

cap 3 - QUEIMADORES

A função do queimador é o de fazer com que o combustível e o oxidante fiquem em contato o tempo suficiente e à temperatura suficiente para ocorrer e completar a reação de combustão. Uma vez que a maioria das reações de combustão acontecem na fase gasosa, o contato eficiente depende de: Tempo, Temperatura e Turbulência.

Em geral os queimadores não podem ser considerados isolados do forno pois os arredores obviamente vão ter um efeito sobre a quantidade de calor perdida pela chama, conseqüentemente sobre a sua temperatura, sobre o tempo em que os gases da chama são mantidos na zona de combustão e, sobre a recirculação do gás.

Considere as paredes da câmara de combustão fechada e fria, a chama vai perder calor rapidamente e sua temperatura pode ser tão reduzida que a queima cessa antes que se complete.

Isto vai acontecer por exemplo, quando um forno é ligado frio. Outro resultado de uma câmara de combustão fria será o alongamento da chama por causa das reações químicas mais lentas em temperatura reduzida. Do mesmo modo, paredes refratárias quentes vão irradiar o calor de volta para a chama, aumentando sua temperatura e a intensidade de combustão, dando uma chama menor e mais intensa. De maneira semelhante, se o calor é irradiado para a base da chama ele vai reduzir a zona de pré-aquecimento, novamente aumentando a intensidade da combustão.

Enquanto que a turbulência inicial pode ser gerada pelo queimador, seu desenvolvimento pode ser alterado pela proximidade das paredes da câmara. Além de fazer uma boa mistura do combustível e do oxidante, a turbulência tem o efeito de fazer com que os gases quentes e os intermediários da combustão retornem para a zona de ignição, com a conseqüente redução no tempo de ignição.

A maneira de introdução do ar secundário também pode afetar a forma, intensidade e estabilidade da chama.

Se o ar secundário é adicionado com alta turbulência, isto aumentará a turbulência dando uma chama menor e mais intensa a ignição mais estável. Se o ar secundário é adicionado rápido demais a uma chama que queima devagar, ele pode ter um efeito de esfriamento brusco e portanto o ar secundário é normalmente adicionado em etapas. Do mesmo modo, o ar secundário em excesso pode ter um efeito de esfriamento em qualquer chama. Este efeito pode ser reduzido se usarmos ar secundário quente.

A combustão de gás de óleo vaporizado, óleo pulverizado ou sólido pulverizado, pode ser considerada semelhante no aspecto que a combustão ocorre na fase gasosa.

A combustão de combustíveis sólidos tanto nos leitos fixos como nos fluidizados depende mais da transferência de massa sólido/gás do que da mistura na fase gasosa.

3.1 - QUEIMADORES DE GASES

Os gases podem ser classificados em termos de velocidade da chama e do índice de Wobbe para propósitos de projeto do queimador.

O índice de Wobbe é uma medida de energia do gás que passa através de um determinado orifício com uma determinada queda de pressão.

Os gases combustíveis são frequentemente divididos em três grupos:

Tabela 3.1 - Grupos de índice de Wobbe

Grupo	Índice de Wobbe (MJ/m ³)	velocidade de chama	A/C (vol)	exemplo
1	24,4 - 28,8	alta	3~4	gás de rua
2	48,2 - 53,2	baixa	7~8,5	gás natural
3	72,6 - 87,6	baixa	~25	GLP

Além desses gases distribuídos, existem os gases de baixo poder calorífico (gás de gasogênio) que são produzidos e queimados no mesmo local. Estes podem ser produzidos para utilização num processo perto do local de produção, ou serem produtos secundários de outros processos como por exemplo o gás de alto forno ou gás de forno de coque.

Os gases de baixo poder calorífico tem uma grande relação de volume/energia para serem economicamente distribuídos.

O gás do gasogênio caiu em desuso na década de 50 e nas últimas décadas voltou com um papel maior em alguns países, incluindo o Brasil.

Por causa da grande disponibilidade de gás natural, há uma tendência mundial em deslocar-se os gases do grupo 1 para o grupo 2. Devido aos altos índices de Wobbe, a capacidade de um sistema de distribuição em unidades de calor é aumentada através da mudança de gases do grupo 1 para o grupo 2. Onde o gás natural não é disponível há tendência de produzir gases baseados em metano, extraídos do carvão ou do óleo.

O metano tem uma razão ar de combustão/volume combustível cerca de duas vezes a do gás de carvão. Assim, o gás vai precisar de uma velocidade maior para arrastar seu ar de combustão do que aquela exigida pelo gás de carvão.

No caso de GLP a velocidade de chama é semelhante à do metano, mas o poder calorífico por volume e a razão ar/combustível por volume serão maiores.

Tipos de queimadores de gases

Podemos classificar os queimadores de gás em 3 tipos básicos, conforme a maneira em que é misturado o ar e o gás combustível:

- queimadores de chama de difusão
- queimadores com pré-mistura
- queimadores com bicos de mistura (ou de mistura direta).

Queimadores com chama de difusão

Num queimador de chama de difusão o gás sai do bico para a zona de combustão com velocidade suficiente para arrastar dos arredores seu ar de combustão e dar uma chama da intensidade exigida. Alguns queimadores, especialmente os de pequenos tamanhos, dão uma chama permitindo uma grande área para a difusão do ar, e portanto, uma chama muito intensa.

Quando os gases do grupo 2 ou 3 são empregados num queimador de difusão, a tendência é a chama se apagar na saída antes que ela possa arrastar uma quantidade útil de ar. Nêste caso, utiliza-se então estabilizadores de chama na forma de jatos piloto que fornecem calor e espécies ativas para a base da chama, ou na forma de promotores de recirculação que fornecem calor e intermediários de cadeia para a base da chama principal, o que permite que a estabilidade da chama seja mantida com valores úteis de fluxo de gás.

As chamas difusoras são usadas em queimadores pequenos porque elas são estáveis, silenciosas, tem boa faixa de controle e não requerem um ajuste de entrada de ar e de gás. Alguns tipos de queimadores de difusão são mostrados na figura 1.

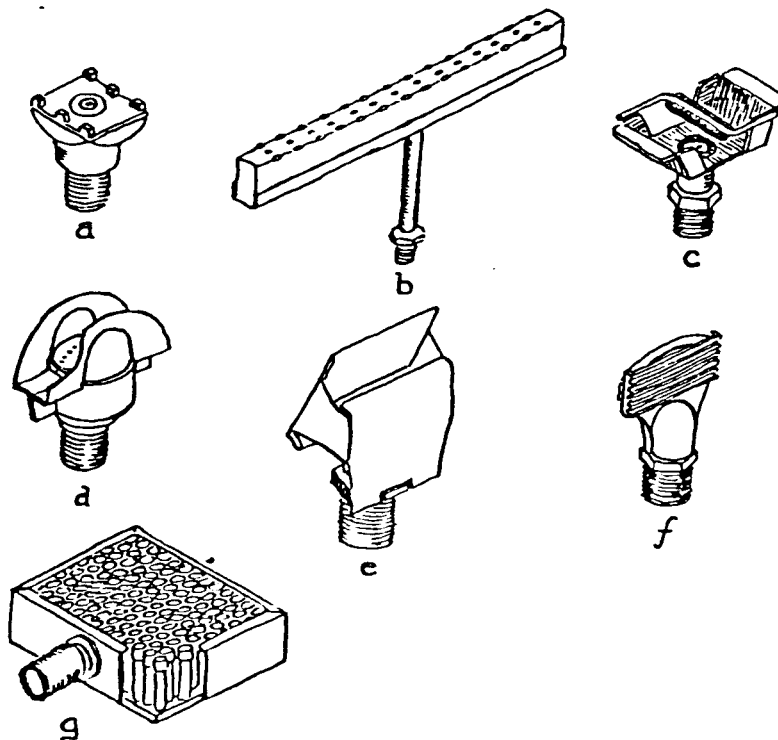
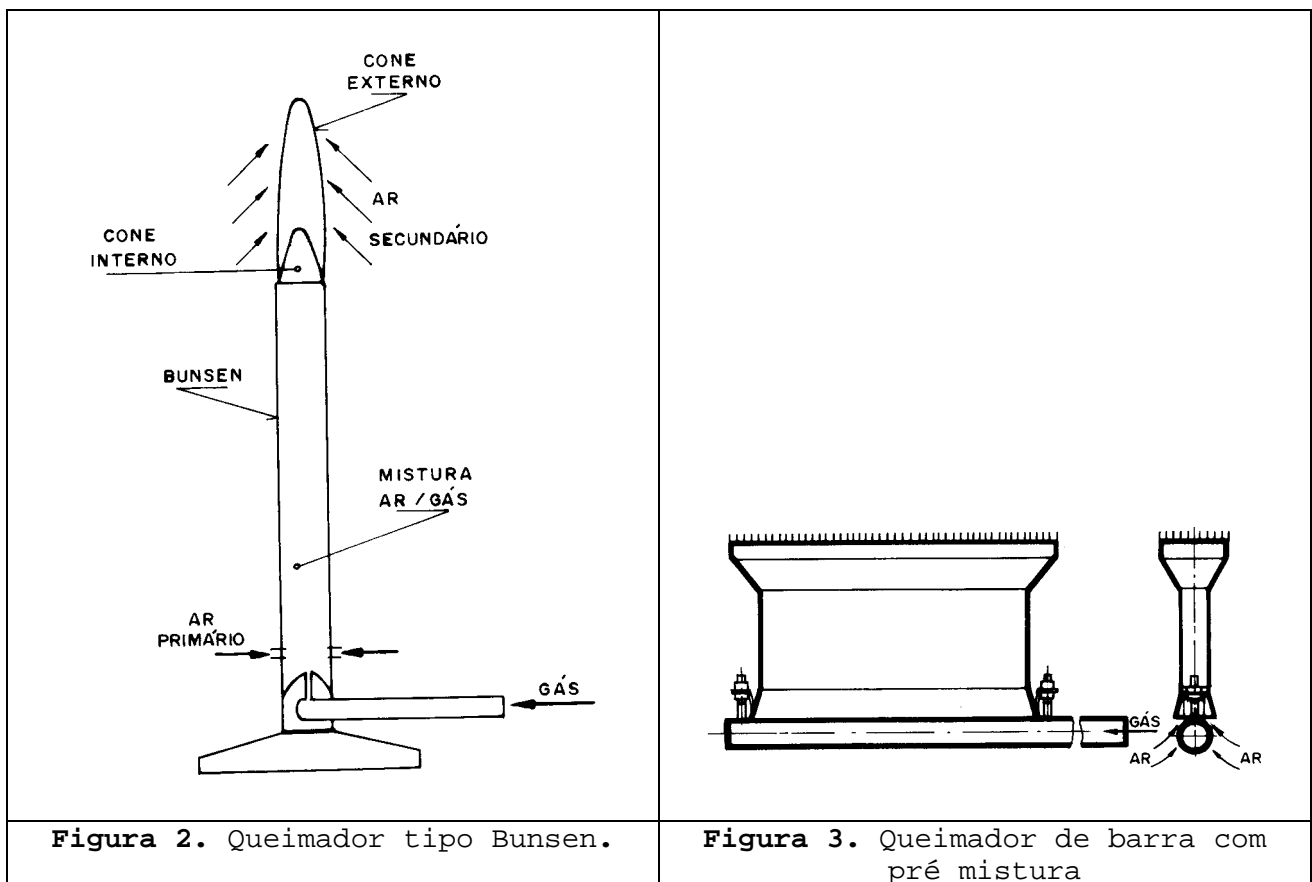


