

CIBEC/INEP



B0003038

FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA A AGRICULTURA

- Energia de biomassa
- Energia solar
- Outras fontes

MODULO 1 - PARTE A

COMBUSTÃO DE BIOMASSA

018.43:620.92
683f

MEC - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
ABEAS - Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior

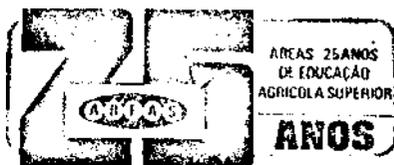
**FONTES
ALTERNATIVAS
DE ENERGIA
PARA
A AGRICULTURA**

Energia de biomassa
Energia solar • Outras
fontes

MODULO 1 - PARTE A
COMBUSTÃO DE BIOMASSA

MEC - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

ABE S ■ Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AGRÍCOLA SUPERIOR SCS-Ed.
Ceará - 59 andar - Salas 507/09 - Tel.: (061) 225-5928 - 70.303 - Brasília-DF

Curso de Fontes Alternativas de Energia

Término: 05/06/86

Início: 06/05/85 Módulo

Introdutório —

Revisão : Noções Básicas e Mecânica de Fluidos; Fundamentos de Cálculo Diferencial e Integral; Fundamentos de Química e Conceitos Básicos de Termodinâmica.

Período : 06/05 à 07/06/85

Duração : 50 horas

Tutores : Prof.ª Maria da Conceição Pinheiro — UFV
Prof. Jadir Nogueira da Silva — UFV
Prof. Heleno Nascimento Santos — UFV
Prof. Efrain Lázaro dos Reis — UFV

MODULO 1 - ENERGIA DA BIOMASSA

Período : 10/06/85 à 15/11/85

Duração : 230 horas

Tutores : Prof. Jadir Nogueira da Silva — UFV
Prof. Hélio Correia - ESAL
Prof. Carlos Frederico Hermeto — ESAL

I ENCONTRO NACIONAL

Período : 19/11/85 à 21/11/85 Local

: Belo Horizonte

MÓDULO 2 - ENERGIA SOLAR E SUAS APLICAÇÕES

Período : 25/11 /85 à 01/04/86

Duração : 150 horas

Tutores : Prof. Rogério Pinheiro Kruppel — UFPB
Prof. Fernando França - UNICAMP

MÓDULO 3 - OUTRAS FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA

Período : 07/04 à 23/05/86 Duração

: 70 horas

Tutores : Prof. Teimo Silva Araújo — UFPB
Prof. Deme'trio Bastos Netto - IPQM

29 ENCONTRO NACIONAL

Período : 3,4 e 5 de junho de 1986 Local :

Brasília-DF

* O Período de 20/12/85 à 12/01/86 será de férias não sendo portanto computado no tempo do curso.

1985					1986			
FEVEREIRO 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 2 9 16 23	MARÇO 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30	JULHO 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27	AGOSTO 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31	SETEMBRO 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28	JANEIRO 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25	FEVEREIRO 2 9 16 23 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22	MARÇO 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29	ABRIL 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26
MAIO 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25	JUNHO 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29	OUTUBRO 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26	NOVEMBRO 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30	DEZEMBRO 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28	MAIO 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31	JUNHO 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28	JULHO 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26	AGOSTO 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30
FEVEREIRO 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25	OUTUBRO 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27	NOVEMBRO 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30	DEZEMBRO 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28	JANEIRO 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27	FEVEREIRO 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25	MARÇO 2 9 16 23 30 3 10 17 24 31 4 11 18 25 5 12 19 26 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29	ABRIL 6 13 20 27 7 14 21 28 1 8 15 22 29 2 9 16 23 30 3 10 17 24 4 11 18 25 5 12 19 26	

	Página
5. FORNALHAS	33
5.1. Fornalhas para Combustíveis Sólidos	33
5.1.1. Fornalha sem Trocador de Calor	33
5.1.1.1. Dimensionamento	36
5.1.2. Fornalha com Trocador de Calor	38
6. CALDEIRA À LENHA	39
6.1. A Combustão da Lenha	39
6.2. Câmaras de Combustão	40
6.3. Caldeiras	43
6.3.1. Caldeiras Fogotubulares (FT)	43
6.3.1.1. Fogotubulares Verticais (FTV)	43
6.3.1.2. Fogotubulares Horizontais (FTH)	45
6.3.2. Caldeiras Aquatubulares (AT)	46
6.3.2.1. Caldeiras de Câmaras (AT-C)	47
6.3.2.2. Caldeiras de Dois Tambores (AT-2T)	48
6.4. Caldeiras Mistas	48
6.5. Generalidades	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE I - Variação dos Podêres Caloríficos da Lenha com a Umidade	
APÊNDICE II - Rendimento Térmico de Fornalha a Lenha em relação ao Poder Calorífico Superior, sendo Isolamento de Tijolos Refratários e Excesso de Ar de 40%.	

FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA A AGRICULTURA CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO POR TUTORIA À DISTÂNCIA

MODULO 1 PARTE A -

COMBUSTÃO DE BIOMASSA

ÍNDICE

	Pagina
1 . INTRODUÇÃO	1
2. COMBUSTÍVEIS	3
2.1. Poder Calorífico	3
2.1.1. Métodos de Calculo	4
2.2	7
Combustíveis Sólidos	7
2.2.1 . Lenha	8
2.2.2. Carvão Mineral	8
2.2.3. Carvão Vegetal	8
2.2.4. Coque	8
2.2.5. Resíduos Agrícolas	11
2.2.6. Coque do Coco de Babaçu	11
2.3, Combustíveis Líquidos	11
2.3.1. Petróleo	11
2.3.2. Óleo de Xisto	11
2.3.3. Álcool Etílico	11
2.4. Combustíveis Gasosos	12
COMBUSTÃO	13
3.1. Requisitos para uma Combustão Adequada	14
3.2. Cálculo do Ar Necessário para a Combustão	14
3.3.0 Excesso de Ar	15
3.4. Cálculo dos Produtos da Combustão	17
3.5. Temperatura da Combustão	17
3.5.1. Temperatura Teórica da Chama	18
3.5.2. Temperatura Média da Câmara de Combustão	20
4. COMBUSTÃO DA LENHA	20
4.1. Introdução	21
4.2. Combustão da Lenha	24
4.3. Temperatura da Combustão	25
4.4. Absorção na Fornalha	26
4.5. Rendimento Térmico	31
4.6. Conversão de Combustível	

FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA A AGRICULTURA CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO POR TUTORIA À DISTÂNCIA

MODULO 01 - PARTE 1 - COMBUSTÃO

OBJETIVOS Ao final da leitura do

Modulo o aluno deverá ser capaz de:

1. Diferenciar um dos outros, os processos de combustão, pirólise e gaseificação
2. Descrever os diversos tipos de combustão e suas propriedades.
3. Descrever e/ou explicar os requisitos para uma combustão adequada.
4. Calcular o ar necessário para combustão de Biomassa.
5. Reconhecer e/ou Descrever os diversos tipos de fornalhas e caldeiras que utilizam Biomassa como combustível.
6. Reconhecer e/ou descrever técnicas de dimensionamento de Fornalhas.

FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA A AGRICULTURA CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO POR TUTORIA À DISTÂNCIA

MÓDULO 1

PARTE A - COMBUSTÃO DE BIOMASSA

I. INTRODUÇÃO

Apesar de que as reservas mundiais de petróleo e gás natural não vão acabar da noite para o dia, dois fatores têm contribuído para que se acelerem pesquisas em fontes alternativas de energia. O primeiro deles é o alto custo associado aos combustíveis fósseis. O segundo é a incerteza de suprimento constantes principalmente de petróleo, devido as constantes instabilidades políticas e militares no Oriente Médio, recentemente agravado com a interminável Guerra Santa Iraque.

Biomassa, isto é lenha, resíduos agrícolas, etc., tem mere-

cido atenção ultimamente, como uma fonte alternativa de energia renovável e deve ser vista como boa opção, senão a melhor, para os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento que dependem dos combustíveis fósseis importados. Para estes países o petróleo deve ser visto como uma fonte nobre de energia e usado somente na fabricação de produtos químicos indispensáveis, e nunca como fonte de calor.

Os principais caminhos a seguir para aproveitamento da energia da biomassa estão ilustrados na Figura 1.

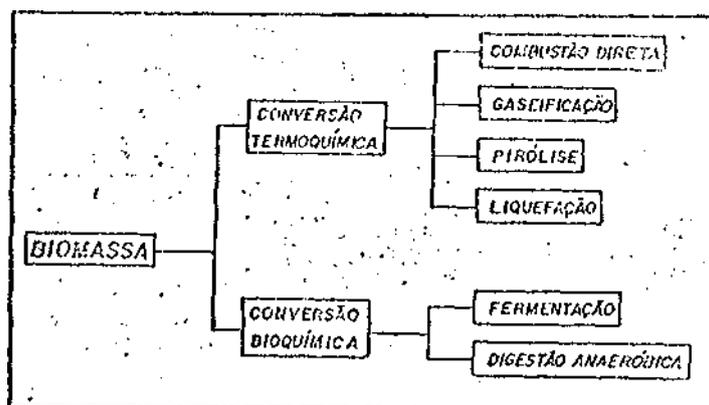


FIGURA 1 - Caminhos para conversão de biomassa.

É muito importante diferenciar uns dos outros os processos de Combustão Direta, Gaseificação

e Pirólise. Isto pode ser feito através da análise da Razão Equivalente (RE) definida como:

$$RE = \frac{\text{Peso do Oxidante/Peso da Biomassa}}{\text{Razão estequiométrica Oxidante/Biomassa}}$$

Para a Combustão Direta (queima) a razão de equivalência é igual ou maior que 1, isto é a combustão se faz com a quantidade estequiométrica (teórica) de ar, ou com excesso de ar. Para a Gaseificação, a razão de equivalência varia, entre 0,20 a 0,40, isto é, 20 a 40% da razão estequiométrica, e para a Pirolise a razão da equivalência é teoricamente zero. Para esclarecer este conceito vejamos o seguinte exemplo: para queimar (combustão direta) 1 kg de madeira precisamos de cerca de 6,4 kg de ar (quantidade estequiométrica) ou mais, (queima

com excesso de ar) . Já para gasificar 1 kg de madeira devemos ceder de 1,28 kg até 2,56 kg de ar, enquanto que para pirolizar não devemos ceder ar nenhum.

No Brasil, atualmente, cerca de 30% de toda energia consumida é proveniente da biomassa. A contribuição da biomassa como energético difere de estado para estado . Particularmente, em Minas Gerais a biomassa contribuiu, em 1984, com cerca de 41% de toda energia consumida no Estado. Esta importância da biomassa energética para Minas e Brasil está ilustrada na Tabela 1.

