inofensivo a camada de ozônio. Já o HFC é a abreviação de HidroFlúorCarbono, e HC é a abreviação de HidroCarbono, ambas substâncias inofensivas à camada de ozônio, porque não tem cloro nas suas composições.

EXEMPLOS:

1) Refrigerante: R - 12.

Nomenclatura química: Diclorofluormetano.

Fórmula química:



a) N° de átomos de C - 1 = 1 - 1 = 0.

b) N° de átomos de H + 1 = 0 + 1 = 1.

c) N° de átomos de F = 2.

d) Não existe nenhum átomo de bromo no composto.

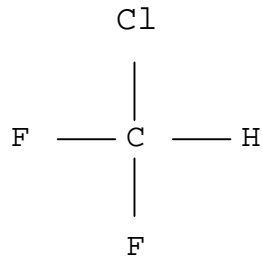
Logo, este composto é denominado R - 12.



2) Refrigerante: R - 22.

Nomenclatura química. Clorodifluormetano.

Fórmula química:



a) N° de átomos de C - 1 = 1 - 1 = 0.

b) N° de átomos de H + 1 = 1 + 1 = 2.

c) N° de átomos de F = 2.

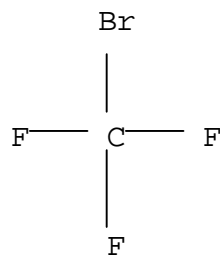
Não existe nenhum átomo de bromo no composto.

Logo, este composto é denominado R - 22.

3) Refrigerante: R - 13B1

Nomenclatura química: Bromotrifluormetano.

Fórmula química:



a) N° de átomos de C - 1 = 1 - 1 = 0.

b) N° de átomos de H + 1 = 0 + 1 = 1.

c) N° de átomos de F = 3.

d) Existe um átomo de bromo no composto.

Logo, este composto é denominado R - 13B1.



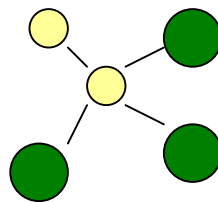
Alguns refrigerantes.

Fórmula	ASHRAE	Outra	Denominação
CCl_3F	R 11	CFC 11	Triclorofluormetano
CHClF_2	R 21	HCFC 21	Dicloromonofluormetano
CH_2FCF_3	R 134a	HFC 134a	Tetrafluoretano
CHCl_2CF_2	R 123	HCFC 123	Diclorotrifluoretano

4.1.2 PORQUE OS CFCs SÃO PREJUDICIAIS A CAMADA DE OZÔNIO.

Entre 12 e 13 km de distância do solo, na estratosfera, existe uma camada de ozônio que nos protege dos raios ultravioleta do sol. Essa camada absorve parte da radiação ultravioleta, impedindo que ela chegue à superfície da Terra. Esses raios possuem grande quantidade de energia. Os CFCs não reagem e não são destruídos na troposfera (camada mais baixa da atmosfera). Assim, quando liberados próximo ao solo, os CFCs vão subindo lentamente da troposfera para as camadas mais distantes da atmosfera. Esta subida leva vários anos.

Quando os CFCs chegam na estratosfera são atingidos pelos raios ultravioleta do sol, que provocam o rompimento de suas moléculas, liberando átomos de cloro. Esses átomos de cloro atacam e destroem o ozônio, reduzindo a camada de ozônio.

