

ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA QUEIMADORES À LENHA E/OU

CARVÃO VEGETAL NA GERAÇÃO DE VAPOR

PROJETO INDUSTRIAL

PMC - 516

Giancarlo Lombardi / n° USP 0217892 /
Francisco E.W.A. Silva / n° USP 0219307 /
José Manoel M. Leite / n° USP 0210252 /
Paulo Roberto D.Menezes / n° USP 0223272 /
Paulo Sergio Capriglione / n° USP 0217917 /

TF-83
L838e

Prof. Orientador: Omar Moore Madureira

ÍNDICE

Pág.

1. Estudo da Viabilidade.....	01
Estabelecimento da Necessidade.....	01
Formulação do Projeto e Especificação Técnica.....	01
Síntese de Possíveis Soluções.....	07
Exeqüibilidade Física.....	09
Viabilidade Econômica.....	14
Viabilidade Financeira.....	14
 2. Projeto Básico.....	 15
Escolha da Melhor Solução.....	15
Modelo Matemático.....	17
Análise da Sensibilidade.....	25
Análise da Compatibilidade.....	26
Análise da Estabilidade.....	28
Otimização Formal.....	28
Previsões para o Futuro.....	29
Previsão de Tempo de Funcionamento.....	30
Ensaio e Testes do Projeto.....	30
Simplificação.....	31
Conclusão.....	31
Bibliografia.....	32

ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA QUEIMADORES À LENHA E/OU CARVÃO

VEGETAL NA GERAÇÃO DE VAPOR.

1. ESTUDO DA VIABILIDADE

1.1. Estabelecimento da necessidade

A necessidade de tal estudo originou-se da inviabilidade do uso de frações leves derivadas de petróleo, na indústria, devido a alta de preços de tal produto no mercado internacional bem como, sua significância na balança comercial do país.

Como medida de controle da demanda o Conselho Nacional do Petróleo (CNP) baixou a Portaria de número 318 de 27 de agosto de 1982, proibindo o uso de querosene e óleo diesel em sistemas industriais de aquecimento a partir de 27.08.82.

Além desta medida, as indústrias localizadas no Estado de São Paulo, devem satisfazer os índices de controle de poluição, impostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) referentes a dessulfurização dos gases de combustão.

Levando-se em conta estas restrições justifica-se a necessidade da mudança dos atuais processos e combustíveis por outros que não sejam afetados por tais medidas, como é o caso da energia elétrica, biogás, lenha, álcool etílico e outros.

1.2. Formulação do Projeto e Especificação Técnica

A partir de um pré-estudo das possíveis alternativas energéticas, já realizado, obteve-se as informações descritas a seguir:

No caso do álcool etílico a Comissão Executiva Nacional do Alcool (CENAL) tem declarado que, por problemas estratégicos, é inexecutável a utilização imediata de álcool etílico para fins industriais. Porém, pode ser que no futuro, face à alterações na conjuntura econômica, possa ocorrer uma inversão nesta posição.

Com relação à energia elétrica, apesar do incentivo financeiro dado, caso da Energia Garantida por Tempo Determinado (EGTD) apresentando tarifa consideravelmente abaixo da energia dita firme, consultas feitas junto a Companhia Energética de São Paulo (CESP) mostraram a impossibilidade de implantação de rede de distribuição compatível com a utilização da empresa.

qual?

Sendo o biogás obtido através do processo de fermentação de biomassa em presença de micro-organismos, e tendo o tempo de fermentação como um parâmetro fixo, a quantidade de energia requerida pela indústria acarretaria um grande volume de biogás e portanto um grande volume de biomassa a manipular.

Haja visto a localização da indústria, fora dos limites metropolitanos onde existe lenha nativa, esta teria condições de receber através de fornecedores especializados lenha ou carvão vegetal a qual viria de regiões próximas. Também seria possível a implantação de uma floresta energética para seu próprio abastecimento dada a existência de área disponível.

ii-la!

Destas informações foi concluído que a Companhia contratante Gipauchima S.A. teve de optar pela utilização de lenha ou carvão vegetal como insumo energético para o seu sistema de geração de vapor.

A empresa localiza-se no município de Tatuí, Estado de São Paulo, sendo sua atividade a prestação de serviços de tingimento e estamparia de tecidos para terceiros. Esses são a seda pura, puro algodão, do tipo voil, e em artigos de viscose como crepes e langerie. A sua produção média está em torno de 6.000.000 de metros por ano. O fluxograma produtivo será descrito a seguir.

PURGA

A purga visa a eliminação das impurezas.

O processo consiste na imersão do tecido, no mínimo por 4 horas e no máximo 10 horas, em um banho de água aquecida a vapor com temperatura entre 60 a 90°C. Os equipamentos utilizados são os buques de purga e jiggers.

SECAGEM

qualidade? Após a operação de purga, os tecidos são secados a fim de permitir a inspeção de quantidade? O tecido permanece e/ou passa em ambiente aquecido sob temperaturas variando entre 90 a 120°C, visando a eliminação da umidade. Para tanto, utilizam-se das secadeiras de tecidos com aquecimento a vapor ou gás de nafta.

TINGIMENTO

Uma vez secos e revisados os tecidos são, então preparados para o tingimento. Esse consiste na imersão do tecido em água quente, com produtos químicos dissolvidos, e sua permanência nesse banho com movimentação, permitindo a incorporação dos corantes às fibras. A temperatura do banho varia de 60 a 90°C. Os equipamentos utilizados são as barcas e os jiggers, sendo que o tempo de tingimento é variável, entre 3 a 6 horas, e o aquecimento é feito com vapor.

SECAGEM DO TECIDO TINGIDO

Terminado o tingimento os tecidos são secados para permitir a inspeção e para evitar defeitos.

O processo baseia-se na manutenção dos tecidos em câmaras aquecida com circulação de ar quente na faixa de 50 a 120°C.

Os equipamentos utilizados são as secadeiras de tecidos e as estufas.

ACABAMENTO

Depois de seco os tecidos tingidos são submetidos a um processo de acabamento, que consiste em dar as características finais aos mesmos com relação a toque, fixação de cores e de dimensões.

Nesse processo, o tecido passa inicialmente em banhos a frio. O excesso de água é retirado mecanicamente por compressão e em processo contínuo os tecidos entram em equipamentos próprios de acabamento onde passam com velocidades pré-determinadas em vários campos com diferentes temperaturas variando em torno de 90°C. Os equipamentos utilizados nesse processo são as ramas, os palmers e as calandras, todos com aquecimento a vapor.

Até esse ponto os processos são comuns tanto aos artigos tingidos quanto aos estampados, sendo que os tingidos são então revisados e expedidos aos clientes.

No caso de tecidos estampados, o processo continua a partir da obtenção do tingido, que será a base do processo de estamparia.

ESTAMPAGEM

No processo de estampagem o tecido tingido é colocado, esticado e sem dobra, sobre as mesas de estampagem. O desenho é transferido dos quadros para o tecido.

SECAGEM

Após a estampagem, com o tecido ainda na mesa, é passada uma corrente de ar quente por aproximadamente 20 min visando a eliminação da umidade.

O aquecimento do ar é feito através de trocadores de calor a vapor.

VAPORAGEM

Após a secagem o tecido é submetido à vaporagem. Este processo tem como finalidade a fixação das anilinas ao tecido, através de um fluxo de vapor d'água a temperaturas pré-estabelecidas em torno de 120°C e à pressão de aproximadamente 1 atm.

Os equipamentos utilizados são os vaporizadores de pressão.

LAVAGEM

Uma vez feita a vaporização, lava-se as peças de tecido para eliminar os resíduos de anilinas que se incorporaram ao tecido nas operações anteriores. Essa lavagem é feita através de sucessivas passagens do tecido em banhos de água quente a aproximadamente 50°C e fria à temperatura ambiente. Utiliza-se para este processo as barcas de lavagem.

SECAGEM E ACABAMENTO

Uma vez lavados, os tecidos são então submetidos a processos de secagem e acabamento semelhantes aos já descritos.