TABELA 1 - Consumo Total de Energia - Minas Gerais e Brasil

					MG BR MG/BR - t	- 10 ³ tEP - 10 ³ tEP t
	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Lenha e Carvão Vegetal	5.941	6.499	7.260	6.835	6.519	6.818
	26.237	26.934	28.096	27.547	28.144	28.901
	22,6	24,1	25,8	24,8	23,2	23,6
Petróleo, Gás Natural e Derivados	5.285	5.461	5.198	4.630	4.380	3.948
	52.643	56.539	55.043	50.492	50.139	49.326
	10,0	9,7	9,4	9,2	8,7	8,0
Energia Hidráulica	3.737	4.453	5.102	5.218	5.403	5.586
	25.326	28.809	32.170	32.651	34.935	38.025
	14,8	15,5	15,9	16,0	15,5	14,7
Carvão Metalúrgico e Coque	1.160	1.487	1.522	1.152	1.429	1.292
	3.521	4.062	4.230	3.376	3.785	4.529
	32,9	36,6	36,0	34,1	37,8	28,5
Carvão Energético		11	67	171	306	312
	1.151	1.099	1.206	1.794	2.196	2.163
		1,0	5,6	9,5	13,9	14,4
Cana-de-Açúcar e Alcool	463	617	671	681	760	1.011
	9.861	11.089	12.109	12.719	14.062	17.26
	4,7	5,6	5,5	5,4	5,4	4 5,9
Outras Fontes Primárias	153	207	271	224	284	248
	184	236	335	470	523	408
	83,2	87,7	80,9	47,7	54,3	60,8
T O T A L	16.739	18.735	20.091	18.911	19.081	19.215
	118.923	128.768	133.189	129.049	133.784	140.616
	14,1	14,5	15,1	14,7	14,3	13,2

Fonte: CEMIG

Faremos neste curso um estudo da combustão de biomassa. Conceitos básicos serão introduzidos e serão seguidos por uma coleta de literatura existente. Estes trabalhos, transmitidos em parte ou *ipsis-literis*, certamente contribuirão para o aperfeiçoamento do aluno na matéria em questão, pois foram feitos por técnicos da área. O grau de profundidade científica e prática dos trabalhos são distintos propositalmente. Com esta metodologia pretendemos expor os alunos a diferentes maneiras de abordar o problema.

2. COMBUSTÍVEIS*

Combustíveis em termos práticos, são as substâncias que podem queimar liberando calor.

Os combustíveis podem ser classificados em sólidos, líquidos e gasosos e cada um desses pode ser natural ou derivado. Naturais são aqueles usados nas mesmas condições em que são extraídos da natureza. Exemplo; lenha, carvão de pedra, gás natural, resíduos agrícolas. Derivados são aqueles que resultam de algum processo de preparação. Exemplos: carvão vegetal, coque, derivados de petróleo, álcool, etc.

2.1. PODER CALORÍFICO

Dentre as características dos combustíveis a mais importante é o poder calorífico. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia desprendida na combustão completa de uma unidade em peso (ou em volume) de determinado combustível, veja Quadro 2. O poder calorífico depende das características químicas do combustível e não das condições onde é queimado, visto que se considera a combustão completa do mesmo. Geralmente é dividido em superior e inferior.

O poder calorífico superior (PCS) é medido pela bomba calorimétrica. É aquele que leva em conta o calor da condensação do vapor d'água dos produtos da combustão. O poder calorífico inferior (PCI) é aquele que não leva em conta o calor de condensação do vapor d'água formado pelos produtos da combustão. Haja visto que os gases da combustão deixam os equipamentos de utilização do calor total de vaporização da água formada não é utilizado. Este precisa ser deduzido do poder calorífico superior, resultando então o poder calorífico inferior, que normalmente é usado na prática. O poder calorífico inferior é também chamado de poder calorífico líquido ou prático.

QUADRO 2 - Poder calorífico inferior de alguns combustíveis.

Combustível	Poder Calorífico (KJ/kg)
; Lenha seca ao ar	11286 a 15884
. Carvão de pedra (hulha)	31391
. Carvão vegetal	27170
. Coque de carvão de pedra	31350 a 33440
. Bagaço de cana	6688
. Coque de coco babaçu	31768
. Casca de arroz	11704
. Óleo diesel	43890 a 45980
. Querosene e gasolina	41800 a 45980
. Álcool etílico	26585
. Gás natural	33440 a 54340
. GLP	100320 (KJ/Nm ³)
. Gás de gasogênio	5016 a 5832 (KJ/Nm ³)

2.1.1. Métodos de Calculo

a) Método Experimental

Para os combustíveis sólidos o calorímetro de uso mais generalizado é de Berthelot-Mahler, comumente chamado de Bomba Calorimétrica de Mahler (Figura 2). O seu funcionamento se baseia na combustão completa de uma amostra de combustível de peso conhecido em atmosfera rica em oxigênio.

Após o balanço de se calor tem-:

$$gN = (M + A) (t_2 - t_1) C_p \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

g = massa de combustível (kg)

N = poder calorífico da amostra (PCI) (KJ/kg) M = massa de água (kg) A=constante do aparelho (kg) t_2, t_1 = temperatura final e inicial de equilíbrio respectivamente (°C) C = calor específico da água P (KJ/kg°C).

O método de cálculo do poder calorífico através da bomba calorimétrica de Mahler fornece o poder calorífico superior visto que para se chegar ao equilíbrio, após a combustão ocorre condensação do vapor d'água.

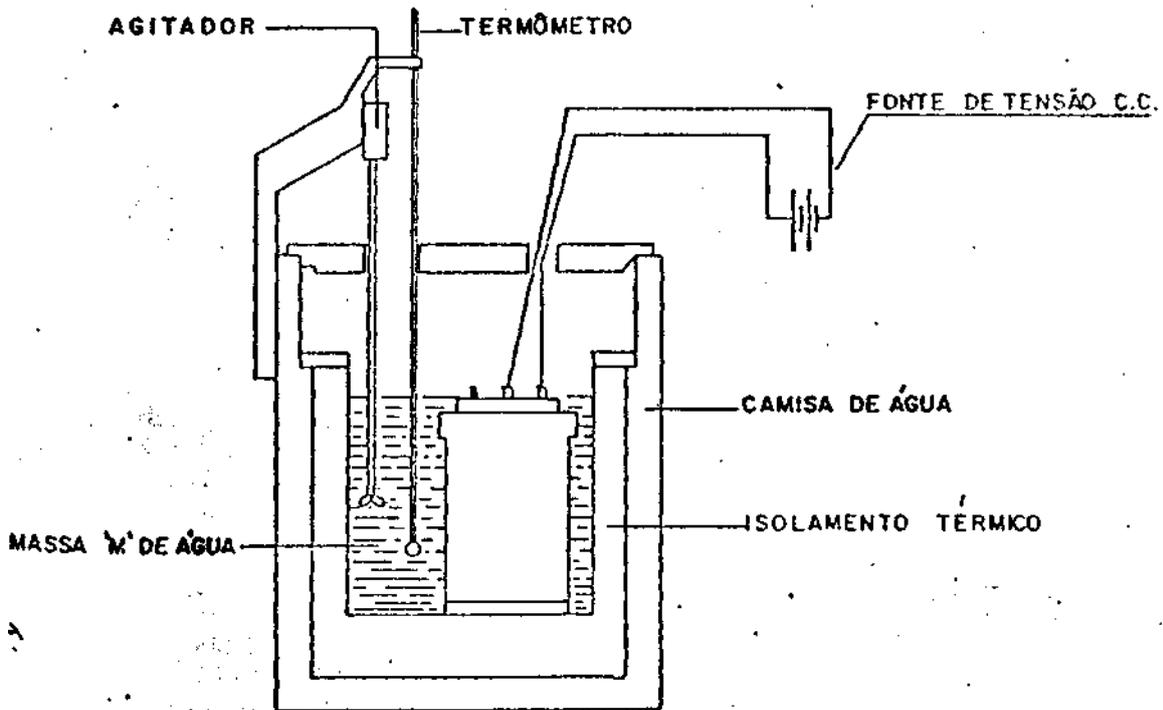
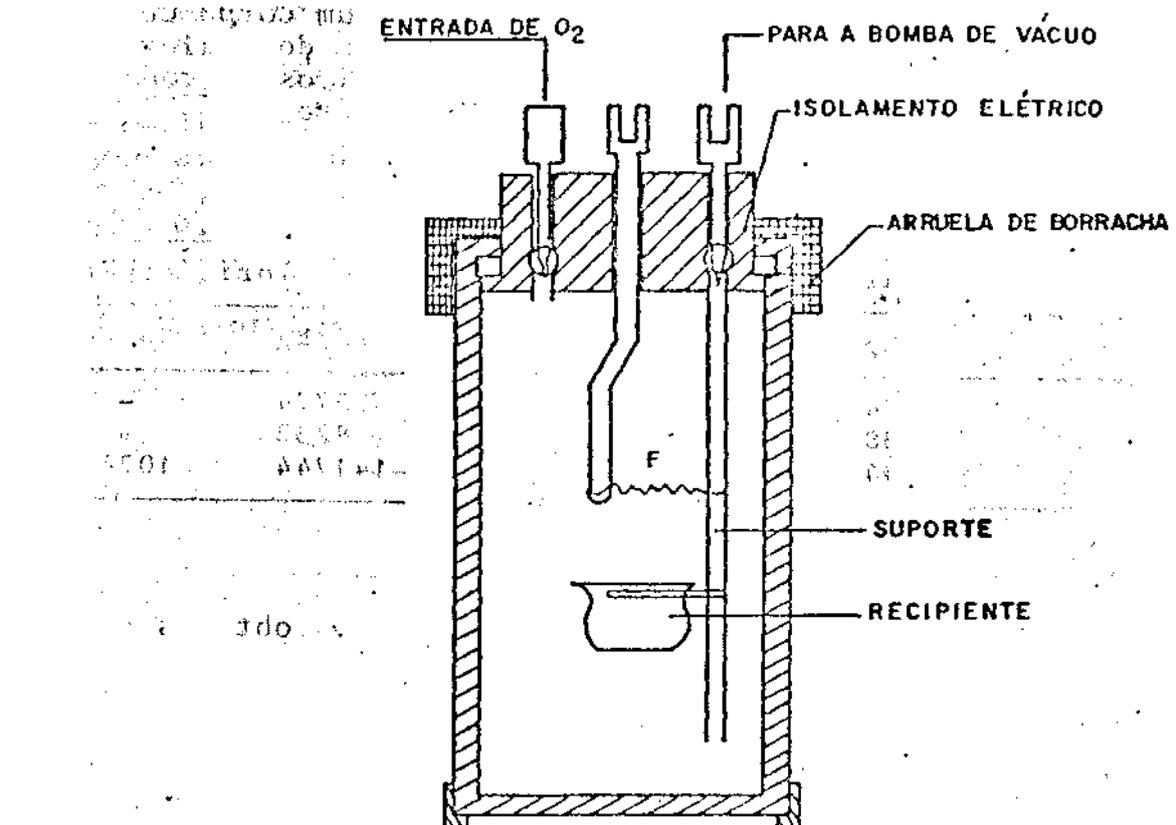


FIGURA 2 - Bomba Calorimetrica de Malher

b) Método Analítico de reação de um corpo composto que é igual a soma dos valores dos potências caloríficas de cada dos componentes (Quadro 3).

