

## 18 – CONDENSAÇÃO E INCINERAÇÃO

---

**Condensador** - condensação é o processo de converter um gás ou um vapor em líquido (mudança de fase). Em princípio, qualquer gás pode ser condensado pelo abaixamento de sua temperatura ou pelo aumento de sua pressão. A redução da temperatura é mais utilizada, pois o aumento da pressão costuma ser mais caro.

Condensadores utilizam, normalmente, água ou ar para resfriar e condensar uma corrente gasosa ou um de seus componentes. São dispositivos que não atingem temperaturas muito baixas ( $\approx 30^{\circ}\text{C}$ ), portanto não possuem alta eficiência de remoção da maioria dos gases, apenas em casos em que o vapor se condense em altas temperaturas. São equipamentos utilizados como pré-tratamento de dispositivos mais eficientes.

As condições nas quais um determinado gás possa condensar dependem de suas propriedades físicas e químicas. A condensação pode ocorrer quando a pressão parcial do poluente na corrente (mistura) gasosa é igual a sua pressão de vapor como substância pura, na temperatura considerada.

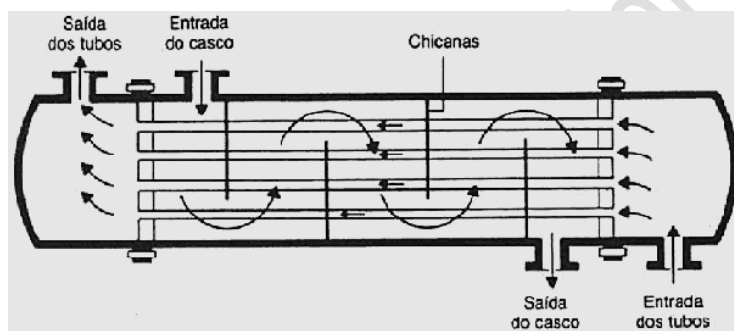
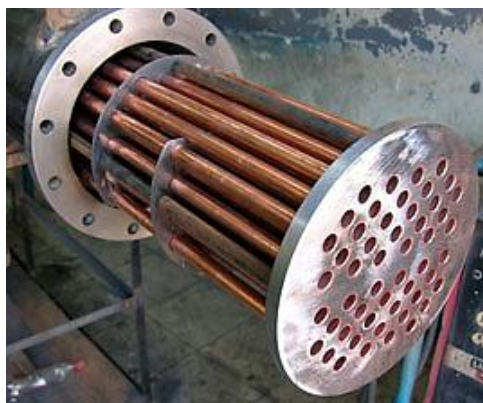
Assim, podemos condensar um gás de três maneiras:

- 1 - em uma dada temperatura, a pressão do sistema é elevada (compressão) até a pressão parcial do gás se igualar a sua pressão de vapor;
- 2 - em uma dada pressão, a temperatura do sistema é reduzida até a pressão parcial do gás se igualar a sua pressão de vapor;
- 3 - usando-se uma combinação de compressão e resfriamento do sistema até a pressão parcial do gás se igualar a sua pressão de vapor.

Na prática, os condensadores operam com remoção de calor da corrente gasosa (abaixamento da temperatura). Os tipos mais comuns são: os condensadores de contato, nos quais o fluido resfriador ou fluido refrigerante é colocado em contato direto com a corrente gasosa, ou