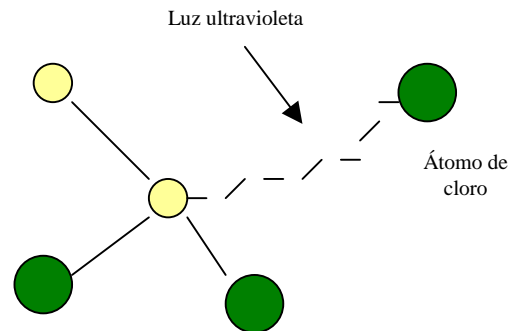


Molécula de CFC



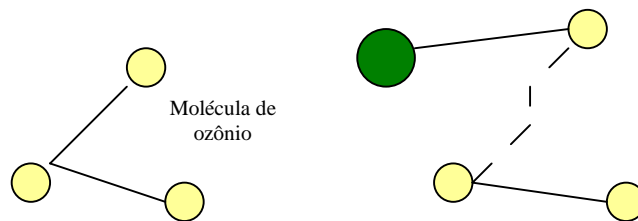
Os átomos de cloro formados na decomposição dos CFCs pelos raios ultravioleta são muito ativos. Cada um deles é capaz de destruir mais de 100.000 moléculas de ozônio.

A reação de destruição ocorre em quatro etapas, a partir da chegada das moléculas de CFC à estratosfera. Na 1ª etapa, a luz ultravioleta quebra a ligação de um átomo de cloro da molécula de CFC.



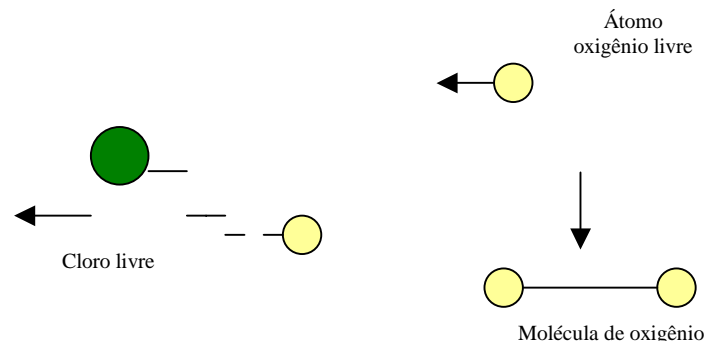
Molécula de CFC como cloro separando.

Em seguida, o átomo de cloro ataca a molécula de ozônio (O_3) e forma um monóxido de cloro.



Rompimento da ligação e formação das novas moléculas.

O monóxido de cloro é instável, tem sua ligação quebrada e forma-se novamente cloro livre, que vai atacar e destruir outra molécula de ozônio, repetindo-se o processo.



Cl - O rompendo, formando-se O_2 e cloro livre, que volta a reagir.



Quando se destrói parte da camada de ozônio ela fica mais fina em alguns lugares. É o camada "buraco", por onde os raios ultravioleta do sol entram com pouca proteção e atingem a Terra. Os efeitos desses raios se dão sobre todos os seres vivos e são principalmente:

- Aumento dos casos de cancer de pele.
- Danos ao sistema imunológico.
- Destruição ou danos aos organismos aquáticos e plantações.

4.2 COMPOSTOS INORGÂNICOS.

Muitos dos primeiros refrigerantes eram compostos inorgânicos e alguns mantiveram sua proeminência até o presente

Alguns refrigerantes

Fórmula	ASHRAE	Denominação
NH ₃	R 717	Amônia
H ₂ O	R 718	Água
	R 729	Ar
CO ₂	R 744	Dióxido de carbono
SO ₂	R 764	Dióxido de enxofre

O primeiro dígito indica ser um composto inorgânico e os dois últimos indicam o peso molecular.

4.3 HIDROCARBONETOS.

Muitos hidrocarbonetos são adequados como refrigerantes especialmente para operação em indústrias de petróleo e petroquímicas.



Alguns Refrigerantes

Fórmula	ASHRAE	Denominação
CH ₄	R 50	Metano
C ₂ H ₆	R 170	Etano
C ₃ H ₈	R 290	Propano

Segue as mesmas regras dos hidrocarbonetos halogenados.

4.4 AZEOTROPOS.

Uma mistura azeotrópica de duas substância é aquela que não pode ser separada em seus componentes por destilação. Um azeotropo evapora e condensa como uma substância simples com propriedades diferentes das de cada um se seus constituintes.

Alguns refrigerantes

R 502	48,8% de R 22 e 51,2% de R 115
R 503	40% de R 23 e 60% de R 13

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE ALGUNS REFRIGERANTES.

