

3.9. Utilidades

O equipamento produtivo e o equipamento auxiliar localizam-se em geral em áreas separadas duma fábrica. Este equipamento auxiliar é constituído pelos seguintes componentes, que se designam habitualmente por utilidades: caldeira de vapor, caldeira de fluido termico, torre de refrigeração, tanques de armazenagem, compressores para ar comprimido, unidades criogénicas, produção de azoto ou oxigénio, desmineralização de água, sistema contra incendios, posto de transformação electrico, sistema de vácuo, tratamento de efluentes.

3.9.1. Caldeira de vapor

O aquecimento de reactores quimicos a temperaturas inferiores a 130°C é normalmente feito por vapor produzido a 8 bar e reduzido para 4-6 bar. O vapor é produzido numa caldeira por vaporização de **água desmineralizada**.

A caldeira é constituída por um queimador que origina uma chama localizada no centro de um feixe de tubos segundo a figura 3.9.2. Os vapores de combustão circulam pelo interior dos tubos. A água a vaporizar circula pelo exterior dos tubos do feixe tubular.

O nível da água é regulado pelo nível dum depósito exterior que está ligado no topo e na base respectivamente com o topo e a base do feixe de tubos.

Quando a instalação consome vapor, a pressão baixa, o queimador arranca e o nível da água líquida baixa porque é vaporizada. Quando a pressão ultrapassa um determinado limite superior, o queimador pára.

Quando o nível da água líquida atinge um determinado nível inferior entra mais água. Quando o nível de água atinge um determinado nível superior fecha a entrada de água.

A água é vaporizada por contacto da chama e dos fumos quentes com as paredes dos tubos ou placas.

O **combustível** normalmente usado em caldeiras é o fuel para dimensões superiores a cerca de 10 milhões de kcal/hora e propano ou gás natural, para dimensões inferiores.

O vapor que sai da caldeira, ao aquecer os reactores através da camisa exterior ou de serpentinas sofre uma condensação. A **água condensada**, por ser desmineralizada, é reciclada através dum circuito de recolha de condensado e é reutilizada para produzir vapor.

O vapor entra sempre no **topo das camisas** dos reactores e sai como condensado pela base, através de válvulas adequadas.

Estas válvulas só deixam passar o condensado e retem o vapor. Para isso tem uma saída inferior por um tubo que fica tapado por uma esfera que não flutua quando não há liquido condensado.

Processos da Industria Quimica

A esfera flutua quando há liquido condensado e por isso abre o tubo inferior de descarga de condensado.

Há dois tipos de operação de caldeiras. Nas caldeiras com **vapor saturado**, o vapor de água sai da caldeira com uma pressão correspondente à temperatura de equilíbrio com a água líquida. Quanto mais elevada a temperatura mais elevada a pressão. O vapor neste estado chama-se saturado e não satisfaz a equação dos gases perfeitos mas sim a tabela 3.9.1.

A maior parte do calor fornecido pelo vapor de água no aquecimento dum reactor corresponde ao **calor da condensação** do vapor. O calor fornecido pelo vapor correspondente à descida da temperatura na entrada do manto até à temperatura de condensação seria pequeno.

A temperatura e pressão do vapor à entrada da camisa dum reactor é por isso igual à temperatura e pressão de saída de condensado.

Para que haja uma transferencia suficientemente rápida de calor do manto para o produto é necessária uma diferença de temperatura de 20-30°C. Por estes factos, só se pode aquecer com vapor um produto até 20-30°C abaixo da temperatura de ebulição da água à pressão que suporta o manto do reactor.

Para uma pressão de 6 bar essa temperatura é de 130°C. Para temperaturas superiores a 130°C, a pressão torna-se tão alta que obriga à construção de tubos e camisas de reactores com a parede demasiado espessa para serem economicamente interessantes, em geral.

Um segundo tipo de caldeiras trabalha com vapor **sobreaquecido** a uma temperatura superior à da saturação. Neste caso é possível usar vapor para produzir **energia electrica**.

O vapor sai da caldeira e vai accionar uma turbina que produz energia electrica. Ao passar pela turbina o vapor expande até baixar a temperatura e a pressão para os valores correspondentes à saturação.

Este vapor saturado é depois usado para aquecimento das unidades de produção de produtos quimicos, onde o calor libertado é como dissemos o calor de condensação.

Tabela 3.9.1 - Tensão de vapor em equilibrio com água líquida

| pressão (bar) | temperatura (°C) |
|----------------------|-------------------------|
| 1 | 100 |
| 2 | 120 |
| 3 | 134 |
| 4 | 144 |
| 5 | 152 |
| 6 | 159 |
| 7 | 165 |
| 8 | 171 |

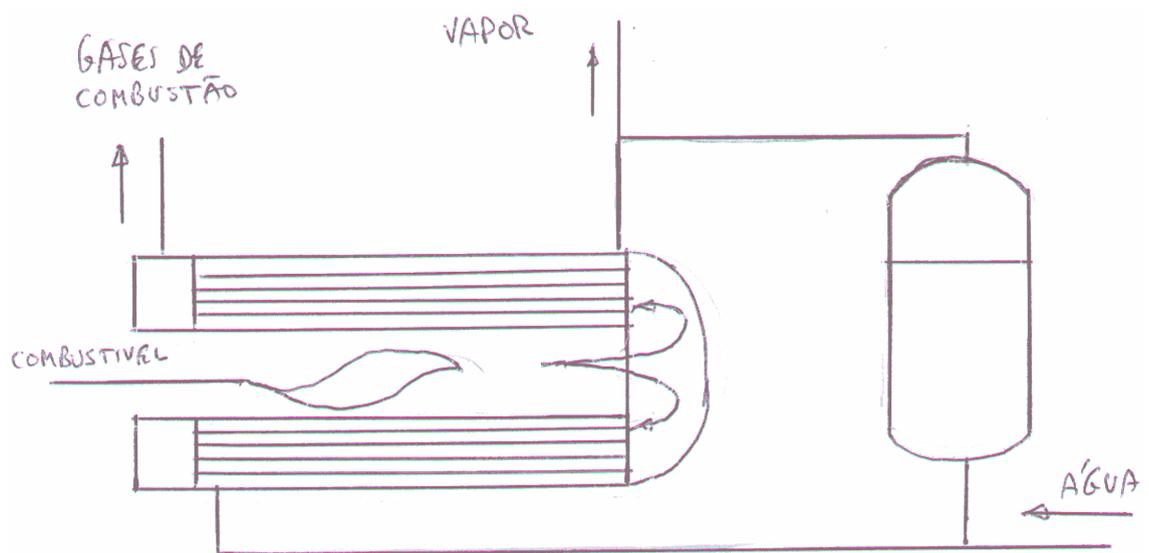


Figura 3.9.2 A – Esquema de funcionamento duma caldeira de vapor

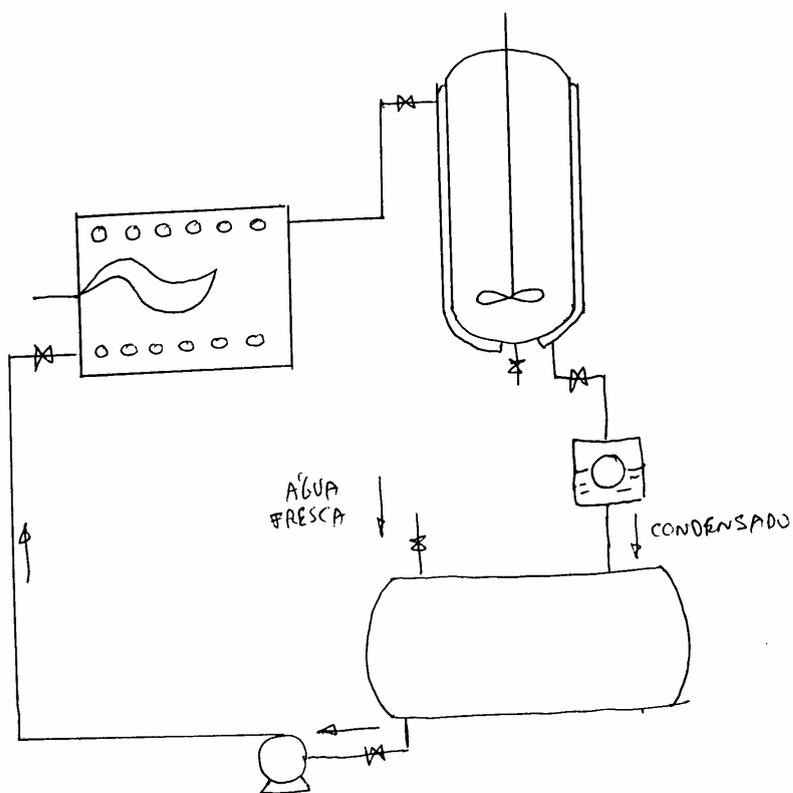


Figura 3.9.2 B – Circuito de ligações duma caldeira de vapor

Processos da Indústria Química

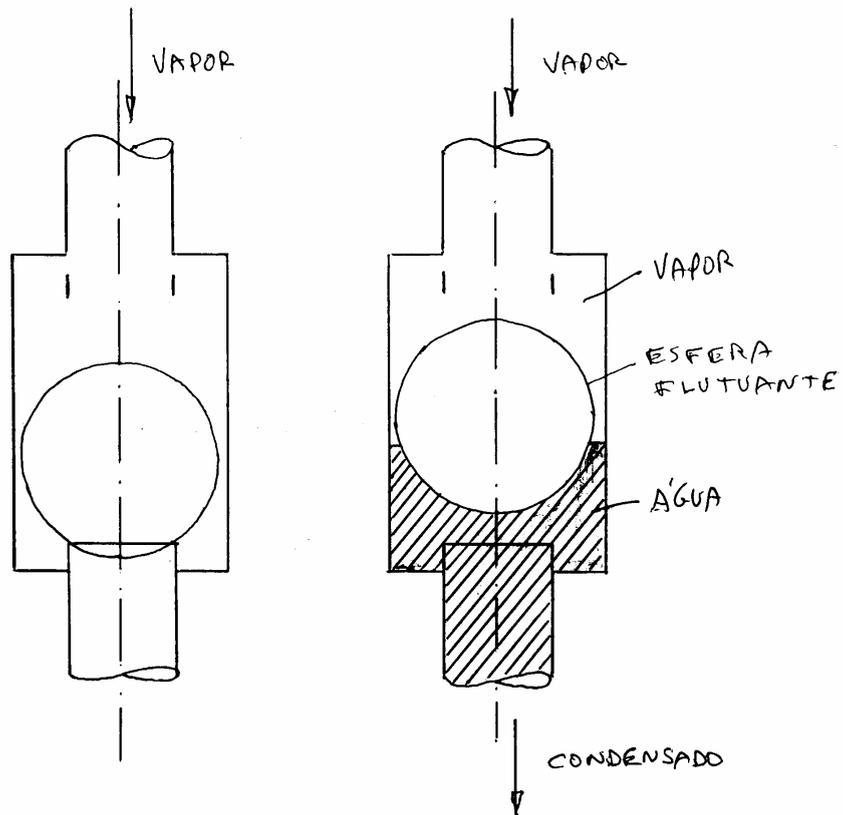


Figura 3.9.1 Representação esquemática do funcionamento duma válvula de purga de condensado num circuito de aquecimento por vapor

3 . 9 . 2 . Caldeira de fluido termico e circuito secundário de aquecimento

Quando os reactores são aquecidos acima de 130°C e até 250°C usam-se caldeiras de fluido termico. Estas são análogas às caldeiras de vapor, mas em lugar de água usam uma mistura de hidrocarbonetos com uma **temperatura de decomposição** que é cerca de 300°C.

Estes hidrocarbonetos tem uma **condutividade térmica** inferior à do vapor de água, mas o sistema tem as seguintes **vantagens**:

- dispensar as unidades de desmineralização de água
- permitir maiores temperaturas
- manter a pressão a 3-4 bar do lado da compressão da bomba de recirculação e a pressão atmosférica do lado da aspiração da bomba.
- o fluido térmico é menos corrosivo para o aço usado no circuito que o vapor de água

O circuito duma caldeira de fluido térmico está representado na figura 3-9-2. É constituído por um **tanque de expansão** em posição superior, e cuja função é evitar que as variações de volume do termofluido com a temperatura danifiquem o circuito. Existe um **tanque de armazenagem** ao nível mais baixo da instalação, ligado por uma bomba ao tanque superior.

O tanque de armazenagem tem um volume 30% maior que o circuito total incluindo camisas de reactores, de forma a poder recolher a totalidade do termofluido em caso de avaria.

O tanque de expansão tem metade do volume do tanque de armazenagem.

O tanque de expansão descarrega para o tanque de armazenagem logo que o nível ultrapasse um determinado valor.

O ponto mais alto do circuito está ligado por um tubo que passa num **arrefecedor a ar** e vai conduzir o termofluido ao tanque de expansão..

Quando a caldeira se desliga e arrefece, o termofluido passa em parte do tanque de expansão para o circuito principal, para compensar a diminuição de volume originada pelo arrefecimento.

Nunca deve entrar ar ou água para o circuito de aquecimento.

O queimador desliga automaticamente em 4 condições:

- a temperatura é superior ao valor programado pelo operador
- a bomba de circulação de termofluido pára por avaria
- a pressão no circuito principal de termofluido varia devido, por exemplo, a uma rotura de tubagem ou à abertura duma válvula da camisa dum reactor que se pretende aquecer
- sempre que existe ar ou vapor no circuito. A sua presença pode causar explosões ou a degradação do termofluido no tubular interior à caldeira, que é aquecido a temperaturas superiores à decomposição do termofluido.

Processos da Industria Quimica

As 3 ultimas alternativas são detectada por um **manómetro diferencial**, que mede a perda de carga entre a saída e a entrada da caldeira, a qual é menor no caso de haver ar ou vapor no circuito, no caso de paragem da bomba ou de descida de pressão por abertura dum novo circuito. Para eliminar este ar ou vapor, existe um **tubo de purga** que liga o ponto mais alto da instalação ao tanque de expansão.

Para dimensionar uma caldeira de fluido termico é necessário conhecer a quantidade de energia a fornecer por hora e o caudal de termofluido que passa no reactor ou torre de destilação que se pretende aquecer.

A **quantidade de calor transportada pelo termofluido** é igual ao produto do caudal pelo calor especifico e pelo salto térmico:

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

Esta quantidade de calor por sua vez é igual à quantidade de calor produzida na combustão do combustível, que é igual ao produto do consumo de combustível, vezes o poder calorifico, vezes o rendimento:

$$Q = C \cdot \Delta H \cdot r$$

O caudal de termofluido que passa na camisa do reactor é calculado tomando em consideração que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída deve ser cerca de 10°C.

Este **salto térmico** é menor que o da água de refrigeração, que normalmente é de 20°C, pelo motivo que expomos a seguir.

O salto termico no reactor é igual ao salto térmico na caldeira. O termofluido circula na caldeira em tubos aquecidos exteriormente com gases de combustão a mais de 600°C.

