

# SISTEMAS TÉRMICOS DE POTÊNCIA

PROF. RAMÓN SILVA



Engenharia de Energia

Dourados MS - 2013



# COMBUSTÃO EM CALDEIRAS

- A forma mais empregada para assegurar o fornecimento do calor necessário à produção de vapor é por meio da queima de algum combustível, como gás combustível ou lenha.
- Interessa, portanto, apresentar os combustíveis e seu processo de fornecimento de calor, do ponto de vista das reações envolvidas e da geração de energia térmica, que se associam diretamente ao impacto ambiental e à eficiência energética na produção de vapor.

- A combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica rápida entre duas substâncias, um combustível e um comburente.
- As reações exotérmicas são aquelas que liberam energia térmica.
- O combustível é a substância que queima, que se oxida, contendo em sua composição, principalmente, carbono e hidrogênio, e, eventualmente e em menores teores, outros elementos reagentes, como oxigênio e enxofre, ou ainda outros elementos ou compostos que não participam da reação de combustão, como a água.

- Comburente é o componente da reação de combustão que fornece o oxigênio.
- Em geral, é usado o ar atmosférico, que apresenta a grande vantagem de não ter custo de fornecimento.
- Entretanto, o ar contém relativamente pouco oxigênio, existindo 3,76 volumes de nitrogênio por volume de oxigênio (21% em percentagem volumétrica ou 23% em percentagem por peso atômico), além de trazer sempre alguma umidade.

- Os produtos da combustão são tipicamente gasosos. Contudo, os elementos do combustível que não se oxidam ou já estão oxidados vão constituir as cinzas.
- Os combustíveis podem ser classificados de acordo com seu estado físico nas condições ambientes em:
  - sólidos: madeira, bagaço de cana, turfa, carvão mineral, carvão vegetal, coque de carvão, coque de petróleo, etc.
  - líquidos: líquidos derivados de petróleo, óleo de xisto, alcatrão, licor negro (lixívia celulósica), álcool, óleos vegetais, etc.; ou
  - gasosos: metano, hidrogênio, gases siderúrgicos (gás de coqueria, gás de alto forno, gás de aciaria), gás de madeira, biogás, etc.

- Alguns combustíveis podem situar-se em uma ou outra classificação, dependendo da pressão.
- Por exemplo, o gás liquefeito de petróleo, ou GLP, uma mistura de butano e propano, sob pressões relativamente baixas, pode estar no estado líquido.



- O conhecimento básico das reações de combustão permite estimar o requerimento de ar teórico e as condições reais de sistemas utilizando combustíveis.
- Na Tabela 4.1 estão resumidas as reações elementares para o estudo da combustão, correspondentes respectivamente:
  - à oxidação completa e incompleta do carbono, à oxidação do hidrogênio
  - e à oxidação do enxofre.
- É apresentado também o calor liberado em cada reação, por unidade de massa do combustível.



TABELA 4.1 - REAÇÕES BÁSICAS DE COMBUSTÃO

REAGENTES		PRODUTOS	ENERGIA LIBERADA
$C + O_2$	$\longrightarrow$	$CO_2$	+ 8.100 kcal/kg C
$C + 1/2 O_2$	$\longrightarrow$	$CO$	+ 2.400 kcal/kg C
$2 H_2 + O_2$	$\longrightarrow$	$2 H_2O (L)$	+ 34.100 kcal/kg $H_2$
$S + O_2$	$\longrightarrow$	$SO_2$	+ 2.200 kcal/kg S

- Deve ser observado que para cada caso existe uma quantidade determinada de oxigênio; portanto, de ar a ser fornecido.
- A combustão completa quando todos os elementos combustíveis contidos no combustível (C, H, S, etc.) combinam com o oxigênio do ar, fornecendo os produtos finais correspondentes estáveis quimicamente.
- Neste sentido, a segunda reação apresentada para o carbono, com a formação do monóxido de carbono (CO), não é completa.

- Neste sentido, a segunda reação apresentada para o carbono, com a formação do monóxido de carbono (CO), não é completa.
- Fica ainda evidente que a queima parcial do carbono libera bem menos energia que sua total oxidação.
- Na queima do hidrogênio, a água formada pode estar como líquido ou como vapor, sendo apresentada nessa tabela a energia liberada quando está na forma líquida.

- A proporção exata de ar e combustível para uma combustão completa é conhecida como relação *ar/combustível estequiométrica*, uma propriedade característica de cada combustível.
- Por exemplo, a maioria dos derivados de petróleo requer da ordem de 14 kg de ar por kg de combustível, enquanto a lenha seca requer cerca de 6 kg de ar por kg.
- Dependendo da temperatura e da pressão, esta quantidade de ar corresponderá a um determinado volume

- Em termos volumétricos, de interesse para combustíveis gasosos, a relação ar/combustível, em m<sup>3</sup> de ar/m<sup>3</sup> de gás combustível) pode ser estimada pela equação seguinte:

$$(a/c)_{\text{base seca, volume}} = 4,76 (x + y/4 - z/2 + k),$$

- a/c - relação ar/combustível estequiométrica;
- x - teor molar de carbono;
- y - teor molar de hidrogênio;
- z - teor molar de oxigênio; e
- k - teor molar de enxofre.