A tabela abaixo foi obtida do problema 1 do capítulo 2 da apostila de refrigeração volume II, baseada de um ciclo de compressão de vapor padrão com uma temperatura de evaporação de -15°C e uma temperatura de condensação de 30°C.



R	P_2 / P_1	q_E	G	Vd	ϵ	t_d (C)
R-11	6,20	37,64	80,340	61,64	5,03	42,0
R-12	4,08	28,60	105,73	9,780	4,70	39,0
R-22	4,06	38,50	78,540	6,130	4,66	55,0
R-717	4,94	263,3	11,480	5,850	4,75	104,0
R-729	5,00	16,00	188,62	95,26	1,71	135,5

Do exercício citado notamos que:

- Tanto as pressões como as temperaturas de descargas devem ser baixas o suficiente para permitir construções leves, tanto compressor como de vasos e tubos, facilitar a lubrificação e a vedação;
- A pressão baixa de refrigerantes como R 11 inferior a pressão atmosférica, tem a desvantagem de permitir a infiltração de ar no sistema, principalmente nos casos que se utiliza compressores abertos.

Da tabela acima observamos que:

- O R 22 apresenta menor relação de compressão, que é desejável para qualquer tipo de compressor;
- O R 717 tem o efeito frigorífico maior que os demais, entretanto o seu trabalho de compressão é também alto, de forma que o ϵ é da mesma ordem de magnitude dos outros refrigerantes;
- A capacidade do compressor e o volume deslocado influi na taxa de bombeamento e/ou no tipo de compressor. Os R 11 e R729 são menos densos o que requer maiores capacidades dos compressores. Os volumes deslocados elevados dos R 11 e R 729 indicam por que eles usam compressores centrífugos;
- O R 11 apresenta maior coeficiente de efeito frigorífico, mas esta vantagem não é o suficiente para permitir sua utilização em qualquer sistema, exceto os que utilizam compressores centrífugos;
- O R 717 é considerado inflamável em um mistura de 16 a 25% em volume como o ar, enquanto os demais são considerados não inflamáveis;



- O R 717 pertence ao grupo dos refrigerantes prejudiciais ou letais em concentrações de $\frac{1}{2}$ a 1% para exposições de $\frac{1}{2}$ h de duração;
- O R 717 não é miscível com óleo;
- Certos metais podem ser atacados por refrigerantes; o R 717 reage com cobre, latão ou ligas de cobre na presença de água. O ferro e aço são portanto usados em sistemas com R 717.
- Os halocarbônicos podem reagir com zinco, mas não com cobre, alumínio, ferro ou aço. Na presença de uma pequena quantidade de água, entretanto, os halocarbônicos atacam a borracha natural, portanto material sintético deve ser usado como gaxetas e outros elementos de vedação;
- O R 134a só opera com novos óleos sintéticos chamados PAG. (Polyalkylene Glycol).

4.5 REFRIGERANTES SECUNDÁRIOS

A água poderia ser um refrigerante secundário, mas as substância que nós desejamos explorar são as salmouras e anticongelantes, que são soluções com temperaturas de congelamento abaixo de 0°C . Vários dos anticongelantes mais largamente usados são soluções de água e etileno glicol, propileno glicol, ou cloreto de cálcio.

Seja uma solução de concentração x (Fig. 5.1), menor do que a eutética x_e . Em A é totalmente líquida a solução. Abaixando a temperatura A x constante, a solução continua líquida e atinge B. Nesta temperatura, a água começa a se separar na forma de gelo e o líquido restante tem sua concentração aumentada. No ponto C haverá uma mistura de gelo e de anticongelante líquido de concentração C_1 .

Atingindo o ponto D, tem-se uma mistura de m_1 partes de anticongelante eutético e m_2 partes de gelo, ambos na temperatura eutética.

Continuando a retirar calor, toda a mistura se congela na temperatura eutética, obtendo-se uma mistura mecânica de gelo e sal sólido.