Para que o termofluido fique pouco tempo exposto a temperaturas superiores a 300°C, que é a sua **temperatura de decomposição**, ele deve percorrer o tubular da caldeira a alta velocidade, o que obriga a um valor do salto térmico de cerca de 10°C.

Como ordem de grandeza, uma caldeira de termofluido com 560000 kcal/hora de capacidade, que corresponde a vaporizar uma tonelada de água por hora, consome 100 kg de gás natural por hora e tem um caudal de termofluido de 70 m³/hora. O termofluido tem um calor especifico de 0,8 kcal kg⁻¹ °C⁻¹.

Os circuitos de termofluido tem uma válvula de 3 vias para cada reactor, de forma a que não seja necessário parar e arrancar com a bomba de circulação da caldeira cada vez que a temperatura do reactor sai dos limites predefinidos. Para além disso, estas válvulas de 3 vias permitem com uma mesma caldeira aquecer vários reactores cada uma à sua temperatura.

A temperatura de cada reactor comanda a válvula de 3 vias de forma a que, sempre que a temperatura do reactor for excessiva, o circuito de termofluido regressa à caldeira sem passar pelo reactor.

Processos da Industria Quimica

Para temperaturas superiores a 250°C, os reactores ou torres de destilação são aquecidos com chama directa ou electricamente.

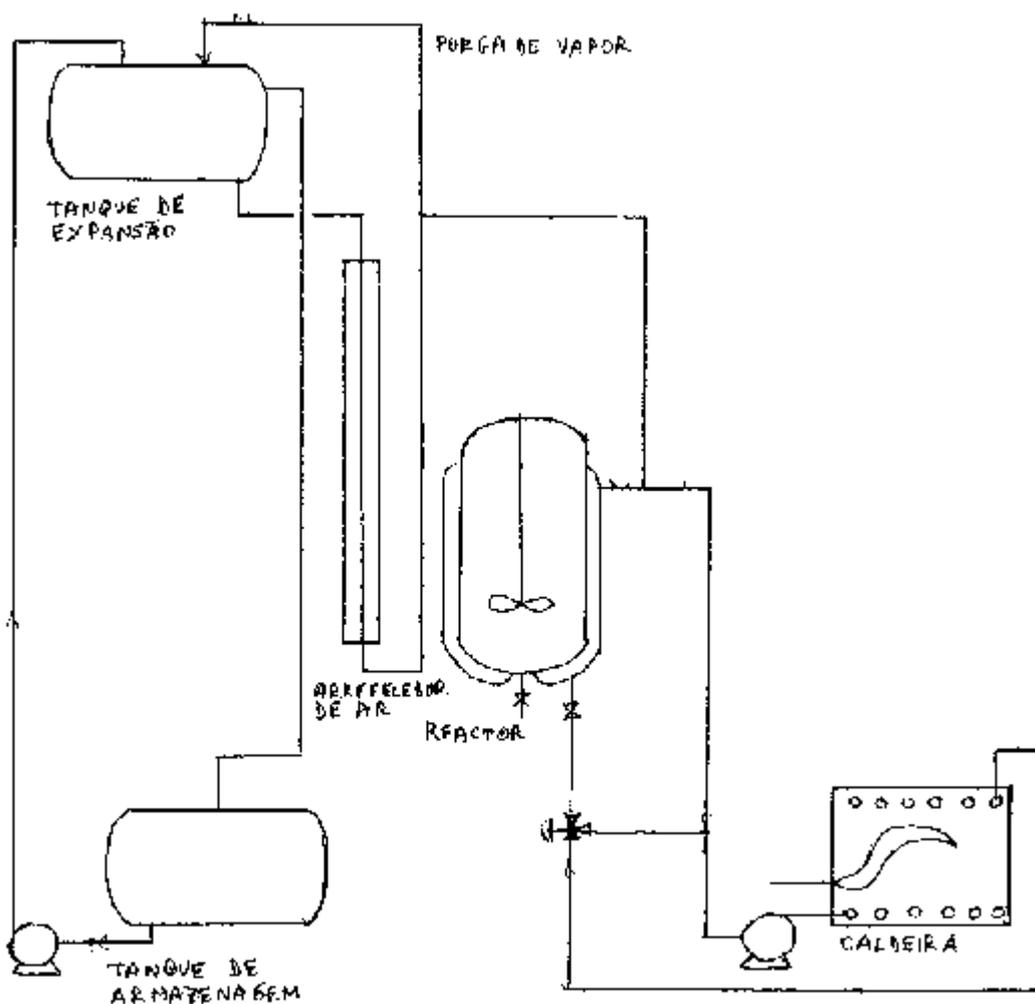


Figura 3.9.3 - Circuito de termofluido duma caldeira

Nos reactores vidrados, existe sómente um manto para aquecimento e arrefecimento. Por outro lado, a diferença de temperatura dos dois lados do aço vidrado, entre a camisa e o reactor, não pode ser superior a 100°C, para evitar que o vidro estilhaçe. O termofluido é uma mistura de hidrocarbonetos imiscível com a água de refrigeração. Por estes factos, usa-se para aquecer e arrefecer reactores vidrados, um circuito secundário de aquecimento, como se indica na figura 3.9.4 .

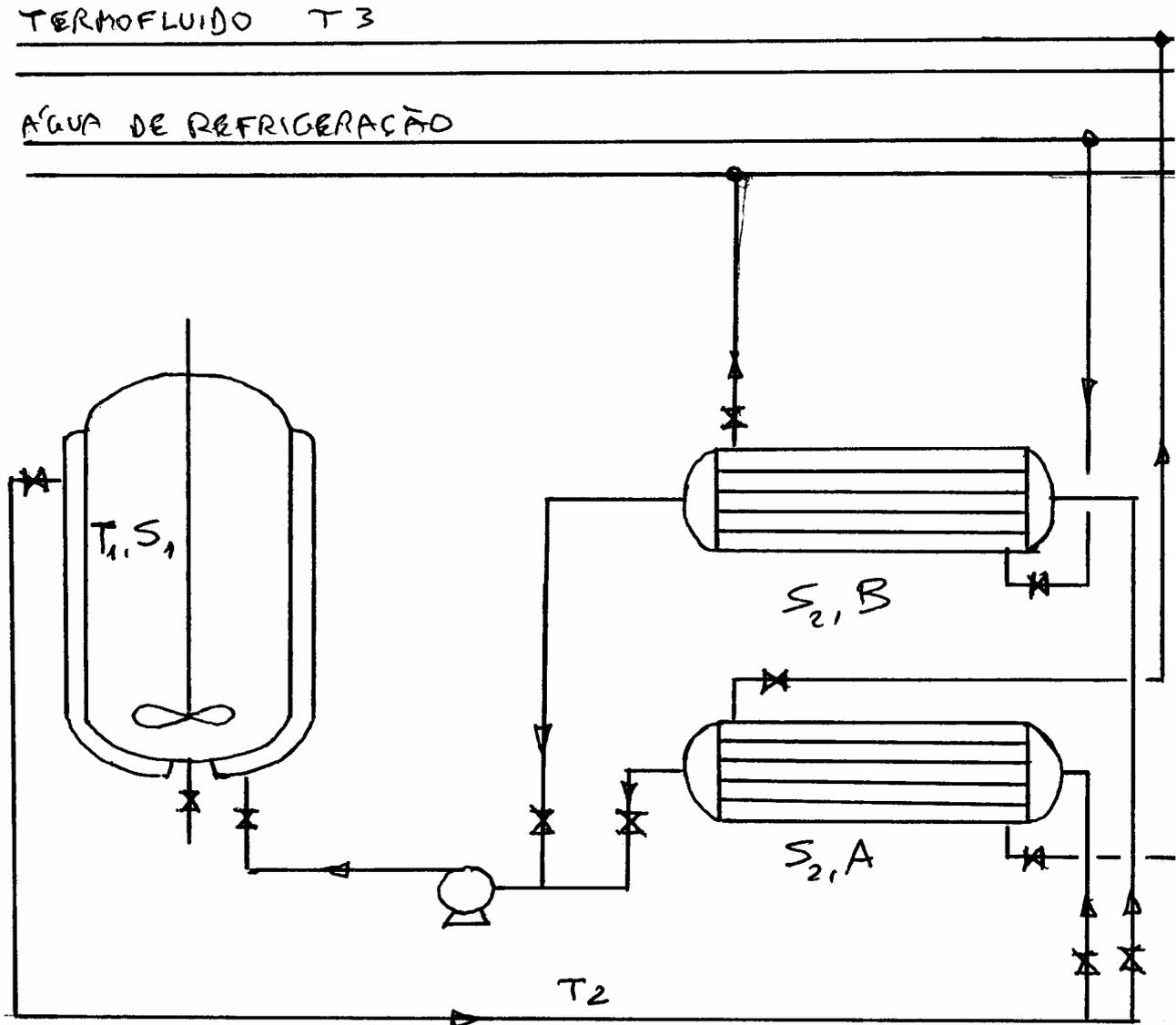


Figura 3 . 9 . 4 . Esquema do circuito secundário de aquecimento dum reactor com termofluido e arrefecimento com água

Para aquecer o reactor, existe um circuito de termofluido que circula na camisa do reactor e no permutador A .

Para arrefecer, o termofluido da camisa do reactor circula no permutador B.

Para passar dum modo de aquecimento para arrefecimento ou o inverso, operam-se 4 válvulas.

O termofluido da caldeira circula no exterior do tubular do permutador A e B.

Consideremos que a superficie de permuta de calor do manto do reactor é S_1 e que os dois permutadores tem a mesma superficie de permuta S_2 . A superficie de cada permutador normalmente é dupla da superficie da camisa do reactor.

Processos da Industria Quimica

Vamos sómente considerar o permutador de aquecimento, pois o cálculo é identico para o arrefecimento.

Designemos como T_1 a temperatura dentro do reactor e T_2 a temperatura média no circuito secundário, que passa na camisa do reactor. T_3 é a temperatura do circuito primário de termofluido, que vem da caldeira, não representada na figura.

A quantidade de calor que passa no tempo dt através da superficie S_1 é, segundo a expressão do cálculo do tempo de aquecimento de reactores (capítulo reactores):

$$dQ_1 = U_1 S_1 (T_2 - T_1) dt \quad (1)$$

Da mesma forma, o calor que passa na superficie S_2 no tempo dt é :

$$dQ_2 = U_2 S_2 (T_3 - T_2) dt \quad (2)$$

Considerando que dentro do reactor existe a massa de reagentes M_1 com o calor especifico C_{p1} , então a quantidade de calor que entra pela superficie da camisa do reactor é igual à quantidade de calor que vai aumentar a temperatura do reactor, ou que vai ser consumida numa reacção endotérmica. Vamos considerar que existe um aumento de temperatura:

$$dQ_1 = M_1 C_{p1} dT_1 \quad (3)$$

Da mesma forma, a quantidade de calor que vai aumentar a temperatura do circuito secundário de termofluido é a diferença entre o calor que entra para este circuito através do permutador A menos o calor que sai deste circuito para o reactor :

$$dQ_2 - dQ_1 = M_2 C_{p2} dT_2 \quad (4)$$

Eliminando dQ_1 e dQ_2 entre estas equações (1) a (4) fica:

$$U_2 S_2 (T_3 - T_2) dt = M_2 C_{p2} dT_2 - M_1 C_{p1} dT_1 \quad (5)$$

$$U_1 S_1 (T_2 - T_1) dt = M_1 C_{p1} dT_1 \quad (6)$$

Se consideramos que T_3 é constante e se eliminarmos T_2 entre as equações (5) e (6) obtemos uma equação diferencial:

$$a \frac{d^2 T_1}{dt^2} + b \frac{dT_1}{dt} + c T_1 + d = 0 \quad (7)$$

em que as constantes a, b, c, d são função dos parametros das equações (5) e (6). A equação (7) tem uma solução analitica:

$$T_1 = A \exp(-\alpha t) + B \exp(-\beta t) + C$$

Em que A, B, C, α , β são funções dos parametros das equações (4) e (5) e da temperatura inicial do reactor.

Desta forma podemos obter a temperatura T_1 e similarmemente T_2 em função do tempo e ficar assim a conhecer os tempos de aquecimento de reactores com circuitos secundários. O circuito secundário tem ainda a grande vantagem de assegurar que a diferença de temperatura entre a

Processos da Industria Quimica

camisa e o interior do reactor nunca ultrapassa 100°C, apesar do circuito primário de termofluido poder estar a uma temperatura superior e constante condicionado pelo resto da fábrica.

O caudal do circuito secundário de termofluido calcula-se considerando que o salto térmico deve ser 10°C entre a entrada e a saída da camisa do reactor e considerando a quantidade máxima de calor que passa na camisa do reactor por unidade de tempo.

3.9.3. Torres de refrigeração

As torres de refrigeração podem ser por ar ou por vaporização de água.

As **torres arrefecidas a ar** são constituídas por um feixe de tubos atravessados interiormente pelo fluido quente.

Cada tubo tem chapas soldadas para aumentar a superfície de contacto entre o metal e o ar.

De facto, a transferencia de calor do liquido para o metal da parede do tubo é fácil e o metal também é um bom condutor.

O passo limitante na transferencia de calor é a passagem de calor do metal para o ar e essa é a razão da necessidade das placas laterais para aumentar a superfície de contacto.

Em vez de tubos também se usam placas soldadas com um intervalo de 5 a 10 milímetros entre elas. No interior deste espaço passa o fluido quente.

Um ventilador forte faz passar ar pelo exterior dos tubos ou das placas. O sistema de arrefecedores a ar é idêntico aos radiadores dos automóveis e dos frigoríficos. (figura 3.9.4).

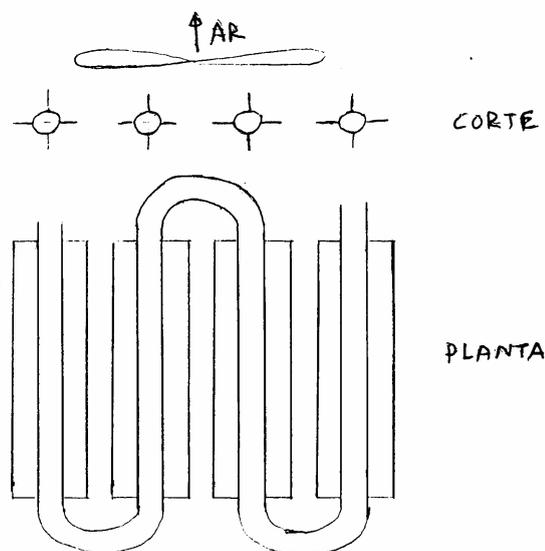


Figura 3.9.4 - Esquema dum torre de refrigeração a ar

Processos da Industria Quimica

O **princípio de funcionamento** das torres de refrigeração por vaporização de água é o facto da vaporização da água em contacto com o ar ocorrer sempre que o ar não está saturado de humidade e o facto da vaporização se fazer com absorpção de calor.

Para analisar este processo, vamos considerar um copo com água em repouso e analisar o mecanismo da vaporização da água e o arrefecimento causado por ele.

Na interfase entre a água líquida e o ar dá -se uma vaporização até o ar na vizinhança da interfase ficar saturado de água. Este vapor de água difunde para zonas do ar mais afastadas da interfase.