Figura 1. Alguns tipos de queimadores de difusão

Queimadores com pré-mistura ou ventilados

O tipo básico do queimador com pré-mistura é representado pelo queimador Bunsen (figura 2), e este é apropriado somente para uso em pequeno tamanho por causa da possibilidade de retorno de chama dentro do tubo em queimadores maiores. A pressão do gás através de um orifício, arrasta o ar para o tubo de mistura. Com a pressão do gás encanado (ou GLP na pressão reduzida), apenas 50% do ar de combustão é arrastado; o restante precisa ser fornecido como ar secundário. Queimadores de barra (figura 3), são queimadores do tipo Bunsen, com orifícios múltiplos. Utilizando cerâmica porosa ou perfurada ou tela na boca do queimador, pode-se realizar a combustão na superfície.



Os queimadores com pré-mistura geralmente estão disponíveis em tamanhos pequenos, mas também podem ser usados em grupos e queimadores de barra para caldeiras, fornos de fundição de metal, etc. A aplicação típica de queimadores pré-misturados é em fogões domésticos e industriais.

A velocidade da chama de um gás tem considerável efeito sobre o projeto do queimador; com um gás de chama de alta velocidade é fácil produzir-se uma chama estável, mas o retorno de chama pode ser um problema, e em alguns queimadores maiores podem levar a detonações perigosas. Em geral os gases com chama de alta velocidade vão conter alta porcentagem de hidrogênio, por exemplo, gás de rua, de carvão ou de

nafta. Gráficos de estabilidade de chama (diagrama fuidge) estão representados na figura 4.

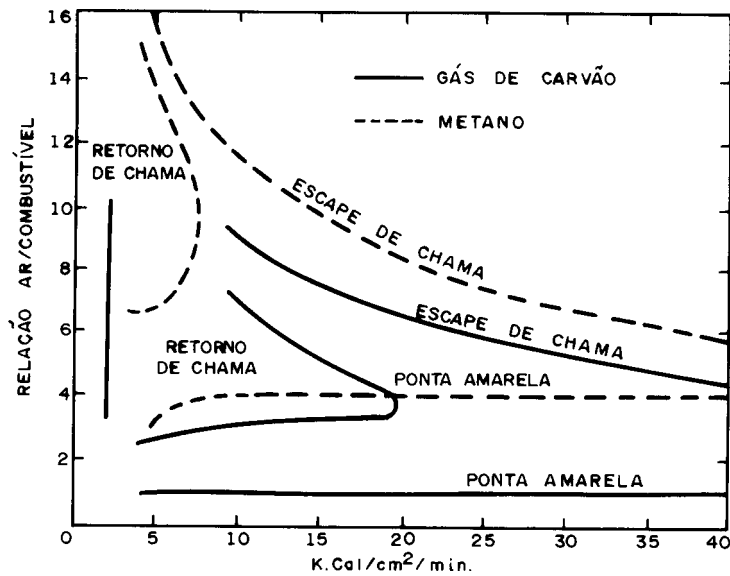


Figura 4. Diagrama Fuidge.

Com o gás cuja chama é de baixa velocidade, o retorno da chama já não é um problema sério, mas os limites de inflamabilidade (relação ar/combustível) ficam mais próximos e a saída da chama se torna um problema importante. Um gráfico de predição da estabilidade de chama é mostrado na figura 5.

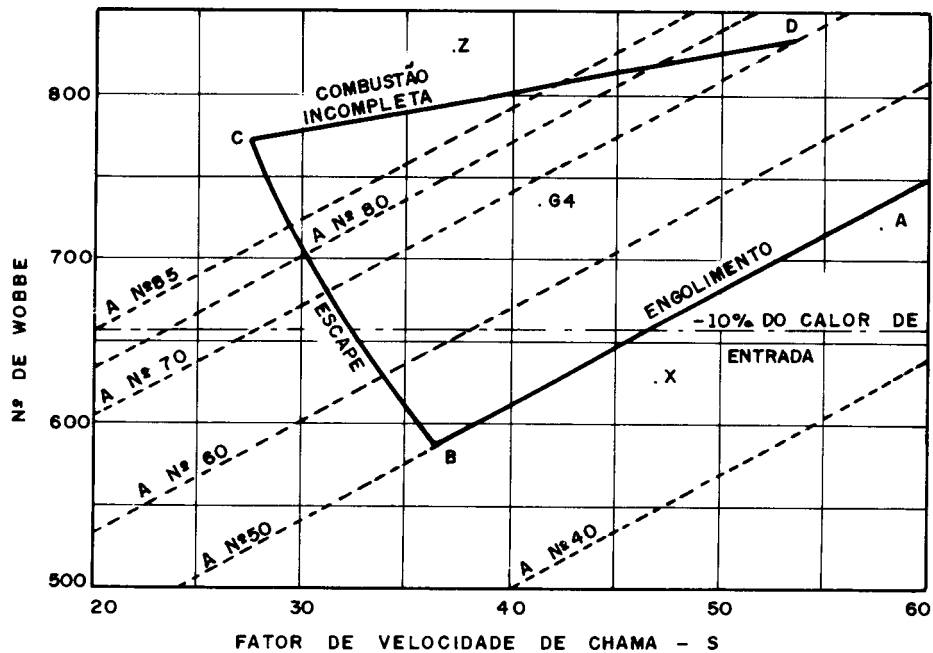


Figura 5. Diagrama de predição de chama

Queimadores com bicos de mistura (Nozzle Mix Burners)

São aqueles em que o gás e o ar são misturados no ponto em que ocorre a combustão (figura 6). Geralmente estes queimadores são empregados em grandes capacidades à medida em que não há nenhuma possibilidade de retorno de chama. Os queimadores com bicos de mistura podem ser do tipo de registro, onde a combustão ocorre na saída do queimador, ou do tipo de queimadores em túnel onde a combustão ocorre num tubo refratário.

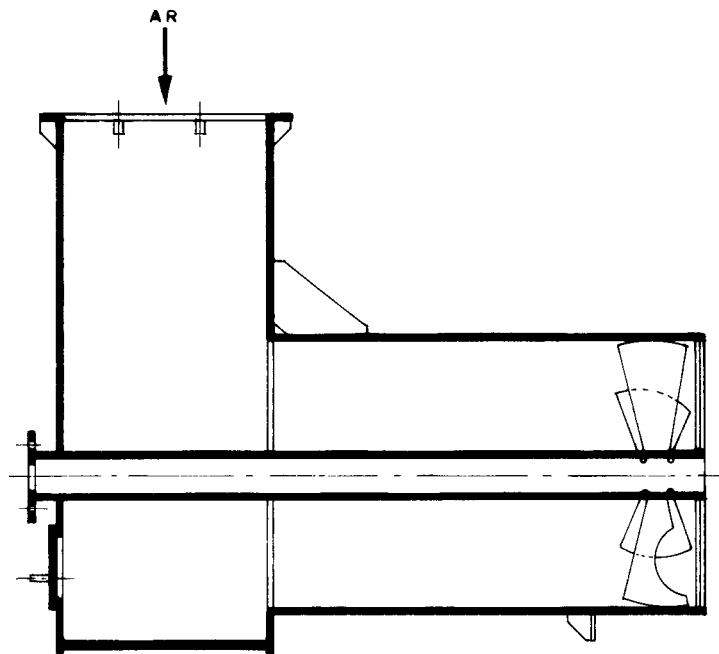


Figura 6. Queimador com bico de mistura

Queimadores de registro

O queimador de registro simples consiste em um injetor de gás rodeado por uma entrada de ar e a combustão ocorre na frente do queimador. Normalmente é necessário um dispositivo de estabilização de chama, como por exemplo, nas pequenas unidades, uma grade estabilizadora.