QUADRO 3 - Podêres caloríficos

Elemento	Poder calorífico superior		Poder calorífico inferior	
	KJ/kg	KJ/Nm ³	KJ/kg	KJ/Nm ³
C	33774	12749	33774	10743
S	9238		8238	
H ₂	141744		141744	

Apesar deste método ser menos exato do que o experimental, por não levar em conta o calor de dissociação necessário para separar as moléculas dos componen-

tes, os valores obtidos são próximos aos do calorímetro. Para muitos combustíveis a diferença é de 1 a 2% o poder calorífico superior do combustível será então:

$$PCS = 33774 \cdot P_C + 141744 \cdot (P_{H_2} - 1/8 P_{O_2}) + 9238 \cdot P_S \text{ (KJ/kg)} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde

PCS = poder calorífico superior (KJ/kg)
 P_C = fração de carbono no combustível (kg de C/kg de combustível)
 P_{O₂} = fração de oxigênio no combustível (kg de O₂/kg de combustível)
 P_{H₂} = fração de hidrogênio no combustível (kg de H₂/kg de combustível)
 P_S = fração de enxofre no combustível (kg de S/kg de combustível)

s
 tível).

Ja o poder calorífico inferior (PCI) será calculado através da equação:

$$PCI = 33774 P_C + 141744 (P_{H_2} - 1/8 P_{O_2}) + 9238 P_S - 2450 \times 9 P_{H_2} \text{ (KJ/kg)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Esta expressão é conhecida como formula de Dulong ou seja:

$$PCI = PCS - 2450 \times 9 P_{H_2} \text{ (KH/kg)} \quad (\text{Eq. 4})$$

c) Método Empírico

Quando se dispõe apenas da análise imediata dos combustíveis ou seja: umidade; matérias voláteis (V), carbono fixo (C) e resíduo fixo, pode-se estimar o

poder calorífico através da (Eq. 5)

$$PCS = 4 \cdot 18(82 \cdot C + aV)(KJ/kg) \quad (Eq. 5)$$

onde :

a é o coeficiente que depende da qualidade do combustível, veja Quadro 4.

QUADRO 4 - Valores estimados de a

$\frac{V}{V + C}$	a
0,05	150
0,05	145
0,10	130
0,15	117
0,20	109
0,25	103
0,30	96
0,35	89
0,40	90

2.2. COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

2.2.1. Lenha

Lenha é a madeira picada ou desdobrada em pedaços de tamanhos adequados para serem queimados ou transformados em carvão.

A análise química elementar mostra que a madeira é constituída aproximadamente de 50% de carbono,, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio. Neste caso não se consideram quantidades mínimas de nitrogênio e outros elementos. Esta composição se mantém mais ou menos constante, independentemente da espécie, diferenças genéticas ou idade, conforme Martins (15).

A lenha é formada por matérias orgânicas que chegam a alcan

çar 3/4 do peso, pequena quantidade de minerais (cinza) , que após a combustão raramente ultrapassa 2% e quantidade variável de água. O teor de umidade da lenha recém-cortada varia de 40 a 55% base úmida e de 20 a 25% base seca. O poder calorífico inferior da lenha varia, dependendo-se do seu teor de umidade , conforme ilustra o apêndice I.

Um conhecimento do potencial e da versatilidade da madeira, como fonte de combustível, é um pré-requisito indispensável à análise econômica dos projetos que envolvem a utilização da floresta para a produção de energia.

Pode-se : enumerar as seguintes vantagens e desvantagens de) uso da lenha como combustível:

As percentagens de: a) umidade (perda de peso da amostra quando aquecida durante uma hora a 105 C); b) matérias voláteis (mistura complexa de produtos que volatilizam, de uma amostra seca, quando aquecida a 950 C durante cerca de 10 min., fora do contato do ar; c) carbono fixo, mistura de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e nitrogênio que não são volatilizados na fase anterior mas que são queimados na presença de ar a uma temperatura de 700 a 800 C; d) resíduo fixo - é a fração incombustível (cinzas).

Vantagens:

- . nós países em desenvolvimento ainda é o combustível mais barato, tanto por tonelada quanto por unidade de calor;
- . mão-de-obra não-qualificada, gerando emprego e fixação do homem no campo;
- . armazenagem possível em espaço livre e aberto;
- . baixo teor de cinza e enxofre.

Desvantagens

- . exigência de muita mão-de-obra, elevando os custos nos países onde os salários são altos;
- . controle por instituições como departamentos florestais, polícia, etc., necessitando planejamento para seu uso;
- . fornecimentos irregulares, tendo em vista as grandes quantidades exigidas;
- . poder calorífico inferior ao dos combustíveis fósseis.

Planejando o Uso da Lenha

A utilização da madeira, baseada exclusivamente no consumo das reservas nativas, esta em vias de ser encerrado.

A partir dos anos sessenta ganha impulso a implementação de maciços florestais, para produção de madeira e seus subprodutos de modo permanente. Esta transformação surgiu com a conscientização da esgotabilidade daqueles recursos. Criou-se assim, a indústria de reflorestamento que se preocupou, na sua maioria, apenas em participar de uma agressiva corrida na captação de incentivos fiscais, conforme Magalhães (13).

Uma das preocupações dos consumidores de lenha é a garantia de suprimento e a economia da sua utilização. Para isto uma das alternativas que se tem é a implementação de pequenos reflorestamentos. Estes reflorestamentos, além destas vantagens, têm a característica de gerar empregos a serem implementados em terras muitas vezes impróprias para a agricultura, tais como encostas muito íngremes e topo de morros, confor-

me Ribeiro (16) e Magalhães (13).

2.2.2. Carvão Mineral

É formado pela acumulação de matéria orgânica submetida a transformações físicas e químicas devido a processos geológicos. Conforme as transformações ocorridas há quatro tipos de carvões:

a) Turfa é o estágio inicial de transformação; possui alto teor de voláteis e de umidade, nas jazidas contém 80 a 90% de água, que pode ser reduzida até 50 a 60% por prensagem; PCI = 16929 KJ/kg;

b) Linhito é o segundo estágio de transformação; tem menos voláteis e é mais denso do que a turfa. Tem elevado grau de umidade 30 a 40% e PCI = 16804 KJ/kg;

c) Hulha é o terceiro estágio de transformação é o mais importante para fins industriais PCI = 31392 KJ/kg;

d) Antracito é o último estágio de transformação; tem baixo teor de voláteis; PCI = 31016 KJ/kg.

2.2.3. Carvão Vegetal

É um produto obtido pela pirólise da lenha. Pesa cerca de 40% do peso da lenha. O alcatrão liberado na produção do carvão tem PCI = 27211 KJ/kg quando desumidificado.

2.2.4. Coque

É o resíduo obtido na destilação da hulha. Nesta destilação eliminam-se parte dos materiais voláteis e parte das cinzas. O poder calorífico inferior do coque é de 31400 a 33500 KJ/kg.

2.2.5. Resíduos Agrícolas

São aqueles obtidos após colheita de produtos agrícolas tais como: bagaço de cana, caso

de arroz, palha de arroz, palha de café, sabugo de milho, etc.

Segundo Claar II (5), para evitar a erosão e para manter a fertilidade do solo são necessários de 36 a 50 % do total de resíduos agrícolas produzidos. Para a secagem seriam necessários por volta de 15% do total de sabugos produzidos ou 5% do total de resíduos produzidos em uma lavoura de milho com produtividade média de 7,22 t/ha ou 2,4 t/ha de sabugo. Não foram consideradas 4,5 t/ha de resíduos, compostos pela plan-

ta de milho. Calcula-se que 681 do total de sabugos produzidos seriam suficientes para secagem dos grãos e do próprio sabugo, além de gerar vapor para a produção de álcool para uma mini-usina instalada na fazenda, capaz de suprir as necessidades de combustível líquido para os tratores culturais.

Estimando-se o potencial de produção de energia de alguns resíduos orgânicos chega-se aos valores do Quadro 5, calculados a partir dos valores publicados no Anuário Estatístico do Brasil (8).

QUADRO 5 - Energia produzida por alguns resíduos orgânicos, 1980

Resíduo	Energia (10 ¹⁰ KJ)
Palha de arroz Casca	6128
de arroz Casca de	2454
café Serragem de	531
madeira Bagaço de	1868
cana	44697
T O T A L	56678

Daquele total estima-se que 50% não é aproveitado. Sendo que atualmente daqueles resíduos o bagaço de cana e um dos mais aproveitados, contribuindo para a economia nacional, em 1980, da ordem de 27.839x10¹⁰ KJ. Para se ter uma idéia do quanto este valor representa, no Quadro 6 estão amos-

tradas as necessidades energéticas para a secagem dos principais produtos agrícolas brasileiros. Sem dúvida, é a etapa onde se tem o maior consumo de energia por kg de produto armazenado, podendo representar até 40 a 50% do gasto no processamento de alguns produtos.

QUADRO 6 - Energia necessária para a secagem dos principais produtos agrícolas brasileiros .

Produto	Produção 1980 (Ton.) (1)	Energia para secar 1 tonelada (10 ³ KJ)	Energia para secar produção de 1980 (10 ¹⁰ KJ)
Arroz em casca	9.775.720	1729	713
Feijão em grão	1.968.165	937	184
Milho em grão	20.372.072	937	1908
Soja em grão	15.155.804	632	958
Trigo em grão	2.701.703	632	1707
Café em coco	2.122.391	2082	442
Amendoim em casca	482.819	1249	60
T O T A L	52.578.584		5972

(D) | Fonte: Anuário Estatístico do Brasil, 1981 FIBGE (4).

Deste quadro vemos que são necessários 5972×10^{10} KJ para secagem da produção brasileira de arroz, feijão, milho, soja, trigo, café e amendoim. Isto representa apenas uma parte potencial da palha do arroz, da casca do arroz, da casca do café, da serragem de madeira e da energia do bagaço de cana daria para secagem de aproximadamente 9,3 vezes a produção da queles produtos.

A título de ilustração podemos estimar que 12,0% dos resíduos (casca e palha) da produção de arroz daria para secagem do mesmo.

Supondo neste caso:

- a) 1 kg de resíduos produz 6270 KJ
- b) são necessários 2.700 KJ por kg de água evaporada do arroz
- c) A eficiência de secagem é por volta de 30%
- d) O arroz será seco de 201 para 13% base úmida.

Os resíduos agrícolas como vemos têm um grande potencial energético e o bagaço de cana já contribui com parcela significativa no balanço energético do Brasil.

O Conselho Nacional do Petróleo baixou portaria proibindo o uso de derivados de petróleo para a secagem de produtos agrícola

las no Brasil. Este fato aliado a crise dos preços do petróleo motivava o setor agrário a buscar fontes alternativas de energia para secagem.

E sabido que, dependendo do caso, os resíduos tem aplicações mais nobres, por exemplo para se fazer estéreo ou placas de aglomerado ou para se fazer papel. Contudo, dependendo da situação, o seu uso como vetor energético poderia ser mais econômico.