A saturação de água ocorre no ar sempre que a pressão parcial do vapor de água corresponde à pressão de vapor que existiria se num determinado espaço houvesse água líquida e vapor de água em equilíbrio à mesma temperatura. A presença de ar não afecta sensivelmente esta tensão de vapor de água, que tem um valor definido para cada temperatura.

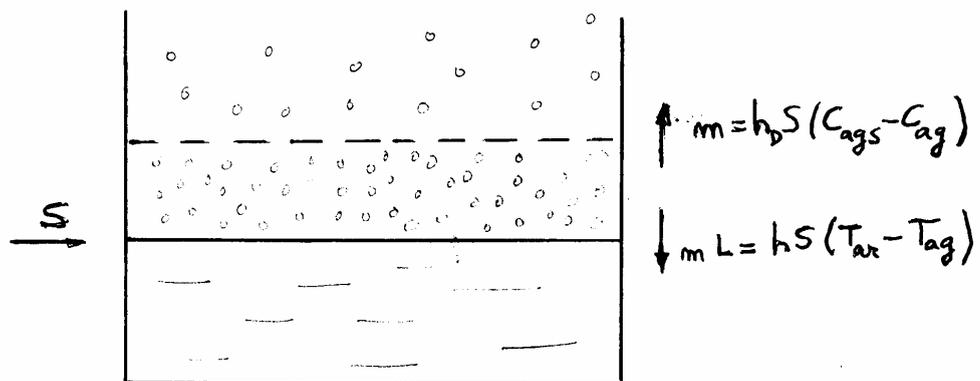


Figura 3.9.5 - Ilustração do cálculo da temperatura do termómetro húmido

A quantidade de água que difunde da interfase para a zona mais afastada do ar é determinada pela equação de difusão:

$$m = h_D S (C_{ags} - C_{ag}) \quad (1)$$

em que

m é a massa de água que difunde da interfase para a zona do ar afastada da interfase

h_D é o coeficiente de difusão

S é área da interfase

C_{ags} é a concentração de vapor de água saturada junto à interfase, que é função da temperatura da água

Processos da Industria Quimica

C_{ag} é a concentração de vapor de água na zona do ar afastada da interfase

Por outro lado, a água existente no copo vai arrefecendo porque vai fornecendo calor para a vaporização. No estado de equilíbrio, a vaporização da água só é possível porque o calor necessário á vaporização é fornecido pelo ar.

Neste estado de equilíbrio, a quantidade de água vaporizada multiplicada pelo calor latente de vaporização terá que ser igual ao calor transmitido por condução do ar para a interfase:

$$mL = h S (T_{ar} - T_{ag}) \quad (2)$$

Eliminando a massa m entre as duas equações (1) e (2) obtemos a expressão:

$$C_{ags} - C_{ag} = \frac{h}{h_D L} (T_{ar} - T_{ag}) \quad (3)$$

Esta equação relaciona a diferença entre a concentração de vapor de água na zona saturada da interfase menos a concentração de vapor de água numa zona afastada da interfase por um lado, com a diferença de temperatura entre o ar e a água. No equilíbrio, quanto mais seco estiver o ar ambiente maior será o arrefecimento causado na água.

Vamos agora exprimir a equação (3) em função da grandeza humidade.

A humidade define-se como a massa de vapor de água que existe na unidade de massa de ar seco. A humidade de saturação para cada temperatura é o valor da humidade correspondente à concentração máxima possível de água no ar a essa temperatura. Acima deste valor o vapor de água começa a condensar.

A concentração de ar seco é dada por:

$$C_{ar} = \frac{M_{ar} n_{ar}}{V} = \frac{p - p_{ag}}{RT_{ar}} M_{ar} = \frac{p}{RT_{ar}} M_{ar} \quad (4)$$

em que M_{ar} é a média ponderada das massas moleculares dos componentes do ar. Fizemos a aproximação de considerar p_{ag} desprezável quando se subtrai à pressão total do ar humido p .

De acordo com a definição de humidade conclui-se que o seu valor será:

$$H = \frac{C_{ag}}{C_{ar}} = \frac{C_{ag}}{p M_{ar}} RT_{ar} \quad (5)$$

Em que substituímos C_{ar} pelo seu valor dado por (4). Podemos agora exprimir a concentração em função da humidade:

$$C_{ag} = \frac{p M_{ar}}{R T_{ar}} H \quad (6)$$

A expressão (6) permite-nos compreender que para uma determinada humidade, quando aumenta a pressão aumenta a concentração de água, o que em metereologia pode originar chuva, sempre que a concentração de água ultrapassar o valor de saturação C_{ags} .

Substituindo (6) na equação (3) e simplificando resulta:

Processos da Industria Quimica

$$H = H_s - K (T_{ar} - T_{ag}) \quad (7)$$

em que K tem o valor:

$$K = \frac{h R T_{ar}}{h_D L p M_{ar}} \quad (8)$$

O valor de K é constante desde que a velocidade da corrente de ar em relação à água seja superior a 4 m seg⁻¹.

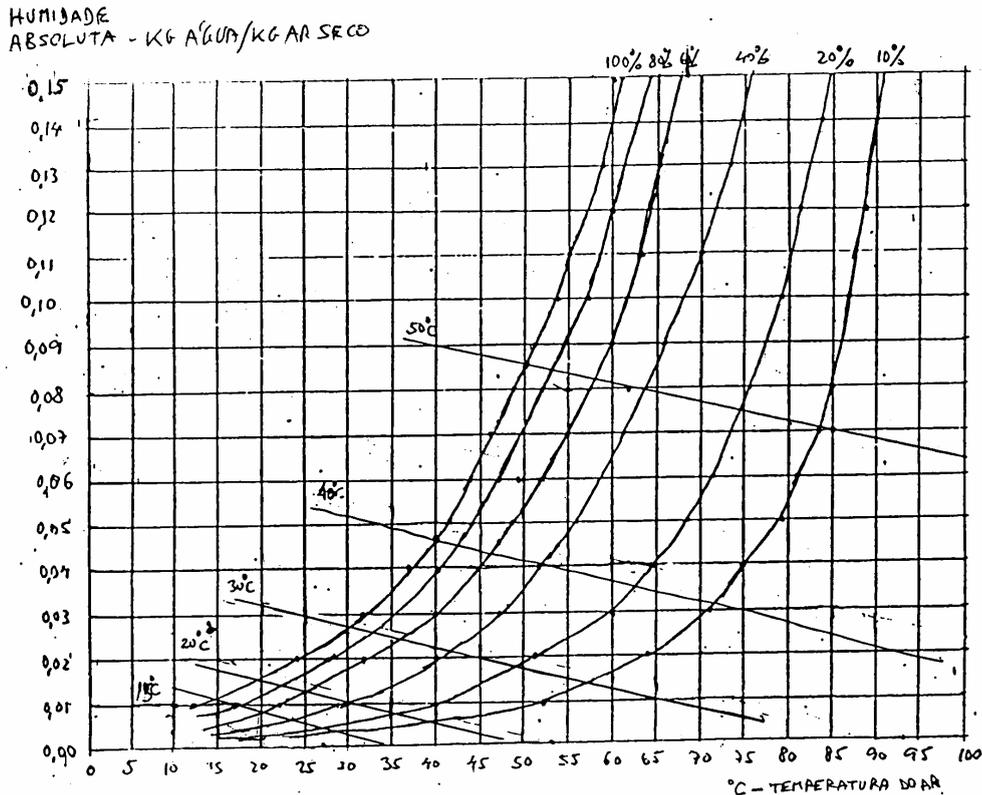


Figura 3.9.6 - Diagrama da humidade em função da temperatura para o sistema ar - vapor de água à pressão atmosférica

Se fizermos passar uma corrente de ar à temperatura T_{ar} e com a humidade H junto de um termómetro de mercurio cujo bolbo está envolvido num pano encharcado em água, a temperatura da água depois de estabelecido o equilíbrio é dada pela equação (7) e designa-se como a temperatura do termómetro humido.

H_s na equação (7) é a humidade de saturação correspondente à temperatura da água, a qual é igual à temperatura do termómetro humido numa situação de equilíbrio.

A cada valor da temperatura do ar e da humidade corresponde uma temperatura do termómetro humido. Inversamente a cada temperatura do ar e do termómetro humido corresponde uma

Processos da Industria Quimica

humidade. Por isso o termómetro humido é um instrumento usado para determinar a humidade do ar.

Na figura 3.9.7 representamos em abcissas as temperaturas e em ordenadas as humidades. As curvas são determinadas experimentalmente e representam a humidade em função da temperatura, para um valor da humidade relativa constante, que é o parametro da curva.

Chama-se humidade relativa o quociente da humidade pela humidade de saturação.

A equação (7) está representada na figura 3.9.7 por rectas cujo parametro é a temperatura do termómetro humido. Estas rectas representam a humidade em função da temperatura do ar para um valor constante da temperatura do termómetro humido.

A recta vertical que passa pela abcissa correspondente à temperatura do ar, encontra a recta obliqua correspondente à temperatura do termómetro humido num ponto. Por este ponto passa a curva da humidade em função da temperatura correspondente á humidade relativa. Desta forma se determina a humidade relativa a partir do conhecimento experimental da temperatura do ar e da temperatura do termómetro humido.

No caso duma torre de refrigeração, a corrente de ar vai arrastando vapor de água que vaporiza da corrente liquida. Existe uma diferença fundamental em relação à experiencia do termómetro humido, é que a água nunca atinge a temperatura do termómetro húmido senão no limite de grande caudal de ar e pequeno caudal de água. Normalmente a vaporização da água não se dá por isso por transferencia de calor do ar para a interfase mas sim da água para a interfase e é esta transferencia que vai causar o arrefecimento da água.

A água poderá por este processo arrefecer mesmo abaixo da temperatura do ar.

Para dimensionar uma torre de refrigeração usam-se como parametros **a temperatura do termómetro humido** no local da fábrica na época do ano mais desfavorável, a quantidade de **calor** a retirar e a diferença de temperatura entre a entrada e a saída da torre de refrigeração, que é o **salto térmico**.

Na figura 3.9.8 representamos como estes parametros estão relacionados numa torre real. Estas curvas ou tabelas são dadas pelos fabricantes. Não se usam equações teóricas para as calcular.

Para cada caudal escolhemos uma curva na figura. Definimos um salto térmico com o qual pretendemos operar a torre, escolhemos a temperatura do termómetro humido e em ordenadas lemos a temperatura á saída da torre. Se esta temperatura satisfizer as nossas condições de projecto, então escolhemos o modelo de torre de refrigeração a que corresponde a figura.

Vemos por esta figura, que uma torre de refrigeração apresenta as seguintes características:

- para uma determinada temperatura do termómetro humido, a **temperatura à saída** será tanto menor quanto menor o **caudal**. De facto, se o caudal for menor, a torre baixa mais a temperatura da água à saída para uma mesma quantidade de calor retirada.

Processos da Industria Quimica

- para a mesma temperatura do termometro humido, a **temperatura à saída** será tanto menor quanto menor for o **salto termico DT**, ou seja, quanto menor for a temperatura à entrada.

O caudal de água é dimensionado com base no valor da quantidade total de calor a remover e considerando saltos térmicos habituais entre 18 e 22°C.

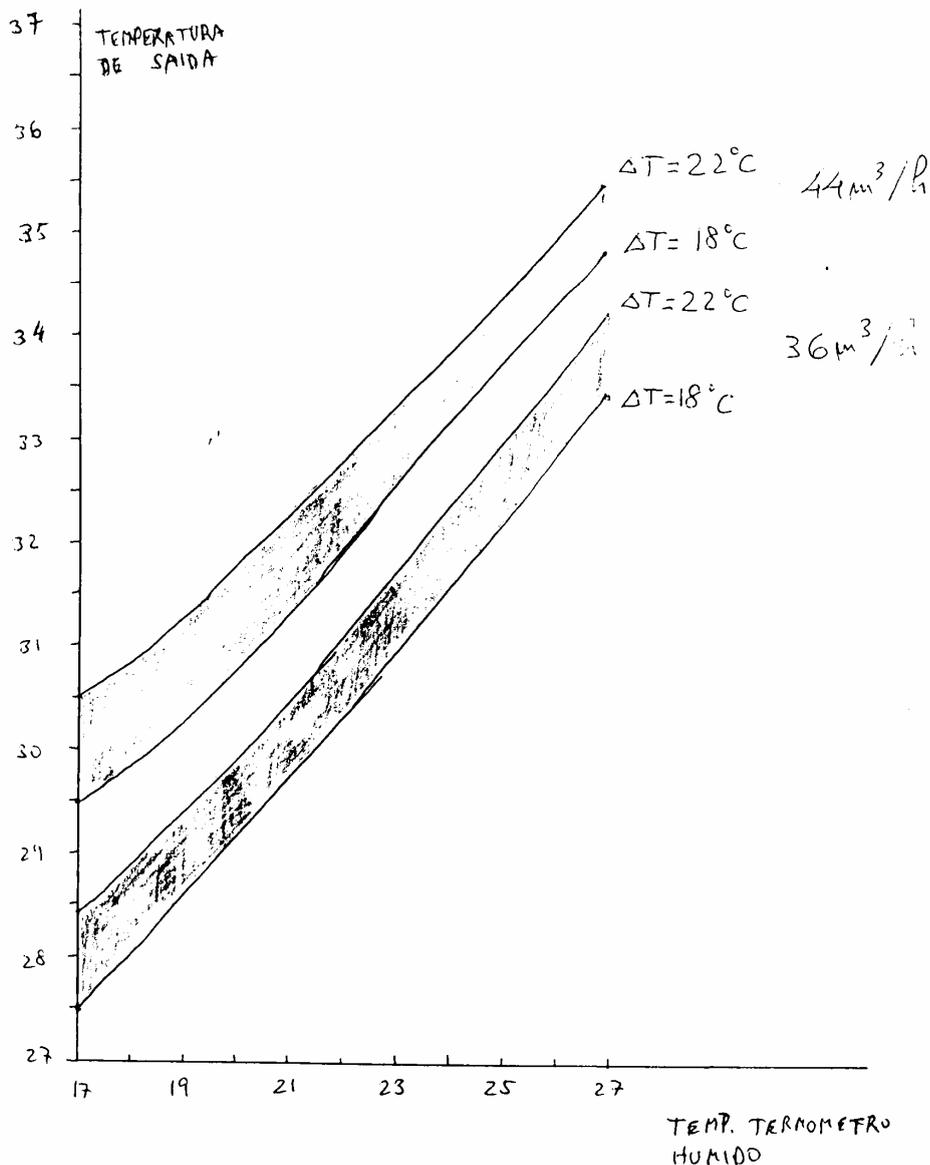


Figura 3.9.7 Curvas características duma torre de refrigeração. ΔT é a temperatura de entrada menos a de saída

As **torres de refrigeração por vaporização de água** podem ser de dois tipos. Há as torres com circulação forçada de ar e as torres com convecção.

As **torres por convecção**, usam-se nas centrais térmicas e atómicas para produção de energia eléctrica.

O ar circula por efeito de convecção devido à grande dimensão e à forma das torres, que chegam a ter 100 metros de altura e um estrangulamento no topo. Este estrangulamento funciona de efeito Venturi no local de queda da água quente (figura 3.9.5).