# COMBUSTÃO EM CALDEIRAS

- Para combustíveis sólidos e líquidos, a quantidade teórica de ar necessária à combustão de um combustível é usualmente apresentada em base mássica (kg de ar/ kg de combustível), podendo ser calculada pela fórmula a seguir, valendo a mesma simbologia da expressão anterior.

$$(a/c)_{\text{base seca, massa}} = \left( \frac{137,28 (x + y/4 - z/2 + k)}{12x + y + 16z + 32k} \right)$$

- Sendo conhecida a composição em massa do combustível, os teores molares (x, y, z e k) podem ser determinados dividindo-se, respectivamente, os teores mássicos ou em peso por 12, 1, 16 e 32, ou seja, pelos pesos molares destes elementos.
- Quando existirem inertes, como cinzas ou nitrogênio, a quantidade de ar requerida, determinada pelas expressões anteriores, deverá ser ajustada proporcionalmente.



TABELA 4.2 - COEFICIENTES MOLARES PARA ALGUNS COMBUSTÍVEIS

COMBUSTÍVEL	COEFICIENTE MOLAR				OBSERVAÇÃO
	x	y	z	k	
Óleo combustível	7,2	12	0	0,06	tipo B1, 2% de enxofre
Gás natural (típico)	1,15	4	0,2	0	85% CH <sub>4</sub> , 10% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> e 10% CO <sub>2</sub>
GLP	3,5	9	0	0	50% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> e 50% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Lenha	4,76	7,2	3,3	0	eucalipto com 30% de umidade
Bagaço de cana	4,02	6,7	2,8	0	
Carvão vegetal	6,19	3,6	0	0	carvão de eucalipto, de boa qualidade
Carvão mineral	7,37	5,7	0	5,7	carvão vapor de Tubarão, SC, 44% cinzas



TABELA 4.3 - RELAÇÕES AR/COMBUSTÍVEL ESTEQUIOMÉTRICAS EM BASE ÚMIDA

COMBUSTÍVEL	RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL ESTEQUIOMÉTRICA	UMIDADE TÍPICA
Óleo combustível	13,5:1 kg/kg	~ 0%
Gás natural (típico)	9,76 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	0%
GLP	15,1:1 kg/kg ; 26,2 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	0%
Lenha	3,99 kg/kg	30%
Bagaço de cana	2,95 kg/kg	50%
Carvão vegetal	12,5 kg/kg	~ 0%
Carvão mineral, 44% cinzas	6,89 kg/kg	~ 0%

- É interessante notar que a umidade e o teor de cinzas afetam diretamente a relação ar/combustível estequiométrica, já que a parcela do combustível que efetivamente reage é menor quando uma parte de seu peso corresponde à água ou a outros materiais que não vão reagir com o oxigênio.
- Como um exemplo, um kg de bagaço de cana com 50% de umidade consome apenas a metade do ar requerido pela mesma massa de bagaço seco.

- A expressão a seguir pode ser utilizada para avaliar a relação ar/combustível em base úmida.

$$(a/c)_{\text{base úmida}} = (a/c)_{\text{base seca}} (1 - \phi/100) \quad (4.3)$$

em que:

$\phi$  = umidade referida à massa seca do combustível (%)

- Excesso de ar
- Como a reação de combustão deve ocorrer de forma rápida e em um volume limitado, para assegurar que todo o combustível se oxide, é necessário colocar sempre algum ar em excesso, senão aparecerá combustível sem queimar, com evidentes implicações econômicas e ambientais.
- De outro lado, o excesso de ar para combustão deve ser sempre o menor possível, pois o ar, além do oxigênio, sempre traz consigo uma massa elevada de nitrogênio, gás inerte e que arrasta para a chaminé parte do calor gerado na reação, resultando em uma perda de desempenho da utilização do calor do combustível.

- Excesso de ar
- Ou seja, se a correta proporção entre o ar e o combustível não for mantida, haverá insuficiência ou excesso de ar, além do mínimo recomendável e, conseqüentemente, perda de eficiência no processo, como representado no Gráfico

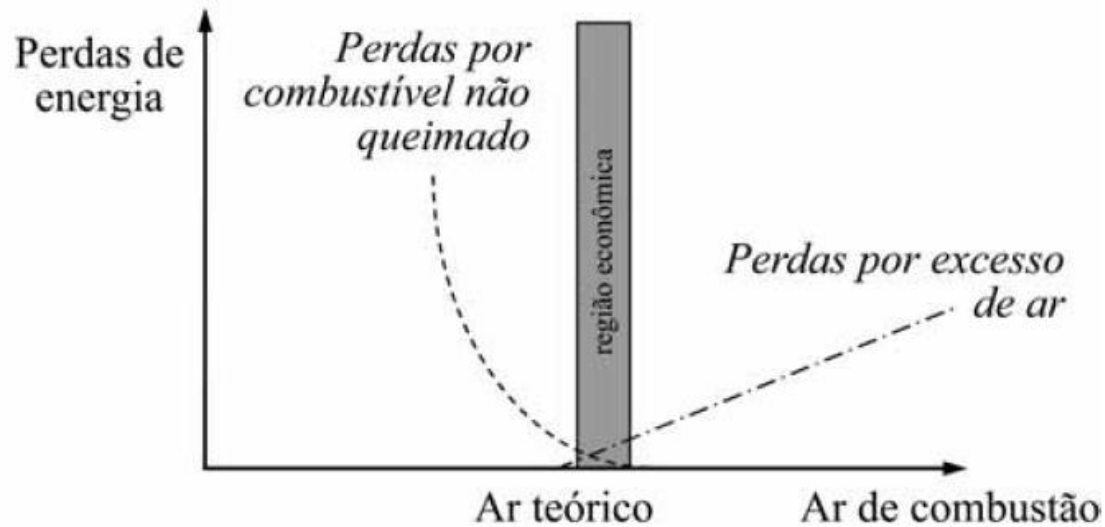


Gráfico 4.1 - Efeito do excesso de ar sobre as perdas em sistemas de combustão



- Excesso de ar
- O excesso mínimo de ar a ser adotado depende tanto do tipo de combustível como do sistema de combustão, já que se trata de buscar uma mistura adequada entre o combustível e o comburente.
- Em geral, gases combustíveis permitem uma mistura adequada sem dificuldade, e os excessos de ar situam-se usualmente entre 5 a 10%.