Nas unidades grandes, a turbulência, um obstáculo ou a forma da câmara de combustão podem ser utilizadas para fornecer a estabilização da chama. As posições da entrada de ar e do gás podem ser trocadas (não é comum), ou pode haver entradas múltiplas de gás ou de ar.

O queimador de registro tanto de tamanho pequeno como de tamanho grande, pode ser adaptado para queimar dual de óleo e gás (figura 7).

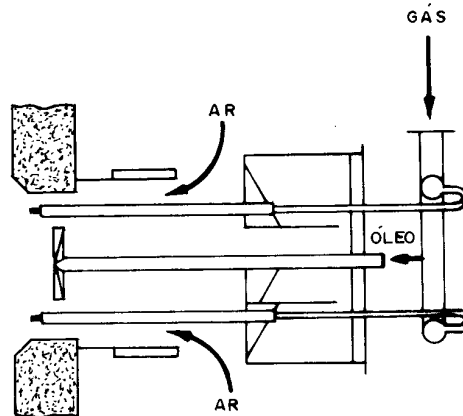


Figura 7. Queimador DUAL óleo e gás.

Queimadores em túnel

Nos queimadores de túnel a combustão ocorre dentro de um túnel refratário. Este queimador se parece com um queimador de pré-mistura que opera numa condição permanente de retorno de chama. O túnel refratário incandescente minimiza a perda de calor da chama, e portanto,

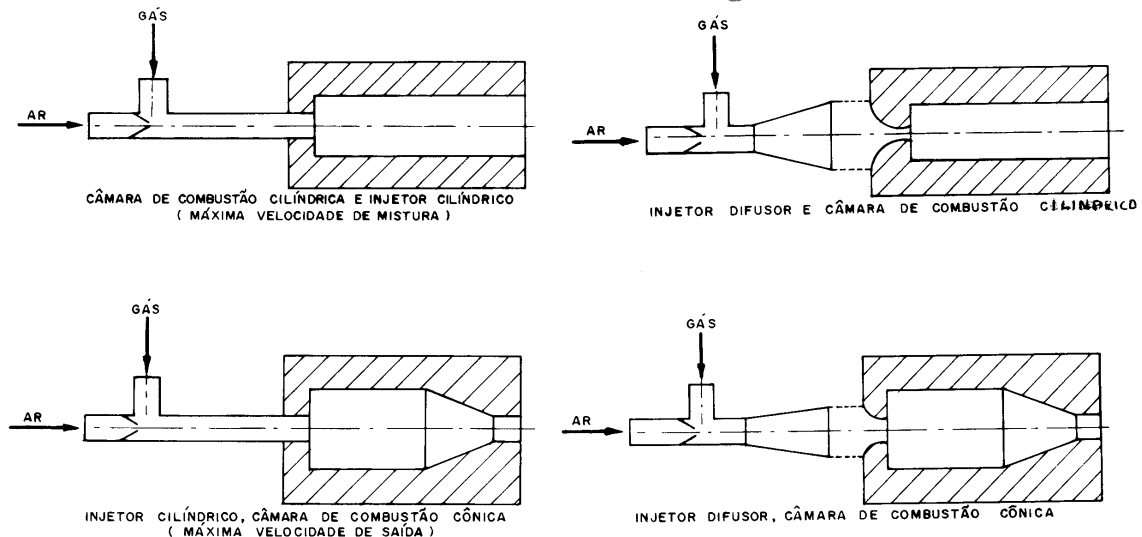


Figura 8. Combinação de injetor e câmara de combustão.

intensifica a combustão.

São em geral, com a pressão do gás regulado para pressão atmosférica ("Zero Governed") com injetor que controla a relação de ar/combustível e o fluxo de gás é induzido pela pressão do ar (figura8).

A forma do túnel utilizado pode alterar a eficiência da perda de pressão do queimador. As mudanças na contrapressão do forno podem fazer necessário uma pequena pressão positiva de gás. Em geral, o acendimento dos queimadores em túnel é difícil. Um método empregado é o de acender a mistura entre o injetor e o túnel e deixar a chama prosseguir para dentro do túnel onde ela se estabiliza.

Queimadores a gás por radiação

Podem ser do tipo de chapa radiante, em que o gás/ar pré-misturado sai passando às costas de um ladrilho poroso ou perfurado (figura 9).

Os queimadores com cuba radiante em que a chama incide sobre uma telha em forma de cuba, alternativamente, um tubo aquecedor radiante que pode ser simples ou com um sf terminal, pode ser usado para dar um aquecimento indireto.

A proporção de calor radiante para o calor convectivo, emitido por um aquecedor radiante direto, raramente é mais do que 15%. O principal emprego dos tubos aquecedores por radiação é quando a contaminação do material com os produtos da combustão não é desejado. Temperaturas até 1500 °C na superfície são obtidas com tubos de cerâmica.

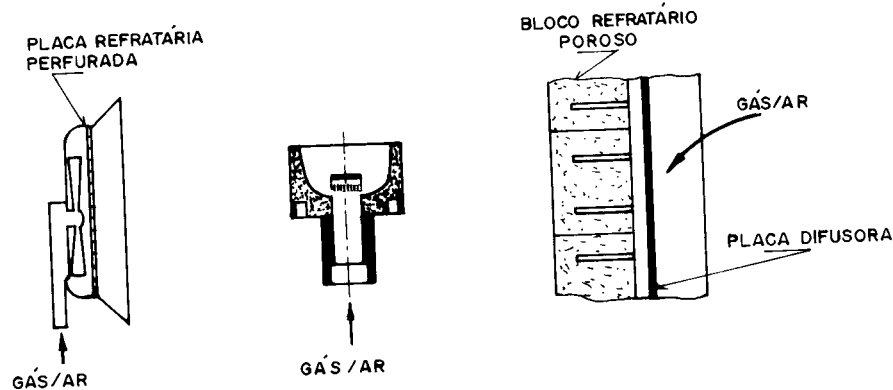


Figura 9. Queimadores típicos de radiação, a gás.

SEGURANÇA E CONTROLE DOS QUEIMADORES A GÁS

Pode ser visto no diagrama da figura 10 que os gases que contêm hidrogênio, apresentam maior risco de ignição, tendo chamas de altas velocidades e maiores limites de inflamabilidade.

O diâmetro de esfriamento, diâmetro mínimo do tubo em que uma chama vai atravessar sem se extinguir, mostra uma variação semelhante.

Tabela 1 - Diâmetro de esfriamento de diversos gases

	com Ar	com Oxigênio
Metano	1 cm	Estes valores
Propano	1 cm	são aproxima-
Butano	1 cm	damente a me-
Gás de rua	0,5cm	tade
Hidrogênio	0,4cm	

É claro que uma chama misturada anteriormente é perfeitamente segura, desde que o diâmetro do tubo de mistura não exceda o diâmetro de esfriamento.

Num tubo de diâmetro maior, um aparelho corta chama que consista em diversos tubos de diâmetro pequeno, um grupo de tubos, ou um pacote de metal enrolado, vai impedir a travessia da chama. Mas na medida em que frente de chama avança dentro de um tubo, ela pode acelerar e formar uma onda de denotação que não vai ser parada por um corta chama.

Portanto, o corta chama deve estar na boca do tubo de mistura.

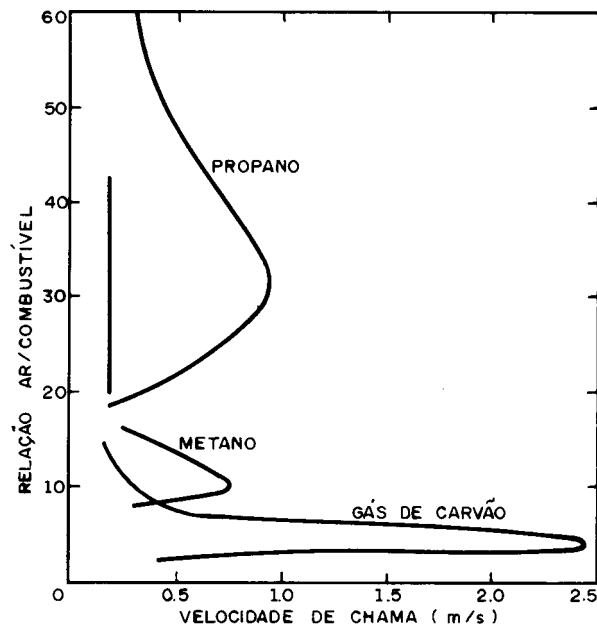


Figura 10. Diagrama de velocidade de chama adiabática horizontal pré-misturada de diversos gases, nas condições normais.

Regras de segurança bem óbvias são aplicáveis aos queimadores a gás (e em menor extensão, à maioria dos outros tipos de queimadores).

A ignição nunca deve ser feita quando pode haver um volume considerável de mistura combustível na câmara de combustão, causado por:-

- Vazamento de gás durante os períodos de inatividade;
- Uma tentativa de ignição sem sucesso;

- Perda de combustão.

Num queimador novo, ou depois que a manutenção tenha sido feita, as linhas de conexão vão conter ar, portanto, a mudança para o gás pode envolver uma mistura combustível num dado ponto. Todas as linhas deveriam ser purgadas antes do funcionamento, tanto com:-

- Um gás inerte
- Gás de combustão escapando através de um corta chama ou através de um maçarico de bico menor do que o diâmetro de esfriamento.