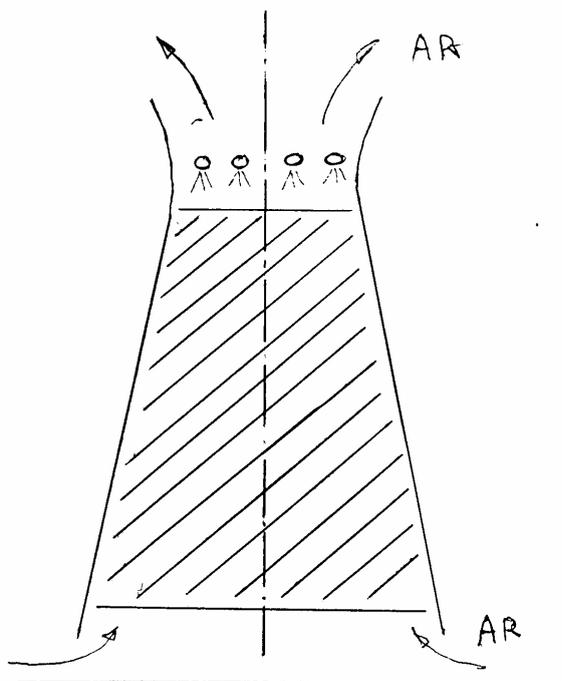


Figura 3.9.8 - Torre de refrigeração por convecção de ar e vaporização de água

No caso do **arrefecimento dum reactor com torre de refrigeração de água com circulação forçada de ar**, como o representado na Figura 3.9.9 usa-se um circuito de água, que entra fria pela base do reactor e sai quente pelo topo.

A água quente é conduzida a uma torre de refrigeração onde é pulverizada sobre um volume tipo rede tridimensional onde a água cai em contra corrente com ar que é forçado por um ventilador.

A corrente de ar conduz à vaporização de parte da água quente, o que origina um arrefecimento de água líquida que cai para um tanque. Deste tanque a água é bombada de novo para o manto do reactor.

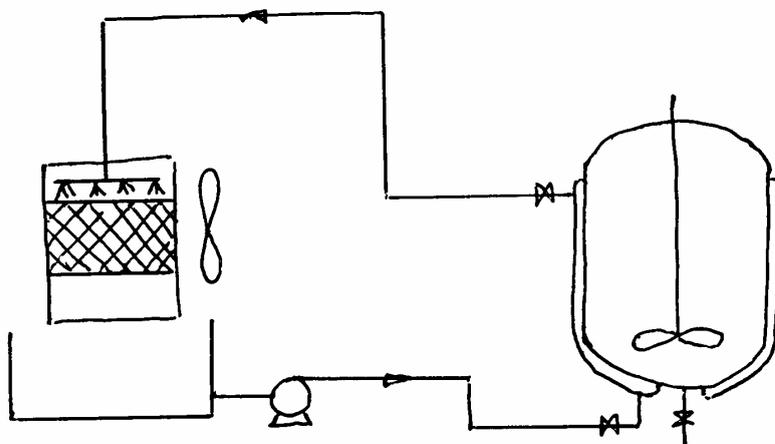


Fig.3.9.9 Representação esquemática duma torre de refrigeração.

Para calcular a quantidade de calor a retirar dum determinado reactor e assim dimensionar o circuito de refrigeração, há que estabelecer um balanço de energia.

Se o objectivo é retirar calor duma reacção exotérmica há que determinar qual a quantidade de calor produzida por unidade de tempo no decurso da reacção.

No caso de se querer baixar a temperatura dum reactor, após concluída a reacção, temos que conhecer qual a velocidade de arrefecimento pretendida.

No caso dum reactor com 10 m^3 , contendo 8 toneladas de uma mistura líquida de calor específico $0,8 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, que se quer arrefecer de 120°C até 40°C em 2 horas, a quantidade de calor a retirar é de:

$$Q = m.c. \Delta T = 8000 \times 0,8 \times 80 \text{ Kcal} = 512 \text{ 000 Kcal}$$

Temos portanto que retirar por hora 256 000 Kcal

Admitindo que o manto tem tubagem de admissão e saída de água de 50mm de diâmetro interno, o caudal de água aceitável no circuito calcula-se considerando uma velocidade linear para a água na tubagem de 5m/seg

$$V = \pi r^2 v = \pi 2,5^2 \times 500 = 9812 \text{ cm}^3 \text{ seg}^{-1} = 9,8 \text{ litros seg}^{-1} = 35 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$$

Esta água terá que entrar fria e sair quente do manto, absorvendo os $256000 \text{ Kcal hora}^{-1}$. O salto de temperatura ΔT será:

$$Q = V.c \Delta T$$

$$256 \text{ 000 Kcal h}^{-1} = 35 \text{ m}^3/\text{h}^{-1} \cdot 1000 \text{ Kcal m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \Delta T$$

Processos da Industria Quimica

$$\Delta T = 256\ 000 / (35 \times 1000) = 7,3^\circ\text{C}$$

Precisamos portanto duma torre de refrigeração que tenha capacidade para dissipar 256 000 kcal h⁻¹ utilizando um caudal de água de 35 m³ h⁻¹ e apresentando um salto térmico de 7,3°C.

Se optarmos por um salto térmico $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ poderemos baixar o caudal de água de refrigeração.

O cálculo duma torre de refrigeração para dissipar calor de reacção realiza-se de forma análoga.

Um construtor de torres de refrigeração poderá com base nestes dados fazer uma proposta do modelo mais adequado duma gama de fabrico.

Da mesma forma se calcula também a dimensão duma caldeira de vapor ou de fluído térmico orgânico para fornecer calor a um reactor químico ou a uma torre de destilação.

Para um determinado salto térmico ΔT e caudal F existe uma quantidade de calor dissipada na torre dada por:

$$\Delta H = F C_p \Delta T$$

esta quantidade de calor corresponde a uma quantidade de água que vaporiza:

$$\Delta H = m_1 L = F C_p \Delta T$$

$$m_1 = \frac{F C_p \Delta T}{L} \quad (1)$$

Como esta água contem carbonato de cálcio e outros sais dissolvidos, que não evaporam e se vão concentrando no circuito da torre, é necessário purgar este circuito.

De outra forma o calcáreo iria sendo depositado nas paredes do tubos e nas camisas dos reactores e acabaria por bloquear a refrigeração.

A quantidade de água a purgar m_2 deverá conter uma quantidade de sais igual á quantidade de água que evaporou. Admitindo que se pretende trabalhar com uma margem de segurança para evitar precipitações de carbonato de cálcio, a concentração de sais no circuito da torre deve ser igual

$$c_2 = f c_s \quad (2)$$

em que c_s é a concentração de saturação e f o factor de segurança. Este valor f poderá estar entre 0,7 e 0,8.

Se a água de reposição m_3 tiver uma concentração de sais c_3 , então serão válidas as duas equações seguintes:

$$m_3 = m_1 + m_2 \quad (3)$$

$$m_3 c_3 = m_2 c_2 \quad (4)$$

Eliminando m_2 entre (3) e (4) fica:

$$m_3 = \frac{c_2}{c_2 - c_3} m_1$$

Substituindo nesta equação (1) e (2) fica:

Processos da Industria Quimica

$$m_3 = \frac{F C_p \Delta T f c_s}{L (f c_s - c_3)} \quad (5)$$

Esta equação permite-nos determinar a quantidade repor. A quantidade a purgar será :

$$m_2 = m_3 - m_1 \quad (6)$$

3 . 9 . 4 . Unidades criogenicas

As torres de refrigeração por vaporização de água permitem obter temperaturas de 5 - 10°C acima da temperatura ambiente. Para obter temperaturas mais baixas é necessário usar unidades criogénicas, cujo principio de funcionamento é similar ao dum frigorifico ou aparelho de ar condicionado doméstico.

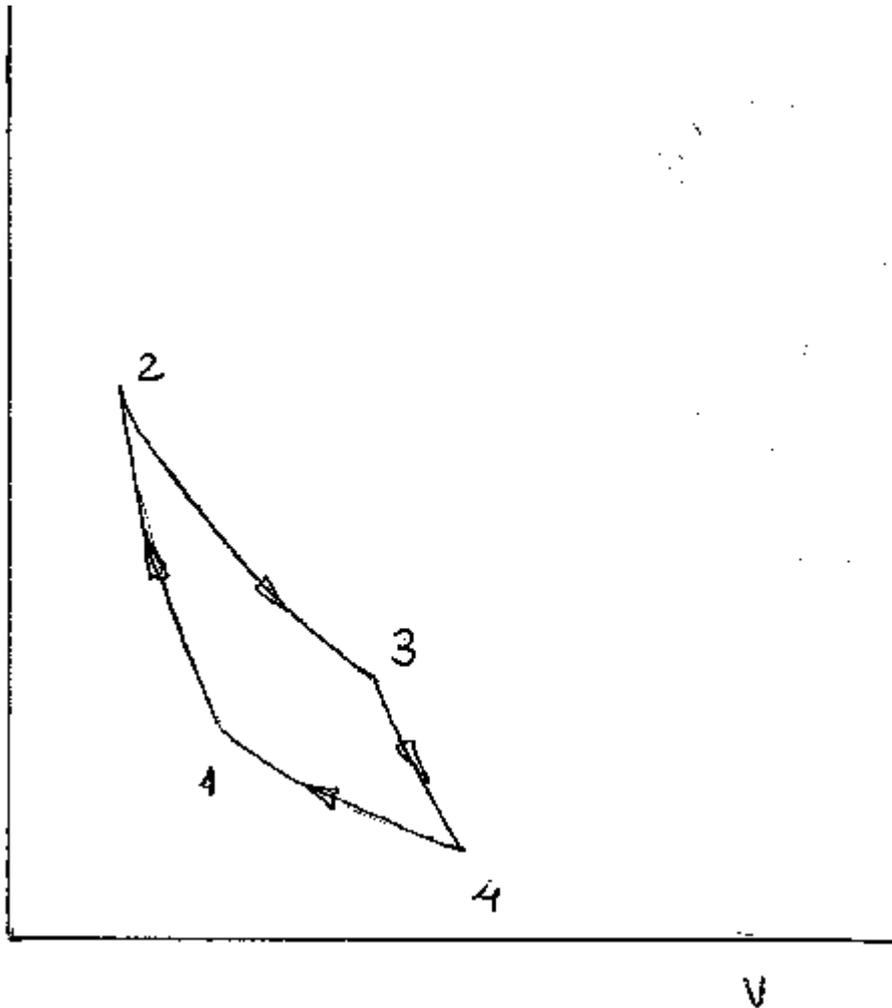


Figura 3 . 9 . 10 – Ciclo de Carnot para os casos de funcionamento como motor e como máquina criogénica

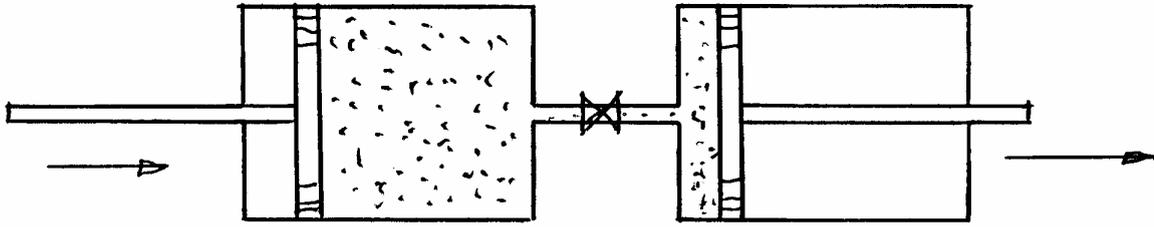


Figura 3.9.11 – Representação do efeito de Joule Thompson

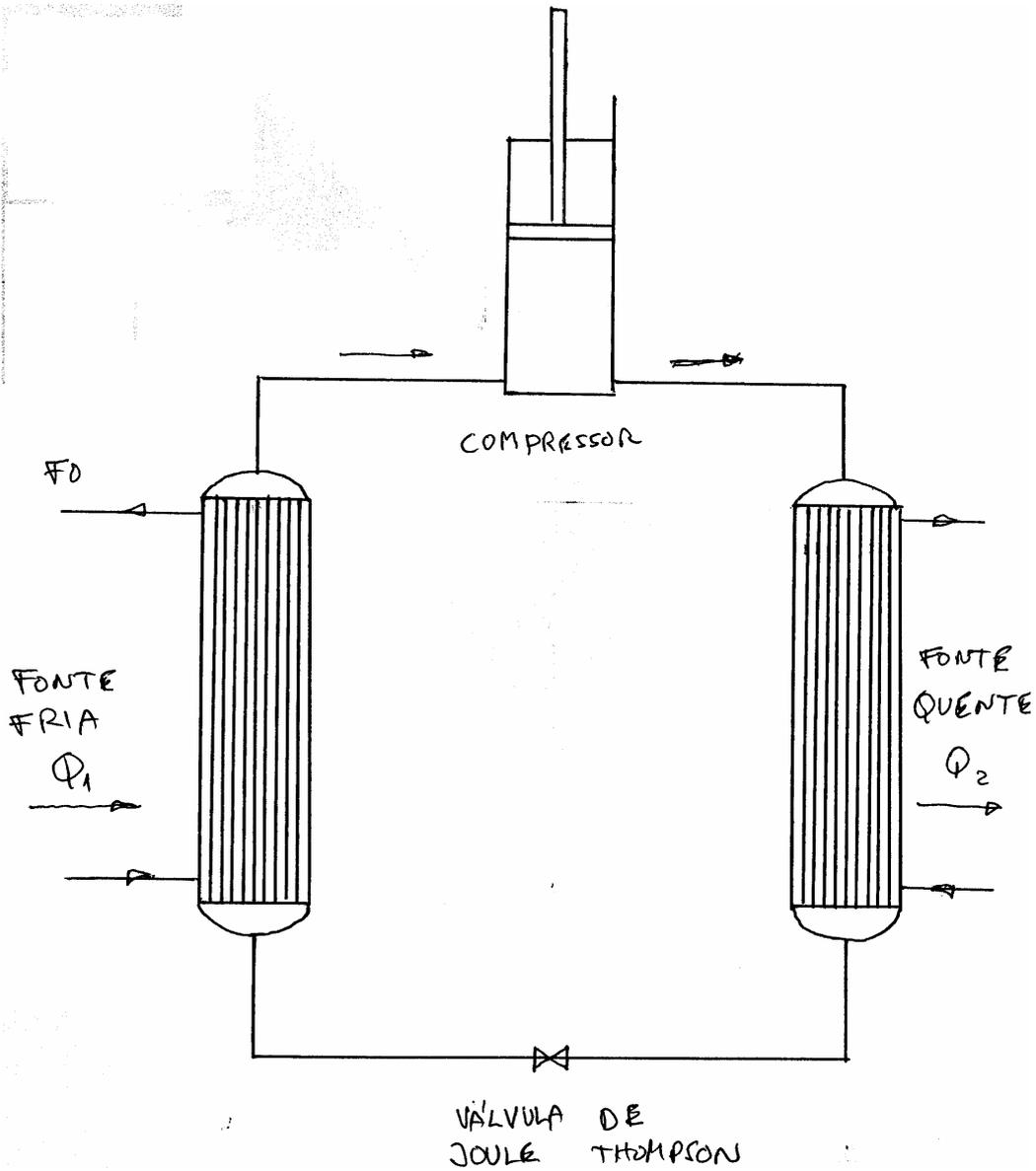


Figura 3.9.12 – Equipamento usado numa máquina criogénica

Processos da Industria Quimica

Para compreender o funcionamento duma unidade crigénica vamos recorrer aos dois principios da termodinamica.