- Excesso de ar
- Para um combustível líquido, em função de sua viscosidade e do sistema de atomização empregado no queimador, pode ser requerido menos de 10% de excesso de ar ou mais de 30%.

- Excesso de ar
- No caso dos combustíveis sólidos o excesso de ar depende muito da granulometria e da forma de alimentação do combustível.
- Um combustível bem moído e alimentado em suspensão pode comportar-se como um óleo pesado, enquanto lenha em pedaços grandes sobre uma grelha fixa pode requerer de 60 a 120% de excesso de ar.

- Excesso de ar
- A determinação prática do excesso de ar é usualmente realizada por meio de medidas de composição dos gases de combustão em base seca; isto é, sem serem afetadas pelo teor de umidade eventual do combustível queimado.

- Excesso de ar
- As medidas mais importantes são os teores de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ).
- Tradicionalmente, estas medidas eram realizadas utilizando métodos químicos de absorção seletiva, mediante instrumentos do tipo aparelho de Orsat, mas atualmente são também largamente empregados sistemas eletrônicos, trabalhando com células sensoras aos produtos de combustão.

- Excesso de ar
- As expressões a seguir, permitem conhecer o excesso de ar a partir de medidas dos teores de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

$$\lambda = \left[ \frac{\left( \frac{k}{x} \% \text{CO}_2 \right) x - k - 3,76 A}{4,76 A} \right]$$

$\lambda$  - coeficiente de excesso de ar =  $\frac{\text{ar real de combustão}}{\text{ar estequiométrico}}$ ;

A - coeficiente estequiométrico =  $x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} + k$ ;

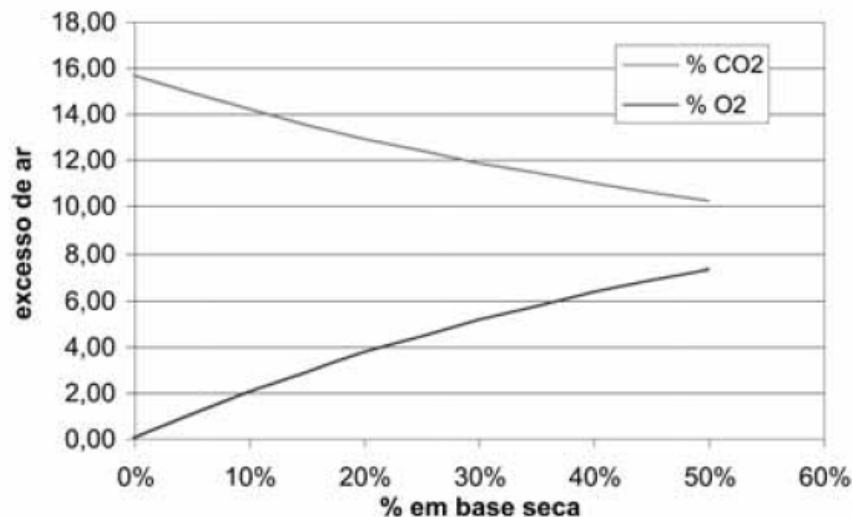
% CO<sub>2</sub> - teor de dióxido de carbono nos produtos de combustão;

% O<sub>2</sub> - teor de oxigênio nos produtos de combustão; e

$$\lambda = \left[ \frac{\% \text{O}_2 (x - k - 3,76 A)}{A (1 - 4,76 (\% \text{O}_2))} \right]$$

x, y, z e k - teores molares respectivamente do carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre do combustível (como nas expressões anteriores).

- Excesso de ar
- A relação entre a composição dos gases de combustão, usualmente amostrados na base da chaminé, e o excesso de ar é exemplificada no Gráfico 4.2, com valores válidos para o óleo combustível tipo B1 (BPF).





- A seguir, são resumidas as principais exigências de um eficiente processo de combustão, do ponto de vista das proporções entre o ar e o combustível:



- O comburente deve estar em quantidade suficiente em relação ao combustível para que a reação química da combustão seja completa.
- Deve-se trabalhar com o mínimo de excesso de ar, suficiente para a total oxidação do combustível, sem indícios significativos de monóxido de carbono e fuligem.

- O comburente deve formar com o combustível uma mistura homogênea.
- O uso de queimadores corretos para o combustível, bem operados, assegura que o ar é fornecido à reação de combustão sem existirem zonas de mistura muito rica ou muito pobre e garantindo completa oxidação do combustível.

- No caso de combustíveis líquidos, a adequada viscosidade é um fator essencial para uma queima correta.
- Quanto menor a viscosidade do combustível, melhor será a sua pulverização; ou seja, mais fácil será a sua divisão em gotículas e, portanto, melhor sua mistura com o ar.