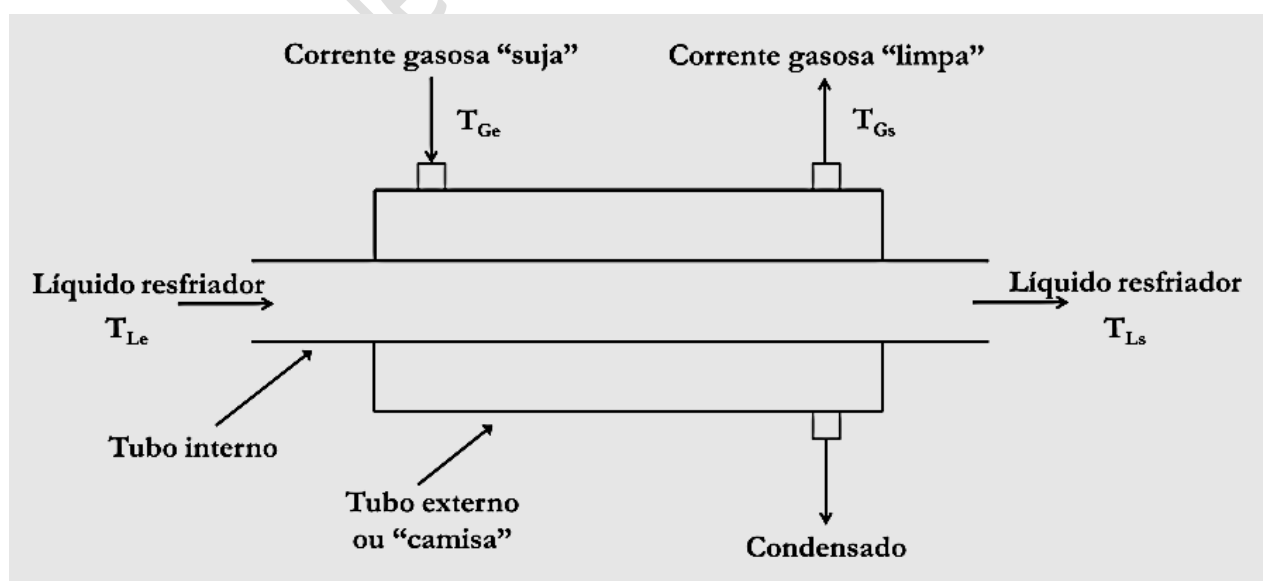
seja, misturado com o gás e os condensadores de superfície, nos quais o fluido resfriador está confinado em um compartimento distinto da corrente gasosa, por exemplo, em um conduto ou tubo.

Em geral, os condensadores de superfície são os mais utilizados, sendo as mais comuns: casco e tubos, duplo tubo, tubo espiral e placas planas.



Casco e tubos

Em um condensador do tipo duplo tubo, no qual a corrente gasosa escoia no interior do espaço anular entre os dois tubos concêntricos, e o fluido refrigerante escoia no interior do tubo interno. O tubo externo é também chamado de "camisa". A condensação ocorre no espaço entre os tubos.



O dimensionamento de um condensador de superfície envolve a estimativa da vazão do líquido resfriador e da área ou superfície de troca térmica.

A energia retirada, em forma de calor, da corrente gasosa necessária para a condensação do vapor é o calor latente de condensação. Para estimar a vazão do líquido refrigerante:

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{M}_V \Delta H_V + \dot{M}_C C_{pc} (T_{Ge} - T_{Gs})}{C_{pL} (T_{Ls} - T_{Le})}$$

$\dot{m}_L$  = vazão mássica do líquido resfriador (kg/s);

$C_{pL}$  = capacidade calorífica do líquido resfriador (J/kg.°C);

$\dot{M}_V$  = vazão mássica do vapor (kg/s);

$\dot{M}_C$  = vazão mássica do condensado (kg/s);

$\Delta H_V$  = calor latente de vaporização do condensado (J/kg)

$C_{pc}$  = capacidade calorífica do condensado (J/kg.°C).

Produto	$\Delta H_V$ (cal/g)	Temperatura de ebulição (°C)	Pressão de vapor (mmHg)
Acetato de etila	87,6	77,0	100 (27 °C)
Acetona	122,0	56,1	200 (22,7 °C)
Benzeno	94,1	80,1	100 (26,1 °C)
Etanol	200,0	78,3	60 (26 °C)
Éter dietílico	84,9	34,6	460 (21 °C)
Hexano	80,0	68,7	200 (31,6 °C)

Fonte: <http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergencias-quimicas/258-manual-de-produtos-quimicos>

Para o caso mais simples, em que temos a condensação total de um único vapor, a transferência de calor no condensador é governada por:

$$\dot{Q} = UA(MLDT)$$

$\dot{Q}$  = taxa de transferência de calor (J/s);

$U$  = coeficiente global de transferência de calor (J/s.m<sup>2</sup>.°C);

$A$  = área de contato ou área de troca de calor (m<sup>2</sup>);

$MLDT$  = média logarítmica da diferença de temperatura (°C)