As especificações técnicas serão a seguir resumidas numa tabela indicativa.

	Processo	Nº de equipamentos	Consumo p/ equipamento (kg/h)	Consumo total	Temperatura máxima (°C)
TINGIMENTO	Purga	4	150	600	90
	Secagem	1	80	80	120
	Tingimento	20	75	1500	90
	Secagem do tecido tingido	3	400	1200	120
	Acabamento	2	700	1400	90
ESTAMPAGEM	Secagem	8	100	800	60
	Vaporagem	3	600	1800	120
	Lavagem	10	70	700	50
	Secagem e Acabamento	2	800	1600	90
T O T A L				9680	

Os valores apresentados nesta tabela representam a condição de operação simultânea de todos os equipamentos.

Para atender as condições necessárias o sistema gerador deverá ter uma capacidade de produção de 10 ton/h de vapor à temperatura máxima de 120°C no processo, o que leva a uma pressão de trabalho de 7 kgf/cm².

Foi solicitado que a solução pudesse ser adaptada a caldeira já existente na empresa, e portanto o estudo versará somente sobre a fornalha.

*Podria estudar
melhor as especifica-
ções operacionais.*

1.3. Síntese de possíveis soluções

Dentro do escopo definido na Formulação do Projeto serão descritas as possíveis soluções para a queima da lenha. — *contos?*

Para melhor entendimento das soluções, que serão a partir de agora apresentadas será feito uma subdivisão quanto aos seus aspectos construtivos e funcionais. Existem dois processos básicos de queima, combustão em suspensão ou em grelha.

- Fornalha com suporte

Tendo-se em vista ser a fornalha o local onde é feita a queima de combustível e grelhas como sendo um conjunto de barras que o suportam e permitem a passagem de ar de combustão pode-se definir as possíveis soluções:

1.3.1. Fornalha de grelhas planas ligeiramente inclinadas (vide figura 1)

Este equipamento apresenta uma grelha inclinada com fornecimento de combustível pela parte superior permitindo seu movimento descendente pela ação da gravidade e entrada de novo combustível. A queima se processa ao longo do percurso, e o fornecimento de combustível é manual ou automático. As cinzas são captadas no final do plano inclinado quando o material já terá completado a combustão. A admissão do ar para ventilação das grelhas e de combustão é feita através de janelas na parte inferior da fornalha sendo a captação do ar quente de combustão feita pela parte superior da mesma.

1.3.2. Fornalha em Escada (vide figura 2)

Solução de concepção semelhante a anterior diferenciando-se desta por ser o combustível transportado pelo movimento dos degraus da grelha. Este movimento propicia uma melhor combustão devido a boa mistura

do material.

A cinza é captada no final da escada em uma grelha plana, cuja função é extinguir os últimos traços de combustível.

1.3.3. Fornalha de Esteira Fixa Basculante (vide figura 3)

O combustível é projetado por um dispositivo mecânico no interior da câmara de combustão onde queimam parcialmente em suspensão; os não queimados o fazem sobre o suporte onde largam as cinzas.

A remoção das cinzas é feita pelo basculamento das grelhas. O ar de combustão é insuflado sob pressão por baixo da esteira.

1.3.4. Fornalha com Grelha Oscilante (vide figura 4)

A grelha tem posição horizontal, sendo atuada por um mecanismo motorizado excêntrico causando uma oscilação contínua a qual revolve o combustível nela depositada. As cinzas são projetadas na direção do impulso sendo então descarregadas no cinzeiro.

1.3.5. Fornalha de Esteira Rotativa Móvel (vide figura 5)

O combustível é alimentado mecanicamente formando uma espessa camada caminhante que sofre combustão à medida que a esteira avança até a queima total e descarga das cinzas residuais no fim do trajeto.

O processo de alimentação é totalmente mecanizado e o ar de combustão é forçado pela parte inferior da grelha. As grelhas podem ter movimento em ambos os sentidos.

1.3.6. Fornalha de Leito Fluidizado (vide figura 6)

O combustível é alimentado continuamente e o leito permanece em combustão contínua. O leito é composto de um material inerte, por exemplo areia.

Estas fornalhas apresentam características únicas, como por exemplo, elevado coeficiente de transmissão de calor o que permite que a serpentina, mergulhada no leito, retire grande quantidade de calor com pouca superfície de aquecimento, ao mesmo tempo em que se mantém um balanço térmico que oferece baixa temperatura na câmara de combustão.

Estas fornalhas se prestam excelentemente à queima do carvão brasileiro, pois a cinza é extraída e seu ponto de fusão não é atingido. Mantem-se temperaturas em torno de 850 - 900°C no leito.

1.3.7. Fornalha com Queimador do tipo Lança de Carvão Pulverizado (vide figura 7)

O combustível, consistindo de carvão pulverizado mais ar comprimido, é injetado no interior da câmara de combustão. Através da queima deste são produzidos gases a altas temperaturas os quais são então direcionados para a caldeira. A proporção da mistura ar mais carvão pode ser convenientemente dosada em função das necessidades energéticas bem como das limitações dos teores dos produtos da combustão.

1.4. Exeqüibilidade física

Descrever-se-ã as soluções fisicamente seguindo a divisão formulada no ítem anterior.

1.4.1. Fornalha de grelha plana ligeiramente inclinada

A câmara de combustão é feita em alvenaria com tijolo refratário com tomada de ar (porta de ventilação) comandada externamente de forma a controlar a velocidade de combustão com variação na quantidade de ar que entra para a combustão.

A inclinação das grelhas deve ser entre 15 e 20° variando de acordo com o ponto de fusão das cinzas, velocidade de queima requerida e máxima carga admitida. Deve-se ter também uma janela de observação de modo a se poder controlar visualmente a temperatura de queima. No caso de alimentação manual deve-se ter grelhas que não ultrapassem 25 m de profundidade.

Em geral temos grelhas com 600 mm de comprimento dispostas em 4 fileiras colocadas com 5 mm de folga para permitir a dilatação no sentido longitudinal.

A capacidade é de 20 t/h.

1.4.2. Fornalha em Escada

Neste modelo a câmara de combustão também é feita em tijolo refratário com cordão de dilatação em amianto.

A boca de carga localiza-se acima do início da escada. As portas de ventilação são também utilizadas para retirada das cinzas e, em geral são em número maior que 2.

O ângulo de inclinação da escada está entre 35 e 45° e em seu final há uma grelha plana para captação de cinzas, sendo também ligeiramente inclinada, sua profundidade também deve estar com cerca de 2,5m.

A capacidade é de 20 t/h.

1.4.3. Fornalha de Esteira Fixa Basculante

Como os combustíveis são lançados por um "Spreader" lançador/vaporizador no interior da fornalha existe uma certa responsabilidade com relação a choques mecânicos nas paredes, o que faz com que os tijolos que constituem a alvenaria da câmara tenham uma constituição adequada. Além disto é importante ressaltar que o sistema de acionamento do "Spreader" deve ser totalmente protegido contra o calor (por se tratar de um sistema pneumático, incompatível com altas temperaturas) ou se compor mecanismos de interface que garantam tais temperaturas.

O mesmo problema é encontrado no basculamento das grelhas, feito para a remoção das cinzas.

São necessários grupos de ventiladores com o propósito de insuflar ar sob pressão por baixo da esteira. Este ar tem o propósito de resfriar a grelha além de alimentar a combustão.

O esquema de portas fica restrito à de alimentação e limpeza, não existindo a de ventilação.

A capacidade é de 50 tv/h.

1.4.4. Fornalha com Grelha Oscilante

O sistema estrutural da fornalha desta solução é metálico com sistema de dutos acoplados a sua superfície. No interior destes dutos circula água com o objetivo de manter o conjunto a temperatura compatível com suas solicitações.

A grelha sobre a qual será depositada o combustível é construída em perfis de ferro fundido dispostos paralelamente a sentido de oscilação. Estes são fixados em perfis T que têm posicionamento perpendicular a sentido de oscilação. O conjunto assim constituído é apoiado

do sobre barras articuladas neste e na estrutura possibilitando a oscilação.