O **primeiro principio da termodinamica** diz que a soma do trabalho e do calor fornecidos do exterior a um sistema são iguais ao aumento da energia interna deste sistema.

De acordo com este principio o fisico Carnot idealizou um ciclo segundo a figura 3.9.10, em que se representa no diagrama $p - V$ duas isotermicas e duas adiabáticas que descrevem o comportamento dum gás perfeito contido num embolo. Este embolo percorre os seguintes estados:

-A – B - uma compressão adiabática partindo da isotérmica a temperatura minima T_2 e terminando na isotérmica a temperatura maxima T_1

-B – C - uma transferencia de calor para dentro do embolo à temperatura constante T_1 ao longo duma isotermica , com aumento de volume e redução de pressão

-C – D - uma expansão adiabática partindo da isotermica a temperatura T_1 e terminando na isotermica a T_2

-D – A - uma transferencia de calor para fora do embolo a temperatura constante T_2 ao longo duma isotérmica com redução de volume e aumento de pressão

Considerando a função de estado dos gases perfeitos, a equação adiabática dos gases perfeitos e considerando que a energia interna dum gás perfeito só depende da temperatura, demonstra-se em Termodinamica, que o rendimento da conversão de calor em trabalho realizada pelo embolo depende sómente das temperaturas T_1 e T_2

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1)$$

Nesta expressão define-se rendimento como o quociente entre o trabalho produzido e o calor fornecido pela fonte quente. Mesmo no caso ideal dum gás perfeito, verifica-se que nem todo o calor fornecido pela fonte quente pode ser convertido em trabalho, duma forma ciclica.

Num motor real, verifica-se que o rendimento é sempre inferior ao que é dado pela expressão (1).

A expressão (1) é válida tambem quando durante o ciclo de Carnot se dão mudanças de estado gasoso para liquido.

Em forma diferencial esta expressão, designada como a equação de Gibbs – Helmholtz, escreve-se:

$$\frac{dW}{Q} = \frac{dT}{T} \quad (2)$$

No caso particular duma mudança de estado dum mole de gás, será:

Processos da Industria Quimica

$$W = p \Delta V$$

O trabalho realizado na mudança de estado dum gás é igual ao produto da pressão pela variação de volume.

O trabalho realizado numa mudança de estado associada à variação de temperatura dT será:

$$dW = \Delta V \frac{dp}{dT} dT$$

Substituindo em (2) fica:

$$\frac{dp}{dT} = \Delta V \frac{Q}{T} \quad (3)$$

em que Q é o calor latente de mudança de estado. Esta equação designa-se de Clausius Clapeyron.

Normalmente, o volume no estado liquido é cerca de um milésimo do volume no estado gasoso a temperatura e pressão normal, pelo que pode ser desprezado na diferença ΔV .

Note-se que um gás perfeito é constituído por moléculas que não se atraem nem se repelem por forças intermoleculares. Um gás perfeito por isso não liquefaz.

No entanto, um gás real pode ter o comportamento dum gás perfeito num determinado domínio de temperatura e de pressão.

Admitindo que existe um comportamento de gás perfeito, fica:

$$\Delta V = V_{\text{gás}} - V_{\text{liq}} = V_{\text{gás}} = \frac{RT}{p}$$

ou seja:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{Q}{RT^2}$$

e por integração:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (4)$$

Esta é a forma integrada para gases perfeitos da equação de Clausius Clapeyron.

No caso concreto do gás freon R22, monocloro difluor metano, muito usado em unidades criogénicas, as temperaturas e pressões de trabalho estão relacionadas pela equação (4).

O ciclo de Carnot é reversível. Por consequência pode ser percorrido nos dois sentidos:

Processos da Industria Quimica

- no sentido ABCD da figura 3.9.10 o embolo produz trabalho e em simultaneo transporta-se calor da fonte quente para a fonte fria. Este é o funcionamento dum motor de explosão dum automovel, por exemplo.
- No sentido ADCB da figura 3.9.10 o embolo recebe trabalho do exterior e transporta calor da fonte fria para a fonte quente. Este é o funcionamento duma unidade criogénica, como um frigorífico, um aparelho de ar condicionado ou bomba de calor.

Existem vários tipos de máquinas criogénicas conforme as temperaturas de trabalho e as aplicações:

- máquina criogénica industrial - tem como fonte quente a atmosfera e como fonte fria o liquido a arrefecer
- frigorífico ou congelador - tem como fonte quente a atmosfera e como fonte fria o interior dum armário
- ar condicionado - tem como fonte quente a rua no verão e como fonte fria o interior da casa
- bomba de calor - tem como fonte quente o interior da casa e como fonte fria a rua no inverno

O **segundo principio da termodinamica** diz que não é possível uma máquina de funcionamento periodico produzir trabalho por conversão de calor retirado a uma única fonte.

De facto, o ciclo de Carnot mostra que numa máquina ideal, com gás perfeito, de funcionamento reversivel, a energia que se consegue retirar da fonte quente só parcialmente pode ser convertida em trabalho, sendo uma parte transferida como calor para a fonte fria. Num motor dum automovel tambem não é possível converter toda a energia libertada na combustão da gasolina em trabalho, sendo uma parte do calor sempre transportada como gás quente de combustão para a atmosfera. De acordo com o segundo principio da termodinamica, o ciclo de Carnot representa o trabalho máximo que se pode obter com uma máquina a funcionar entre duas fontes de calor.

Uma máquina que permitisse uma melhor conversão de calor em trabalho do que o ciclo de Carnot não seria compativel com o segundo principio da termodinamica, pois seria possível usar essa máquina para converter calor em trabalho entre duas fontes a temperaturas diferentes e usar o ciclo de Carnot para transportar calor da fonte fria para a fonte quente usando o trabalho da primeira máquina. Desta forma o conjunto das duas máquinas produzia trabalho em funcionamento periodico, sem que houvesse consumo de calor, ou seja produzia trabalho, energia, a partir de nada, o que se verifica experimentalmente ser impossível na natureza.

Uma unidade criogenica não funciona segundo um ciclo de Carnot, mas não pode ter melhor rendimento do que um ciclo de Carnot. Isto é, uma unidade criogenica permite produzir frio com um consumo de trabalho superior ao que seria necessário para obter o rendimento máximo teorico dado pelo ciclo de Carnot.

Processos da Industria Quimica

O funcionamento duma máquina criogénica representa-se na figura 3.9.11. Ela é constituída por um embolo, dois permutadores e uma válvula que funciona por efeito de Joule - Thompson. No interior deste equipamento circula um gás com características adequadas. Para arrefecimento a temperaturas de 3 – 10°C usa-se monocloro difluor metano, designado comercialmente como R22.

Na figura 3.9.12 representamos as seguintes operações a que é submetido o monocloro difluor metano:

C – B – compressão adiabática com aumento de temperatura e pressão. Nesta operação é fornecido trabalho do exterior para operar o compressor. O gás aquece acima da temperatura da fonte quente.

B – A – Arrefecimento a volume constante num permutador a alta temperatura (fonte quente)

A – D – expansão. O monocloro difluor metano passa através dum orificio do permutador da fonte quente para o permutador da fonte fria, sem realização de trabalho. Este é o efeito de Joule Thompson. O gás arrefece abaixo da temperatura da fonte fria.

D – C – Aquecimento a volume constante do monocloro difluor metano no permutador de baixa temperatura (fonte fria)

No efeito de Joule Thompson o gás passa dum espaço a pressão constante para outro espaço a menor pressão mas que tambem se mantem constante, segundo a figura 3.9.11.

Consideremos que o embolo da esquerda está à pressão p_1 e se desloca do volume V_1 . O trabalho realizado é pois $p_1 V_1$. A energia interna do gás é U_1 .

O embolo da direita está à pressão p_2 e desloca-se do volume V_2 . O trabalho realizado é $p_2 V_2$. A energia interna do gás é U_2

Por definição de energia interna:

$$dU = dW = dQ$$

Em que dW é o trabalho realizado. Na experiencia de Joule Thompson será:

$$U_1 + U_2 + p_1 V_1 - p_2 V_2 = dQ = 0$$

Ou seja:

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2$$

Fica assim demonstrado que a experiencia de Joule Thompson para alem de ser adiabática é a entalpia constante, pois a entalpia por definição é :

$$H = U + pV$$

O efeito de Joule Thompson é reversivel se considerarmos que os 2 embolos se podem deslocar da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda mantendo um diferença de pressão dp infinitesimal primeiro maior à esquerda e depois maior à direita..

Será então:

Processos da Indústria Química

$$dQ = dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp$$

ou seja

$$\frac{dH}{dp} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_p \quad (5)$$

visto que C_p é a derivada de H em ordem a T.

Para calcular a derivada de H em ordem a p na equação (5) em função de variáveis de estado p, V, T, vamos considerar a equação (2) :

$$Q = T \frac{dW}{dT}$$

O trabalho dW é neste caso:

$$dW = p dV \quad (6)$$

Q é o calor trocado a temperatura constante com a fonte quente. Por definição de energia interna é:

$$Q = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \Delta V + p \Delta V \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (5) e dividindo ambos os membros por ΔV :

$$T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p$$

ou seja :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p \quad (8)$$

Podemos assim exprimir a derivada de H em ordem a p, usando a definição de entalpia (9) e a equação (8):

$$H = U + pV \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T + V + p \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (10)$$

Substituindo (8) em (10) fica :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T - p \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T + V + p \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (11)$$

ou seja :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T + V \quad (12)$$

Processos da Industria Quimica

Para simplificar (12) consideramos que a equação de estado

$$V = V(p, T)$$

pode ser derivada e fica:

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT \quad (13)$$

Para $dV=0$ e dividindo a equação (13) por dT fica:

$$0 = \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (14)$$

Substituindo (14) em (13) fica :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p + V \quad (15)$$

Substituindo em (5) fica :

$$\frac{dT}{dp} = \frac{1}{C_p} T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - \frac{V}{C_p} \quad (16)$$

Esta equação permite-nos calcular a redução de temperatura por expansão de Joule Thompson.

No caso dum gás perfeito, o efeito de Joule Thompson é nulo, porque as moléculas não exercem forças intermoleculares umas sobre as outras e a energia interna U na equação (6) não depende do volume do gás mas sómente da temperatura. Aliás, substituindo a equação dos gases perfeitos na equação (16) obtem-se o valor zero.

Nas unidades criogénicas o gás usado não é um gás perfeito.

Para além disso, o efeito de Joule Thompson pode dar-se com arrefecimento ou com aquecimento, segundo a temperatura a que se trabalha. Tem por isso que se escolher o gás de forma a que à temperatura de trabalho o efeito de Joule Thompson origine arrefecimento.

Este tipo de unidade criogénica usa-se para liquefazer ar, de forma a separar por destilação o azoto, o oxigénio e argon.

Em unidades criogénicas para obter temperaturas de -10°C até $+10^\circ\text{C}$ usa-se este sistema, mas para além disso trabalha-se numa zona de pressões e com gases escolhidos de forma a que durante o ciclo liquefaz cerca de 75% do gás.

Desta forma é possível manter sempre uma massa gasosa durante a compressão e descompressão. Se o gás liquefizesse completamente obtinha-se um liquido, que é praticamente incompressível e iria destruir o embolo do compressor.

O facto de 75% mudar de estado aumenta as quantidades de calor trocadas para a mesma massa de gás, pois o calor latente de vaporização é muito maior por unidade de massa de gás do

que o calor de Joule Thompson associado à mudança de pressão. Desta forma é possível com um equipamento mais barato conseguir o mesmo arrefecimento.

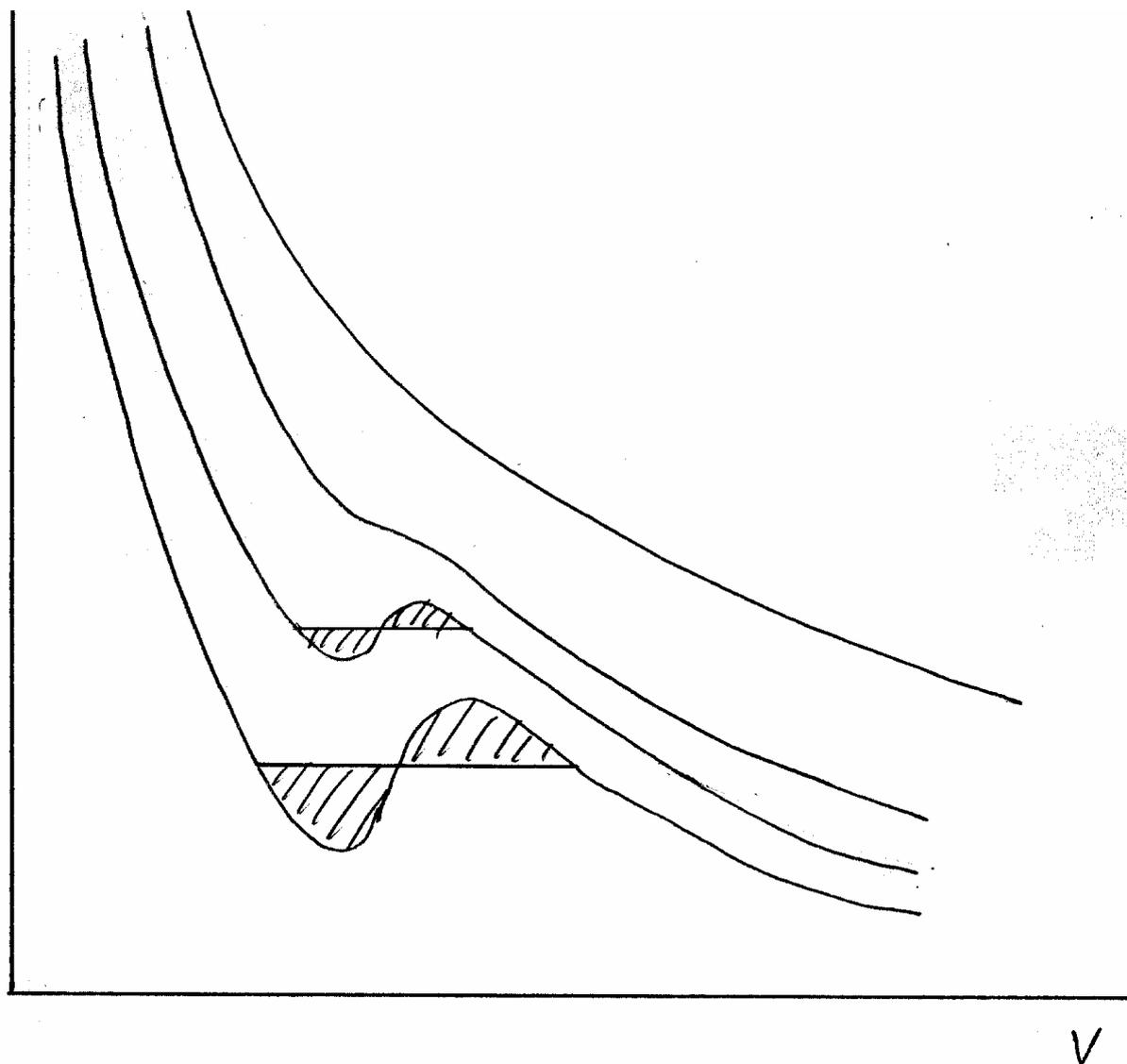


Figura 3 . 9 . 13 – Representação da equação de Van der Waals

Os gases usados nos aparelhos criogénicos não satisfazem a equação dos gases perfeitos, como dissemos, mas satisfazem muito aproximadamente a equação de Van der Waals:

$$\left(p - \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

Esta equação representa-se gráficamente na figura 3 . 9 . 13 para várias temperaturas.