A “força motriz” para a transferência de calor é a diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e a corrente gasosa, que pode ser representada pela média logarítmica da diferença de temperatura:

$$MLDT = \frac{(T_{Ge} - T_{Le}) - (T_{Gs} - T_{Ls})}{LN \frac{(T_{Ge} - T_{Le})}{(T_{Gs} - T_{Ls})}}$$

$T_{Ge}$ : temperatura de entrada da corrente gasosa ( $^{\circ}C$ );

$T_{Gs}$ : temperatura de saída da corrente gasosa ( $^{\circ}C$ );

$T_{Le}$ : temperatura de entrada do líquido resfriador ( $^{\circ}C$ );

$T_{Ls}$ : temperatura de saída do líquido resfriador ( $^{\circ}C$ )

**Incinerador** - combustão é um processo químico que ocorre pela rápida combinação do oxigênio com vários compostos químicos, resultando na liberação de calor. O processo de combustão (oxidação térmica ou incineração) é mais frequentemente utilizado para o controle de emissões de compostos orgânicos. Em princípio, se tivermos uma temperatura elevada e um tempo de residência adequados, qualquer hidrocarboneto pode ser oxidado para água e dióxido de carbono, pelo processo da combustão.

Pode ser empregado, também, quando os poluentes devem ser “destruídos” de maneira mais eficiente, como no caso de gases tóxicos ou perigosos. Os sistemas de combustão são relativamente caros, utilizam um combustível adicional para a queima dos poluentes e geralmente possuem algum dispositivo para recuperação do calor gerado.

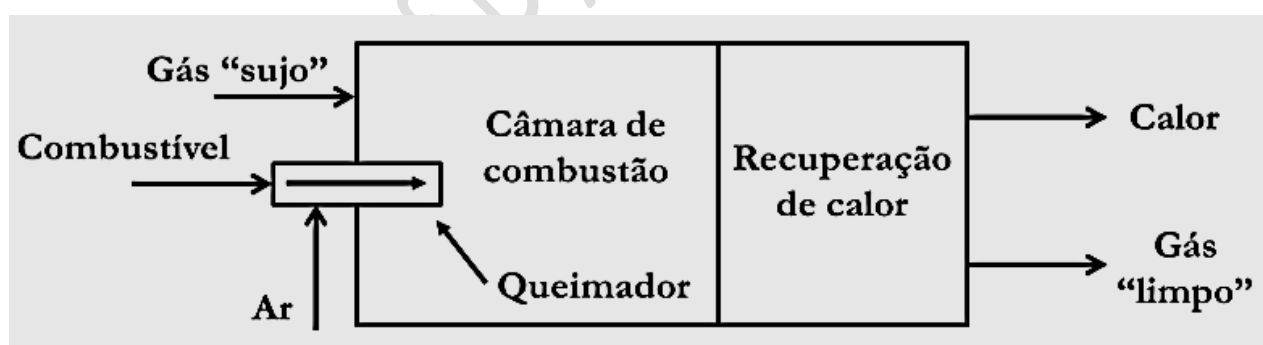
Um processo ideal é aquele em que a combustão é completa, ou seja, os produtos da reação são apenas  $H_2O$  e  $CO_2$ . Se outros produtos são gerados, como por exemplo, monóxido de carbono ou óxidos de nitrogênio, a combustão é denominada incompleta. A combustão

incompleta de muitos compostos orgânicos resulta na formação de aldeídos ou ácidos orgânicos, gerando problemas adicionais.

A oxidação de compostos contendo enxofre ou halogênios produz compostos indesejáveis como dióxido de enxofre, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, ou fosgênio ( $\text{COCl}_2$ ). Sendo assim, um processo adicional deve ser utilizado para tratamento das emissões.

Para alcançar a combustão completa, temos de colocar em contato íntimo os poluentes, o combustível e o ar (oxigênio), proporcionando as seguintes condições: temperatura elevada para ignição da mistura poluente/combustível, mistura turbulenta dos reagentes e tempo de residência suficiente para a reação ocorrer.

Os incineradores operam em temperaturas entre 600 e 650 °C, quando oxidam a maioria dos compostos orgânicos, mas, em alguns casos, as temperaturas podem variar entre 1.800 e 2.200 °C, para poluentes mais perigosos. Gás natural ou propano podem ser utilizados como combustíveis para a manutenção das temperaturas adequadas.