- Como a viscosidade varia com a temperatura, o preaquecimento do combustível é fundamental para se atingirem os limites de viscosidade necessários para uma boa pulverização.
- A viscosidade de um óleo combustível pode variar por outros motivos, como sua composição, e a temperatura de aquecimento deve ser ajustada, quando necessário.
- Entretanto, por uma questão de segurança, esta temperatura não deve aproximar-se muito do ponto de fulgor do óleo combustível.

- No caso de combustíveis sólidos, por idênticas razões, sua granulometria é de extrema importância para obterem-se as condições adequadas de queima.
- Quanto mais reduzido o tamanho de uma partícula, maior será a área de contato com o comburente e melhores serão as condições para a reação de combustão.

- Poder calorífico dos combustíveis
- A energia térmica fornecida durante a queima dos combustíveis pode ser avaliada por seu poder calorífico, em geral, apresentado para sólidos e líquidos por unidade de massa e para gases por unidade de volume, referidas neste caso a pressão atmosférica e a temperatura de 0°C.



- Poder calorífico dos combustíveis
- Como comentado, a água, usualmente presente nos produtos de combustão, resultante da oxidação do hidrogênio, pode apresentar-se em diferentes estados(líquido e vapor).
  - São definidos dois tipos de poder calorífico: o Poder Calorífico Superior (PCS), quando a água está na forma líquida, estado típico nas condições de ensaio de combustíveis, pouco aplicado em situações práticas; e
  - Poder Calorífico Inferior (PCI), quando a água apresenta-se como vapor, situação que efetivamente ocorre nos produtos de combustão nas chaminés.



- Poder calorífico dos combustíveis
- Naturalmente, dependendo do teor de hidrogênio do combustível, o Poder Calorífico Superior é cerca de 10% maior que o Poder Calorífico Inferior.

- Poder calorífico dos combustíveis

COMBUSTÍVEL	PODER CALORÍFICO INFERIOR	DENSIDADE
Óleo combustível B1	9.590 kcal/kg	1000 kg/m <sup>3</sup>
Gás natural (típico)	8.800 kcal/m <sup>3</sup>	-
GLP	11.100 kcal/kg	-
Lenha	3.100 kcal/kg	400 kg/m <sup>3</sup>
Bagaço de cana	2.130 kcal/kg	-
Carvão vegetal	6.460 kcal/kg	260 kg/m <sup>3</sup>
Carvão mineral <sup>1</sup>	2.850 kcal/kg	-

<sup>1</sup>Carvão vapor sem especificação, podendo ser especificados produtos com PCs Superior.

- Tecnologia de combustão
- Para a realização prática de processos de combustão, são necessários equipamentos capazes de proporcionar a mistura do ar e do combustível em condições seguras e controladas, sem perdas.
- A seguir, são apresentados os componentes dos sistemas de produção de vapor em que ocorrem tais reações de combustão, que influem decisivamente em seu desempenho.

- Tecnologia de combustão - Fornalhas
- Fornalha é a denominação genérica que se dá ao local onde se queima o combustível e de onde saem os produtos da combustão.
- Pode ser formada por queimadores (para combustíveis líquidos e gasosos), grelhas (para combustíveis sólidos) ou câmaras de combustão.

- Tecnologia de combustão - Fornalhas
- A câmara de combustão é um volume adequadamente dimensionado, no qual se desenvolve a chama e se completa a combustão, além de propiciar a proteção e os suportes necessários para os queimadores e grelhas.
- De forma geral, a fornalha deve evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar sua temperatura do combustível até a combustão, proporcionando a condição ideal uma combustão completa, criar turbulência para misturar o ar e o combustível, e impedir a troca de calor entre os gases quentes produzidos e o ambiente.

- Tecnologia de combustão - Fornalhas
- No interior da fornalha as paredes devem ser revestidas com uma camada de tijolos refratários, responsáveis por reter o calor no interior da fornalha.
- Por isso, devem suportar altas temperaturas e apresentar resistência ao choque térmico



- Tecnologia de combustão – Fornalhas - Categorias
- *fornalhas com combustão sobre suporte*. Englobam todas as fornalhas que queimam combustíveis sólidos a granel, grosseiramente divididos, picados e/ou britados.
- Segundo a qualidade (teor de cinzas e voláteis) e quantidade de combustível manipulado, seu grau de divisão e mecanização da alimentação, podem ser grelhas fixas, inclinadas, basculantes ou rotativas;

- Tecnologia de combustão – Fornalhas - Categorias
- *fornalhas para queima em suspensa*. São usadas quando se queimam óleo, gases ou combustíveis sólidos pulverizados, utilizando para alimentar o combustível equipamento especial, chamado maçarico, queimador ou combustor, responsável pela dispersão do combustível na fornalha de forma homogênea.

- Tecnologia de combustão – Queimadores - Líquidos
- Os combustíveis líquidos são queimados nas câmaras de combustão, sempre em suspensão, pulverizados por meio de vários processos, que devem ser capazes de atomizar bem o combustível, mesmo sob cargas parciais.