O sistema motor de acionamento da grelha localiza-se externamente à fornalha devido as condições adversas encontradas no interior desta.

O momento necessário para acionamento da grelha é transmitido, assim, por eixo ligado ao mecanismo excêntrico. A amplitude de vibração pode ser controlada através da regulagem da excentricidade do mecanismo, tendo influência no processo de homogeneização da massa sobre a grelha e assim melhorando as condições de queima. O sistema de oscilação permite a movimentação automática da carga. A capacidade desta fornalha é 50 tv/h.

1.4.5. Fornalha de Esteira Rotativa Móvel

Este tipo de fornalha possui a câmara de combustão totalmente revestida de tijolo refratário.

A alimentação da carga é realizada automaticamente, bem como a retirada das cinzas ao final do curso.

A carga percorre a fornalha sobre uma esteira metálica que possui no mínimo um comprimento de 4 metros e um máximo de 8 metros, onde a queima se processa extinguindo-se até o término do percurso.

A esteira é construída de forma a permitir a dilatação devido às altas temperaturas existentes na câmara. Seu acionamento é realizado por um sistema de transmissão proveniente de um motor localizado externamente à fornalha, devido às altas temperaturas existentes na mesma.

O comprimento da esteira deve ser compatível com a velocidade de translação, para poder permitir a queima total da carga.

Este tipo de fornalha tem sua aplicação limitada a produção de 75 tv/h, embora possa chegar em alguns casos a 100 tv/h, prestando-se particularmente para a queima de carvão britado com alto teor de cinzas.

1.4.6. Fornalha de Leito Fluidizado

No caso, temos uma câmara de combustão totalmente refrigerada a água. Na sua parte inferior temos um crivo que é o suporte do leito. Por ele passa o ar de combustão que vai manter o leito no estado de fluidização. A passagem do ar corretamente distribuído pelo crivo através do leito vai torná-lo fluidizado, isto é, a velocidade do ar ao passar pelos grãos de areia tenderá a elevá-los e haverá um momento para uma certa velocidade do ar, em que o leito se comporta exatamente como um líquido, porém, em estado de muita agitação interna. As partículas caminham em todas as direções estabelecendo um estado que é próprio dos leitos fluidizados.

Se imaginarmos esta massa de areia na fase fluidizada aquecida ao ponto de inflamação da madeira, ao arremesarmos pedaços de madeira no leito, esta se inflamará e fornecerá calor para que o leito continue aquecido. A madeira tem cinzas e estas permanecem no leito e tendem a elevar o seu nível; quando isso ocorre extraímos pelo tubo de extração do material do leito uma quantidade que reestabeleça o nível ideal.

1.4.7. Fornalha com Queimador do tipo Lança de Carvão Pulverizado

A instalação, ocupando uma área útil de dimensões consideráveis, compreende basicamente duas estações. A primeira de compressores que fornecem ar sob pressão para o transporte pneumático do carvão e a segunda, do sadora de carvão pulverizado que permite a composição

de diferentes misturas deste com o ar.

O queimador propicia a formação de uma chama de formato e comprimento controlado a qual é proveniente da combustão do carvão vegetal pulverizado com o ar de transporte. Habitualmente utiliza-se uma relação ar de transporte para carvão de aproximadamente 7 com uma faixa econômica de utilização entre 20 a 80 tv/h.

1.5. Viabilidade Econômica

Analisar-se-ã o valor econômico das alternativas sob o ponto de vista do usuário e do consumidor. Todas as alternativas sob o aspecto do fabricante são compensadoras, pois seus rendimentos serão maiores que respectivos custos de fabricação. Isto foi avaliado por um estudo econômico previamente realizado o qual levou em conta, entre outros fatores, o prazo de execução, os processos utilizados, a disponibilidade de tecnologia e mão-de-obra ou seja, os custos fixos e variáveis.

Por outro lado, o preço provável estimado pelo comprador será maior que o preço a pagar para todas as alternativas com exceção da fornalha em leito fluidizado, a qual apresenta uma tecnologia de custo elevado.

1.6. Viabilidade Financeira

Levando-se em conta que as alternativas restantes utilizam tecnologia nacional e acessível, e consequentemente de execução compatível com os recursos disponíveis na empresa construtora, chega-se à conclusão que aquelas alternativas são viáveis financeiramente.

*Crédito / 5
é o indicador
maior no
caso!*

*Ordem de
prioridade
investimentos?*

2. PROJETO BÁSICO

2.1. Escolha da melhor solução

Para a melhor compreensão dos itens relacionados na matriz de precisão passa-se a defini-los subdividindo-os em quatro características principais:

2.1.1. Características funcionais

- rendimento térmico - é a relação entre a energia contida nos gases de combustão e a energia liberada pelo combustível;
- segurança na operação - é a segurança que o equipamento admite ao operador e a instalação durante a operação, manutenção, alimentação e descarga;
- consumo específico - é a relação entre a vazão de gases quentes e o consumo de combustível.

2.1.2. Características operacionais

- *confiabilidade* *vida útil* - durabilidade - é o tempo de funcionamento do equipamento entre manutenções corretivas;
- facilidade de manutenção - é a praticidade de manutenção do equipamento com vista na baixa utilização de mão-de-obra e investimento;
- facilidade de carga - é a facilidade de alimentação do combustível na fornalha;
- controle operacional - é a possibilidade do operador modular a temperatura dos gases em função da quantidade de combustível adicionada.

2.1.3. Características financeiras

- prazo de retorno - é o período necessário para que o investimento inicial seja ressarcido. Variando em função dos rendimentos e dos custos de manutenção e dos equipamentos empregados.

2.1.4. Características econômicas

- custo de manutenção - é o capital gasto em mão-de-obra e peças para a manutenção preventiva e corretiva do equipamento.
- custo de operação - é o custo da matéria-prima e sua preparação, mão-de-obra e operação do equipamento;
- custo de armazenamento - é o capital empatado em manutenção de estoques estratégicos de combustível.

A partir deste ponto as alternativas supra-descritas serão representadas, por facilidade, por meios de letras, na ordem em que foram apresentadas.

Peso	A	B	C	D	E	F	G	
12	7	7	6	7	6		8	Rendimento Térmico
8	5	6	5	6	8		8	Segurança na operação
13	5	8	5	8	8		8	Consumo específico
8	8	7	7	7	7	Inviabilizado financeiramente	5	Durabilidade
8	8	7	7	6	5		5	Facilidade de manutenção
7	7	8	5	8	9		8	Facilidade de carga
9	6	6	3	6	7		8	Controle operacional
12	8	8	7	6	6		4	Prazo de retorno
9	8	7	7	6	5		4	Custo de manutenção
9	6	5	6	6	6		5	Custo de operação
5	5	5	5	5	5		4	Custo de armazenagem
Σ 100	667	687	577	655	658		621	

Analisando os totais obtidos na matriz de avaliação, verifica-se o melhor resultado na alternativa "B" - "Fornalha em escada", a qual passa-se a modelar matematicamente.