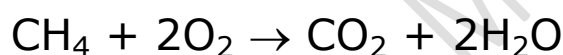
Oxigênio é necessário para a combustão ocorrer e, para a combustão completa de um composto, uma quantidade suficiente de oxigênio deve estar presente para a conversão de todo carbono a  $\text{CO}_2$ . Esta quantidade de oxigênio é denominada estequiométrica ou teórica e vem do balanceamento da equação química da combustão completa daquele composto.

Lembre-se que a equação estequiométrica de uma reação química é uma declaração da quantidade relativa de moléculas ou moles de reagentes e produtos que tomam parte na reação. Se não houver oxigênio suficiente, a combustão é incompleta.

O suprimento de oxigênio nos processos de combustão vem do ar. Se assumirmos que o ar é, basicamente, uma mistura de 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio (em base molar), um grande volume de ar é necessário para suprir as necessidades da combustão.

Normalmente, mais que a quantidade estequiométrica é utilizada, caracterizando o chamado oxigênio em excesso.

Vamos considerar a combustão completa de 1 mol de metano:



Neste exemplo, a partir de 1 mol de  $\text{CH}_4$ , foram formados 1 mol de  $\text{CO}_2$  e 2 moles de  $\text{H}_2\text{O}$ , com consumo de 2 moles de  $\text{O}_2$ .

Na prática, para "garantir" uma combustão completa, emprega-se  $\text{O}_2$  em excesso. Se tivermos 80% de excesso, isso significa 1,6 moles, ou um total de 3,6 moles do  $\text{O}_2$ .

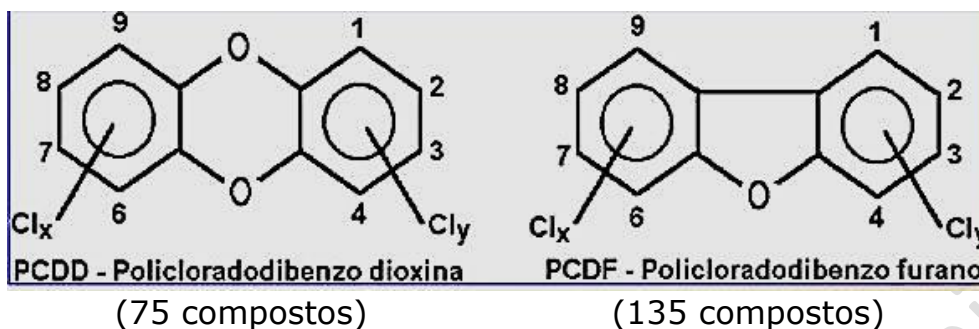
Se tivermos uma boa mistura dos gases na câmara de combustão, o uso de  $\text{O}_2$  em excesso é reduzido. Lembre-se que o ar em excesso não participa da reação, mas ele absorve uma parte do calor produzido pela reação.

## Dioxinas e Furanos

O termo dioxinas é usado para denominar uma família de compostos aromáticos, planares, tricíclicos, constituída por dois grupos de compostos. São produtos não-intencionais da combustão e de diversos processos industriais. São classificadas como Poluentes Orgânicos Persistentes (POP), tóxicos, bioacumulativos, resistem à

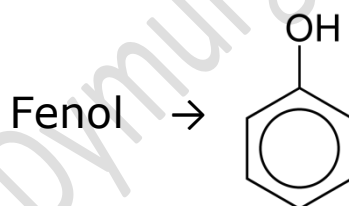


degradação, podendo depositar-se distantes da fonte e acumular-se em ecossistemas terrestres e aquáticos.



### Mecanismos de Formação de Dioxinas e Furanos:

- Presença de compostos orgânicos do tipo fenol;
- Presença de compostos clorados;
- Presença de catalizadores (ex. cobre);
- Temperatura no incinerador entre 200 e 600 °C;
- Temperatura no processo de controle de emissão entre 200 e 400 °C.