Um dos problemas que se tem na utilização dos resíduos orgânicos para fins energéticos é o seu manuseio. Há de se pesquisar, em dois setores, para melhor economia da utilização dos resíduos:

- a) adaptar as fornalhas ao tipo de combustível existente. Já existem modelos de fornalhas adaptadas a queima de resíduos pulverizados ;
- b) adaptar o combustível aos tipos de fornalhas disponíveis.

Briquetagem é a operação geralmente utilizada para recuperação de combustíveis pulverizados (finamente divididos), e que por isso seriam de difícil consumo nas grelhas comuns. Recorre-se então ao expediente de aglutinar este material de forma a fornecer blocos prensados, possíveis de se

rem queimados (6).

A obtenção de briquetes pode ser conseguida com um aglutinante estranho ao material combustível ou a custa de seu próprio poder aglutinante, se for o caso (6). As substâncias aglutinantes tem de atender aos requisitos de baixo custo, baixo teor de cinzas e alto poder calorífico. Alguns já são utilizados, tais como:

- a) goma de amido de mandioca
- b) resíduo de matadouro
- c) breu
- d) alcatrão de madeira, etc.

A briquetagem de carvão é largamente utilizada e tem sido estudada de longa data, contudo a briquetagem de produtos agrícolas só agora vem merecendo maior interesse, haja visto a crise energética mundial.

2.2.6. Coque do Coco de Babaçu

O babaçu é uma palmeira nativa do nordeste brasileiro. O coque é formado por uma casca constituída de material fibroso de grande potencial energético. O coque de babaçu tem o poder calorífico inferior de 31768 KJ/kg.

2.3. COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Os principais combustíveis líquidos são o álcool etílico, o xisto e o petróleo com seus derivados. O alto preço destes produtos e sua grande demanda em outros setores fizeram com que o governo brasileiro proibisse o uso destes combustíveis na secagem de grãos e outros produtos agrícolas.

2.3.1. Petróleo

É uma substância oleosa constituída pela mistura de compostos orgânicos (hidrocarbonetos). O petróleo como sai do poço, quase não tem utilização prática; por destilação separam-se seus diversos componentes, tais como: gasolina, querosene, óleo diesel, fuel oil, etc.

2.3.2. óleo de Xisto

É um óleo semelhante ao petróleo, obtido de algumas rochas oleíferas chamadas "xisto".

2.3.3. Álcool Etílico

É um produto extraído de várias plantas principalmente da cana e da mandioca. Ao contrário do petróleo, é um produto renovável.

2.4. COMBUSTÍVEIS GASOSOS

É formado por mistura de gases. O mais comum é o gás liquefeito de petróleo (G.L.P.). O biogás utilizado em propriedades rurais é formada pela fermentação de resíduos orgânicos. Estes combustíveis não são usados na secagem de grãos pois o G.L.P. é subsidiado pelo governo brasileiro para uso na cocção de alimentos e o biogás é produzido muito lentamente através da fermentação.

O gasôgênio poderia ser usado na secagem de grãos, se não houvesse dificuldades na sua obtenção. É um gás pobre produzido soprando-se ar ambiente em uma camada de carvão incandescente; pos

sui 52 a 55% de nitrogênio que não é combustível, daí ser chamado de gás pobre.

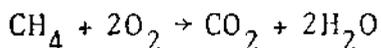
3. COMBUSTÃO

O processo de combustão envolve a oxidação dos constituintes de um combustível que pode ser oxidada. Pode ser representado por uma equação química (reveja o módulo introdutório de química), e durante o processo a massa de cada elemento permanece constante.

Consideremos como exemplo a queima do carbono (reação do carbono com $C + O_2 \rightarrow CO_2$

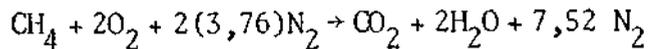
(reagentes) (produto)

Seja agora um combustível constituído por hidrocarbonetos, onde o carbono (C) e o hidrogênio (H) são oxidados:



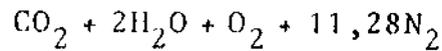
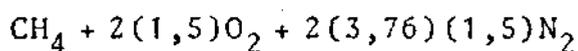
Nota-se que além de CO_2 , a água foi produzida no processo de combustão.

Consideremos a combustão do CH_4 , agora com o ar, que é formado por, aproximadamente 21% (por volume) de Oxigênio e 79% de Nitrogênio.



Onde $3,76 = 79/21$, significando que para cada mol de oxigênio, 3,76 moles de N_2 estão envolvidos.

A quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para oxidação completa dos elementos do combustível é chamada "ar teórico". Quando a combustão é feita com o ar teórico, não há oxigênio nos produtos. Caso contrário pode haver. Por exemplo:



representa a combustão do CH_4 (metano) com 150% de ar teórico, ou seja com 50% de excesso de ar.

A relação ar teórico-combustível é a relação entre a massa (ou moles) de ar teórico e a massa ou moles do combustível. É representada por AC. o seu recíproco, representado por CA é a relação combustível-ar.

Problema:

- 1) Faça a equação de combustão do metano (CH_4) com 120% de ar teórico e calcule as razões AC e CA.
- 2) Suponha agora a queima do CH_4 com ar atmosférico com a análise dos produtos como sendo:
Determine a equação da combustão. Calcule AC e a percentagem de ar teórico.
 $N_2 = \frac{0,21 \cdot 79}{0,21 \cdot 79}$
- 3) Estude num livro de termodinâmica ou de química o que é "Entalpia de formação". Como você poderia usar este conceito em combustão/combustíveis?

3. COMBUSTÃO*

Denomina-se combustão as reações químicas exotérmicas em que intervêm o oxigênio, produzindo calor em forma aproveitável. Além do oxigênio e do combustível é necessário que este seja aquecido até a temperatura de ignição. Por exemplo, com um palito de fósforo consegue-se queimar uma folha de papel mas não se consegue que

*

Fonte: Andrade et alii (1).

mar um pau de lenha, pois a temperatura de ignição do papel é muito mais baixa que a da lenha. As

temperaturas de ignição de alguns combustíveis, a nível do mar estão no Quadro 7.

QUADRO 7 - Temperaturas de ignição de alguns combustíveis

Carvão vegetal	340 a 400°C
Carvão mineral	400 a 500°C
Metano	640 a 750°C
Etano	470 a 630°C
Monóxido de carbono	640 a 655°C
GLP	500°C 300°C
Madeira	700 a 800°C
Gás de gasogênio	

A temperatura de ignição pode ser definida como a temperatura na qual o calor gerado na reação é maior do que o calor perdido para o ambiente e, assim, a combustão pode ser mantida. A temperatura de ignição dos gasosos, são, geralmente, destilados e não inflamados antes da temperatura de ignição ser alcançada. Ela depende da pressão e do comburente usado, isto é, ar ou oxigênio puro.

Estes três fatores: temperatura, oxigênio (comburente) e combustível, formam o "triângulo do fogo" (Figura 3) ou seja, faltando um deles não haverá fogo.

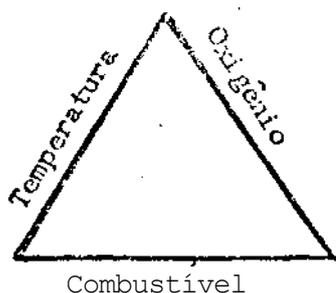


FIGURA 3 - "Triângulo do Fogo" . Elementos indispensáveis para que haja fogo.

bustível com o ar é necessário que:

a) O ar e o combustível sejam dosados numa proporção correta com pequeno excesso de ar;

b) o combustível e o ar sejam colocados em contato íntimo (turbulência). Para isso é preciso que o combustível sólido seja dividido em pedaços e o líquido seja pulverizado;

c) o combustível e o ar disponham de espaço e tempo para realizar a combustão;

d) o combustível e o ar sejam aquecidos até a temperatura de ignição.

Para que ocorra uma boa combustão é preciso que haja temperatura, turbulência e tempo, que são chamados os 3T da combustão. Se a temperatura for inferior àquela de ignição a combustão não ocorrerá, mesmo existindo ar em quantidade suficiente. Grande turbulência provoca mistura violenta do oxigênio com o combustível, reduzindo a chama e o volume de fornalha. Turbulência é fundamental à combustão para que a queima seja completa. É necessário tempo para que o oxigênio encontre e reaja com os gases combustíveis na fornalha, e a combustão seja completa.

3-1. REQUISITOS PARA UMA COMBUSTÃO ADEQUADA

Para que ocorra uma boa combustão além de se misturar o com-

3.2. CALCULO DO AR NECESSÁRIO, COMBUSTÃO

a) Cálculo Gravimétrico
Para de combus

$$Q_{O_2} = 32 \left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{\text{kg de oxigênio do ar}}{\text{kg de combustível}} \quad (\text{Eq. 6})$$

queimar 1 kg

Como o ar seco apresenta uma composição gravimétrica média de 23,2% de oxigênio e 76,81 de nitrogênio e uma composição Volumétrica média de 21,0% de oxigênio

$$Q_{ar} = \frac{32}{0,232} \left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{\text{kg de ar}}{\text{kg de comb.}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$Q_{ar} = \frac{32}{0,232 \times 1,251} \left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \cdot \text{Nm}^3 \text{ de ar} \quad (\text{Eq. 8})$$

ou

onde 1

,251 = densidade do ar (Kg/Nm³)
segundo KREITH (1)

$P_C, P_{H_2}, P_S, P_{O_2}$ = peso do carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio por unidade de peso do combustível, respectivamente.

tível sólido ou líquido e necessário oxigênio, que pode ser proveniente do ar, de acordo com a Equação 6.

nio e 79,0% de nitrogênio tem-se então que o ar necessário para a queima de 1 kg de combustível se rã:

Q_{O_2} "Tcg de comb

Q_{ar} = quantidade de oxigênio do ar necessário para a combustão completa (kg de O₂/kg)
= quantidade de ar necessário para combustão completa (kg/kg) ou (Nm³/Nm³).

$$Q_{ar} = \frac{22,4}{0,21} \left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{\text{Nm}^3 \text{ de ar}}{\text{kg de comb.}} \quad (\text{Eq. 9})$$

b) Calculo Volumétrico

O ar necessário à combustão sofre modificações de volume com a temperatura e pressão de acordo com a Equação 11.

$$V = \frac{T}{P} \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde :

P_1, V_1, T_1 = pressão atmosférica, volume e temperatura nas condições normais. P, V, T = idem nas condições de trabalho.