2.2. Modelo Matemático

2.2.1. Modelação de combustão da lenha

Sejam estes os componentes da lenha:

C % em peso de carbono;

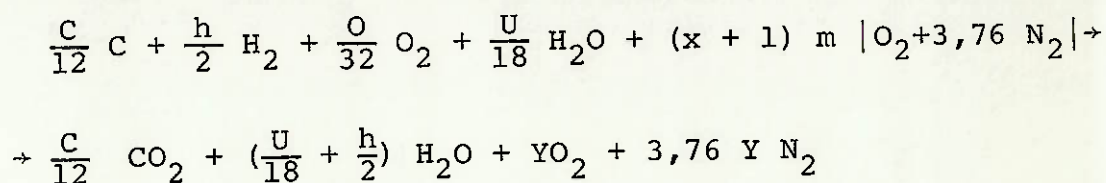
H % em peso de hidrogênio;

O % em peso de oxigênio;

X % de excesso de ar/100;

U % de umidade do combustível/100

Tem-se a equação de combustão da lenha:



$$m = \frac{C}{12} + \frac{h}{4} - \frac{O}{32}; \quad Y = (x+1) \left| \frac{C}{12} + \frac{h}{4} - \frac{O}{32} \right| + \frac{O}{32} - \frac{h}{4} - \frac{C}{12}$$

A partir dessa equação passa-se a definir as quantidades em volume:

- Ar de entrada

$$V_{ar} = \left(\frac{C}{12} + \frac{h}{4} - \frac{O}{32}\right) (1 + x)$$

- Vapor d'água

$$V_v = \frac{U}{18} + \frac{h}{2}$$

- Gases secos

$$V_{gs} = \frac{C}{12} + 4,76 \cdot Y$$

- Gás total

$$V_{gt} = V_v + V_{gs}$$

- % CO₂

$$\% CO_2 = \frac{\frac{C}{12}}{\frac{C}{12} + 4,76 Y} \quad (\text{base seca})$$

$$\% CO_2 = \frac{\frac{C}{12}}{\frac{C}{12} + \frac{U}{18} + \frac{h}{2} + 4,76 Y} \quad (\text{base úmida})$$

2.2.2. Modelação da temperatura da chama

Seja um processo de combustão que ocorre adiabaticamente, sem envolver trabalho ou variação de energia cinética ou potencial. Para esse processo, a temperatura atingida pelos produtos é chama de temperatura adiabática de chama. Esta será a temperatura máxima atingida pelos reagentes, pois qualquer transmissão de calor dos reagentes e/ou qualquer combustão incompleta tenderia a diminuir a temperatura dos produtos.

Devem ser feitas algumas hipóteses:

- regime permanente;
- variação de energia cinética e potencial desprezíveis;
- trabalho e troca de calor igual a zero.

Da teoria termodinâmica:

$$\sum_r n_r (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_r = \sum_p n_p (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_p$$

onde: h_f^0 = entalpia de formação (25°C - 1 atm)

Δh = variação da entalpia com relação a entalpia de formação

r = reagentes

p = produtos

Para determinação da temperatura adiabática é necessário um estudo do efeito da dissociação dos produtos. Entre esse efeito a dissociação do $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ tem grande importância. Deve portanto ser calculado o constante de dissociação K.

$$K = \frac{(v_{CO_2})_{A_{CO_2}}}{(v_{CO})_{A_{CO}} \cdot (v_{O_2})_{A_{O_2}}}$$

onde: A_i = atividade de componente: $A_i = Y_i \cdot \frac{f_i}{f_i^0}$

Y = fração molar do componente;

f_i = fugacidade do componente;

f_i^0 = fugacidade do componente no estado padrão

Adotando-se como hipótese que os produtos de combustão podem ser considerados como gases perfeitos:

$f = P$ onde P é a pressão do componente

$P = P_s = 1 \text{ atm}$ (P_s = estado padrão)

tem-se:

$$K = \frac{Y_{CO_2}}{Y_{CO} + Y_{O_2}^{1/2}}$$

Sendo a constante de equilíbrio passível de ser calculada pela equação:

$$\log K = \frac{29.530.5}{T} - 2,769 \log T + 0,0001225 T - 1,356 \cdot 10^{-7} T^2 + 1,714$$

onde T é em graus Kelvin

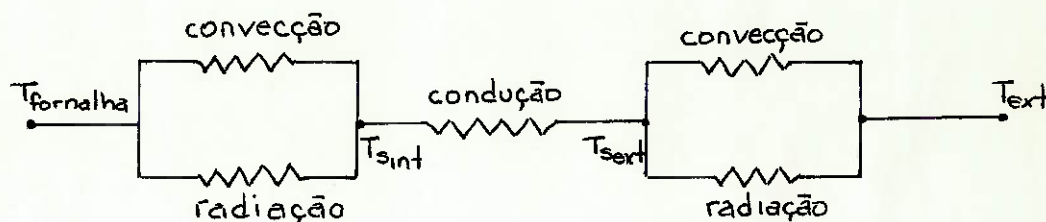
com o valor de K calculado obtém-se qual a parcela dissociada.

Assim para o cálculo da temperatura adiabática de chama adota-se uma temperatura dos produtos a partir da qual é calculada a parcela dissociada e a entalpia dos produtos. Estes devem ser comparados com a entalpia dos reagentes, caso não coincidam deve ser avaliada outra temperatura e reiterado.

2.2.3. Modelação das perdas para o ambiente

Tem-se como formas de transferência de calor envolvidas neste fenómeno a radiação, convecção e condução. Cada uma tem sua importância relativa a uma fase do processo de troca de calor, assim a perda para a parede na parte interna devido as altas temperaturas se deve em grande parte a transferência devida a radiação apesar de o efeito de convecção ser importante. Nas trocas internas ao material da parede da fornalha, o fenómeno de condução está presente. Na parte externa do forno tem-se a transferência por convecção e radiação.

A partir do exposto constroi-se o seguinte circuito.



o fluxo de calor é dado

$$\dot{Q}_{\text{amb}} = \frac{T_{\text{fornalha}} - T_{\text{ext}}}{\frac{1}{h_{\text{int}} \cdot \Delta_{\text{int}}} + \frac{K \cdot A}{E} + \frac{1}{h_{\text{ext}} \cdot \Delta_{\text{ext}}}}$$

onde: $h_{\text{int}} = h_r + h_c$, efeito conjunto de radiação e convecção parte interna;

Δ_{int} = área interna da fornalha;

K = condutibilidade térmica;

A = área de referência;

E = espessura da parede de refratários;

$h_{\text{ext}} = h_r + h_c$, efeito conjunto de radiação e convecção parte externa;

Δ_{ext} = área externa da fornalha

Soma-se a essas perdas a entalpia dos gases de saída que representam energia não utilizada. Esta pode ser avaliada da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{gc} * C_{p_{gc}} * (\Delta T)$$

onde T é a diferença entre a temperatura dos gases de combustão e a temperatura ambiente. Deve-se notar que a rigor a temperatura inferior não é a ambiente haja visto a necessidade de se observar o limite do ponto de orvalho de algumas substâncias.

2.2.4. Modelação da absorção de calor na caldeira

Nas fornalhas industriais a temperatura é inferior à teórica porque existem perdas de calor pelas paredes da câmara. Diminuindo-se da temperatura teórica o efeito das perdas, determinamos a temperatura de saída dos gases e portanto a absorção por radiação pela fórmula:

$$HABS = \epsilon SA \cdot \sigma \cdot |(T_c + 273)^4 - (t + 273)^4|$$

sendo:

SA = superfície de aquecimento exposta à radiação em m^2 ;

T_c = temperatura de saída dos gases da fornalha em $^{\circ}C$;

ϵ = emissividade dos gases;

σ = constante de Stephan-Boltzmann =

$$= 4,88 \times 10^{-8} \text{ kcal/k}^4 \text{ m}^2 \cdot \text{h};$$

$HABS$ = fluxo de calor absorvido por radiação em kcal/h

t = temperatura da parede dos tubos em $^{\circ}C$ que é expressa pela temperatura logarítmica média entre a temperatura de entrada dos gases e temperatura de saída para a chaminé.

Sendo o peso total do combustível dado por WF em kg de combustível por hora, pelo balanço térmico: (fluxo de calor a partir de entalpia dos gases de combustão) = (fluxo de calor a partir da entalpia dos gases de saída) + (fluxo de calor absorvido por radiação)

$$WG \cdot WF \cdot h_o = h_c \cdot WG \cdot WF + HABS$$

$$\therefore h_c = h_o - \frac{HABS}{WG \cdot WF} \quad \text{sendo } h_c = \text{entalpia dos gases de saída (kcal/kg)}$$

Esta fórmula fornece a temperatura de saída que é obtida por tentativas, pois admite-se um certo T_c e calcula-se HABS e obtem-se h_c .