Ao promover ignição numa câmara de combustão deve ser observado as seguintes operações:

- 1) Purgue com ar para remover o gás de combustão da câmara;
- 2) Verifique o funcionamento do sistema de ignição;
- 3) Ligado o piloto ou o gás principal de baixa porcentagem, verifique a presença da chama;
- 4) Ligar a chama principal na potência normal. Verifique a presença da chama.

Se alguma vez correr o apagamento da chama, o fluxo de gás deve ser interrompido e a câmara de combustão deve ser purgada com ar. Então o ciclo de ignição deve ser recomeçado.

Nos queimadores industriais esta sequência de segurança é automática. A presença de chama pode ser detectada por:

- sensor de ionização;
- célula fotoelétrica (I.R. ou U.V.)

QUEIMADORES DE ÓLEO

Em geral, os queimadores a óleo são semelhantes aos queimadores a gás, pois são feitos para queimar o óleo na fase de vapor. Isto se aplica para a combustão de gasolina, querosene ou óleo destilado, os quais podem ser vaporizados diretamente do líquido, ou via um pulverizador que produz gotículas que são totalmente vaporizados antes de entrarem na zona de combustão.

Para os óleos combustíveis mais pesados a vaporização é lenta e na maioria dos casos deixa um resíduo sólido que na temperatura de combustão deve ser carbono. Dependendo da viscosidade do óleo, a proporção vaporizada será maior ou menor; além disso vai haver o craqueamento que irá produzir um resíduo de carbono, o qual apresenta queima lenta, fazendo que a chama se torne luminosa e de grande emissividade. Para muitos propósitos, especialmente em fornos metalúrgicos, a alta radiação da chama é vantajosa. Quando a transferência térmica convectiva é utilizada, prefere-se em geral uma chama não luminosa.

A viscosidade dos óleos mais pesados e de alcatrões combustíveis é tão elevada que eles tem de ser aquecidos até 100 a 200 °C (dependendo do tipo) antes que possam ser bombeados ou pulverizados. O aquecimento do líquido e temperaturas mais altas que 260 °C pode causar mudanças na estrutura do combustível com craqueamento e formação de carbono.

QUEIMADORES PULVERIZADORES

Os queimadores pulverizadores são disponíveis em tamanhos de cerca de 15 kw para cima. Uma desvantagem dos tamanhos menores é o pequeno tamanho do orifício de controle do fluxo ou jato atomizador que é necessário, com conseqüente risco de entupimento.

Os pulverizadores podem ser divididos em três tipos:

- Jato de pressão com fluxo constante ou fluxo variável;
- Pulverizador de 2 fluídos para pressão baixa, média e alta.
- Copo rotativo;

Queimador a jato de pressão

O queimador a pulverização mecânica ou jato de pressão produz gotículas de combustível pela passagem do óleo num pequeno orifício. As gotículas são formadas pela alta velocidade do jato de óleo saindo do orifício de encontro a massa de ar ambiente. De modo geral, quanto maior a velocidade relativa entre líquido e ar, menor deve ser o tamanho médio das gotas.

O pulverizador a jato por pressão é provavelmente o tipo mais usado, sendo que suas desvantagens são as de requerer boa filtragem do combustível nos tamanhos menores e que devido ao fluxo ser proporcional a $P^{1/2}$ e o tamanho da gotícula a $1/P$, ele é inflexível na variação do fluxo se o tamanho da gotícula tiver que ser mantido. Os métodos para se superar isto são:

- nas unidades pequenas, controle "liga/desliga",
- nas unidades maiores, pode ser usados os jatos múltiplos controlando a taxa de potência, variando-se a quantidade de pulverizadores em uso.

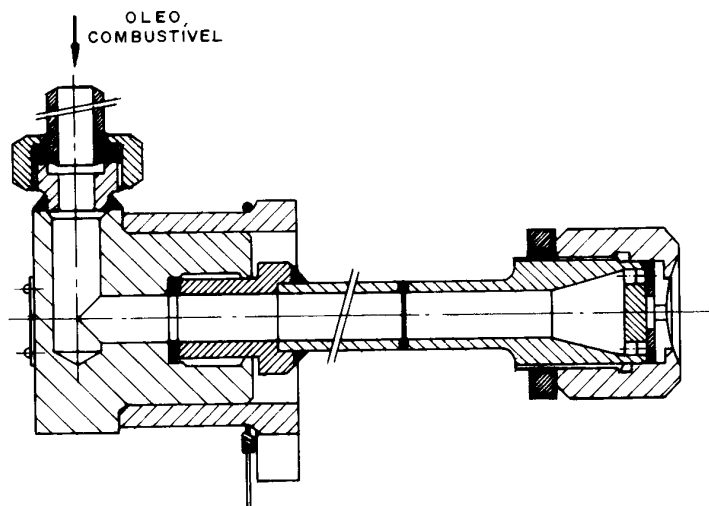


Figura 11. Queimador a óleo com atomização mecânica.

Existem alguns tipos de pulverizadores a jato de pressão com recirculação de óleo ou com orifício variável que pode dar uma faixa de variação de fluxo maior, sem mudança dos tamanhos das gotas. O uso

destes não é muito comum. Um exemplo de pulverizador a jato de pressão é mostrado na figura 11

Pulverizador de 2 fluídos.

Os pulverizadores de 2 fluidos se utilizam de um fluido auxiliar, geralmente ar ou vapor, para provocar a pulverização do óleo. Um jato de fluido auxiliar corta o jato de óleo provocando a quebra das gotículas. Novamente é a velocidade relativa dos fluidos que vai comandar o tamanho das partículas.

Os pulverizadores de 2 fluídos não requerem dimensões tão precisas para manterem o desempenho e são menos suscetíveis ao bloqueio do que os pulverizadores a jato de pressão, sendo portanto, mais apropriados para combustíveis de alta viscosidade.

Existem três tipos de pulverizadores de 2 fluídos:-

- Pressão baixa - O ar é fornecido por um ventilador para pressões < 10 kPa (0,1 atm) . Até 30% do requisito de ar pode ser necessário para a pulverização, o qual pode ser feito em muitos estágios;
- Pressão média - Utilizam ar entre 7 e 100 kPa (0,07 a 1 atm). O volume de ar utilizado é da ordem de 5% da quantidade total;
- Pressão alta - Pode utilizar ar ou vapor levemente superaquecido, como fluido pulverizador. Cerca de 2 a 3% da quantidade total necessária é utilizada para a pulverização em pressões acima de 100 kPa (1 atm).

As figuras 12 e 13 apresentam dois tipos de pulverizadores a 2 fluídos.

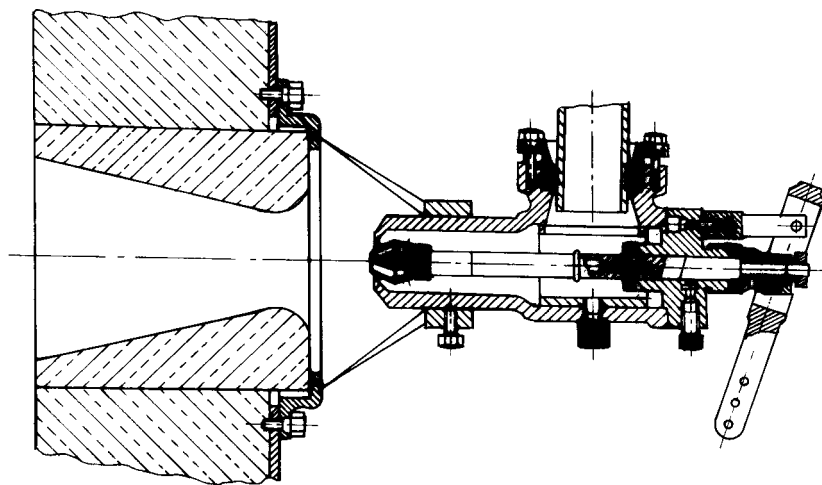


Figura 12. Queimador a óleo com pulverização a vapor.

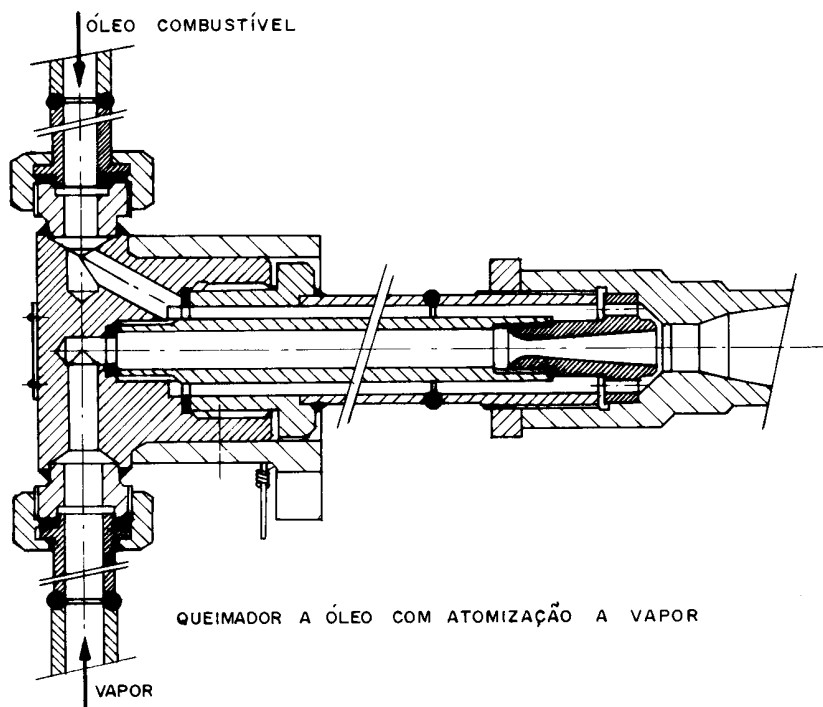


Figura 13. Queimador de pulverização a ar
Pulverizador com copo rotativo.