3.3. O EXCESSO DE AR

Excesso de ar (n) na combustão significa, ter mais ar do que

o necessário para a realização da combustão completa. É calculado a partir da composição química do combustível. É necessário um excesso de ar na combustão para que ela seja completa, pois assegura uma mistura perfeita e íntima do combustível com o ar, devido ao curto espaço de tempo em que ambos permanecem juntos. A quantidade de excesso de ar é variável e depende da função de uma série de fatores tais como: tipo de combustível, método de queima, temperatura a ser atingida na fornalha. Os combustíveis sólidos são os que mais exigem excesso de ar de 30 a 60% além da quantidade de ar necessária na combustão. Os combustíveis líquidos exigem de 10 a 30% e os gasosos de 5 a 20% de excesso de ar. O excesso de ar pode ser expresso por n, onde:

$$n = \frac{Q_{ar \text{ real}}}{Q_{ar \text{ teorica}}} \quad (\text{Eq. 10})$$

O Quadro 8 mostra a variação do teor de CO₂ nos gases de

combustão com o excesso de ar usado. Estes valores são úteis quando se deseja monitorar o excesso de ar, analisando os gases de combustão.

QUADRO 8 - Variação do CO₂ (n) nos gases de combustão da lenha com variação do excesso de ar.

Excesso de ar (n%)	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

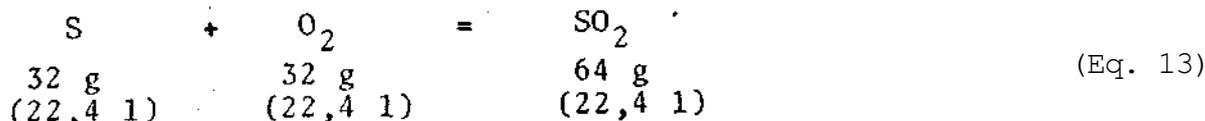
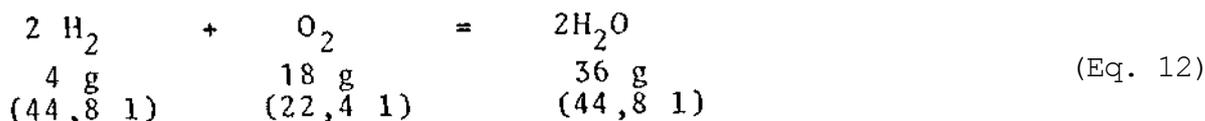
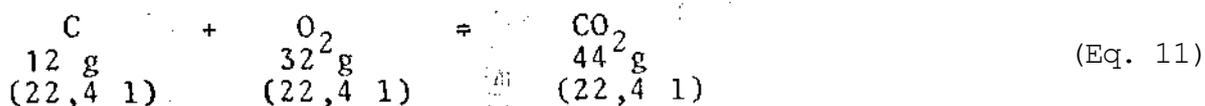
3.4. CÁLCULO DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO

ar

Os produtos da combustão são os gases e vapores formados nas reações, os gases e vapores desprendidos diretamente do combustível, nitrogênio do ar, oxigênio do excesso de ar e umidade do

a) Gases e Vapores Formados nas Reações de Combustão (GR)

Os produtos da combustão são formados a partir das seguintes reações químicas:



A partir destas equações é possível calcular os produtos da combustão, como estão ilustrados nos exemplos abaixo.

$$GR = \left(\frac{44}{12} P_C\right) \text{ kg de } CO_2 + \left(\frac{36}{4} P_{H_2}\right) \text{ kg de } H_2O_{(vap)} + \left(\frac{64}{32} P_S\right) \text{ kg de } SO_2 \left(\frac{\text{kg de GR}}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 14})$$

ou

$$GR = \left(\frac{22,4}{12} P_C\right) \text{ Nm}^3 \text{ de } CO_2 + \left(\frac{22,4}{4} P_{H_2}\right) \text{ Nm}^3 \text{ de } H_2O_{(vap)} + \left(\frac{22,4}{32} P_S\right) \text{ Nm}^3 \text{ de } SO_2 \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{ de GR}}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 15})$$

b) Gases e Vapores Liberados Diretamente do Combustível (GV)

$$GV = (P_{N_2} + P_{H_2O}) \text{ kg } \left(\frac{\text{kg de GV}}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 16})$$

ou

$$GV = \left(\frac{22,4}{28} P_{N_2} + \frac{22,4}{18} P_{H_2O}\right) \text{ Nm}^3 \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{ de GV}}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 17})$$

c) Nitrogênio do Ar (N_{ar})

$$N_{ar} = 0,768 Q_{ar} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg de ar}}\right) = 0,790 Q_{ar} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3 \text{ de ar}}\right) \quad (\text{Eq. 18})$$

d) Oxigênio de Excesso de Ar (O_e)

$$O_e = O_{total} - O_{teórico} \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{ de } O_2}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 19})$$

e) Umidade do Ar (U)

tir da umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica-Varia podendo chegar até ca. 5% podendo ser calculada a par-

$$U = \frac{UR}{U_{max}} \left(\frac{\text{kg de } H_2O}{\text{Nm}^3}\right) \quad (\text{Eq. 20})$$

onde:

U = umidade do ar (Q_t) dutos da combustão será:
UR = umidade relativa ambiente

$$Q_t = GR + GV + N_{ar} + O_e + U \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg de comb.}}\right) \quad (\text{Eq. 21})$$

3.5. TEMPERATURA DA COMBUSTÃO

3.5.1. Temperatura Teórica da Chama

O cálculo da temperatura teórica da chama é feito na suposição de que todo o calor presente, no instante da queima do combustível, seja utilizado apenas para aquecer os produtos da combustão. A suposição, evidentemente, não é verdadeira porque uma parte do calor é perdida por transmissão de calor ao meio ambiente. Apesar disso os princípios de cálculo são muito instrutivos, e os resultados encontrados, de grande valor para comparação entre os diferentes combustíveis na determinação dos efeitos do excesso de ar, do pré-aquecimento do ar, etc. sobre a temperatura a ser alcançada numa combustão.

A energia presente na zona de combustão é constituída pelas seguintes parcelas:

- a) energia potencial do combustível (CO levando em consideração o poder calorífico inferior do combustível ;
- b) Calor sensível do combustível (O_2),
- c) calor sensível no ar utilizado na combustão (Q_3)

Os produtos de combustão após esta zona, contêm a energia

$$T = \frac{T_o + m_c PCI + m_c C_{pc} (T_c - T_o) + m_{ar} C (T_a - T_o)}{m C_p} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{(Eq. 27)}$$

A temperatura teórica de chama também pode ser calculada através da Figura 4, desde que se

sob forma: de calor sensível (Q_4), assim tem-se:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 \text{ (KW)} \quad \text{(Eq. 22)}$$

Tem-se também que:

onde

$$Q_1 = m_c PCI \text{ (KW)} \quad \text{(Eq. 23)}$$

$$Q_2 = m_c C_{pc} (T_c - T_o) \text{ (KW)} \quad \text{(Eq. 24)}$$

$$Q_3 = m_{ar} C (T_a - T_o) \text{ (KW)} \quad \text{(Eq. 25)}$$

$$Q_4 = m C_p (T - T_o) \text{ (KW)} \quad \text{(Eq. 26)}$$

- mc = quantidade de combustível queimado (kg/s)
- m_{ar} = quantidade de ar real utilizado (kg/s)
- PCI = poder calorífico inferior do combustível (KJ/kg)
- C_{pc} = calor específico do combustível (KW/kg $^\circ$ C)
- C = calor específico do ar (KW/kg $^\circ$ C)
- C = calor específico dos produtos da combustão (KW/kg CO)
- T = temperatura ambiente (C)
- T * = temperatura do combustível antes da combustão (C)
- T = temperatura do ar de entrada ($^\circ$ C)
- T = temperatura teórica da chama ($^\circ$ C)

após substituição tem-se:

saiba o excesso de ar e a capacidade do gás de combustão.

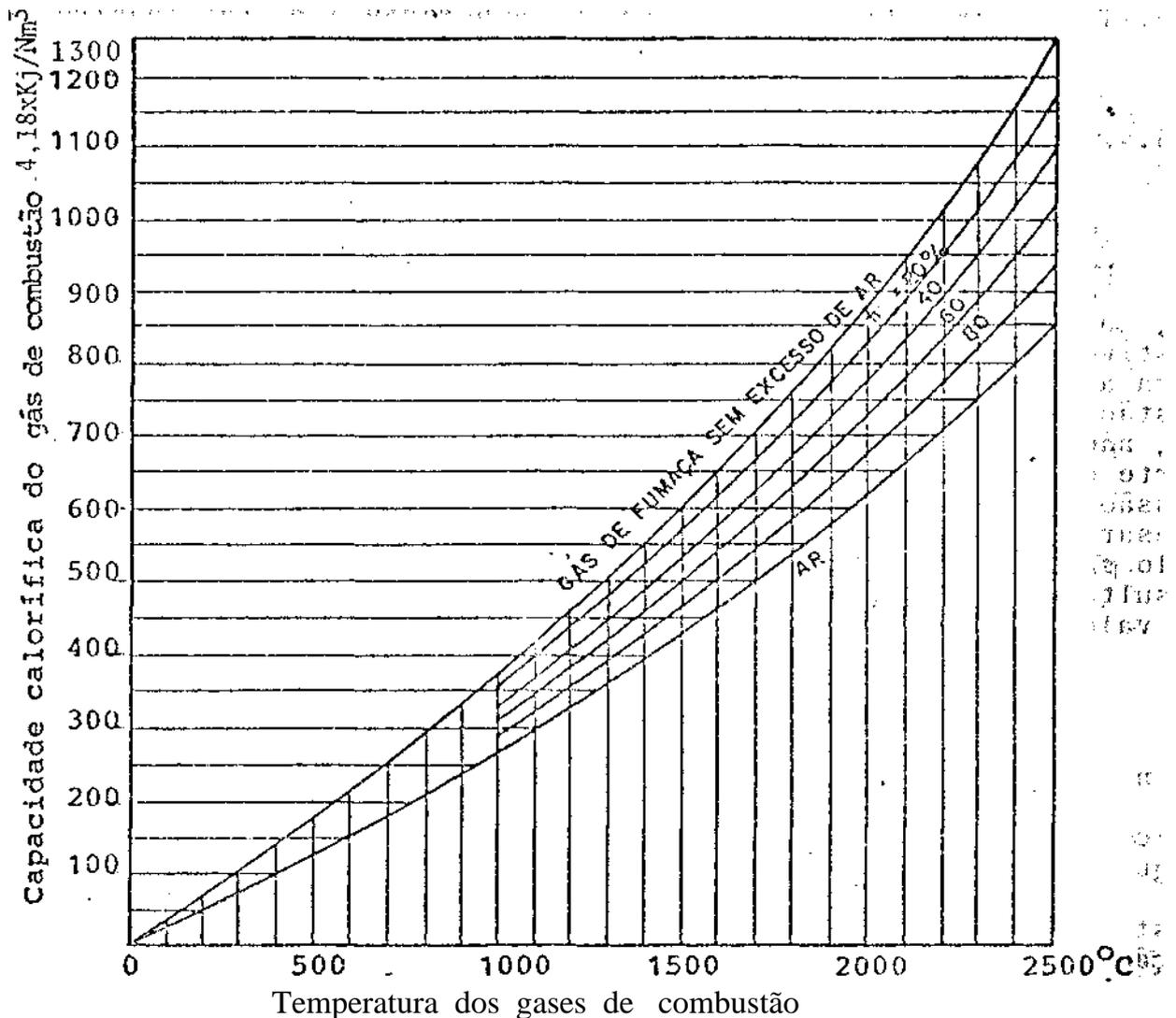


FIGURA 4 - Curvas usadas no calculo da temperatura teórica da chama.