2.2.5. Modelação do rendimento térmico

Para finalizar os aspectos gerais que nos darão as bases para as discussões das fornalhas queimando lenha, analisaremos dois pontos importantes que são o excesso de ar e a umidade dos combustíveis, e seus reflexos no rendimento térmico.

Sendo a fração do calor produzido na fornalha aproveitado na caldeira igual a Q_o e o calor total desenvolvido na fornalha igual a Q_i temos a relação:

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \eta_t \quad \text{onde: } \eta_t \text{ é o rendimento térmico}$$

Como o calor desenvolvido para uma dada quantidade de combustível WF é:

$$Q_{i_l} = PCI \cdot WF \quad \text{onde: } Q_{i_l} \text{ calor desenvolvido líquido;}$$

$$Q_{i_b} = PSC \cdot WF \quad Q_{i_b} \text{ calor desenvolvido bruto.}$$

Seja então o rendimento superior e o inferior definidos respectivamente por:

$$\eta_{ts} = \frac{Q_{i1}}{Q_o} \quad \text{e} \quad \eta_{ts} = \frac{Q_{ib}}{Q_o}$$

Destas relações obtemos para os mesmos Q_o :

$$\eta_{ti} = \eta_{ts} \cdot \frac{PCS}{PCI}$$

Para se calcular o rendimento térmico temos dois principais procedimentos: o estimativo e o rela. Chamamos de estimativo aquele obtido calculando-se as perdas na chaminé e atribuindo-se valores às perdas de cinzas, radiação e consumo de combustível e do calor produzido pela fornalha

O modelo matemático feito permitiu a definição das seguintes variáveis de entrada, de saída e parâmetros:

- variáveis de entrada:

- e_1 . temperatura do ar de entrada
- e_2 . composição do combustível (tipo e umidade)
- e_3 . massa de combustível
- e_4 . massa de ar
- e_5 . temperatura ambiente

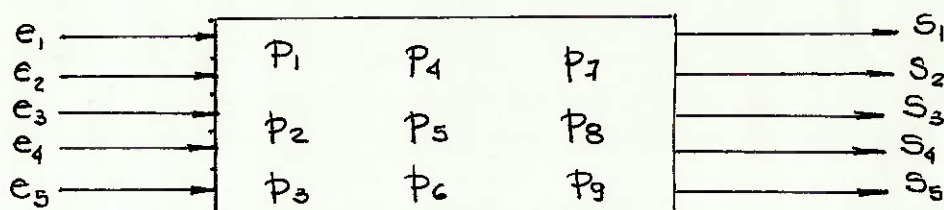
- variáveis de saída:

- s_1 . composição dos gases de saída
- s_2 . massa de gases de saída
- s_3 . temperatura dos gases de saída
- s_4 . perdas de energia para o ambiente
- s_5 . temperatura adiabática de chama

- parâmetros:

- p_1 . capacidade da fornalha (intrínseco)
- p_2 . ~~ex~~cesso de ar
- p_3 . coeficiente de película
- p_4 . condutibilidade térmica
- p_5 . área e espessura da parede
- p_6 . entalpia de formação
- p_7 . emissividade dos gases
- p_8 . área de troca da caldeira
- p_9 . temperatura de saturação do líquido

✓ *low!*



2.3. Análise da sensibilidade

Analisar-se-á a sensibilidade do sistema levando em consideração cada item do modelo matemático.

Na modelação da combustão da lenha o único parâmetro é o excesso de ar (x) utilizado na combustão. Ele é importante na medida em que torna a combustão completa, pois em condições estequiométricas nem sempre isto acontece, e influi na quantidade dos gases de saída. Encontra-se na tabela 1 sua influência na % de CO_2 , que indica o quão completa é a queima.

No item seguinte, modelação da temperatura de chama os parâmetros são: o excesso de ar e entalpias de formação. A importância do excesso de ar deve-se ao fato da temperatura adiabática máxima só ser conseguida na condição estequiométrica. Deve-se portanto considerar a possibilidade da diminuição da

temperatura em favor de uma combustão completa. As entalpias de formação influem diretamente na temperatura de chama.

Com relação à modelação das perdas para o ambiente compare - cem como parâmetros os coeficientes de película, área, espes - sura da parede e condutibilidade térmica. O coeficiente da película não apresenta variações significativas, recaindo por - tanto sobre as dimensões e condutibilidade térmica de maior importância.

Na modelação da absorção de calor na caldeira são parâmetros a área de aquecimento exposta à radiação, emissividade dos ga - ses e temperatura do líquido a ser aquecido, que pode ser con - siderado o mais importante dessa fase.

No último item tem-se somente um único parâmetro que é o ex - cesso de ar, influenciando diretamente no calor fornecido.

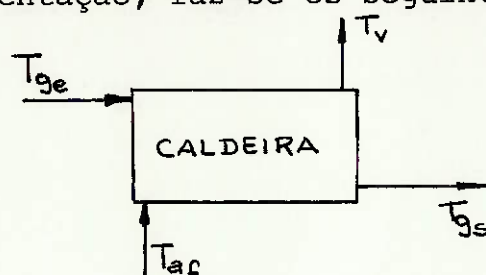
Depois dessa análise, vê-se que os parâmetros mais importan - tes e portanto os críticos são:

- o excesso de ar;
- as entalpias de formação;
- espessura da parede;
- área exposta ao ambiente;
- condutibilidade térmica da parede;
- temperatura de saturação do líquido a ser aquecido.

2.4. Análise da compatibilidade

Para que a instalação da fornalha ocorra de maneira a não in - terferir de forma acentuada no arranjo já existente, suas di - mensões devem ser tais que não comprometam o seu bom desempe - nho e possa ser instalada na caldeira a que se destina.

Para que haja compatibilidade térmica entre caldeira, fornalha e alimentação, faz-se os seguinte balanços:

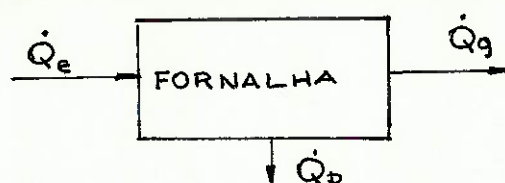


T_v - temperatura do vapor;
 T_{af} - temperatura da água fria
 T_{ge} - temperatura dos gases de entrada
 T_{gs} - temperatura dos gases de saída.

Sendo \dot{m} a massa de água e \dot{m}_g a massa dos gases, tem-se

$$\dot{m} \cdot (h_v - h_{af}) = \dot{m}_g \cdot C_p \cdot (T_{ge} - T_{gs}) \quad (1)$$

Fazendo agora o balanço na fornalha



\dot{Q}_g - fluxo de calor com relação aos gases de saída;
 \dot{Q}_p - calor perdido para o ambiente
 \dot{Q}_e - fluxo de calor que entre na fornalha

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_e - \dot{Q}_p \quad (2)$$

e

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g C_p (T_{ge} - T_{ar_{amb}}) \quad (3)$$

Com relação à alimentação da fornalha o seguinte balanço pode ser feito:

$$\dot{m}_c \text{ PCI} = \dot{Q}_e \quad (4) \quad \text{sendo: } \dot{m}_c \text{ a vazão mássica do combustível que entra.}$$

A compatibilidade térmica deve ser satisfeita pela verificação simultânea de (1), (2), (3) e (4) já que as quatro incógnitas são \dot{m}_c , \dot{m}_g , T_{ge} e \dot{Q}_p .

2.5. Análise da estabilidade

A análise da estabilidade será feita mantendo-se os parâmetros fixos e impondo limites superior e inferior nas variáveis de entrada para que haja estabilidade na saída.

A primeira análise refere-se à influência do tipo de madeira a portanto sua composição no poder calorífico ou seja o calor possível de ser fornecido à fornalha. Esta análise encontra-se na tabela 2.

A análise seguinte diz respeito à influência da umidade no PCS e PCI do combustível. A tabela 3 contém a variação da umidade de 0 a 90% e os respectivos valores de PCS e PCI.

A influência do PCI com relação a temperatura teórica da chama é mostrada na tabela 4.