- Queimadores – Líquidos - Pulverização a ar
- O óleo escoa por gravidade ou por impulsão de uma bomba de baixa pressão.
- O ar é insuflado por ventilador, sendo o veículo responsável pela pulverização do óleo em gotículas

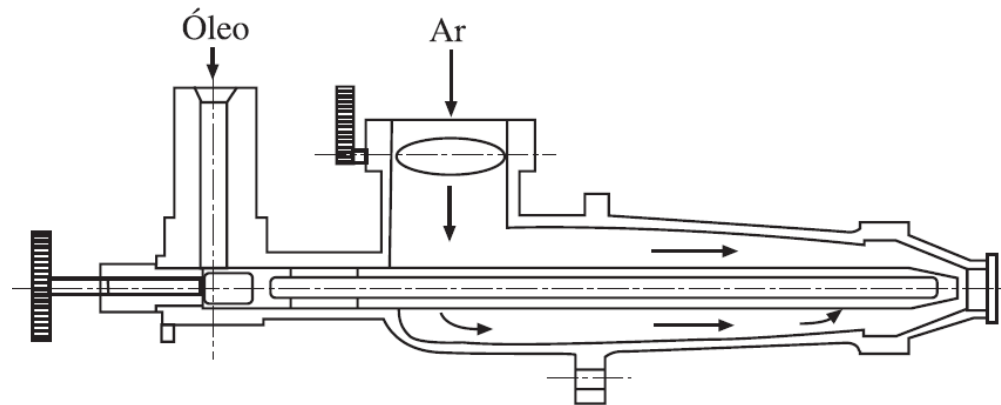


Figura 4.1 - Maçarico de óleo com pulverização a ar

- Queimadores – Líquidos - Pulverização a ar
- Conforme a pressão do ar, os queimadores são denominados de *baixa pressão* (até 500 mmca) ou de *média pressão* (da ordem de 1000 mmca).
- São indicados para unidades de pequeno porte, queimando uma quantidade máxima de 50 kg/h de óleo.

- Queimadores – Líquidos - Pulverização a ar
- Uma concepção mais moderna deste tipo procura dar uma rotação aos dois fluxos, o que tem permitido uma melhora na sua performance.

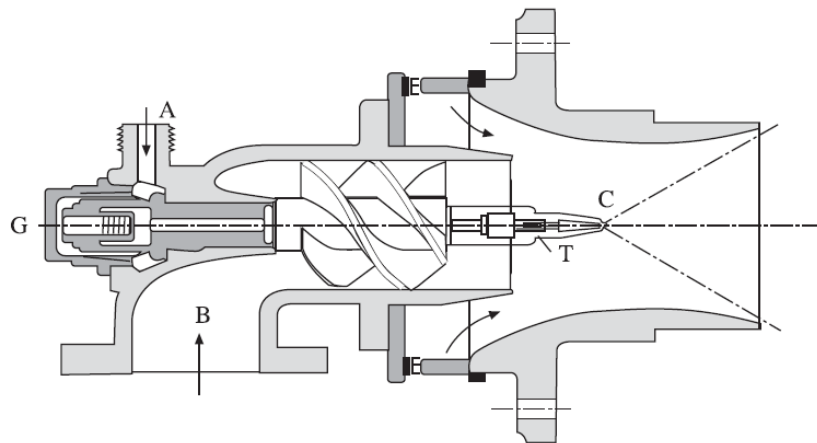


Figura 4.2 - Queimador de óleo com pulverização a ar comprimido e efeito rotação do fluido auxiliar primário

Fonte: Pêra (1990)



- Queimadores – Líquidos - Pulverização a ar
- O ar de pulverização, denominado ar *primário*, representa 20% do ar total necessário à combustão. Operam com 30 a 40% de excesso de ar e apresentam uma pulverização não uniforme, dificultando a regulação da queima.

- Queimadores – Líquidos - Pulverização a vapor
- Substitui o ar pelo vapor produzido na própria caldeira, promovendo uma pulverização mais fina e fortemente acentuada pelo aquecimento.
- Tem o inconveniente de parte do calor produzido na combustão ser consumido pelo vapor, quando este for saturado.