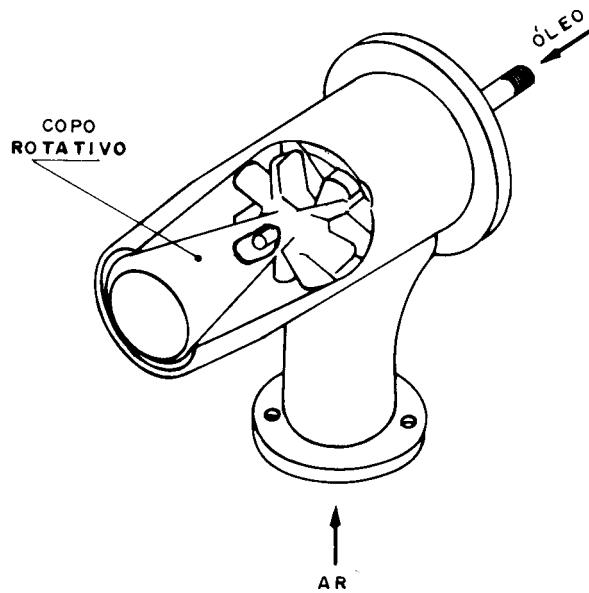


Figura 14. Queimador de copo rotativo.

Neste tipo de óleo é introduzido para o centro de um copo que gira rapidamente até 5000 rpm. à medida que o óleo é arremessado da borda do copo num disco fino, ele é pulverizado pela corrente de ar primário (10% do total), figura 14.

PROPORÇÃO DE AR PRIMÁRIO/SECUNDÁRIO

Uma pulverização "grossa" pode ser empregada deliberadamente a fim de alongar a chama, embora sempre possa provocar o aumento da emissão de material particulado. A presença de gotículas maiores também vai aumentar a proporção de craqueamento antes da vaporização e daí aumentar a radiação da chama. Um queimador para um forno de cimento é um exemplo onde a pulverização "grossa" é empregada.

Se for necessário usar um alto grau de pré-aquecimento do ar, este precisa ser feito principalmente através do ar secundário, pois a alta temperatura do ar primário pode causar craqueamento do óleo. Portanto, se utilizamos pré-aquecimento do ar de combustão, o pulverizador com jato por pressão e o pulverizador de dois fluídos com alta pressão, apresentam a vantagem de que todo ou quase todo ar é fornecido como ar secundário e portanto, pode ser usado para fornecer o pré-aquecimento, quando necessário.

ESTABILIZAÇÃO DA CHAMA

A chama é estabilizada pelo fornecimento de calor e intermediários das reações da combustão para a zona de ignição. O calor pode ser fornecido pela radiação de um cone de refratário quente ou como é mais frequente, junto com a recirculação dos gases quentes da combustão, quando voltam para a base da chama. A recirculação é em geral interna. Em escala industrial, em geral, a recirculação interna é feita por uma turbulência rotacional no ar secundário ou pela utilização de um obstáculo, que pode ser o injetor de óleo.

Geralmente, quanto maior a quantidade de recirculação rotacional, maior será a estabilidade da chama e menor e mais intensa a chama.

Uma turbulência relativamente alta e pulverização "grossa", produzirão uma chama comprida e bem estável.

Queimadores de pequeno porte podem utilizar um obstáculo como estabilizador de chama que atua tanto como "bluff body" como promotor de turbulência rotacional.

A quantidade de ar para combustão estequiométrica de óleo reside na faixa de 13-15 kg de ar por quilo de óleo. Num forno industrial otimizado é possível manter-se a exigência de ar excedente abaixo de 20%, e nas instalações grandes tal como nas caldeiras de uma termoelétrica, pode ser possível reduzir-se o excesso de ar para baixo de 5%, e assim reduz-se a formação de SO_x .

A formação de fumaça nos queimadores a óleo, pode ser sinal de:
- insuficiência de ar para a combustão, a qual pode ser absoluta ou local, devido a uma mistura inadequada;

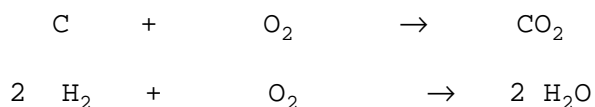
- resfriamento da chama. A chama é esfriada abaixo da temperatura de reação, antes que a reação da combustão seja completada. Isto pode ser causado por:

- formação fraca da chama; a incidência da chama sobre superfícies frias (pode ser inevitável no primeiro acendimento);
- Gotículas grandes que deixam a zona de combustão antes que a reação esteja completa.
- Excesso de ar de combustão. Se uma quantidade excessiva de ar frio incidir numa chama, pode causar o resfriamento local e a formação de fumaça. Taxas de excesso de ar acima de 50% frequentemente vão causar fumaça;
- Turbulência excessiva. Em certas circunstâncias pode causar a formação de fumaça devido ao escape forçado de partículas da zona de queima, antes que seja completada a combustão.

3.3 - QUEIMADORES DE COMBUSTÍVEL SÓLIDO

O carvão é o combustível sólido mais usado mundialmente e o estudo acerca dos combustíveis sólidos vai ser largamente baseado na combustão do carvão mineral. Outros combustíveis vão ter, em geral, valor calorífico mais baixo tanto em base de massa como de volume, e vão conter frequentemente alta proporção de água. As áreas da grelha e os volumes da câmara de combustão geralmente serão maiores para a mesma potência que para a queima de carvão (coque ou carvão vegetal).

Na combustão do carvão (ou material vegetal), as principais reações depois da devotalização são:



Quando o carvão mineral é aquecido, ele:

- amolece;
- solta material volátil, que queima;
- deixa um resíduo sólido - coque, que queima;
- deixa um resíduo sólido - cinza, que não é combustível.

Os requisitos para um queimador de combustível sólido são:

- fazer contato entre o combustível sólido e o ar de combustão;
- fazer a transferência de calor para o combustível que está entrando para iniciar a combustão;
- fornecer uma proporção adequada de transferência de massa entre o sólido e o ar;
- fazer suficiente mistura dos voláteis e do ar de combustão;
- providenciar a remoção da cinza;
- providenciar uma superfície de transferência térmica para absorver o calor útil;
- fornecer espaço para a combustão completa.

Podemos classificar os queimadores de sólidos em 3 tipos básicos:

- queimadores de combustível pulverizado
- queimadores de leito fixo
- queimadores de leito fluidizado
-

Queimadores de Combustível Pulverizado

O carvão pode ser queimado em partículas minúsculas que se movem com o fluxo de gás.

- A área de contato entre as partículas e o ar é alta;
- A transferência de massa é feita principalmente por difusão, e portanto, é lenta (mas é compensada pela grande área de transferência de massa);

As partículas pequenas vão atingir a temperatura de reação rapidamente, aquecidas pelas paredes laterais ou pela massa da chama através da radiação ou através da recirculação dos gases quentes;

- A mistura dos voláteis e dos gases de combustão é feita por difusão, por micro-turbulência ou pela velocidade de evolução do gás das partículas;
- A transferência de calor é feita por convecção dos gases quentes e por radiação das partículas e do gás da zona de combustão;
- A remoção da cinza é feita por elutriação no fluxo do gás de exaustão ou por sedimentação depois da coalescência das partículas de cinza liquefeitas.

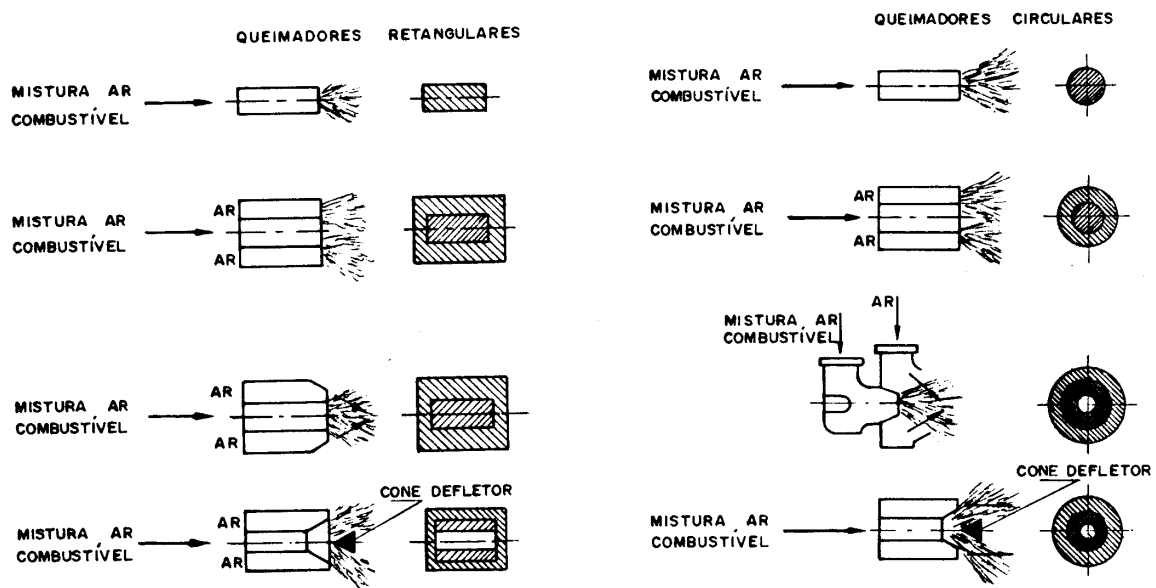


Figura 14. Tipos de queimadores pulverizadores.