Na tabela 5 encontra-se a influência da massa de combustível na temperatura de saída dos gases, e a relação entre massa de combustível e a área de aquecimento da caldeira.

Com relação a uma dada temperatura de saída dos gases, e umidade da lenha pode-se verificar na tabela 6 os diversos rendimentos do sistema caldeira-fornalha.

2.6. Otimização formal

Do estudo dos tipos de lenha a ser utilizado verificou-se que a mais indicada é o eucalipto que apresenta composição média de 54,98% de carbono, 6,54% de hidrogênio, 38,08% de oxigênio e 0,4% de cinza, PCS de 5484 kcal/kg e PCI de 5130 kcal/kg.

Sendo a porcentagem de CO_2 máxima 19,5%, o excesso de ar mínimo é em torno de 10%.

Estando a temperatura dos gases de saída em torno de 225°C , que é um valor bem razoável e com o rendimento térmico entre 70% e 80% o limite máximo de umidade será 40%.

Dado estes valores teremos um PCI mínimo de 3100 kcal/kg e uma temperatura de chama de 1510°C .

Do descrito acima, necessita-se de uma vazão mássica de ar em torno de 19 ton/h as dimensões básicas da fornalha devem ser 3,5 m de altura, por 5,0 m de comprimento, 3,0m de largura e 0,37 m de espessura de parede em tijolo refratário que proporciona uma perda média de 2,5% do calor total fornecido.

2.7. Previsões para o futuro

Uma vez que se tenha escolhido tal solução, sua implantação é de certa forma imediata, pois sua tecnologia construtiva e operacional são por demais difundidas. Devido ao exposto não se incorretá na possibilidade de obsolescência técnica a curto prazo, visto que, basicamente toda sua tecnologia está baseada no desenvolvimento de grelhas e isolamentos, os quais têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos 150 anos.

Tal solução tem sido utilizada desde o princípio da revolução industrial tendo porém sido parcialmente substituída por fornalhas a óleo com a crise do petróleo (guerra do Yom Kippur setembro de 1973) e conseqüente conscientização mundial a cerca de os combustíveis fósseis não serem renováveis, tornou se evidente a necessidade de se encontrar outras soluções.

Tais soluções não são necessariamente novas, mas sim aquelas que, no momento se mostrem mais viáveis.

No momento a viabilidade de tal solução reside no fato de se estar lidando com uma forma renovável e de fácil obtenção de energia.

Não obstante, a médio ou longo prazo, pode-se ter grandes mudanças no panorama energético, podendo-se ter como mais viável a utilização de energia obtida por forma não ortodoxas.

2.8. Previsão de tempo de funcionamento

A vida útil da fornalha pode ser definida como sendo o tempo durante o qual a diferença entre os benefícios da utilização e os custos de aquisição, operação e manutenção apresenta um dado valor positivo, ou seja, a sua utilidade líquida é maior que qualquer outro produto que o pudesse substituir.

A experiência adquirida mostra que o tempo normal de funcionamento de tal equipamento é próximo de 15 anos o que vem de certa forma a ser compatível com a incerteza sobre o surgimento e/ou viabilização de outras alternativas, como é o caso da fornalha com leito fluidizado a qual até o momento é inviável tecnicamente.

Deve-se ter em mente que a variação da função desejada na fornalha, geração de gases quentes, se dá com uma função inversamente proporcional ao tempo de forma que, no seu período de vida útil, sejam cumpridas integralmente as especificações iniciais.

2.9. Ensaaios e testes do projeto

Dado que o projeto em questão trata de uma única instalação de uso difundido, com tecnologia por demais conhecida, só se fazem necessários testes para regulagens de operação através da manipulação direta de algumas variáveis de entrada (quantidade de combustível) e/ou parâmetros (excesso de ar) obtendo

assim um ponto ideal de funcionamento em função da demanda exigida que no caso seria a quantidade de vapor exigida na instalação textil.

*listar os ajustes
e funcionamento
ótimo!*

Simplificação

Por se tratar de um equipamento por demais conhecido e utilizado, fica extrenamente difícil se simplificar sua forma construtiva e funcional esbarrando na dificuldade de se encontrar soluções, novas, mais simples do que as já utilizadas. A não ser pelo surgimento de novos processos de fabricação dos componentes, o que, de certa forma, fugiria ao escopo do projeto básico, não existiriam muitas possibilidades de simplificação mas sim de "complicação com base na otimização.

2.10. Conclusão

Uma vez que a proposta inicial do projeto constitui em determinar qual seria a melhor forma de se queimar lenha ou carvão vegetal para a obtenção de gases quentes e consecutiva geração de vapor observa-se, segundo o desenvolvimento deste projeto, a determinação de um tipo determinado de queimador. Este por sua vez satisfaz às condições exigidas da forma mais econômica e segura possível, não deixando de possibilitar os controles necessários ao cumprimento da demanda exigida.