- Queimadores – Líquidos - Pulverização a vapor

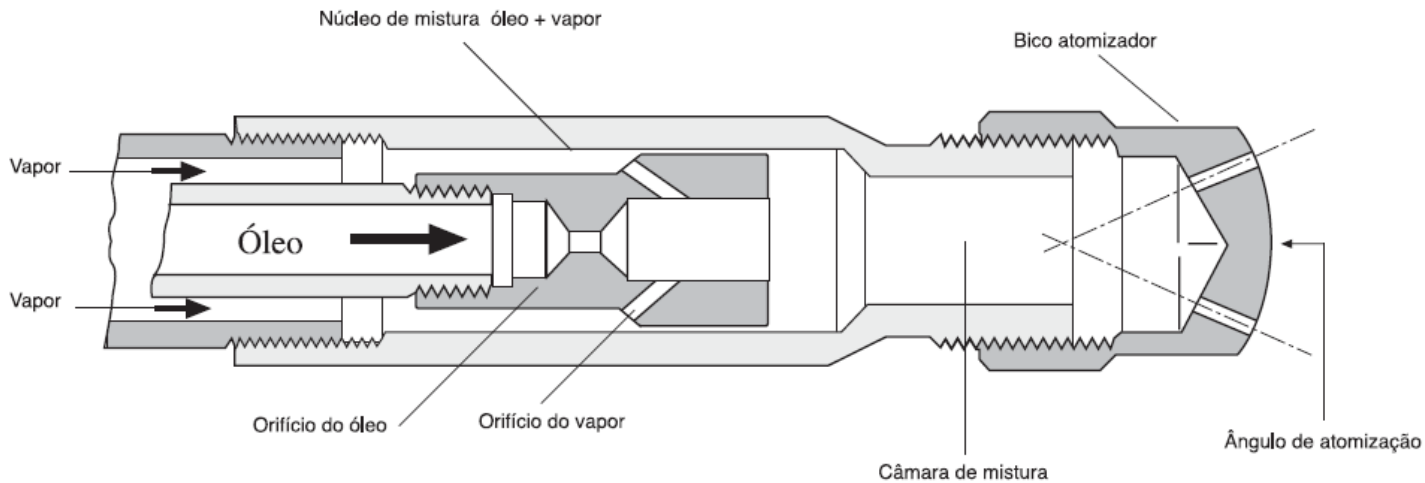


Figura 4.3 - Maçarico de queimador a óleo com atomização a vapor

- Queimadores – Líquidos – Copo Rotativo
- Uma concepção mais complexa e de bom desempenho é o queimador de “copo rotativo”, largamente aplicado nos geradores de vapor limitados à capacidade de queima de 500 kg óleo/h, embora alguns tipos especiais com alta rotação (10000 rpm) possam chegar à capacidade de 3000 kg óleo/h.

- Queimadores – Líquidos – Copo Rotativo
- O funcionamento baseia-se na formação de um filme de óleo no interior de um copo tronco cônico girando a alta rotação (3600 rpm), que projeta o combustível na forma de um anel cônico de encontro a um fluxo de ar rotativo de alta pressão,

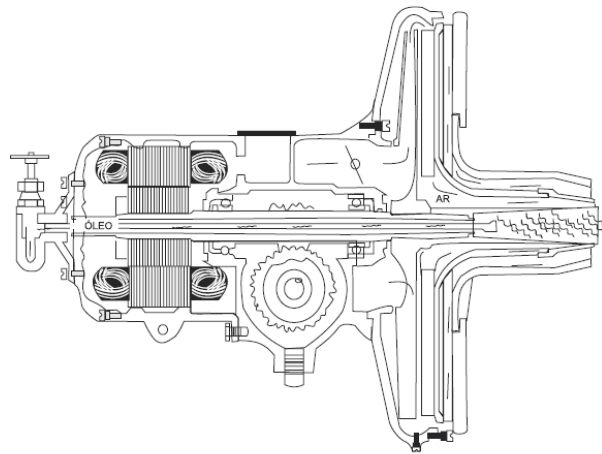


Figura 4.4 - Queimador tipo copo rotativo  
Fonte: Pera (1990)

- Queimadores – Gases
- Os combustíveis gasosos são os mais simples de serem queimados, pois a mistura com o comburente se processa de forma muito mais fácil do que com qualquer outro combustível, podendo ainda ter sua velocidade de ignição aumentada mediante pré-aquecimento do suprimento do comburente.
- Basicamente, distinguem-se dois tipos:
  - Queimadores de mistura; e
  - queimadores de difusão.



- Queimadores – Gases
- Os queimadores de mistura promovem a mistura do ar com o gás antes de injetá-los na câmara de combustão

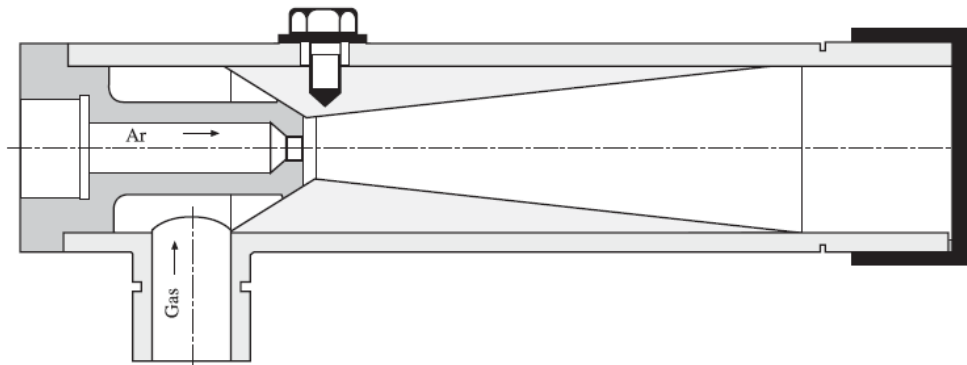
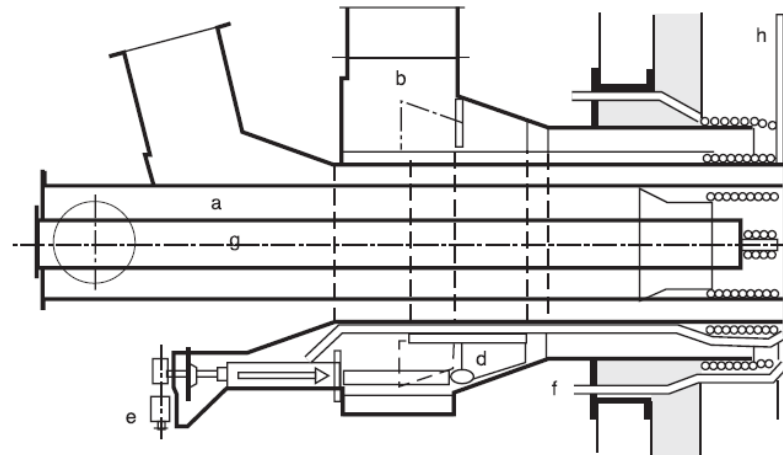


Figura 4.6 - Esquema de um queimador de mistura para gases  
Fonte: Pêra (1990)

- Queimadores – Gases
- Já os queimadores de difusão têm por princípio injetar ambos os fluidos separadamente, proporcionando a mistura de ambos no interior da câmara de combustão, sendo menos empregados.