3.5.2. Temperatura Média da Câmara de Combustão

Pode-se calcular a temperatura média da câmara de combustão graficamente como se segue. Em pri-

meiro lugar deve-se conhecer a superfície de aquecimento F exposta a radiação, conhecendo-se a temperatura teórica da chama, como foi calculada no item 2.5.1. assim:

$$F_s \cdot S = (T - T_m) m_c \cdot Q_t \times C_p \quad (\text{KW}) \quad (\text{Eq. 28})$$

onde :

F_s superfície de aquecimento exposta, a radiação (m^2)
 S = radiação térmica (Eq. 26) (KW/m^2)
 T = temperatura média da câmara de combustão ($^{\circ}\text{C}$)
 T_m = temperatura teórica da chama ($^{\circ}\text{C}$)
 T = temperatura da parede da

fornalha ($^{\circ}\text{C}$)
 m = quantidade de combustível (kg/h)
 Q = quantidade real dos gases de combustão (Nm^3/kg)
 C = calor específico dos gases de combustão a pressão constante ($\text{KJ}/^{\circ}\text{CNm}^3$).

O primeiro termo significa

o calor absorvido pela câmara de combustão e o segundo o calor ce-

dido pelos gases de combustão.

$$S = 4,644 \times 10^{-3} \left\{ \left(\frac{T_m + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 \right\} \text{ (KW/m}^2\text{)} \quad \text{(Eq. 29)}$$

Os valores de F , T , m . Q_a

Exemp]o - Dados:

são invariáveis para um dado esta-
do, supondo C constante, apenas
 S e T_m serão variáveis. Tomando
se os valores de S e T traçam-
as curvas da Figura 5, onde a inter-
cessão das curvas fornece a tempe-
ratura media da câmara de combus-
tão.

- $F_s = 10 \text{ m}^2$
- $PCI = 31.350 \text{ KJ/kg}$
- $Q_t = 12,4 \text{ Nm}^3/\text{kg}$
- $C_p^t = 1,5 \text{ KJ/kg}^\circ\text{CNm}^3$
- $m_c = 1000 \text{ kg/h}$

$$T_{\text{teórica}} = \frac{31350 \text{ KJ/kg}}{12,4 \text{ Nm}^3/\text{kg} \times 1505 \text{ KJ/kg}^\circ\text{CNm}^3} = 1680^\circ\text{C}$$

Traçando as curvas da Figu-
ra 5, com valores de $F_s S$ e
 $(T - T_m) \cdot m \cdot Q_t \cdot \bar{C}_p$

tem-se a temperatura media da
chama de 1230°C .

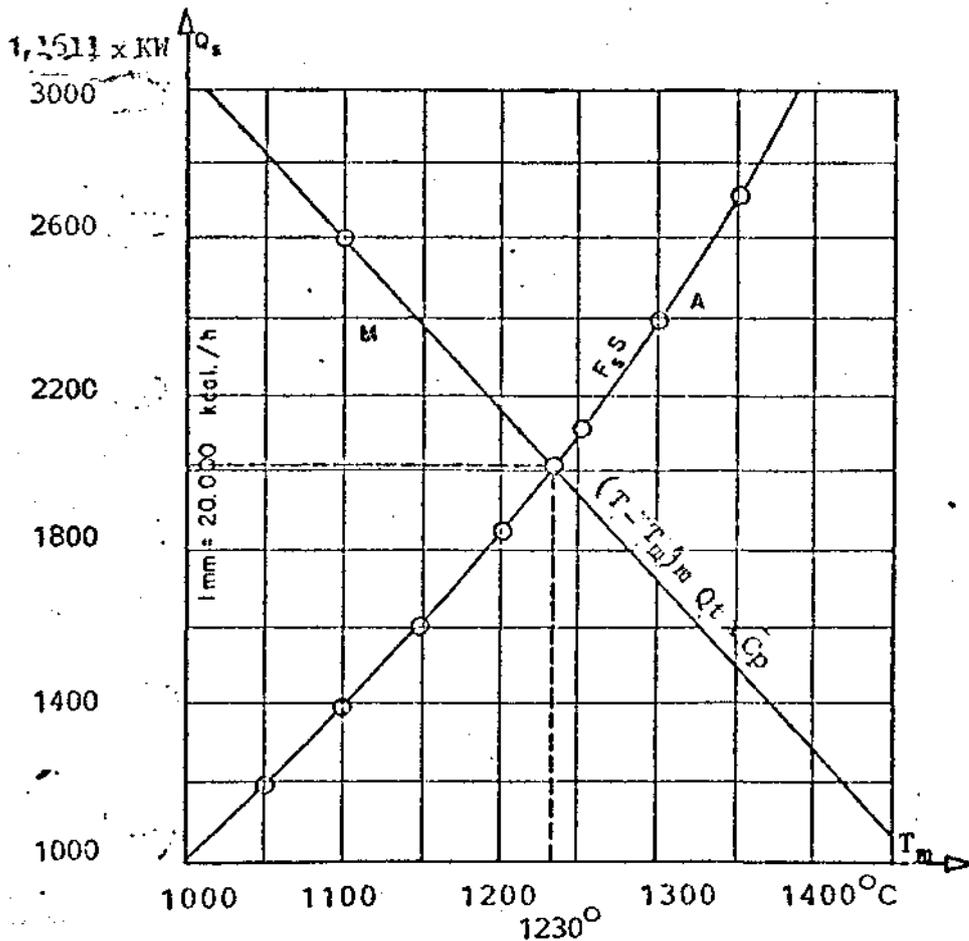


FIGURA 5 - Temperatura media da câmara de combustão obtida com valores de S e T_m .

Passemos agora a estudar o texto abaixo de Diniz (7).

4. COMBUSTÃO DA LENHA*

4.1. INTRODUÇÃO

Uma caldeira é tão boa quanto a sua fornalha. Toda a técnica de uma caldeira repousa sobre as condições ideais de combustão, pois em geral temos, em qualquer caldeira, uma zona de radiação e outra de convecção. Porém, uma verdade é comum a todas elas:

Transformar na câmara de combustão os combustíveis em gases de combustão. Em outras palavras, buscar obter gases que permutam seu calor com a água que vai-se evaporar.

Apesar de termos o mesmo fim os meios são bem diferentes.

Sempre se atribui a uma boa combustão a condição de se ter 3T, isto é: Turbulência, Tempo, Temperatura.

A Turbulência refere-se a uma íntima combinação do oxigênio com o combustível e a turbulência propicia esta condição. Nos combustíveis líquidos e gasosos, esta situação é facilmente atingida pela atomização. Nos combustíveis sólidos em estado de pó ou muito subdivididos, tal como o carvão pulverizado, serragem, casca de arroz, etc., também pode-se atingir tal turbulência. Nota-se que o excesso de ar requerido para a combustão é decorrência desta condição. Voltaremos a este ponto oportunamente.

O Tempo se refere a duração desta combustão, ou seja, o tempo de permanência ou residência na fornalha. A palavra fornalha tem aqui o sentido amplo de lugar ou espaço onde se inicia e se

completa a combustão. Uma partícula de combustível atingirá a total combustão se permanecer tempo suficiente em contacto com o oxigênio, o que lhe permitira completar a combustão, isto é, que todos os seus elementos combustíveis (carbono, hidrogênio, enxofre, etc.), se transformem em gases de combustão.

A Temperatura tem aqui o significado que se pode considerar bem amplo, pois a uma baixa temperatura a combustão não ocorre e a uma temperatura muito elevada podemos ter a fusão das cinzas. A temperatura é mais importante na transmissão de calor, constituindo-se em parâmetro de relevante papel no dimensionamento da câmara de combustão e da zona de convecção da caldeira.

A título de ilustração, na Tabela I relacionamos alguns combustíveis e suas temperaturas de ignição, que é a temperatura em que mais calor é gerado na reação do que é perdido no meio ambiente e então a combustão se auto-sustenta. Abaixo desta temperatura a combustão não se realiza. Em caso de combustão de certos gases pobres, o projeto da câmara se torna crítico pela manutenção de uma temperatura mínima de combustão, e isto é conseguido queimando-se quando se opera em carga baixa, um combustível auxiliar.

Existe uma relação entre o tempo e a temperatura, porque a velocidade da chama aumenta com a temperatura, mas este assunto foge ao escopo deste trabalho.

Fonte: Diniz (7).

TABELA I - Ponto de inflamação em C

Turfa (seca) :.....	225
Enxofro:	243
Lignita (seca):	250-450
Querosene:	255-295
Gasolina:	260-427
Madeira (seca) :.....	300
Carbano Fixo - Carvão BIT.:	410
Carbano Fixo - Semi BIT.:	470
Acetileno:	485
Carbano Fixo - Antracltico:	500
Óleo:	530-580
Gás de Coqueria:	550-650
Hidrogênio:.....	610
Monóxido de Carbono:.....	655
Coque:	700
Gás de Gasogênio:	700-800
Gás de Alto-Forno:	700-800

4.2. COMBUSTÃO DA LENHA

Para se atingir os 3T se di mensiona uma fornalha assumindo compromissos que permitam otimizar cada T envolvido.

Deixaremos de comentar fatos res que possam influir na decisão em se queimar lenha, a não ser os econômicos e os técnicos.

Na Tabela II estão indicados todos os dados importantes na combustão da lenha, no que tange aos aspectos físicos e químicos. é dada uma análise típica que será usada neste trabalho. Desta tabela tiramos a análise química, o CO₂ máximo, os poderes caloríficos e o ar teórico de combustão.

TABELA II - Dados típicos da lenha seca

Carbono - - -	50,30%
Hidrogênio - -	6,20%
Oxigênio - - -	43,08%
Nitrogênio - -	0,04%
Cinzas - - -	0,37%

PCS -----	5083 kcal/kg
PCI _____	4755 kcal/kg
Ar Teórico - -	6,067 kcal/kg
CO ₂ , máximo - - -	20,02%

Estes elementos são característicos do combustível, e é a

partir deles que são feitos todos os demais cálculos de combustão e transmissão de calor.

Por uma questão de clareza são mostradas, a seguir, algumas figuras que ilustram de maneira inquestionável o que se passa com a lenha quando a umidade se modifica. O primeiro retângulo ilustra a análise da lenha seca e o segundo a lenha contendo 40% de umidade.