Processos da Industria Quimica

Na realidade, na zona de mudanas de estado a equao de Van der Waals no se aplica, aplicando-se sim uma recta que divide ao meio as reas que na figura esto acima e abaixo da recta.

O calor latente de vaporizao varia com a temperatura de vaporizao segundo a expresso (4). A presso e a temperatura de vaporizao tambem esto relacionadas entre si. Quanto maior a recta horizontal das curvas de Van der Waals, maior o calor latente de vaporizao. Este calor latente de vaporizao  nulo quando a recta tambem tem um comprimento nulo, o que acontece na temperatura critica. A esta temperatura o estado liquido e gasoso no se distinguem.

Os gases usados nos aparelhos frignicos devem estar a temperaturas inferiores  sua temperatura critica. Isto  uma das limitaoes  escolha destes gases que conduziu durante muitos anos a usar gases que destruiam a camada de ozono da atmosfera.

Vamos ver um exemplo concreto, em que vamos considerar que o calor de mudana de estado  muito superior ao efeito de Joule Thompson.

Admitamos que o fluido usado  o CHClF₂ e que tem as seguintes caracteristicas:

Ponto de ebulioo a 2 bar = 262°K

Ponto de ebulioo a 10 bar = 305°K

Calor de mudana de estado a 262 ou 323°K $L = 15 \text{ kcal mole}^{-1}$

Quantidade de fluido = 2 kg

Massa molecular = 170

Numero de moles $n = 11,7$

Densidade do liquido = 1,50

Volume do liquido = 1,33 litros

$C_p / C_v = 1,10$

Efeito de Joule Thompson:

dT

$----- = 0,6^\circ\text{C}/\text{bar}$

dp

Vamos ainda admitir que 75% do gs muda de estado durante o ciclo.

Para o estado 1 conhecemos portanto :

$V_1 = 1,33 \text{ litros}$

$p_1 = 2 \text{ bar}$

$T_1 = 262^\circ\text{K}$

Para o estado 2 conhecemos:

$p_2 = 2 \text{ bar}$

$T_2 = 262^\circ\text{K}$

Processos da Industria Quimica

Donde calculamos pela equação dos gases perfeitos:

$$V_2 = \frac{nRT_2}{p_2} = 125,7 \text{ litros}$$

Para o ponto 3 conhecemos :

$$p_3 = 10 \text{ bar}$$

O volume é dado pela equação (15) do capítulo de balanços de energia:

$$p_3 V_3^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

Desta equação conclui-se que

$$V_3 = 29,19 \text{ litros}$$

Pela equação dos gases perfeitos podemos calcular

$$T_3 = \frac{n R T_3}{p_3} = 304^\circ\text{K}$$

A esta temperatura e à pressão de 10 bar o gás liquefaz, visto que a temperatura de ebulição a 10 bar é superior a T_3 .

Para o ponto 4 conhecemos

$$p_4 = 10 \text{ bar}$$

$$V_4 = 1,33 \text{ litros}$$

$$T_4 = 305^\circ\text{K} \text{ (temperatura de ebulição a 10 bar)}$$

O trabalho realizado no ciclo todo é dado pela área do trapézio da figura 3.9.10, que se pode calcular considerando a equação (18) do capítulo sobre balanços de energia para a mudança 2-3 e considerando que os integrais que definem o trabalho ao passar de 1 para 2 e de 3 para 4 são iguais à área dos rectangulos respectivos:

$$W = - \int_{1234} p \, dV = (V_3 - V_4) p_3 - (V_2 - V_1) p_2 + \frac{p_3}{1-\gamma} (V_2 - V_1)^\gamma (V_3^{1-\gamma} - V_2^{1-\gamma}) = 75,4 \text{ kcal}$$

Consideramos no calculo que 1 bar litro = 23,42 cal

Para um consumo de enrgia nos compressores de 75,4 kcal por ciclo podemos transferir no percurso 1-2 uma quantidade de calor para o percurso 3-4 igual ao calor latente de vaporização vezes o numero de moles:

$$Q = n L = 11,7 \times 15 = 175,5 \text{ kcal}$$

Quanto maior for o calor latente de vaporização maior será a capacidade de arrefecimento para a mesma potencia consumida no compressor.

Produção de oxigénio e azoto

O ar líquido é produzido numa **unidade criogénica**, em que a substância submetida a compressões e descompressões alternadas e respectivas mudanças de estado é o próprio ar.

O oxigénio e o azoto líquido são obtidos por **destilação de ar liquefeito**.

Uma fábrica com um consumo inferior a cerca de 20 ton/mês de gases liquefeitos normalmente recebe-os em camiões tanque e armazena-os em **tanques de aço de parede dupla** para assegurar a redução de entrada de calor.

O indicador de nível nestes tanques é constituído por um manómetro localizado no topo e outro na base do tanque. A quantidade de líquido é medida pela **diferença de pressão**.

Estes tanques tem dispositivos de sobre pressão constituídos por válvulas ou discos. As **válvulas de sobrepressão** tem um sistema de molas de forma a abrirem quando a pressão ultrapassa um determinado valor.

Outro dispositivo de segurança são os **discos de rebentamento**, que são destruídos quando a pressão ultrapassa um determinado valor

Para grandes consumos, torna-se mais interessante economicamente comprar uma unidade criogénica para produzir estes gases.

3 . 9 . 5 . Outras utilidades

Desmineralização de água

A desmineralização de água é feita quer para alimentação de caldeiras de vapor quer para uso como água de processo. Consiste num sistema de tratamento com resinas permutadoras de iões, que poderão segundo o seu tipo eliminar cationes ou anions. As resinas são polimeros, que tem grupos funcionais anions ou cationes com ligações covalentes ao polimero.

Para eliminar cationes como o cálcio ou o sódio, as resinas fixam o cálcio ou o sódio em grupos funcionais em que estava um protão.

Para eliminar cloretos ou sulfatos, estes anions são fixados por permuta com hidroxilos que estavam ligados à rede macromolecular da resina por cationes que tem ligações covalentes ao polimero.

Após uma operação de permuta de protões e hidroxilos segue-se uma operação de regeneração da resina com um ácido ou uma base respectivamente, para repor estes iões na estrutura do polimero.

Estes desmineralisadores são fornecidos por empresas especializadas, que seleccionam o modelo de aparelho com base na indicação do caudal de água e das concentrações de iões antes e depois do tratamento.

Combate a incendios

O sistema de combate a incendios é constituído por uma rede de água, por unidades de pó quimico ou geradores de espuma.

Nos três casos o objectivo é baixar a temperatura do combustivel e baixar a concentração de oxigénio no ar.

A **água** é usada normalmente para combater incendios em corpos sólidos sem ligações à corrente electrica.

O **pó quimico** é constituído por carbonato de sódio ou de cálcio, por hidrocarbonetos halogenados ou por anidrido carbónico. A sua função é reduzir o teor de oxigénio no ar na zona de combustão. Usam-se para incendios em compostos liquidos organicos e instalações electricas, onde a água por ser condutora não se deve usar.

Nunca se deve usar água para combater incendios em compostos organicos liquidos, pois a água é normalmente mais densa e ao contactar com o liquido em combustão, vai para baixo dele a alta temperatura e ao vaporizar causa projecções do liquido em combustão.

Processos da Industria Quimica

A **espuma** é obtida por mistura de água com um tensioactivo adequado, com base em proteínas, e destina-se a criar uma camada por cima do corpo em combustão que dificulta a chegada de oxigénio do ar à zona do combustível. Usa-se para incendios em compostos organicos mas nunca para zonas com instalações electricas em carga devido à condutividade electrica da água.

A espuma é mais barata que os extintores de pó quimico e é aplicada com canhões de grande caudal em que o tensioactivo é misturado com a água num tubo Venturi.

Em tanques de armazenagem de combustiveis é obrigatório acima dum determinado volume, a instalação de **equipamento tipo Sprinkler**. Este é constituído por uns difusores colocados dentro do tanque junto à parede. Estes difusores permitem cobrir o liquido contido no tanque com uma camada de espuma sem que seja necessária a aproximação dum homem. Estes difusores são alimentados por um sistema de tubagem de aço, que naturalmente resiste a altas temperaturas.

O sistema Sprinkler pode ser disparado automaticamente se houver detectores de fumo ou de temperatura junto aos tanques.

Posto de transformação eléctrico

O abastecimento de energia electrica a uma fábrica pode ser feito em várias tensões segundo a potencia consumida e as disponibilidades de rede local do fornecedor de energia electrica.

Para potencias inferiores a **100 kw** usa-se baixa tensão, de 220 - 380 volt.

Para potencias entre **100 kw e 1 Mw** usa-se média tensão, que pode ser de 10 kvolt, 15 kvolt ou 30 kvolt.

Para potencias superiores a **1 Mw** usa-se alta tensão, de 60 kvolt ou 150 kvolt.

A instalação electrica numa unidade fabril tem sempre que ser aprovada pela companhia fornecedora de energia electrica.

No caso de estarem presentes no processo produtivo produtos quimicos que formem misturas explosivas com o ar, o equipamento electrico na zona de produção tem que ser **anti deflagrante**.

Chama-se anti deflagrante quando é construido de forma a evitar o contacto entre a atmosfera e a zona onde possam aparecer faiscas electricas. O equipamanto anti deflagrante deve ser suficientemente robusto para aguentar uma explosão de gás contido no espaço onde possa ocorrer uma faisca electrica. Para alem disso deve ter todas as juntas entre componentes do equipamento com grande sobreposição para aumentar a estanquicidade entre o espaço onde há faiscas e o espaço onde há misturas explosivas.

Sistema de vácuo

O sistema de vácuo usado na indústria química tem muita importância em unidades de filtração e destilação pelo que vale a pena compreender com mais detalhe o seu funcionamento. As bombas

Processos da Industria Quimica

de vácuo mais usadas para fazer vácuo até 0,1 Bar são as bombas de anel líquido cujo esquema de funcionamento se mostra na Figura 3.9.11 .

Existe uma turbina, cujo eixo está colocado assimetricamente em relação ao eixo da caixa cilindrica da bomba.

Durante o funcionamento da bomba entra água para o espaço onde se move a turbina a qual é atirada para a periferia constituindo um anel.

O espaço entre cada duas pás da turbina tem uma parte variável cheia de água e outra cheia de ar. Desta forma cada um destes espaços entre pás consecutivas da turbina comporta-se como um embolo, que vai sucessivamente aspirando e comprimindo o ar.

No topo do cilindro existe um sistema de furações que dão saída ao ar na fase de compressão e entrada na fase de aspiração. O ar que sai vai para a atmosfera, e o ar que entra na bomba vem do equipamento onde se pretende fazer vácuo.

O vácuo realizado por uma bomba de anel líquido está limitado pela tensão de vapor da água à temperatura de funcionamento.

Assim no verão consegue-se pior vácuo do que no Inverno.

Quando se está a destilar com vácuo, se os vapores vierem quentes do equipamento de destilação, também o vácuo que se consegue é pior.

Tipicamente, uma bomba de anel líquido com duas turbinas em série e uma capacidade de aspiração de 200 m³/h PTN tem uma potência de 7KW.

Para vácuos correspondentes a pressões inferiores a 0,1 bar, usam-se bombas de óleo. Estas bombas tem a estrutura das bombas de deslocamento positivo (figura 3.6.8) em que o fluido lubrificante é o óleo. Naturalmente que quando se usam estas bombas para aspirar vapores de água ou de líquidos organicos é necessário intercalar antes da bomba um espaço arrefecido a uma temperatura que cause a condensação dos vapores à pressão da bomba de vácuo. Frequentemente usam-se reservatórios colocados dentro de azoto líquido para conseguir condensar certos gases a alto vácuo.

Quando se pretendem vácuos ainda mais perfeitos usam-se bombas de deslocamento positivo em que o fluido lubrificante é o mercurio.

Sempre que não seja preciso um vácuo muito elevado é preferível trabalhar com bombas de anel de água, pois os gases aspirados são misturados com água que vai para uma estação de tratamento.

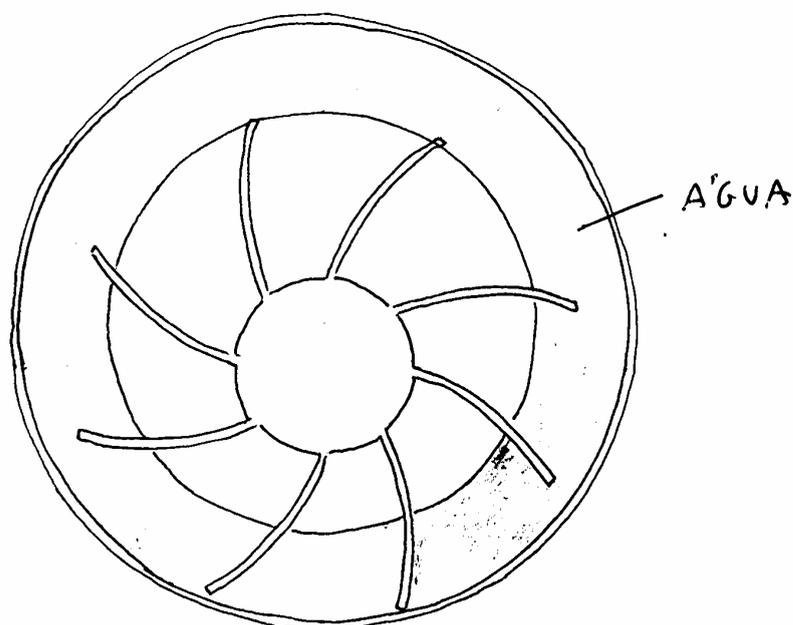


Figura 3.9.11- Esquema de funcionamento duma bomba de vácuo de anel líquido

Tanques de armazenagem

Os tanques de armazenagem estão normalmente reunidos num parque e dispõem dum sistema de tubagem que conduz a uma **central de bombagem** unica. A central de bombagem deve estar colocada junto a uma estrada onde possam descarregar camiões tanque. O liquido a descarregar tem que ser pesado ou medido com contadores.