No queimador de combustível pulverizado em que as partículas de carvão se movem em suspensão no fluxo de gás, a transferência de massa entre o combustível e o oxidante é uma função da micro-turbulência e difusão, da maneira que ocorre na queima de óleo pesado pulverizado. A semelhança é reforçada por causa da similaridade das características de queima entre uma partícula de combustível pulverizado e uma gotícula de óleo combustível residual.

A partícula típica de combustível pulverizado vai ter um tempo maior de combustão, e conseqüentemente vai dar uma chama mais longa e menos intensa do que a do óleo combustível sob as mesmas condições.

Para combustão e ignição estável é essencial que uma quantidade suficiente de calor seja transferida para a base da chama. Isto pode ser por radiação: do refratário quente, da chama, por recirculação do gás quente ou em geral por uma mistura dos três. Não é possível estabilizar-se uma chama pequena de combustível pulverizado fora da câmara de combustão.

Devido à quantidade de calor necessária para estabilizar a combustão, uma chama de combustível pulverizado precisa ser iniciada por um queimador grande a gás ou a óleo. O queimador utilizado para ignição vai ser em geral retrátil, para evitar danos por superaquecimento quando o queimador de combustível pulverizado estiver em operação.

O tamanho do carvão usado para queima pulverizada varia com as características, sendo da ordem de $85\% < 75 \mu\text{m}$.

Uma vez que é difícil armazenar o carvão pulverizado, ele é geralmente moído até o tamanho adequado, transportado por ar quente que serve para secar o carvão e transportá-lo do moinho para o queimador: O ar de transporte atua como ar de combustão primário. A fim de evitar o depósito de carvão nos tubos de alimentação, é necessário uma velocidade de ar de 20-30 m/seg. Isto está bem além da velocidade de queima de combustível pulverizado da ordem de 10 m/s, e assim evita-se qualquer risco de retorno da chama.

Normalmente a cinza do combustível pulverizado deixa a chama acima de seu ponto de fusão, e portanto, vai aderir às superfícies de troca de calor, a menos que sejam primeiramente resfriadas por radiação.

Alternativamente, a cinza pode ser mantida líquida e removida como escória. Os queimadores de combustível pulverizado são usados em grandes instalações; geralmente não são econômicos em tamanhos abaixo de 12-15 t/h, pois:

- O custo do equipamento de pulverização e de transporte se torna significativo;
- Há a dificuldade de ignição e há falta de estabilidade para chamas pequenas de combustível pulverizado;
- A cinza do combustível pulverizado é difícil de se remover do gás de saída, requerendo precipitadores eletroestáticos que são mais econômicos em larga escala;
- A limpeza regular e frequente dos tubos é necessária nas caldeiras, a fim de se remover os acúmulos de cinza muito fina. Para isto ser feito sem paralização, é necessário equipamento para soprar a fuligem, o que não é econômico numa unidade pequena;
- A taxa de controle é limitada, o "abafamento" é impossível.

A figura 14 apresenta alguns tipos de chama de carvão pulverizado e a figura 15 apresenta um esquema de uma câmara de combustão de carvão.

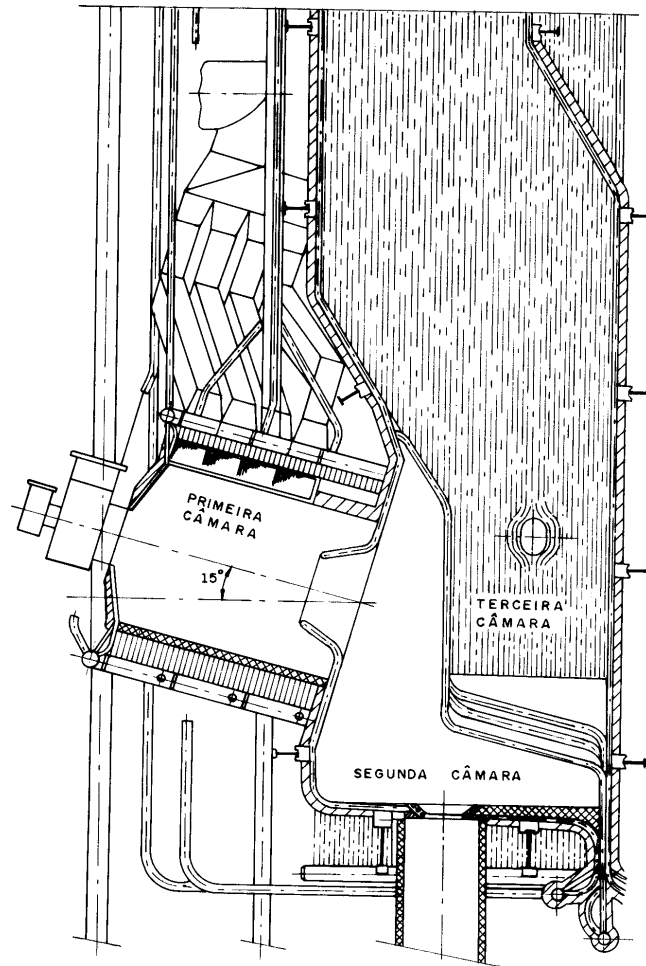


Figura 15. Câmara de Combustão ciclônica para carvão pulverizado, em gerador de vapor

Queimadores de Leito Fixo

- O combustível pode ser apoiado numa grelha:
- A área de contato entre o sólido e o ar é pequena;
 - A transferência de massa entre o ar e o combustível estacionário pode ser boa;
 - O leito fixo de combustível atua como um reservatório de calor mantendo a combustão e promovendo a ignição;
 - Os voláteis são normalmente queimados em cima do leito utilizando-se um fornecimento de ar secundário;
 - A transferência de calor é feita por radiação da superfície quente do leito e por convecção dos gases quentes;
 - A remoção das cinzas é feita por baixo através das barras da grelha ou removendo-se as cinzas e borra da grelha;
- Os tipos de queimadores em que o combustível é queimado numa espécie de grelha são empregados em geral nas unidades pequenas e

médias, com carvão até 12 t/h e em unidades maiores com bagaço de cana até aproximadamente 100 t/h.

Vantagens:

- Boa taxa de controle, facilmente abafado. Não há necessidade de equipamento de pulverização. Não são necessários equipamentos sofisticados para a limpeza do gás de combustão.

Desvantagens:

- Ocupa volume do forno reduzindo a disponibilidade da área de troca de calor. Contém mais peças móveis perto da área de combustão. consequentemente, pode ter grandes exigências de manutenção.

Grelha fixa

Pequenas unidades para combustão de lenha em toras ou pedaços, se utilizam de grelha de barras fixa, ou grelha em escada, figura 16.

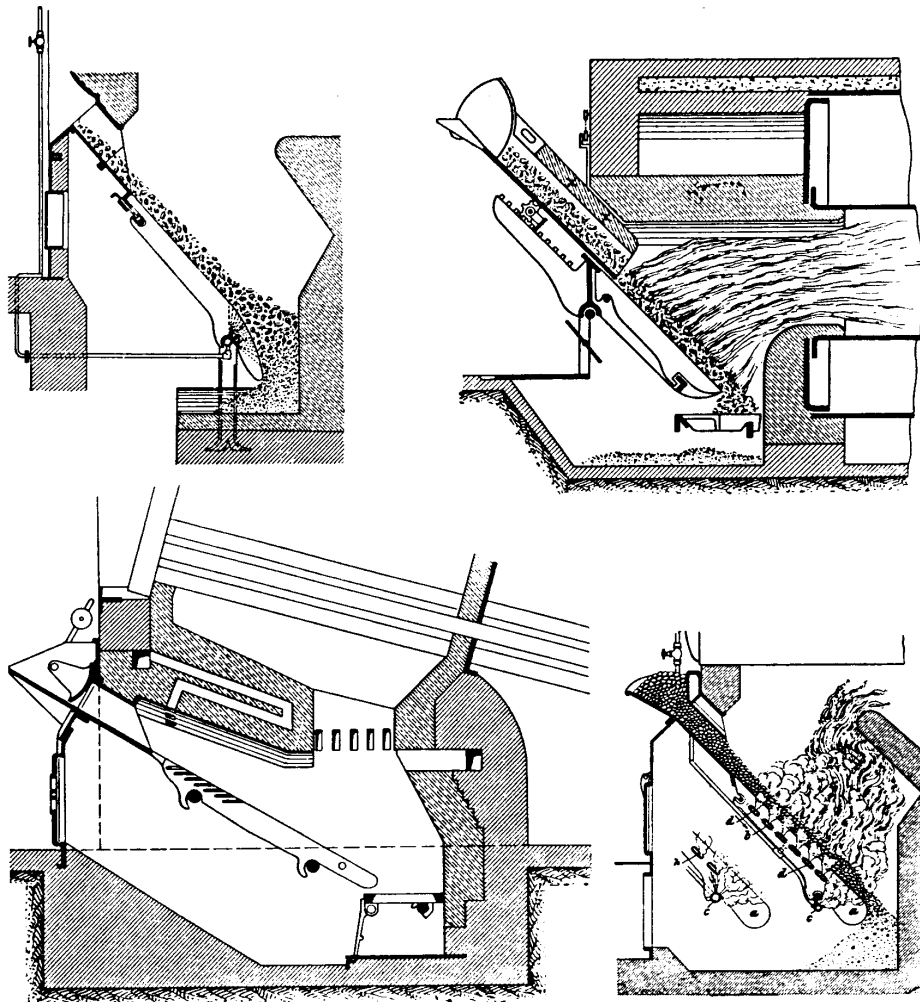


Figura 16. Alguns tipos de grelha em escada

Grelha a Distribuidor, carregada por projeção (figura 17)

O combustível é impelido por um alimentador rotativo ou pneumático para cobrir toda a área de uma grelha móvel. As partículas menores podem queimar em suspensão, sendo que a maior parte de combustível queima na grelha. O ar primário para a combustão é alimentado através da grelha e o ar secundário acima da grelha.