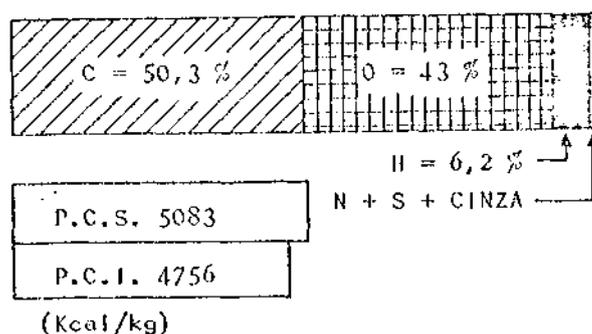


FIGURA 1 - Lenha seca

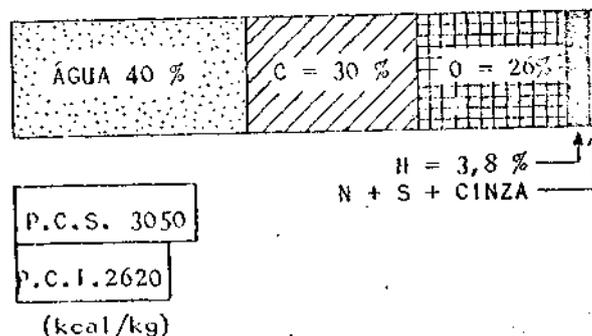


FIGURA 2 - Lenha com 40% de umidade

As figuras dão uma óbvia indicação do que ocorre quando se introduz "umidade" num combustível. Se chamarmos de U% a umidade contida em um combustível, todos os seus elementos serão reduzidos de $\frac{100 - U}{100}$, inclusive o PCS.

Quando se refere a Poder Calorífico, temos a distinguir o superior (PCS) e o Inferior (PCI) Por PCS entendemos a totalidade do calor liberado na combustão e PCI a mesma quantidade de calor deduzido o calor que o combustí-

vel usa para vaporizar a sua própria umidade, bem como a umidade" resultante da combustão do hidrogênio.

No caso do primeiro retângulo, temos que a diferença entre PCS e PCI é de 327 kcal/kg. Esta diferença foi absorvida para vaporizar a água resultante da combustão dos 6,2 % de hidrogênio, isto é: $(9 \times 6,2)/100 = 0,558$ kg de água por kg de combustível, o que dá: $0,558 \times 586 = 327$ kcal/kg. O número 586 representam a quantidade de calor necessária para aquecer a água, vaporizá-la e superaquecê-la. Ou, em outras palavras, é o calor cedido pela condensação da água contida nos produtos da combustão a 16 C.

No segundo retângulo, teremos uma adição de água (40%) e uma redução do teor de hidrogênio para :

Assim sendo, os gases de combustão conterão: 0,40 de água da umidade adicionada mais $(9 \times 3,72)/100 = 0,335$ de água do hidrogênio.

TOTAL = 0,735 kg/kg

Esta é a água contida nos gases, logo, a redução do Poder Calorífico Superior é:

$$586 \times 0,735 = 430 \text{ kcal/kg}$$

Mas, com a redução do carbono e do hidrogênio o PCS se tornou :

$$PCS = 5083 \times \frac{100 - 40}{100} =$$

= 3050 kcal/kg e, por conseguinte, o inferior é:

$$PCI = 3050 - 430 = 2630 \text{ kcal/kg.}$$

Este caminho foi seguido por questão de clareza, mas para os casos correntes, poderemos usar a Tabela III que inter-relaciona os PCS e PCI para as mais variadas condições.

TABELA III - Conversão de poder calorífico

$$\begin{aligned} PCSS &= PCS \text{ Seco II} - \% \text{ Hidrogênio} / 100 \\ PCSU &= PCS \text{ Úmido U} = \% \text{ Umidade} / 100 \\ PCIS &= PCI \text{ Seco Nota: } K = 9H (1-U) + U \\ PCIU &= PCI \text{ Úmido} \end{aligned}$$

Conhecidos PCSS e U

$$\begin{aligned} PCSU &= PCSS (1-U) \\ PCIU &= PCSS (1-U) - 586 K \\ PCIS &= PCSS - 586 K \end{aligned}$$

Conhecidos PCSU e U

$$\begin{aligned} PCSS &= PCSU / (1-U) \\ PCIU &= PCSU - 586 K \\ PCIS &= PCSU / (1-U) - 586 \times 9 \times H \end{aligned}$$

Conhecidos PCIU e U

$$\begin{aligned} PCSU &= PCIU + 586 K \\ PCSS &= PCIU / (1-U) + 586 / (1-U) \times H \\ PCIS &= (PCIU + 586U) / (1-U) \end{aligned}$$

Conhecidos PCIS e U

$$\begin{aligned} PCSU &= PCIS (1-U) + 586 \times 9 \times H (1-U) \\ PCSS &= PCIS + 586 \times 9 \times H \\ PCIS (1-U) &= 586U \end{aligned}$$

Em combustão a lenha, geralmente, temos apenas Carbono (C), Nitrogênio (N), Oxigênio (O), Hidrogênio (H) e Enxofre (S); conforme pode ser depreendido da Tabela IV que relaciona diversas análises de lenha.

TABELA IV - Análise de lenha seca - %

	Cedro	Cipreste	Pinho	Carvalho	Média
C	48,80	54,98	25,55	49,49	51,46
H	6,37	6,54	6,03	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	0,2
PCS	4667	5484	4944	4823	4980
PCI	4322	5130	4616	4665	4683
CO ₂ máx	20,2	19,5	20,2	19,9	20,0

Assim sendo, os dados cons

Fontes Alternativas de Energia para a Agricultura

tantes da Tabela II são os únicos que nos interessarão neste trabalho.

Para que este trabalho seja mais completo são dadas, mais as seguintes tabelas: Tabela V - Ar e produtos de combustão; Tabela VI - PCS e PCI; Tabela VII - CO₂ e Excesso de ar.

TABELA V - Ar e produtos de combustão

	Kg/Kg		Produtos Kg/Kg			
	O ₂	AR	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
Carbono	2,67	11,49	3,67	9,00	8,02	2,00
Hidrogênio	8,00	34,48			26,48	
Enxofre	1,00	4,31			3,31	

TABELA VI - 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 VII - 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

Estamos saindo da época onde a maior parte das caldeiras industriais usava óleo como combustível. Por esse motivo, são dadas algumas tabelas que permitirão, no desenvolver deste trabalho, a comparação dos desempenhos das caldeiras com lenha e com óleo.

Assim, apresentamos na Tabela VIII, os dados típicos para o óleo.

Nos cálculos de combustão sempre recorreremos a quantidade de gases, e então é oportuno oferecer algumas expressões que fornecerão as quantidades de ar, de água, de CO₂, etc. Declinamos da demonstração destas fórmulas para não sobrecarregar este trabalho. Em primeiro lugar são dadas as que calculam os pesos, sempre por unidade de peso de combustível

TABELA VIII - Dados típicos do óleo .

Carbono	34,00 %	PCS	10445 Kcal/Kg
Hidrogênio	12,70 %	PCI	= 9886 Kcal/Kg
Oxigênio	1,20 %	Ar Teórico	14 Kg/Kg
Nitrogênio	1,70 %	CO ₂ Máx.:	15,52
Enxofre	0,40 %		

LEGENDA:

C % em peso de Carbono
 H % em peso de Hidrogênio
 O % em peso de Oxigênio
 S % em peso de Enxofre
 N % em peso de Nitrogênio
 X I de excesso de ar/100
 U I de umidade de combustível/100.

Em peso (kg por kg de combustível)

Ar total

$$WA = [11,47C + 34,48(H - \frac{O}{8}) + 4,31S] \frac{1}{(1+x)(1-U)} \quad (2-01)$$

Vapor D'agua

$$WH = 911(1-U) + U \quad (2-02)$$

Gases Secos

$$WGS = WGS + WH + \frac{X}{1+X} WA \quad (2-03)$$

Gases Totais

$$WG = WGS + WH + \frac{X}{1-X} WA \quad (2-04)$$

% Água

$$\%H = \frac{100 \text{ WH}}{\text{WG}} \quad (2-05)$$

Em volume

(m³N por kg de combustível)

Ar total

$$VA = \left\{ 8,89C + 26,7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33S \right\} \\ (1+x)(1-U) \quad (2-06)$$

Vapor d'água

$$VH = 11,19H(1-U) + 1,244U \quad (2-07)$$

Gases Secos

$$VGS = \left\{ 8,89C + 21,1 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33S + 0,796N \right\} \\ (1-U)(1+X) \quad (2-08)$$

Gases Totais

$$VG = VGS + VH + VGS \cdot \frac{X}{1+X} \quad (2-09)$$

% CO₂

$$\% \text{CO}_2 = \frac{1,867C(1-U)}{VGS} \quad (\text{secos sem ex} \\ \text{cesso}) \quad (2-10)$$

$$\% \text{CO}_2 = \frac{1,867C(1-U)}{VGS + \frac{X}{1+X} \cdot VA} \quad (\text{secos com ex} \\ \text{cesso}) \quad (2-11)$$

$$\% \text{CO}_2 = \frac{1,867C(1-U)}{VG} \quad (\text{úmido com} \\ \text{excesso}) \quad " *$$

Passamos então uma rápida revista em todos os parâmetros que necessitamos, para iniciarmos o estudo propriamente dito da combustão a lenha.

4.3. TEMPERATURA DA COMBUSTÃO

Se queirmos um quilograma de combustível em uma . fornalha perfeitamente isolada, todo calor originado desta combustão será utilizado para elevar a temperatura dos gases de combustão a um valor conhecido como temperatura teórica de combustão (T).

Como já comentamos, o PCI será o único que contribuirá para se atingir esta temperatura, pois, o PCS usará parte de sua energia para a transformação da água contida no combustível ou formada pela queima do hidrogênio

Se chamarmos de io a entalpia dos gases de combustão, ou em linguagem mais pratica, o calor total contido em WG kg de gases , teremos:

$$io = \frac{\text{PCI}}{\text{WG}} \text{ kcal/kg} \quad (3-01)$$

Para exemplificar, se usarmos a nossa Tabela I teremos:

$$\text{PCI} = 4755 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{WA} = 6,067 \text{ kg/kg}$$

Este WA= 6,067 e o teórico sem excesso de ar, e, se fizermos X=0,4, isto é 40% de excesso de ar e U = 0%, os gases totais serão:

$$VG = VA(1+X) + I = 6,067 \times 1,4 + 1 = \\ = 9,494 \text{ kg/kg} \quad (3-02) \\ \text{então } io = \frac{4755}{9,494} = 500 \text{ kcal/kg.}$$

Com base na análise dos gases, e tabelas das constantes dos gases, obtemos: (ver Tabela IX)

$$T_o = 1.620^{\circ}\text{C}$$

TABELA IX - Entalpia dos gases de combustão de lenha

Temperatura Tc °C	Entalpia Kcal/Kg
700	195
800	225
900	258
1000	292
1100	319
1200	358
1300	392

O mesmo cálculo, porem com lenha úmida com 40% de umidade for nece:

$$\begin{aligned} VG &= VA (1 - U) (1 + X) + 1 = \\ &= 6,067 \times 0,6 \times 1,4 + 1 = \\ &= 6,1 \text{ kg/kg.} \end{aligned}$$

Da tabela VI temos
2620 kcal/kg logo:

$$i_o = \frac{2620}{6.1} = 430 \text{ kcal/kg}$$

Esta entalpia

$$T_o = 1.420^\circ\text{C}$$

fornece

Note-se que a umidade baixou de 200 C a temperatura dos gases, .0-que significa termos menor temperatura na fornalha, isto e , menor transmissão de calor por radiação também.