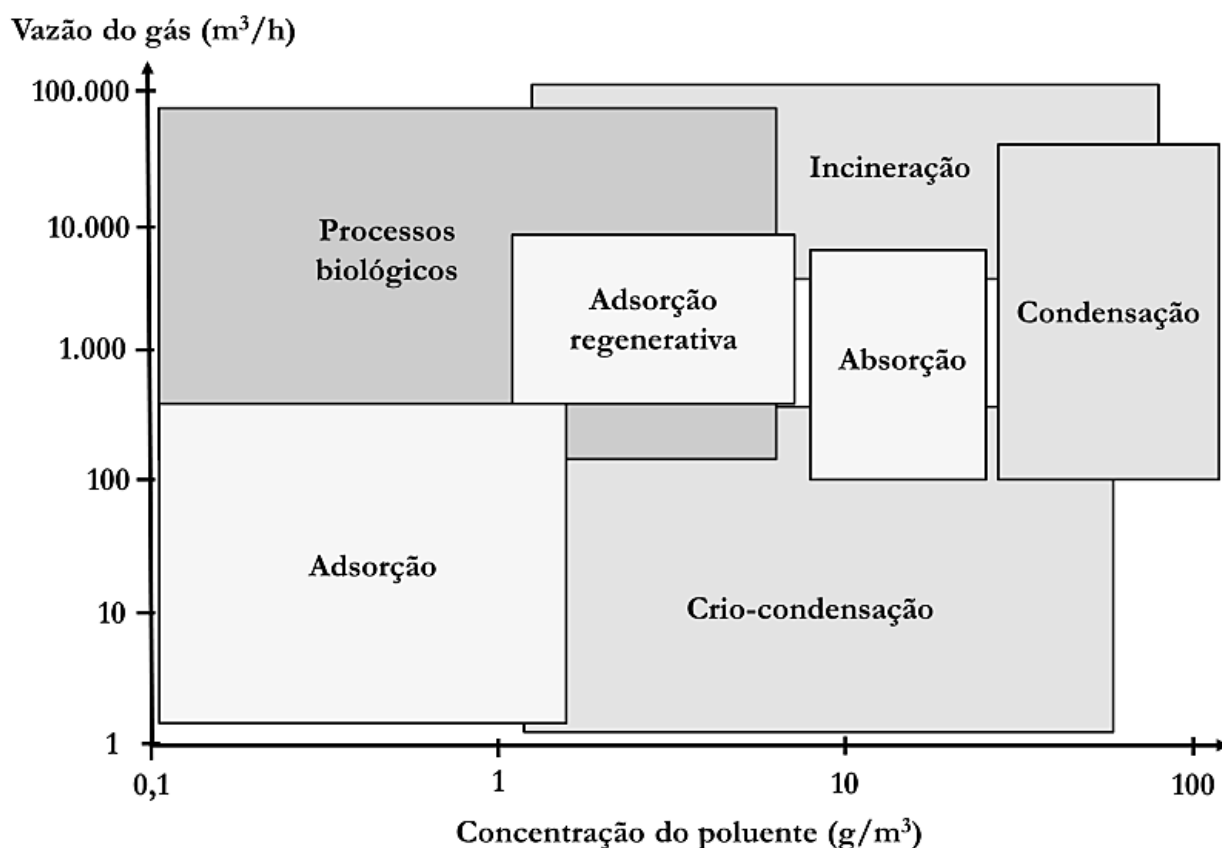


### Principais Poluentes Gerados em Unidades de Incineração

Poluente	Principais efeitos
Metais	Aumento na incidência de doenças cancerígenas e de intoxicação
Dioxinas e furanos	Aumento na incidência de doenças cancerígenas. Má formação de fetos.
Material Particulado	Doenças respiratórias. Agravamento de doenças respiratórias pré-existentes
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	Doenças respiratória. Agravamento de doenças respiratórias pré-existentes. Irritação das vias respiratórias.
Monóxido de carbono (CO)	Diminuição da taxa de transporte de oxigênio no sangue. Diminuição dos reflexos. Caso extremo pode levar a morte.
Óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	Diminuição da resistência imunológicas. Irritação das vias respiratórias. Agravamento de doenças respiratórias pré-existentes

Fonte: IPT. Manual Integrado de Gerenciamento de Lixo. 2 Ed. 2000

Após a apresentação dos equipamentos para remoção de poluentes gasosos, a figura abaixo pode nos auxiliar na seleção inicial do método mais adequado para uma desejada remoção de poluentes gasosos, em função da concentração do poluente na mistura gasosa e da vazão da corrente gasosa.



Prof. Wiclef