Este tipo de grelha é apropriado para queimar a maior parte dos tipos de carvão e também combustíveis vegetais tal como a serragem ou o bagaço.

Desvantagem: não vai queimar carvão grande ou antracita, tende a perder cinza muito fina por arraste, e também pode perder combustível junto com cinza muito fina.

Em geral, um ciclone vai remover de modo adequado toda a cinza do gás de exaustão.

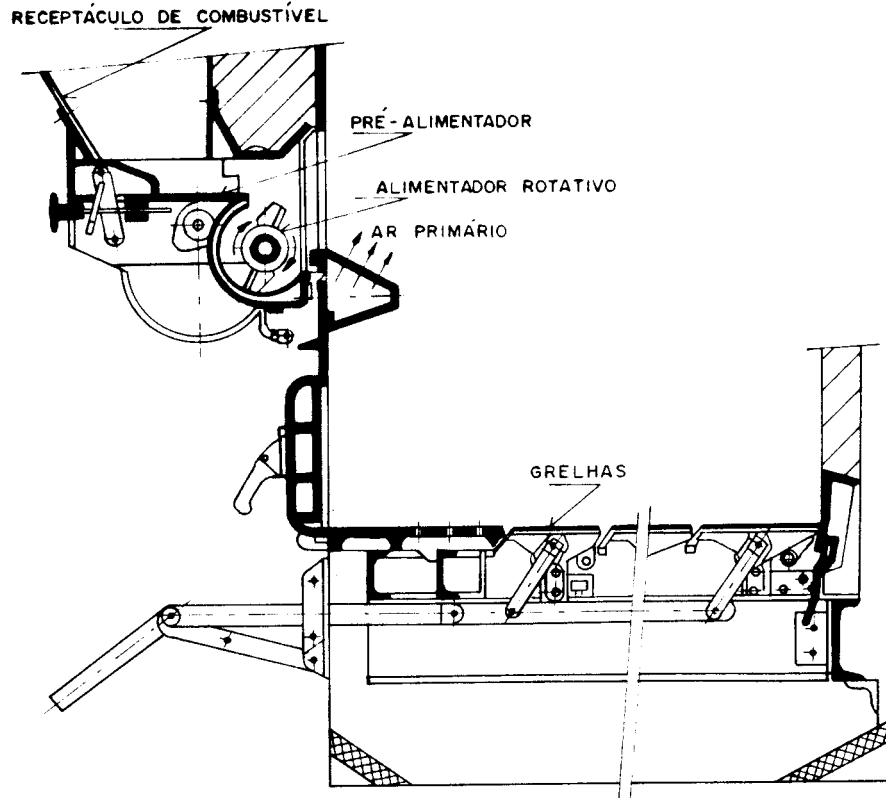


Figura 17. Grelha a Distribuidor, carregada por projeção

Grelha em Esteira (figura 18)

Esta categoria também pode ser utilizada para incluir grelha vibratória ou basculante. Ela é mais usada para as instalações maiores.

As características são:

- Um leito de carvão relativamente fino, controlado por uma guilhotina de até 10 cm de profundidade;
- A ignição é feita por meio de radiação dum arco de ignição acima do leito;
- O ar primário é fornecido por baixo do leito; através das barras da grelha;
- O ar secundário é fornecido acima do leito para queimar os voláteis e o CO. O alimentador em esteira vai queimar eficientemente a maior parte dos tipos de carvão, desde que o tamanho de pulverização seja adequada: 15 a 50 mm.

Um carvão coquificante pode causar má distribuição de ar pela canalização. A presença de finos excessivos também vai causar perda de combustível através da grelha; isto pode ser solucionado, alimentando-se carvão com umidade da ordem de 15%.

Um conteúdo de cinza relativamente alto no carvão é necessário a fim de proteger as barras da grelha do superaquecimento. Em geral, são preferidos os carvões com mais de 7% de cinza.

A faixa de tamanho da grelha em esteira varia até 13 m de comprimento por 2 m de largura.

A taxa de controle é boa e a resposta às mudanças na taxa de queima é rápida.

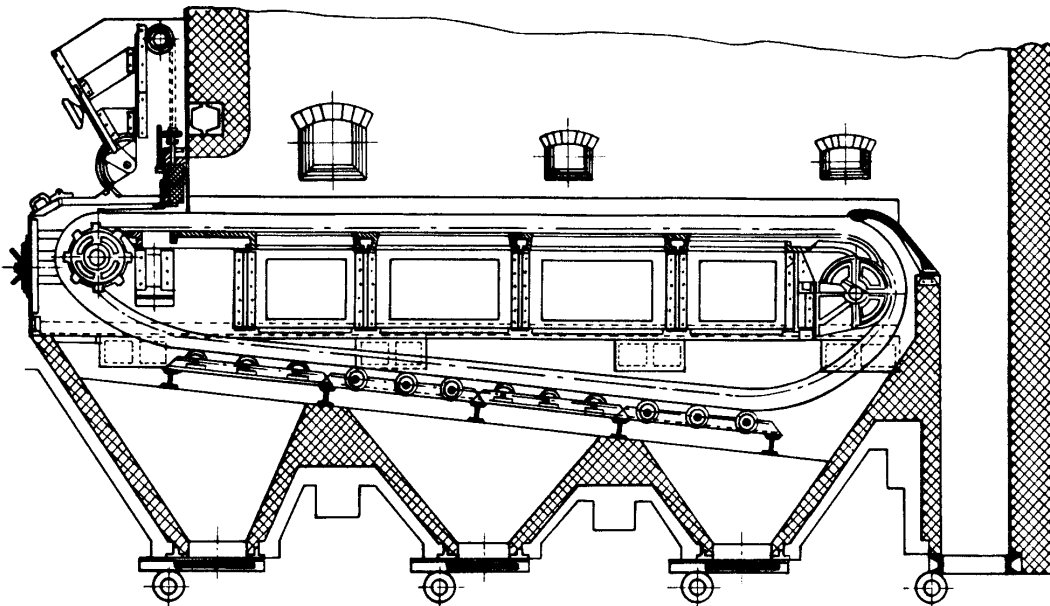


Figura 18. Grelha em esteira rotativa.

Queima de Combustíveis Vegetais em Pilha

A maioria dos combustíveis vegetais tem baixo poder calorífico, reduzido ainda mais por seu alto conteúdo de umidade, mas em geral eles deixam pouca quantidade de cinza após a combustão. Um tipo de forno utilizado em geral, para o bagaço ou para resíduos de madeira empregada a alimentação de combustível por gravidade, formando uma pilha de combustível.

O fornecimento de ar é feito através de aberturas nas paredes da câmara de combustão; o ar primário pode ser fornecido por baixo da grelha, mas nem sempre. A figura 19 apresenta exemplo de forno deste tipo.

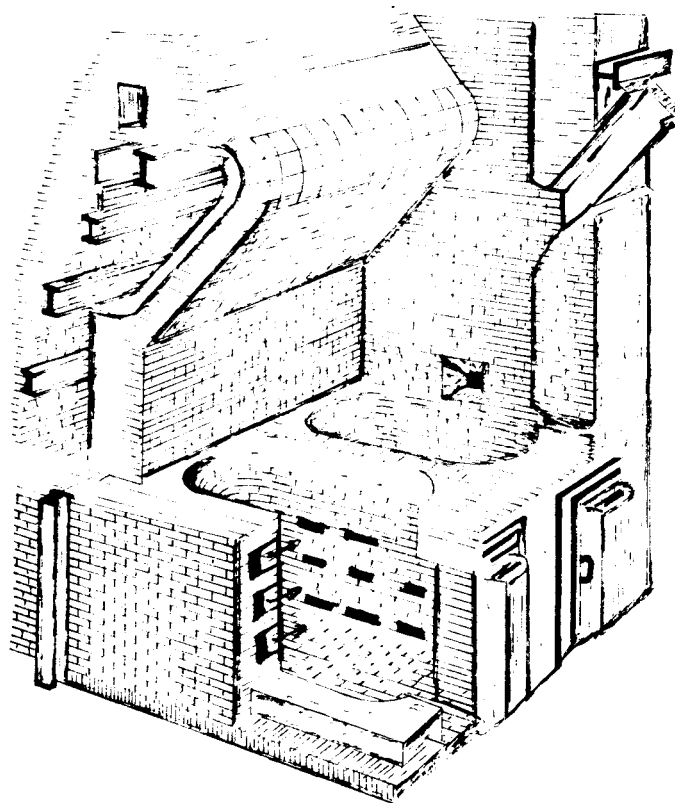


Figura 19. Fornalha Ward para queima de bagaço de cana, em pilha.