- Queimadores – Sólidos
- A utilização dos combustíveis sólidos tem como exemplo mais importante o carvão mineral utilizado nas grandes unidades geradoras de vapor das centrais termoelétricas,
- Existem outros materiais pulverizados e resíduos de processos industriais, como é o caso do bagaço de cana, da borra de café, da serragem e de resíduos florestais macerados, que são particulados e queimados em suspensão, quando insuflados na câmara de combustão

## ○ Queimadores – Sólidos

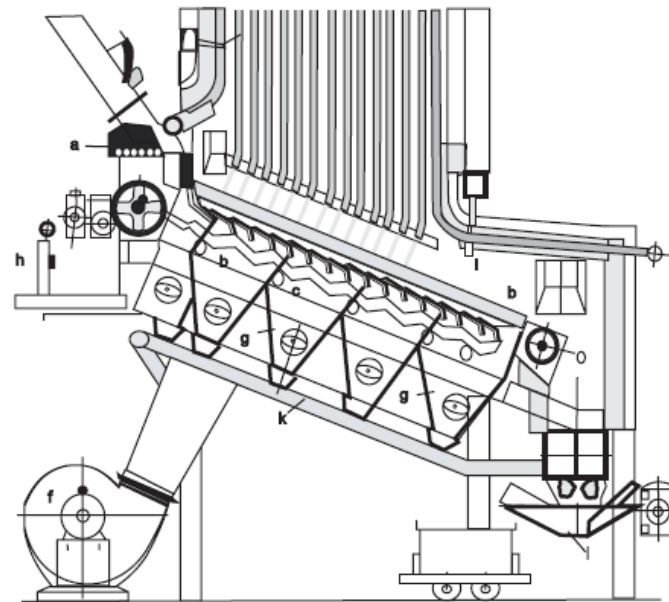


a - ar de núcleo      b - câmara de ar      c - mistura de pó e ar      d - difusor de torção  
e - ajuste do difusor      f - tubos de refrigeração      g - queimador de ignição      h - tubos da parede

Figura 4.7 - Queimador de turbilhão para carvão pulverizado

- Queimadores – Sólidos
- Nas pequenas caldeiras, o combustível, lenha em toras, é colocado manualmente sobre um conjunto de grelhas fixas.
- Para as caldeiras de maior capacidade, utilizam-se sistemas com grelhas móveis ou deslizantes.
- A lenha normalmente picada, é transportada por meio de correias transportadoras, dos silos até aos dosadores e alimentadores

## ○ Queimadores – Sólidos



a - alimentação de carvão  
d - acionamento da grelha  
g - câmaras inferiores  
k - saída de finos

b - barras atçadoras  
e - cilindro de saída  
h - controle de ar  
l - bocais de ar secundário

c - barras de movimento  
f - ventilador principal  
i - saída de escória

Figura 4.8 - Caldeira aquotubular de grelhas móveis.



- Tiragem
- É o processo de retirada dos gases provenientes da combustão, da caldeira para a atmosfera.
- Dependendo do uso de energia externa, sua tiragem pode ser efetuada de várias maneiras: natural, forçada ou mista.

- Tiragem
- Natural
- Quando, normalmente, sem a ajuda de equipamentos especiais, o ar entra na fornalha, alimenta a chama e sai pela chaminé, graças à diferença de temperaturas na sua base e no seu topo.

- Tiragem
- Forçada ou induzida
- Os gases são eliminados com a ajuda de ventiladores sopradores. Pode apresentar várias disposições construtivas.
- Suas dimensões, porém, dependem da capacidade da caldeira para um suficiente suprimento de ar de combustão e para que os gases sejam totalmente eliminados.