Se a concentração x inicial fosse maior do que x_e , teríamos inicialmente separação de sal.

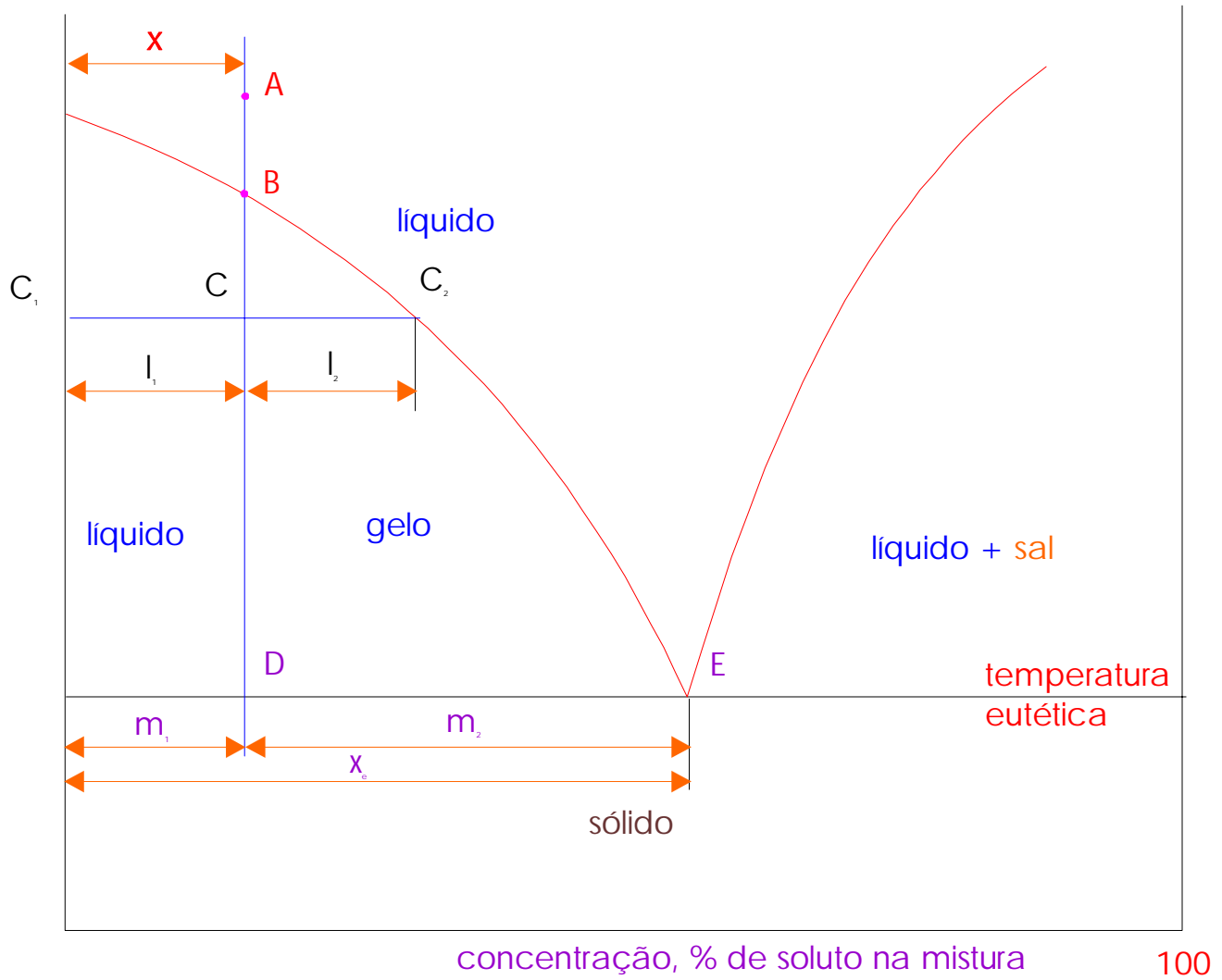


Fig. 5.1