Os tanques que contem combustiveis ou substancias poluentes devem estar contidos numa zona murada, que constitui uma **bacia de retenção** para derrames em caso de fugas por acidente.

Os muros devem ter uma altura calculada de forma a que o liquido derramado do maior tanque fique totalmente retido na bacia.

Por outro lado, o pavimento da bacia de retenção deve ser **impermeável e resistente à corrosão** dos liquidos derramados, de forma a evitar infiltrações no solo em caso de derrame.

Na área dos tanques deverão existir meios de **combate a incendios** manobráveis a distancia. Segundo as normas Seveso, a água usada no combate a incendios de produtos quimicos tem que ser toda recolhida e tratada como um efluente para não contaminar o meio ambiente.

Processos da Industria Quimica

O parque de tanques deve ser rodeado dum faixa de 10 - 15 metros onde se possa deslocar uma grua para montagem ou reparação dos tanques. Esta faixa constitui ao mesmo tempo uma **área de protecção**.

No caso de liquidos com vapores perigosos, que não podem ter fugas para a atmosfera, devem fazer-se as transfegas de um tanque para outro usando um tubo inferior para o liquido circular e outro superior, unindo os topos dos dois tanques, para que o ar circule em sentido oposto ao liquido.

A espessura da parede dum tanque é calculada como se mostrou para um reactor. Ela é a soma da espessura necessária para suportar o próprio reactor quando vazio e à pressão atmosférica, mais a pressão hidrostática do liquido, mais a pressão adicional que se introduza.

Compressores de ar

Os compressores para ar são fornecidos por empresas especializadas. Normalmente vão até 6 bar de pressão.

Para caudais pequenos usam-se **compressores de embolos ou compressores de turbinas**, cujo funcionamento é similar ao das bombas que vimos no capitulo de transporte de liquidos.

Para grandes caudais usam-se **compressores tipo Rootes**, com embolos rotativos (figura 3.9.9). Estes embolos rodam em sentidos opostos e o espaço entre eles e a caixa do compressor varia de forma a comprimir o gás.

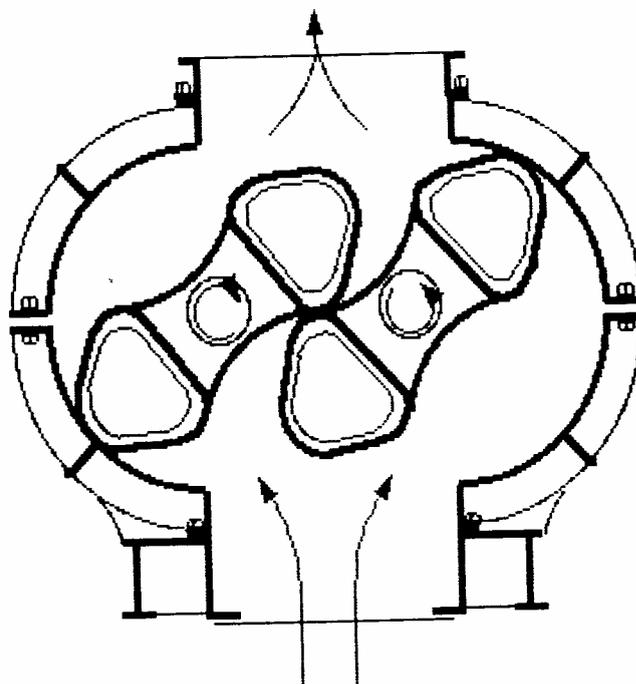


Figura 3.9.9 - Compressor tipo Roots de embolo rotativo

3 . 10 . Tratamento de efluentes

Uma industria quimica produz normalmente efluentes poluentes sólidos, liquidos ou gasosos.

Existe hoje tecnologia para tratar a maior parte dos efluentes, quer de industrias quimicas, quer de industrias alimentares, de papel, textil, metalurgica, de produção de energia etc. A tecnologia para o tratamento de efluentes faz parte da engenharia quimica.

Considera-se que a industria polui quando produz **substancias novas**, que não existem na natureza e as lança no meio ambiente. Tambem se considera poluente quando retira de minas, ou vai buscar à agricultura substancias, que existem portanto na natureza e depois as introduz no meio ambiente em **locais distintos** daqueles onde essas substancias se encontravam antes.

O petróleo bruto existente num poço de petróleo na natureza não é considerado poluente, mas se for derramado no mar já é poluente.

O mercúrio é um produto que existe na natureza e apesar disso é considerado altamente tóxico. Se a industria retirar mercurio duma mina e o lançar num rio está a poluir.

Não é possivel transformar ferro ou calcáreo em água por nenhum processo quimico. Por este facto, o tratamento de efluentes não pode consistir em **transformá-los em água ou ar puro**.

O tratamento de efluentes consiste em **separar da água ou do ar** os átomos ou moléculas de substancias em concentração superior a um determinado valor, considerado legalmente tolerável no local de lançamento do efluente.

As moléculas retiradas do efluente tem que ser **transformadas** sempre que possivel noutras moléculas e lançadas em locais do meio ambiente onde não constituam inconveniente para os seres vivos.

Os locais de lançamento de efluentes prétratados numa fábrica são a atmosfera, os rios, os mares, os colectores municipais e respectivas estações de tratamento, os aterros controlados.

Efluentes gasosos

Os efluentes gasosos tem que ser submetidos segundo a sua composição:

-a unidades de **despoeiramento** por filtração mecanica ou electroestática

-A **adsorção** em carvão activado para eliminação de pequenas quantidades de certos gases

-a **absorção** em torres de lavagem com chuveiros de água, para dissolver os gases soluveis em água

- A **tratamento quimico** de oxidação ou redução, por exemplo , para transformar gases noutros que possam mais facilmente ser removidos. Este processo é obrigatório hoje para os gases de escape dos automóveis. Um catalisador colocado no trajecto do escape permite oxidar o monóxido de carbono a dióxido de carbono e reduzir a concentração de óxidos de azoto.

Processos da Industria Quimica

O lançamento de anidrido carbónico na atmosfera pode ser evitado fazendo passar os gases de combustão numa suspensão de hidróxido de cálcio. Este e outros processos são tecnicamente possíveis mas exigem investimentos muito elevados, ou tem custos de operação, como o consumo de energia, inoportáveis.

Para compensar a nível mundial as emissões de anidrido carbonico originadas pela combustão de combustiveis fosseis, carvão ou petróleo, a solução ecologicamente mais interessante é aumentar a zona de florestas, que transforma o anidrido carbonico por função clorofilina.

Cerca de 80% do anidrido carbónico atmosférico que é transformado em oxigénio é por acção de plantas existentes nos oceanos.

Efluentes liquidos

Os efluentes liquidos obedecem a especificações legais de acordo com directivas comunitárias para serem lançados no meio ambiente. O decreto lei 74/90 fixa as especificações para lançamentos em rios e mares ou em colectores municipais (tabela 6.1 e 6.2) .

O tratamento de efluentes liquidos varia com a sua composição. Vamos referir sómente alguns casos mais frequentes:

-primeiro que tudo, o **processo produtivo** deve evitar quanto possivel que surjam componentes poluentes nos efluentes

- Os **efluentes inorganicos** devem ser **neutralizados** a pH= 6-8. No caso de terem sólidos, estes devem ser filtrados. As particulas coloidais e certos iões metálicos podem ser removidos com sulfato de aluminio ou de ferro, que produzem hidróxidos gelatinosos. Estes ao **precipitarem** arrastam as particulas coloidais e alguns iões.

Certos iões metálicos tem que ser removidos até à concentração tolerável por **precipitação** com aniões adequados, por resinas de **permuta iónica**, ou por **vaporização** da água de forma a ficarem os metais no residuo sólido.

-Os **compostos orgânicos** podem ser removidos por tratamento biológico, que consiste numa **fermentação** com bactérias que os transformam na sua própria substancia e depois são filtradas. A massa sólida obtida é depois usada na agricultura como adubo, se tiver as especificações adequadas ou lançado num aterro controlado.

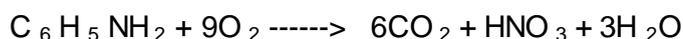
Noutros casos os compostos organicos são eliminados por **incineração**. Os gases depois devidamente tratados e os residuos sólidos são depositados em locais adequados.

Tratamento biológico de efluentes

Os efluentes organicos nem sempre são de composição constante e quimicamente bem conhecida. O valor da carga organica é por isso medido normalmente pelo consumo de oxigénio necessário para oxidar com dicromato de potássio ou permanganato de potássio todos os compostos organicos, cuja medida se chama CQO - **consumo quimico de oxigénio**.

Outra medida é o consumo de oxigénio do ar necessário para, por via fermentativa, oxidar todos os compostos organicos, cuja medida se chama CBO - **consumo biológico de oxigénio**.

O consumo quimico de oxigénio é determinado pela estequiometria da seguinte reacção, em que tomamos a anilina como exemplo:



Neste caso, um mole de anilina consome 9 moles de oxigénio. Uma solução contendo 2% de anilina consumirá uma quantidade de oxigénio que expressa em gramas por kg de solução define o seu CQO.

O dicromato de potássio ou o permanganato de potássio libertam oxigénio segundo as equações seguintes:



O consumo de oxigénio numa fermentação, o CBO, normalmente é 70 - 80% do CQO, pois as bactérias não executam uma oxidação tão completa quanto o dicromato ou o permanganato. O CBO depende naturalmente da estirpe de bactérias que se usam. Há bactérias que se adaptam a certos tipos de efluentes quimicos onde degradam biologicamente mais do que outras bactérias.

Para industrias de pequena dimensão, não faz sentido construir estações de tratamento biológico. É preferível lançar os efluentes em colectores municipais e ser o municipio a executar o tratamento biológico.

Os residuos sólidos finais obtidos, quer no processo industrial quer no tratamento de efluentes devem ser, de acordo com a legislação em vigor, depositados nos aterros urbanos, ou nos aterros controlados industriais conforme a sua composição.

O tratamento biológico consiste em fornecer a carga organica como alimento a uma cultura de bactérias. Estas bactérias assimilam a carga organica, e usam-na para se reproduzirem e aumentarem a sua massa, ou para produção de energia necessária à sua vida.

Para dimensionar uma unidade de tratamento biológico de efluentes é necessário conhecer qual a velocidade com que as bactérias se alimentam de carga organica do efluente e qual o comportamento da cultura das bactérias.

De facto, as bactérias nascem, crescem, reproduzem-se e morrem. Há bactérias que se alimentam de outras bactérias.

Processos da Industria Quimica

Para cada tipo de efluentes há determinadas **estirpes de bactérias** que são particularmente adaptadas a crescerem. Esta selecção das bactérias dá-se ao longo do tempo, em que se reproduzem mais as bactérias com maior capacidade de adaptação aos nutrientes do efluente.

Para efectuar o tratamento biológico, o efluente contendo a carga organica é colocado num tanque em que existem as bactérias adequadas. Este tanque pode funcionar **em continuo ou descontínuo**. Se funcionar em continuo, o tempo de permanencia de efluente no tanque deve ser suficiente para que as bactérias consumam uma quantidade tal de carga organica que permita atingir as especificações necessárias para lançamento do efluente num recurso hidrico.

Nestas condições haverá em simultaneo entrada e saida de efluente.

As bactérias precisam duma determinada **composição alimentar** para viver. Se o efluente não contiver todas essas substancias, é necessário introduzi-las no tanque de tratamento. Por exemplo, certos compostos de fósforo, sódio, potássio são sempre necessários em determinadas concentrações com limites minimo e máximo para que as bactérias possam viver.

O efluente contido no tanque tem que ser submetido a um processo de agitação e a um processo de dissolução de oxigénio .

A **agitação** serve para manter as bactérias em suspensão e evitar que elas se depositem no fundo do tanque e assim deixem de consumir a carga organica do efluente.

A agitação tambem serve para facilitar a difusão do oxigénio do ar ou do oxigénio puro que tambem se pode injectar no tanque.

O **oxigénio** é necessário para assegurar a vida das bactérias aeróbicas.

Se não houver oxigénio suficiente, as bactérias **anaeróbicas** passam a dominar o processo de decomposição da carga organica.

Estas bactérias anaerobicas produzem ácido sulfidrico e anidrido sulfuroso que dão um cheiro muito intenso e desagradável aos tanque de tratamento biológico de efluentes com funcionamento deficiente.

Velocidade de crescimento celular.

Tanto no tratamento em continuo como descontínuo, a velocidade de crescimento v_c é proporcional à concentração das células (bactérias) existentes:

$$v_c = \frac{dc}{dt} = \mu c \quad (1)$$

em que

v_c - velocidade de crescimento das células (massa volume⁻¹ tempo⁻¹)

μ - velocidade especifica de crescimento (tempo⁻¹)

c - concentração de células (massa volume⁻¹)

Processos da Industria Quimica

Numa cultura de células em regime descontínuo, se os nutrientes (substrato) estiverem presentes em concentração limitada, ao fim dum certo tempo eles são consumidos e o crescimento das bactérias pára.

Numa cultura em contínuo, o crescimento é limitado pela concentração de nutrientes.

Verificou-se experimentalmente que o efeito da concentração do nutriente ou substrato na constante cinética μ era dado pela seguinte equação estabelecida por Monod:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} \quad (2)$$

em que:

μ - velocidade específica de crescimento (tempo⁻¹)

μ_m - velocidade específica máxima de crescimento (tempo⁻¹)

S - concentração da componente do substrato que limita o crescimento (massa volume⁻¹)

K_S - constante da velocidade, definida como a concentração do substrato para a qual a velocidade específica de crescimento é metade do valor máximo.

A equação de Monod tem a representação gráfica indicada na figura 3.9.12

Se substituirmos a equação (2) na equação (1) obtemos o valor da velocidade de crescimento de células v_c em função da concentração das células mas também da concentração do substrato:

$$v_c = \frac{\mu_m S}{K_S + S} C \quad (3)$$

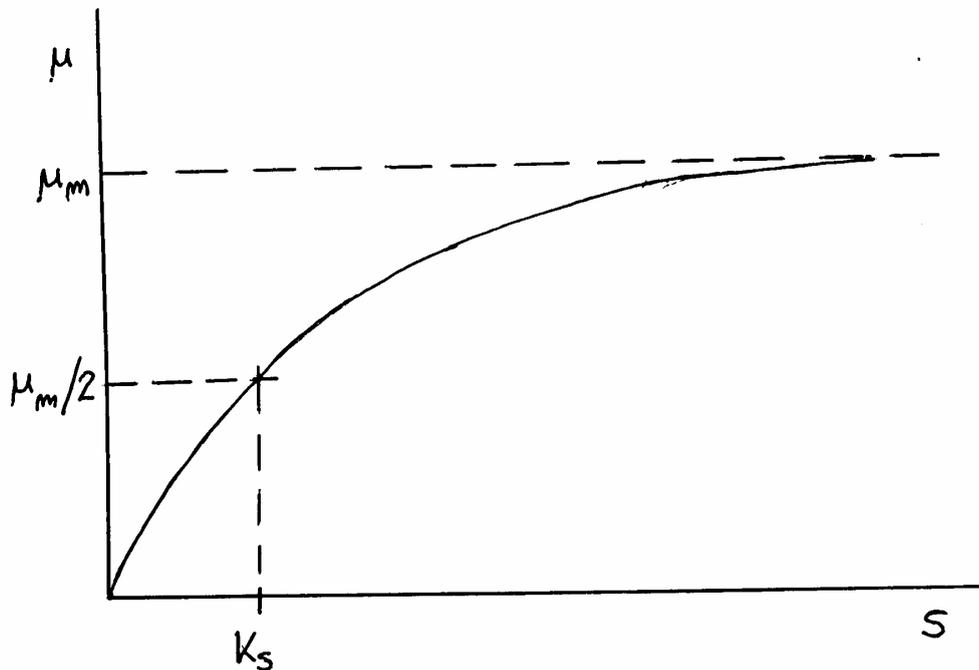


figura 3.9.12 - Representação grafica da velocidade específica de crescimento em função da concentração de substracto

Degradação celular

As bactérias existentes não tem todas a mesma idade, e algumas vão morrendo e por vezes servem de alimento a outras bactérias.