- Tiragem - Forçada ou induzida

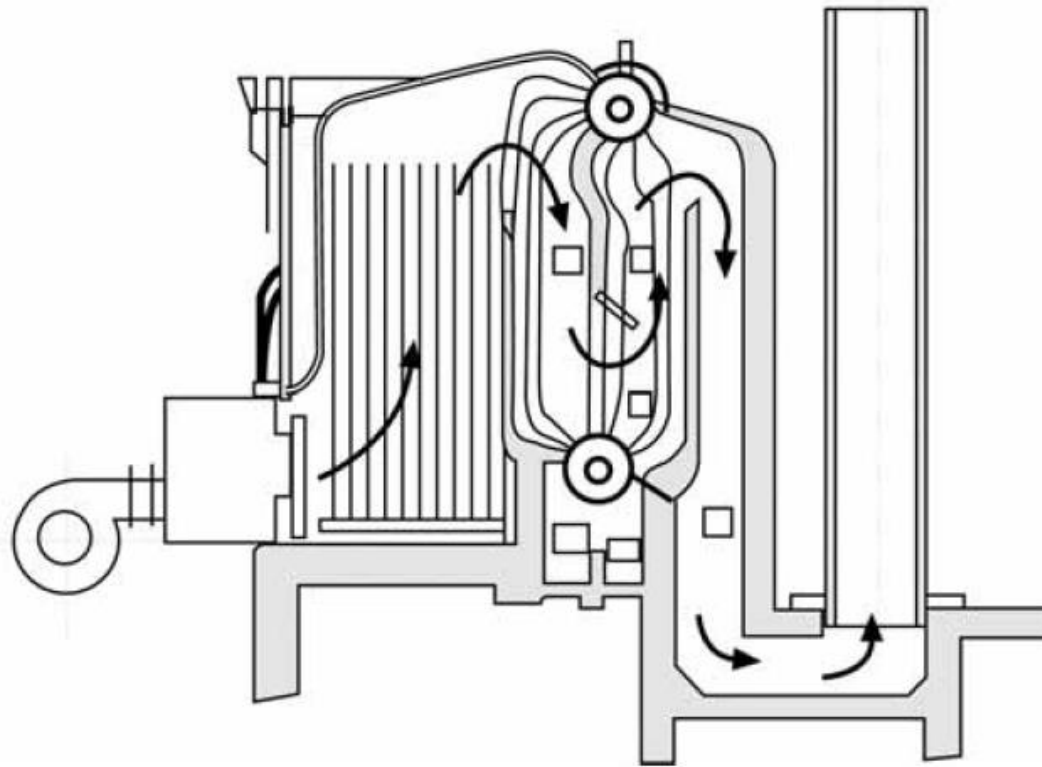


Figura 4.9 - Tiragem Forçada  
Fonte: Pêra (1990)

- Tiragem - Forçada ou induzida

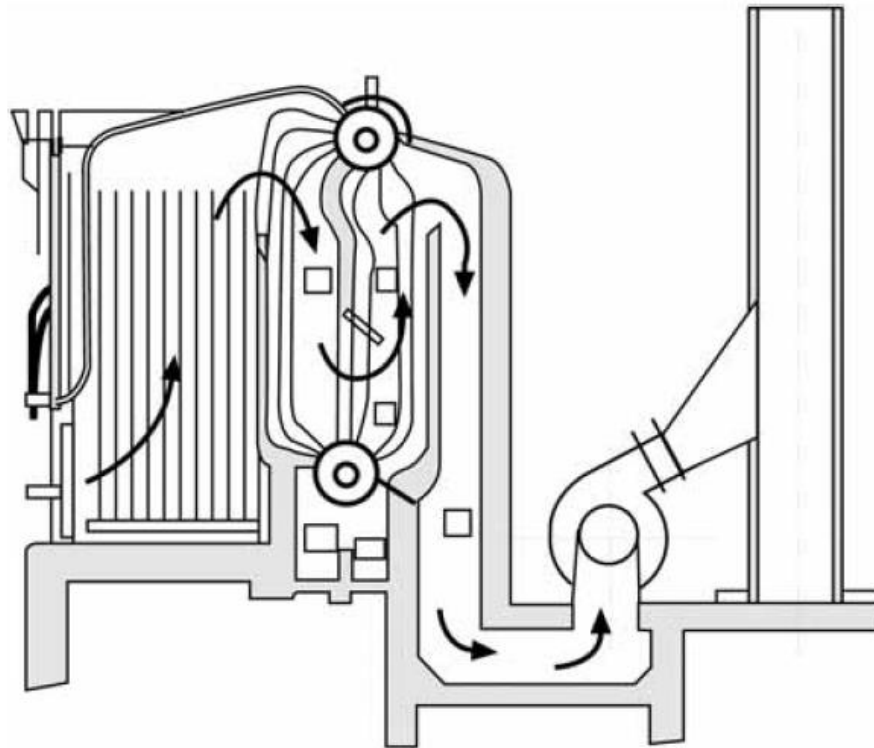


Figura 4.10 - Tiragem Induzida  
Fonte: Pêra (1990)

- Tiragem
- Induzida
- As caldeiras que possuem este tipo de tiragem são chamadas de *caldeiras despressurizadas*.
- Elas precisam ter muito boa vedação, para evitar a entrada de ar falso, através de suas paredes ou duplos invólucros



- Tiragem - Mista ou balanceada
- Neste sistema são empregados dois ventiladores, sendo que um deles tem a finalidade de introduzir o ar na caldeira (ventilador soprador) e o outro tem a finalidade de retirar o ar da caldeira (ventilador exaustor),

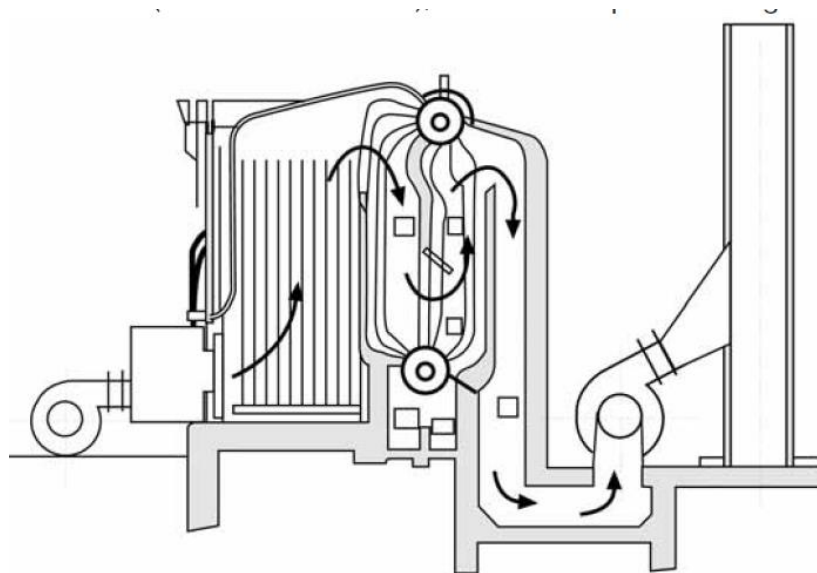


Figura 4.11 - Tiragem Mista



## BIBLIOGRAFIA

Eletrobrás, Procel, FUPAI – Eficiência Energética no Vapor, 2005