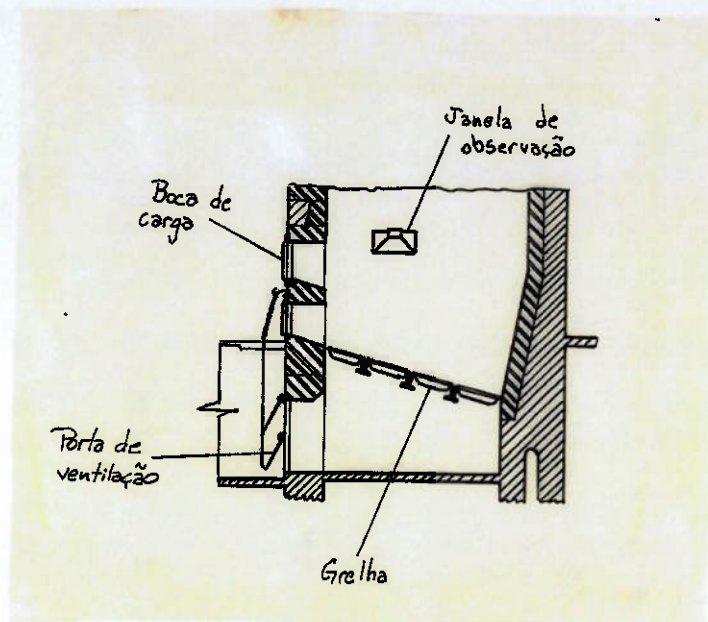


figura 1

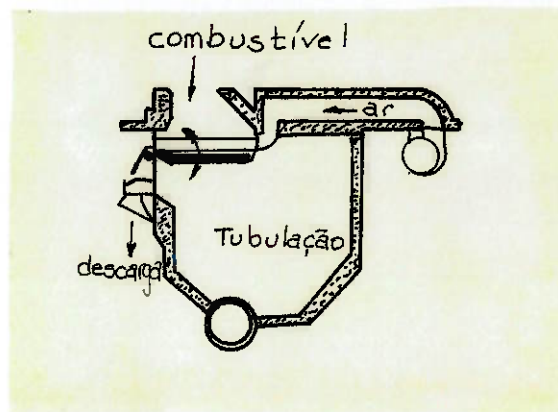
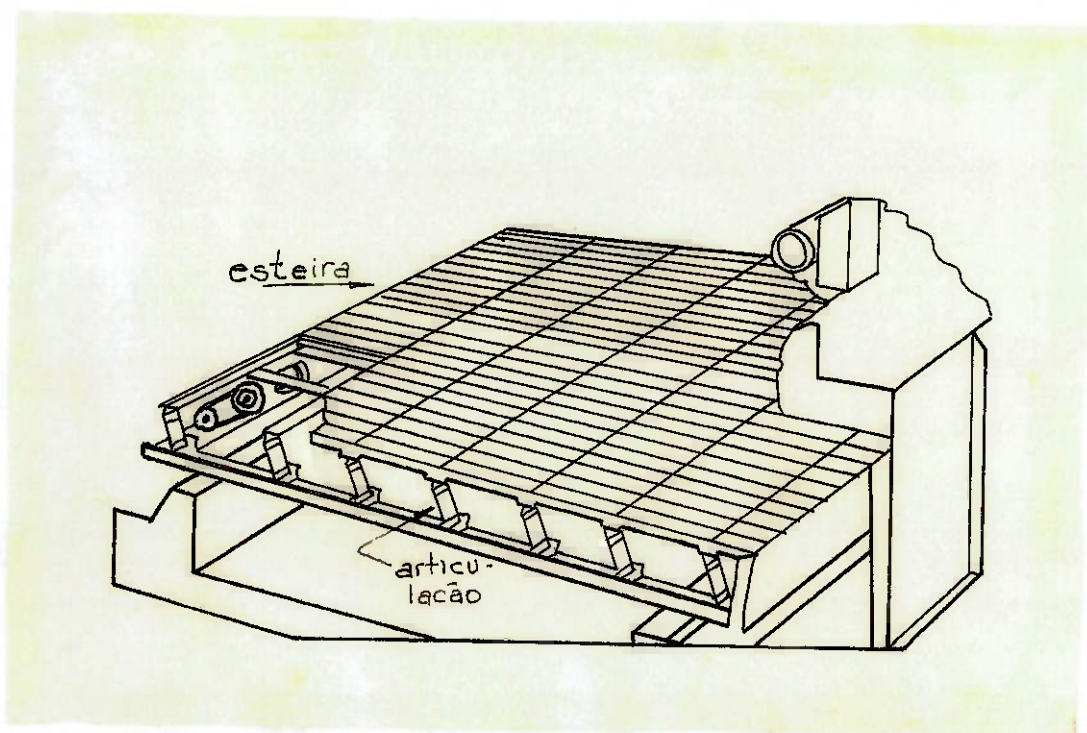


figura 3

figura 4



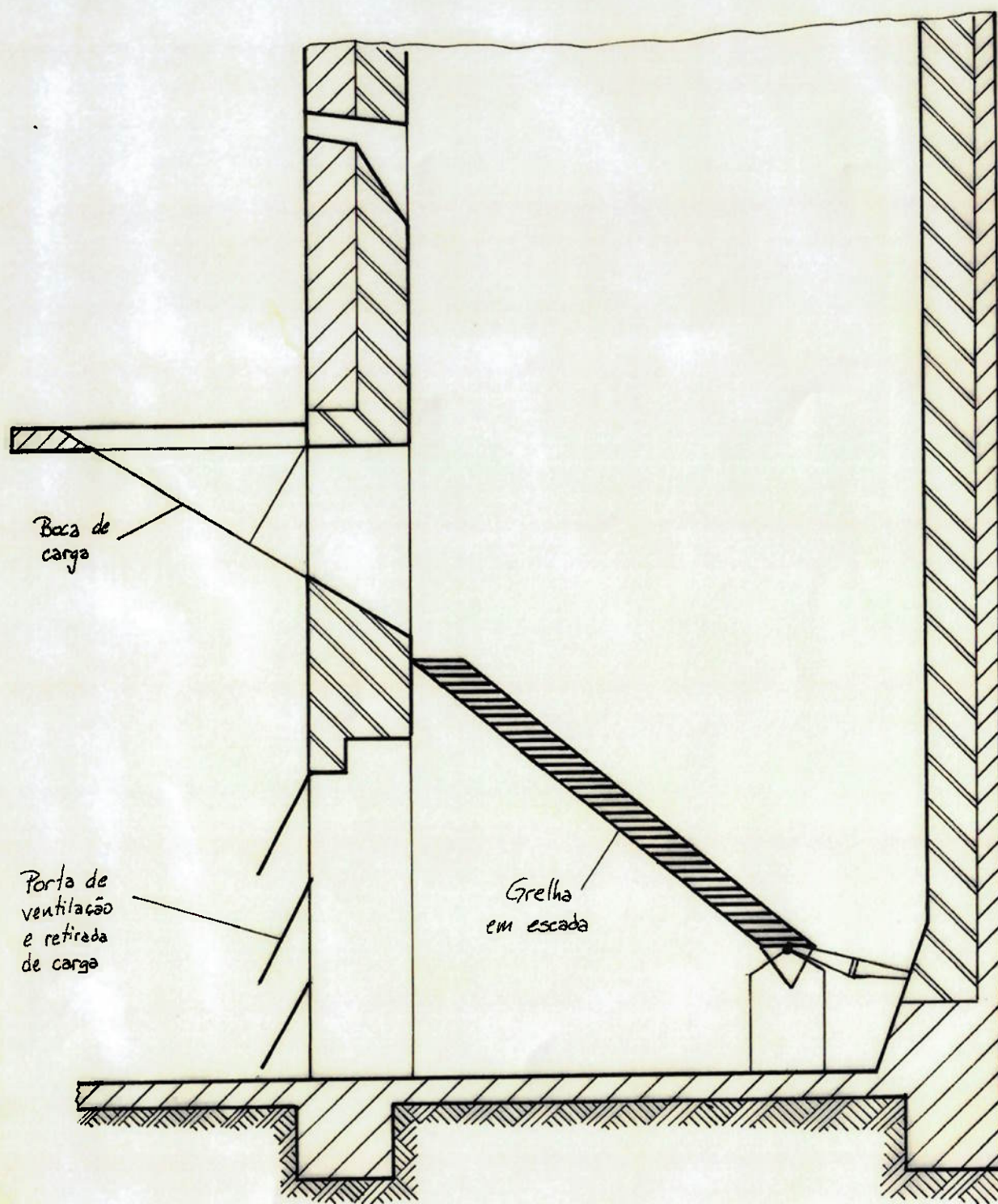
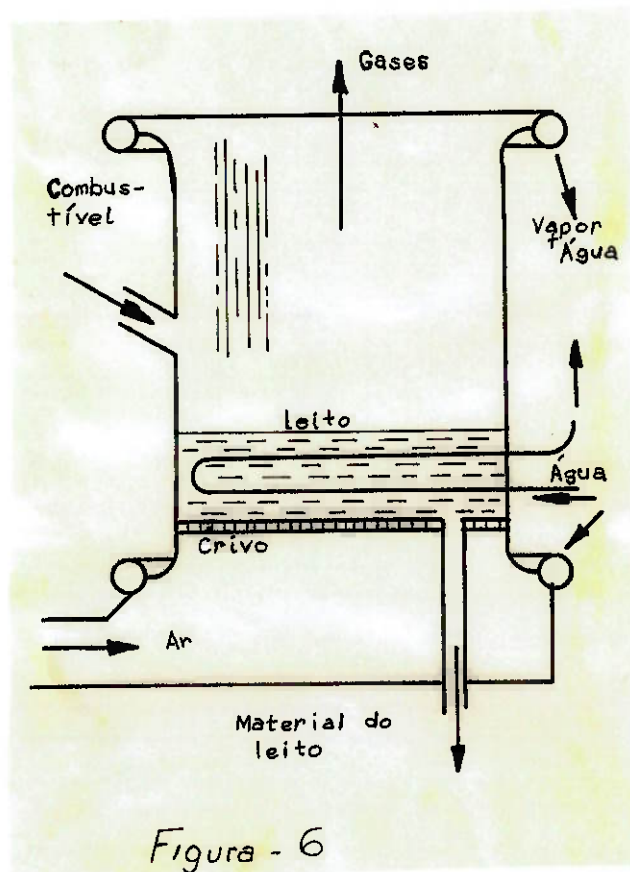
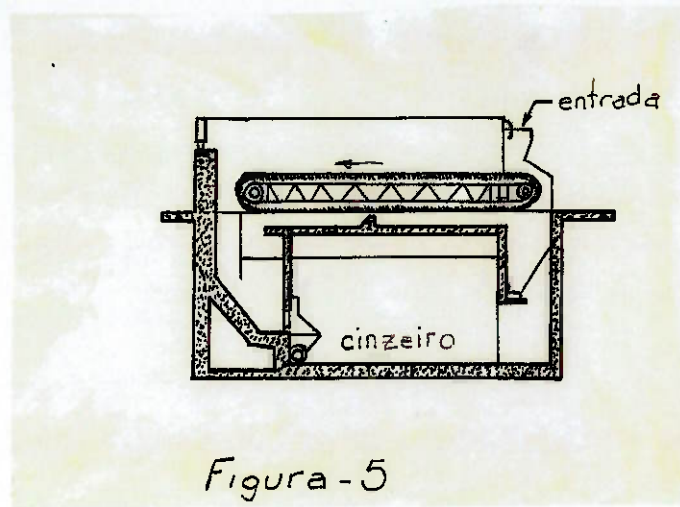