Queima fluidizada

Se num leito fixo a velocidade do ar é aumentada e o tamanho da partícula é reduzido, a velocidade de transferência de massa e de combustão vai ser aumentada. No caso limite as partículas de combustível vão ser suportadas pelo fluxo de ar (figura .20).

- A área de contato entre o combustível e o ar é grande (apesar de ser menor do que para o queimador de combustível pulverizado);

- A transferência de massa entre o combustível e o ar é feita por convecção forçada;
- O leito atua como um reservatório de calor, assegurando uma ignição rápida, e uma combustão eficiente;
- Os voláteis são queimados dentro e em cima do leito fluidizado;
- A transferência de calor é feita principalmente por condução (e radiação) para as superfícies imersas no leito e por convecção dos gases de exaustão quentes;
- A cinza vai se acumular no leito ou vai ser elutriada.

Se um gás flui para cima através de um leito de partículas sólidas, a resistência ao fluxo vai ser uma função da velocidade do gás e do espaço livre entre as partículas.

O espaço livre sai uma função do tamanho e da disposição da partícula:

- Se a velocidade do gás é aumentada de forma que a resistência ao fluxo aproxima-se do peso do leito, as partículas vão primeiro se arranjar no leito para minimizar a resistência ao fluxo de gás.
- Quando a velocidade do gás é aumentada ainda mais, de forma que a resistência ao fluxo se iguale ao peso do leito, as partículas passam a ser suportadas pela corrente de gás (fluidização incipiente);
- a medida que a velocidade do gás é aumentada, ainda mais a distância entre as partículas aumenta, e as partículas circulam dentro de leito. As bolhas de gás vão aparecer dentro do leito;
- Um maior aumento da velocidade do gás vai aumentar o tamanho e número das bolhas de gás de forma que algum gás pode passar através do leito sem contato eficiente entre esse gás e os sólidos (leito em fluidização turbulenta);
- A velocidade limite do gás para a fluidização é aquela em que as partículas são arrastadas do leito pelo fluxo de gás.

Dentro de um leito fluidizado a transferência de massa e de calor entre o gás, as partículas e as superfícies com as quais estão em contato são boas. A mistura é boa em paralelo ao fluxo de gás; menos boa no sentido transversal ao fluxo de gás. O leito se comporta como um fluido e uma densidade aparente pode lhe ser atribuída.

A fluidização ocorre entre a velocidade mínima em que a força total de arrasto é igual ao peso do leito e uma velocidade máxima relacionada à velocidade terminal de queda das partículas.

Assim, num leito composto por partículas de tamanho (ou densidade) mistas, as partículas menores ou de densidade menor, vão ser elutriadas do leitor, preferencialmente.

A queda de pressão no leito é dada por:

$$\Delta P = H_z (1 - \phi)(\rho_s - \rho_f)$$

H_z = altura do leito

ϕ = porosidade do leito

ρ_s = densidade do sólido

ρ_f = densidade do líquido

Em princípio, é possível queimar-se qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso dentro de um leito inerte quente de partículas fluidizadas. Considerando queima fluidizada de carvão, o conteúdo de combustível no leito sob condições de equilíbrio pode ser da ordem 1%.

Normalmente a temperatura do leito não vai exceder 900 °C, a fim de se manter bem abaixo da temperatura de amolecimento da cinza. Assim, é produzida uma cinza friável e os problemas de erosão são minimizados.

A fim de se reduzir a elutriação do carvão não queimado do leito, o carvão pode ser injetado perto da base do reator.

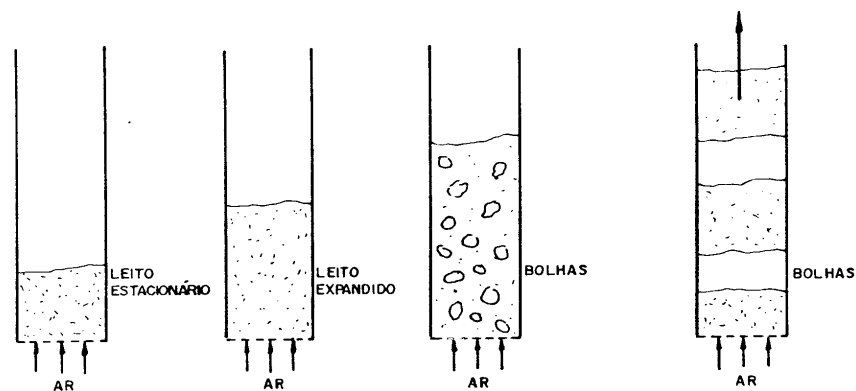
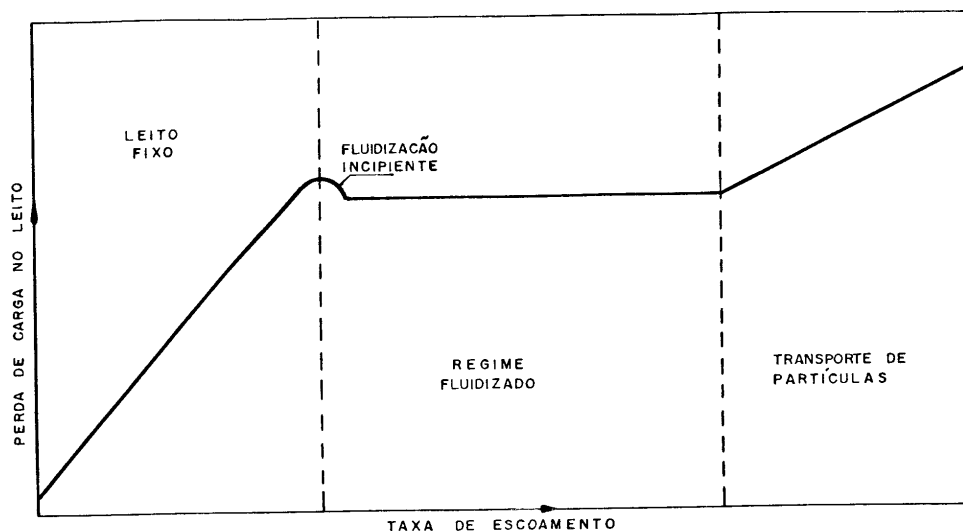


Figura 21. Fases de fluidização em função da velocidade do gás.

Ainda assim, o material elutriado pode conter algum combustível e deve ser reciclado para o leito, ou ser queimado numa câmara de combustão separada.

Não é necessário que o combustível esteja na mesma fase ou na mesma faixa de tamanho do material inerte, por exemplo, é possível queimar carvão em pedaços grandes dentro de um leito fluidizado de material fino. Se a densidade do leito é menor do que a densidade do sólido, as partículas vão queimando em contato com a base e pode causar superaquecimento local.

As taxas de transferência de calor e de transferência de massa são pouco dependentes da velocidade de fluidização acima de uma velocidade crítica correspondente a um leito em ebulição.

Um exemplo de caldeira de leito fluidizado está na figura 22.

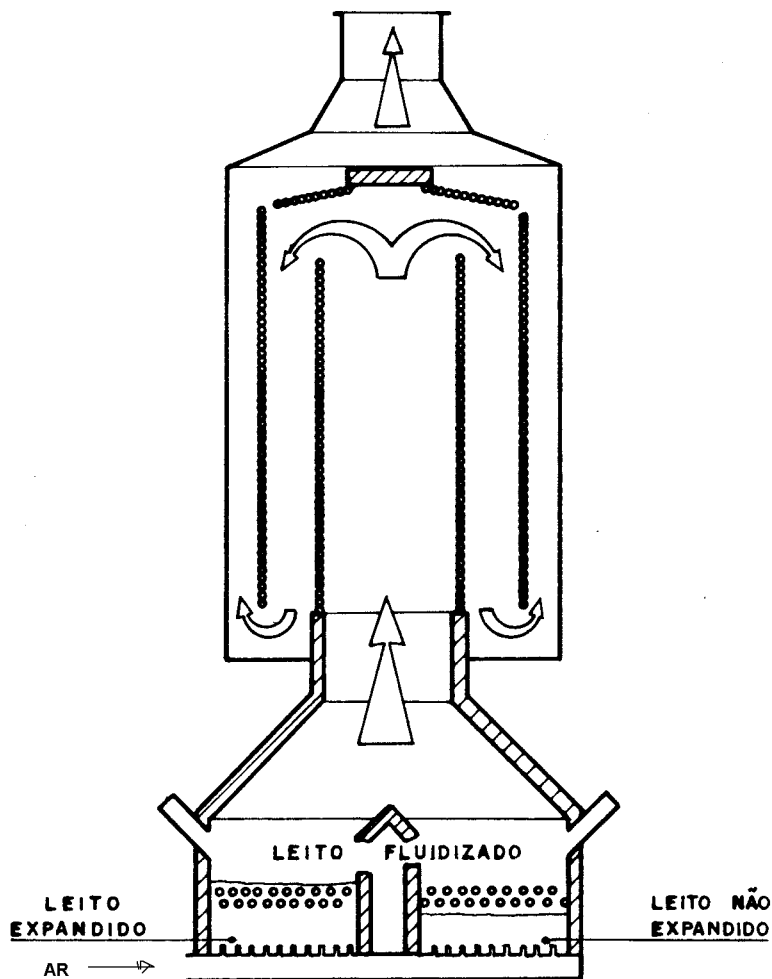


Figura 21. Caldeira de leito fluidizado.