Os dois fenómenos podem ser englobados quantitativamente na velocidade de degradação, proporcional à concentração celular:

$$v_d = -K_d c \quad (4)$$

em que:

K_d - constante de degradação endogénica (tempo⁻¹)

c - concentração de células (massa volume⁻¹)

Subtraindo agora a velocidade de crescimento celular dada pela equação (3) da velocidade de degradação endogénica dada pela equação (7) obtemos :

$$v'_c = v_c + v_d = \frac{\mu_m S}{K_s + S} c - K_d c \quad (5)$$

em que v'_c é a velocidade real de crescimento celular.

As constantes cinéticas na equação (8) assim como o rendimento da equação (4) são fortemente dependentes da temperatura. Não só o metabolismo celular depende da temperatura mas também a transferencia de oxigénio e a sedimentação de particulas.

Balanço de massa das células num tanque de tratamento biológico

Consideremos um tanque agitado em que continuamente entra e sai efluente, como se mostra na figura 3.9.13.

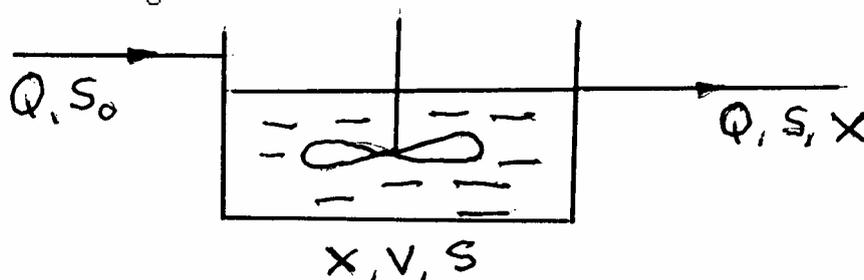


figura 3.9.13 - Tanque de tratamento biologico de efluentes

A velocidade de saída de células no tanque, menos a velocidade de entrada, é igual à velocidade real de crescimento de células no tanque:

$$V v'_c = Q c - Q c_0$$

em que :

c - concentração de celulas existentes no tanque (massa volume $^{-1}$)

V - volume do tanque

Q - caudal de entrada no tanque, suposto ser igual ao caudal de saída (volume tempo $^{-1}$)

c_0 - concentração de células à entrada do tanque (massa volume $^{-1}$)

v'_c - velocidade de crescimento real das células (massa volume $^{-1}$ tempo $^{-1}$)

À concentração total de células em suspensão no tanque ou nas correntes de entrada ou saída também se chama "sólidos suspensos voláteis". Nem todas as células em suspensão são activas biologicamente no processo de tratamento de efluentes.

Admite-se em geral que a concentração de células activas biologicamente no tratamento de efluentes é proporcional à concentração total de células.

Processos da Industria Quimica

A concentração total de células é medida experimentalmente por um teste que se chama a determinação dos “sólidos suspensos voláteis”.

Admitamos na equação (9) que a concentração de células na corrente de entrada é nula: $c = 0$.

A equação (9) transforma-se então na seguinte:

$$Q c = V v' c$$

Define-se tempo de permanencia hidráulico o quociente do volume do reactor pelo caudal de entrada:

$$\Theta = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

A equação (10) pode então transformar-se em:

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{v' c}{c} \quad (7)$$

Substituindo o valor da velocidade real de crescimento celular $v' c$ dado por (8) na equação (12) obtemos:

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{\mu_m S}{K_S + S} - K_d \quad (8)$$

Resolvendo em ordem a S fica:

$$S = \frac{K_S (1 + K_d \Theta)}{\Theta (\mu_m - K_d) - 1} \quad (9)$$

Desta forma eliminamos a concentração de células c e exprimimos a concentração de substrato S em função do tempo de permanencia Θ .

A concentração de substrato S dada por (9) encontra-se representada na figura 3.9.14 em função do tempo de permanencia Θ . Nesta figura representamos a função num dominio maior que a sua aplicação fisica, para mostrar que nos limites os valores que ela dá não tem significado.

Nesta figura usamos os seguintes valores experimentais:

$$K_S = 100 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$$

$$r = 0,5$$

$$K_d = 0,05 \text{ dia}^{-1}$$

$$S_0 = 1000 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$$

$$\mu_m = 2,5 \text{ dia}^{-1}$$

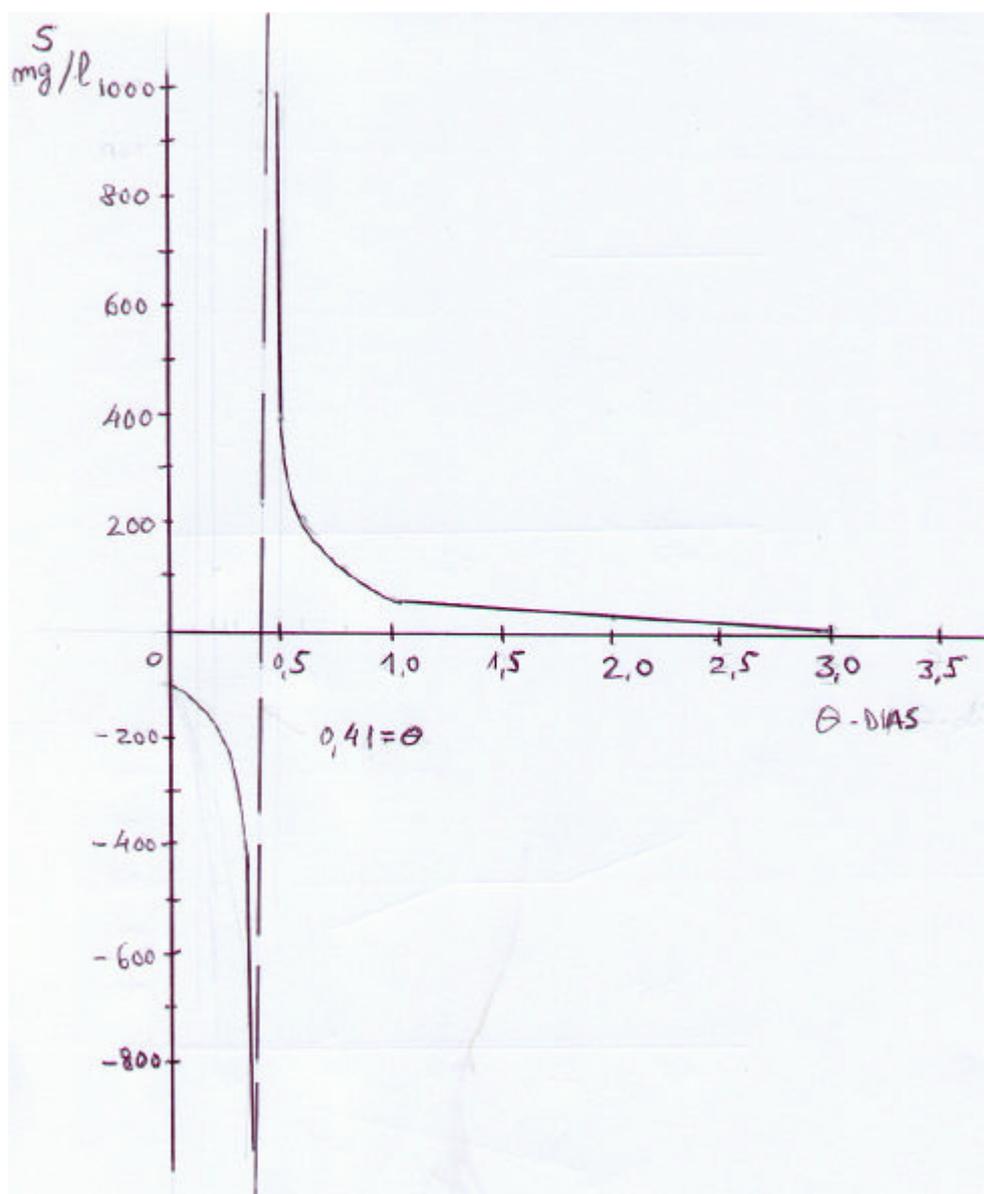


Figura 3.9.14 - Concentração do substrato no efluente após tratamento e eficiência do tratamento em função do tempo de permanência hidráulico para um reactor contínuo de mistura total sem reciclo

Verificamos assim que um dia é neste caso um tempo de permanência hidráulico aceitável. O volume dum reactor biologico deve por isso ser igual ao volume diário de efluente a tratar.

Legislação sobre lançamento no ambiente de águas residuais

Actualmente a legislação aplicável em Portugal é uma transposição de directivas da União Europeia e encontra-se definida no decreto lei 236/98 de 1 de agosto.

Processos da Industria Quimica

As empresas industriais podem lançar os seus efluentes nos colectores municipais, devendo para isso negociar com as camaras municipais as especificações. As camaras municipais deverão autorizar especificações que sejam compatíveis com a resistencia à corrosão dos seus colectores e as características de operação das suas estações de tratamento. Este decreto lei nada impõe sobre esse assunto.

O decreto lei define quais são as especificações válidas para lançamento de efluentes municipais, incluindo os de origem doméstica e industrial. O decreto lei também é válido quando as empresas industriais lançam efluentes directamente nos recursos hidricos sem passar por colectores municipais.

Na tabela 3.5 indicam-se os valores.

Tabela 3-5 - Normas gerais de descarga de águas residuais em recursos hidricos

| Parametro | Expressão do resultado | Valor limite de emissão |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| PH | Sorensen | 6,0-9,0 |
| Temperatura | °C | Aumento de 3° |
| CBO | mg/l | 40 |
| CQO | mg/l | 150 |
| Sólidos suspensos totais | mg/l | 60 |
| Aluminio | mg/l | 10 |
| Ferro | mg/l | 2,0 |
| Manganês | mg/l | 2,0 |
| Cheiro – na diluição 1/20 | | Não detectável |
| Cloro | mg/l | 1,0 |
| Fenois | m/l | 0,5 |
| Óleos e gorduras | mg/l | 0,5 |
| Sulfuretos | mg/l | 1,0 |
| Sulfitos | mg/l SO ₃ | 1,0 |
| Sulfatos | mg/l SO ₄ | 2000 |
| Fosforo total | mg/l P | 10 |
| Azoto amoniacal | mg/l NH ₄ | 10 |
| Azoto total | mg/l N | 15 |
| Nitratos | mg/l NO ₃ | 50 |

Processos da Industria Quimica

| | | |
|--|------------|------|
| Aldeidos | mg/l | 1,0 |
| Arsénio Total | mg/l As | 1,0 |
| Chumbo total | mg/l Pb | 1,0 |
| Cádmio total | mg/l | 0,2 |
| Crómio total | mg/l Cr | 2,0 |
| Crómio hexavalente | mg/l Cr VI | 0,1 |
| Cobre total | mg/l Cu | 1,0 |
| Niquel total | mg/l Ni | 2,0 |
| Mercurio total | mg/l Hg | 0,05 |
| Cianetos totais | mg/l CN | 0,5 |
| Sulfuretos | mg/l S | 1,0 |
| Óleos minerais | mg/l | 15 |
| Detergentes (lauril sulfato de sódio) | mg/l | 2,0 |

Problema 1

Pretende-se condensar 1500 Kg/h do vapor de água a 100°C num permutador tubular.

A água de refrigeração deverá ter um salto térmico de 20°C. A temperatura ambiente nas condições mais desfavoráveis do ano é de 35°C e a humidade de 50%.

- Qual o caudal e a temperatura da água de refrigeração à chegada ao condensador, conhecendo as curvas características da torre de refrigeração. Admita que a torre só está ligada ao condensador.
- Calcule quantos tubos de 25 mm de diâmetro e 3 metros de comprimento deve ter o permutador.

Admita um coeficiente de transferência de calor de $900 \text{ kcal m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Dados:

Diagrama psicométrico

Diagrama de torres de refrigeração Alfa-Laval

Calor de vaporização da água = $9,757 \text{ kcal mole}^{-1}$

Resolução:

- A quantidade de calor a eliminar do permutador é igual à entalpia de vaporização vezes o número de moles/hora.

$$Q = 9,757 \times (1500 \times 10^3 / 18) = 8,13 \times 10^5 \text{ kcal/h}$$

Se o salto térmico na água de refrigeração é de 20°C, então o caudal $\underline{M'}$ será:

$$M' \cdot Cp' \cdot \Delta T' = Q$$

Processos da Industria Quimica

$$M' = (Q/C_p' \Delta T') = (8.15 \times 10^5 / 20) = 40,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para calcular a temperatura da água à saída da torre de refrigeração, que é igual à temperatura à entrada do permutador, temos que calcular a temperatura do termómetro húmido.

Na Fig.3.9.7 , marcamos os ponto de encontro da curva da humidade relativa 50% com a recta vertical correspondentes à temperatura de 35°C.

Por este ponto fazemos passar uma recta paralela às rectas de temperatura do termómetro húmido de 20° e 30°C. Verificamos que esta recta está quase equidistante das duas outras referidas, pelo que a temperatura do termómetro húmido será de 25°C.

Na Fig.3.9.8 verificámos que para o caudal de 40 m³/h, para uma temperatura do termómetro húmido de 25°C e para um salto térmico de 20°C, a temperatura à saída da torre é de 33,4°C. A temperatura à entrada da torre será de 53,4°C portanto

b) Para calcular a área do permutador recorreremos à equação (14) do Capítulo 3.7.

$$S = (C_p' M' / U) \ln ((T'_o - T) / (T'_f - T))$$

Nesta equação vamos considerar que:

T - é a temperatura do vapor de água a condensar, portanto 100°C.

T'_o e T'_f - são as temperaturas à entrada e à saída do permutador relativas à água de refrigeração.

Podemos então calcular a superfície

$$S = (40700/900) \ln ((33.4-100)/(53.4-100)) = 16,1 \text{ m}^2$$

Cada tubo de 25 mm de diâmetro e 3 metros de comprimento tem de área

$$p d h = p \times 0,025 \times 3 = 0,235 \text{ m}^2$$

Precisamos portanto de

$$(16.1/0.235) = 69 \text{ tubos}$$