Figura - 2



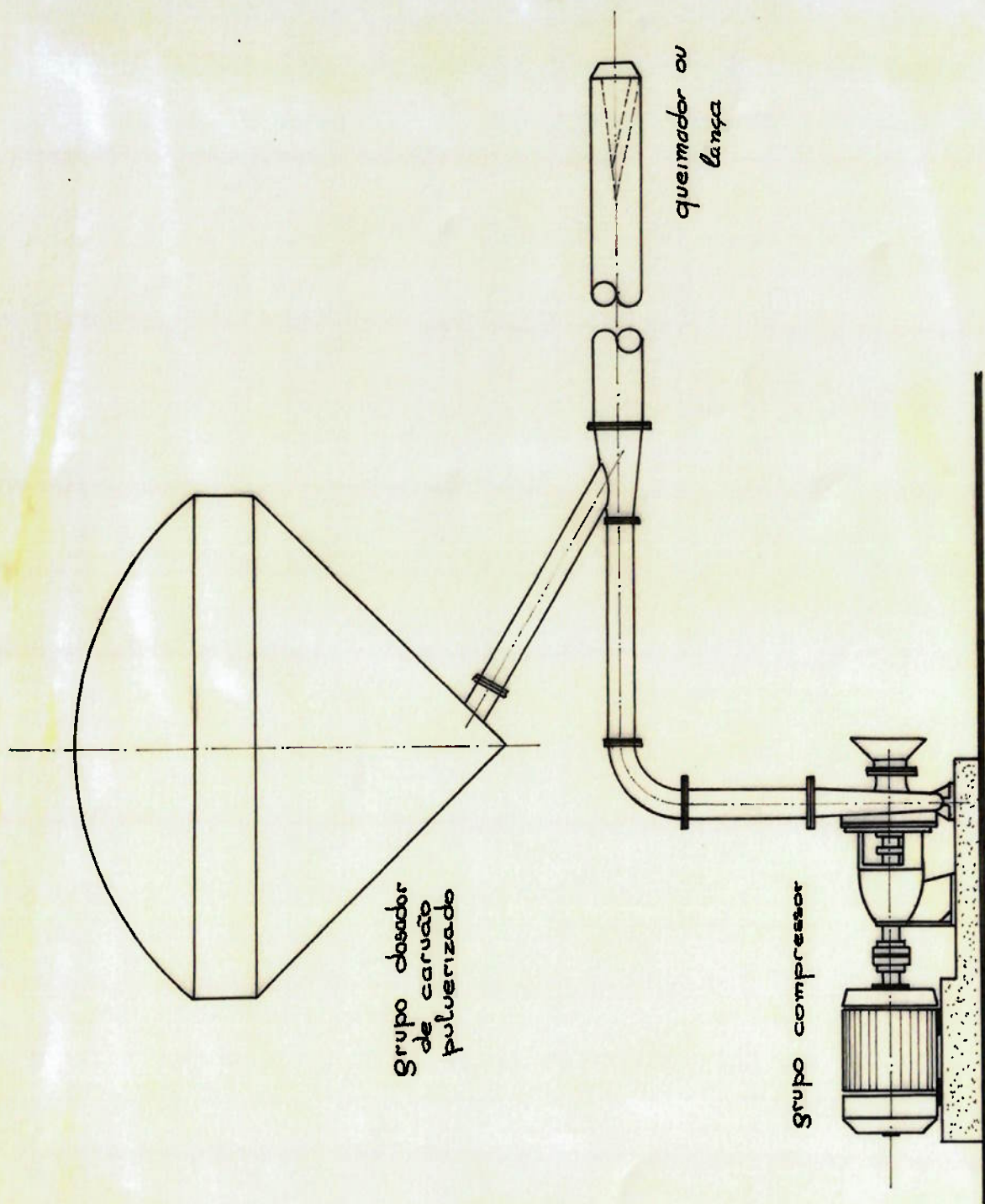


Figura-7

TABELA 1

Variação do CO₂ com o excesso de ar
da lenha

Excesso de ar %	CO ₂ %
0	20,2
10	18,4
20	16,8
30	15,5
40	14,4
50	13,4
60	12,6
70	11,8
80	11,2
90	10,6
100	10,1

TABELA 2

Análise da lenha seca - %

	Cedro	Eucalipto	Pinho	Carvalho	Média
C	48,80	54,98	52,55	49,49	51,46
H	6,37	6,54	6,08	6,62	6,40
O	44,46	38,08	41,25	43,74	41,88
S	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	-
Cinza	0,37	0,40	0,12	0,15	0,26
PCS	4667	5484	4944	4828	4980
PCI	4322	5130	4616	4665	4683
CO ₂ Máx	20,2	19,5	20,2	19,9	20,0

TABELA 3

Variação dos poderes caloríficos com a
umidade da lenha

Umidade %	PCS kcal/kg	PCI kcal/kg
0	5083	4756
10	4575	4221
20	4067	3687
30	3558	3153
40	3050	2619
50	2542	2085
60	2033	1551
70	1525	1016
80	1017	482
90	508	-

TABELA 4

Temperatura teórica de combustão da
lenha

U %	PCI kcal/kg	T _O
0	5130	1710
10	4553	1670
20	3977	1640
30	3400	1580
40	2828	1510
50	2249	1415
60	1673	1270
70	1095	1040

TABELA 5

Temperatura de combustão da lenha

WF.PCI ₂ kcal/m ² .h	WF/S ₂ A. kg/m ² .h	T _c °C
50000	20	685
100000	40	810
200000	80	940
300000	120	1015
400000	160	1065
500000	200	1120

TABELA 6

Rendimento Térmico PCS (lenha)

T _g Gás °C	% Umidade na Lenha								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
200	81,4	80,0	78,1	75,8	72,7	68,4	61,9	51,1	29,4
225	80,2	78,8	76,9	74,5	71,4	67,0	60,4	49,3	27,3
250	79,0	77,5	75,7	73,3	70,0	65,6	58,8	47,6	25,5
275	77,8	76,3	74,4	72,0	68,7	64,1	57,3	45,9	23,0
300	76,6	75,1	73,2	70,7	67,4	62,7	55,7	44,1	20,9
325	75,5	73,9	71,9	69,4	66,0	61,3	54,2	42,4	18,8
350	74,3	72,7	70,7	68,1	64,7	59,9	52,7	40,7	16,7

BIBLIOGRAFIA

1. Hildo Pera - Geradores de Vapor de Água (Caldeiras) - 1966;
2. Prof. Omar Moore *de* Madureira - Apostila de Projeto Industrial - EPUSP;
3. Agrupamento de Engenharia Térmica do IPT - Eficiência no Aproveitamento de um Combustível num Gerador de Vapor;
4. Victor Yves Diniz - Caldeiras a Lenha;
5. Trabalho de PMC-547 de 22 de outubro de 1981 - Cálculo da Temperatura Adiabática de Chama;
6. Catálogos da ATA;
7. Frank Kreith - Princípios da Transmissão de Calor e Massa;
8. Van Wylen e Sontag - Fundamentos da Termodinâmica Clássica.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

- ao Prof. Dr. Clemente Greco pelo seu apoio e orientação neste trabalho; ✓
- ao Eng. José Gilberto Mariano Costa;
- ao Eng. Luís Cesar Floriano Baldo;
- ao Prof. Eng. Euryale Zerbini;
- ao Eng. Myiung Bo Park.