Na Tabela X damos as temperaturas reóricas de combustão calculadas para os diversos teores" de umidade da lenha.

TABELA X - Temperatura teórica de combustão da lenha

u %	PCI Kcal/Kg	WG Kg/Kg	To °C
0	4756	9,50	1620
10	4221	8,64	1580
20	3687	7,80	1540
30	3153	6,95	1490
40	2620	6,10	1420
50	2085	5,25	1320
60	1551	4,40	1190
70	1016	3,55	990

No caso do óleo, com os dados da Tabela VIII, e com excesso de ar de 20%, obtemos:

$$VG = 14,0 \times 1,2 + 1 = 17,8$$

$$PCI = 9886$$

$$i_o = \frac{9886}{17.8} = 555 \text{ kcal/kg e}$$

$$T_o = 1,850^\circ\text{C}$$

Vemos então que a lenha usualmente encontrada nas fornadas tem um $T_o = 1.420^\circ\text{C}$, enquanto que o óleo tem $T_o = 1.850^\circ\text{C}$, isto é 430 C a mais de temperatura.

4.4. ABSORÇÃO NA FORNALHA

Nas fornalhas industriais as temperaturas são inferiores à teórica porque sempre ha perdas de calor e absorção de calor pelos tubos ou paredes de água das câmaras de combustão.

Esta absorção de calor varia com a quarta potência da temperatura da chama, de modo que se uma chama tem 1000°C e outra tem 1100°C , a diferença da absorção é de 46% a mais. Aí esta a razão da importância que se da à temperatura da chama bem como de tirar o máximo proveito desta absorção elevada nas superfícies de aquecimento expostas a radiação na fornalha.

A absorção em uma fornalha pode ser dada aproximadamente pela expressão:

$$HABS = 4 SA. \left\{ \frac{(T_c + 273)^4}{100} - \frac{(t + 273)^4}{100} \right\} \quad (4-01)$$

ou, para os casos práticos ($t = 220^\circ\text{C}$):

$$HABS = 4 SA. \left\{ \frac{(T_c + 273)^4}{100} - 590 \right\} \quad (4-02)$$

Onde:

SA = superfície de aquecimento exposta a radiação em m^2 . T_c = temperatura da saída dos gases da fornalha $^\circ\text{C}$ t = temperatura da parede dos tubos $^\circ\text{C}$. HABS = calor absorvido por radiação kcal/h.m^2 .

Quando esta presente uma certa superfície de aquecimento SA. na fornalha, sendo a absorção de calor dada por HABS, o peso total dos gases quando se queima WF kg/h de combustível $WF.WG$, o balanço térmico se obtém como segue: $WG . WF . i_o = i_c . WG.Wf + HABS$
ou $(4-03)$

$$i_o = i_c + \frac{HABS}{WG . WF} \quad (4-04) \text{ ou ainda}$$

$$i_c = i_o - \frac{HABS}{WG . WF} \quad (4-05)$$

Esta fórmula fornece a temperatura de saída T_c , que é obtida por tentativas, pois admite-se um certo T_c e calcula-se HABS e obtêm-se i_c . Entra-se na Tabela IX e recalcula-se a temperatura. A Tabela IX foi calculada para a combustão da lenha com 40% de excesso de ar e 40% de umidade.

Exemplo com apenas duas tentativas para que este trabalho não se estenda:

$SA = 10 \text{ m}^2$
 $T_c = 1000^\circ\text{C}$ - (1ª tentativa)
 $WF = 700 \text{ kg/h}$
 $WG = 6.1 \text{ kg/kg}$ e $PCI = 2620 \text{ kcal/kg}$.

Temos:

$HABS = 1026840 \text{ kcal/h}$. (fórmula 4-02)

$$i_c = \frac{2620}{6.1} - \frac{1026840}{6.1 \times 700} = 189 \text{ kcal/kg}$$

(fórmula 4-05)

Com a Tabela IX: $T_c = 680^\circ\text{C}$

2ª tentativa: $T_c = 900^\circ\text{C}$
 $HABS = 733670 \text{ kcal/kg}$
 e $i_c = \frac{2620}{6.1} - \frac{733670}{6.1 \times 700} = 258 \text{ kcal/kg}$
 da Tabela IX: $T_c = 900^\circ\text{C}$.

Se reescrevermos a fórmula (4-05) chamando $h = HABS/SA$, teremos,

$$i_c = i_o - \frac{h}{WG \frac{WF}{SA}} \quad (4-06)$$

Com auxílio desta fórmula poderemos estabelecer, para diversos valores de WF/SA , isto é, para diversos valores da quantidade de combustível por metro quadrado de superfície de aquecimento, as correspondentes temperaturas de combustão.

Assim chegamos à Tabela XI que foi elaborada mantendo constantes todos os valores da fórmula (4-06) variando apenas a relação WF/SA . A primeira coluna da tabela foi obtida multiplicando-se a relação WF/SA pelo PCI e é dado prático de muita significação pois **expressa** a carga técnica na forna

lha em $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$. Pela tabela pode-se inferir que a temperatura na câmara será tão maior quanto menor a superfície de aquecimento e assim podemos obter a temperatura que quisermos na câmara para se ter o desempenho correto da fornalha.

TABELA XI - Temperatura de combustão da lenha

WF.PCI Kcal/m ² .h	WK/S.A Kg/m ² .h	Tc °C
■ 50000	20	685
100000	40	810
200000	80	940
300000	3 20	1015
400000	160	1065
500000	200	1120

Para ilustração e comparação, foi elaborada a Tabela XII, que é a mesma anterior, porém, baseada em óleo combustível com 20% de excesso de ar. Os dados das Tabelas XI e XII serão usados quando compararmos os desempenhos das caldeiras a óleo e a lenha.

TABELA XII - Temperatura de combustão de óleo

WF.PCI Kcal/h.m ²	Tc °C	WF/S./v Kg/m ² .h
100000	830	10
200000	980	20
300000	1075	■ 30
400000	1140	40
500000	1190	50
600000	1220	60

4.5. RENDIMENTO TÉRMICO

Para finalizar os aspectos gerais que nos darão as bases para as discussões das caldeiras quei_

mando lenha, tocaremos em dois pontos importantes que são o excesso de ar e a umidade nos combustíveis, e seus reflexos no rendimento térmico.

Para que não surjam dúvidas quanto a validade de se usar rendimento térmico baseado no PCS e no PCI, damos a seguir sua inter-relação que rápida e facilmente nos permite trabalhar com um ou com outro.

O calor produzido na caldeira H_o é a fração utilizável do calor desenvolvido na fornalha. Se chamarmos de H_i o calor desenvolvido na fornalha e $R.T$ o rendimento térmico teremos:

$$H_o = H_i \times (RT/100) \quad (5-01)$$

Mas o calor desenvolvido é dado pelo produto da quantidade de combustível queimando (WF), pelo poder calorífico. Como temos PCS e PCI, teremos um calor desenvolvido superior (bruto) H_{ib} , e um calor desenvolvido inferior (líquido) H_{il} :

$$H_{il} = PCI \times WF \quad (5-02)$$

$$H_{ib} = PCS \times WF \quad (5-03)$$

Como o calor produzido H_o depende de RT e de H_i , teremos:

$$H_o = RT \times PCS \times WF/100 \quad (5-04)$$

ou

$$H_o = RTI \times PCI \times WF/100 \quad (5-05)$$

Igualando e simplificando (5-04) e (5-05):

$$RTI \times PCI = RT \times PCS \quad (5-06)$$

Por conseguinte, os "rendimentos térmicos multiplicados pelos respectivos poderes caloríficos são constantes; com isso teremos:

$$RTI = RT \times \frac{PCS}{PCI} \quad (5-07)$$

Por questão de preferência do autor deste trabalho, os cálculos serão executados no PCS, os resultados convertidos pela relação acima.

Para se calcular o rendimento térmico temos dois principais procedimentos: o estimativo e o real. Chamamos de estimativo aquele obtido calculando-se as perdas na chaminé e atribuindo-se valores as perdas de cinzas, radiação, etc. O real é obtido pelas medições do consumo de combustível e do calor produzido que são os únicos elementos reais de uma caldeira.

a) Rendimento Térmico Estimativo:

Para tal deverão ser conhecidos ou estimados os seguintes elementos:

. Temperatura de saída dos gases - T_g °C . Temperatura ambiente - t_a °C . Percentagem de CO_2

. Poder calorífico PCS ou PCI kcal/kg . Umidade: do combustível - % . Ar teórico de combustão - W_A kg/k . Produção da caldeira- H_o kcal/h.

As perdas na chaminé são calculadas pelas expressões:

$$PGS = WGS \times 0,24(T_g - t_a) \text{ kcal/kg} \quad (5-08)$$

$$PH = M \times (565 + 0,48 T_g) \text{ kcal/kg} \quad (5-09)$$

As perdas totais são a soma das perdas acima. Além destas perdas temos radiação com cerca de 2,5% e uma margem do fabricante de 1,51.

Para simplificar os cálculos apresentamos algumas tabelas que dão os valores calculados para os casos da prática.

TABELA XIII - Rendimento Térmico PCS (lenha)

Tg Gas	% 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	30,2	78,7	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	25,2
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

Conhecidos CO_2 , U e Tg obtemos RTS .

$$CO_2 = 13,4\%$$

$$U = 40\% \text{ e } Tg = 275^\circ C$$

Exemplo:

Pela Tabela VII obtemos x 50%.

$$RST = 68,75 - 0,71 = 68,05\%$$

$$RTI = 68,05 \times \frac{3050}{2620} = 79,22\%$$

TABELA XIV - Rendimento Térmico:
(Óleo)

Excesso Ar = 20% Perdas Div = 4%

ta - 27°C

Temperatura °C	Rendimento % PCS	Rendimento % PCI	Kg/vapor Kg/óleo
200	82,1	86,8	14,13
225	81,1	85,6	13,95
250	80,0	84,5	13,77
275	78,9	83,3	13,58
300	77,8	82,2	13,39
325	76,7	81,0	13,20
350	75,6	79,9	13,01
375	74,5	78,7	12,82
400	73,4	77,6	12,62

Nota: $RTI = RTS \times \frac{PCS}{PCI}$

Nota: 0,71 é o decréscimo para 10% mais que os 401 de excesso de ar usado para elaborar a tabela.

Conhecidos: CO_2 e Tg obtemos RT.

Exemplo: Tg = 325°C e $CO_2 = 12,71$
onde X = 20% (tabela XV)

Então: RTI = 81,00
RTS = 76,71

TABELA XV - Variação das perdas e do CO_2 com o excesso de ar (oleo)

Excesso Ar-%	CO_2 %	Perdas % (PCS) (250°C)
0	15,5	14,6
10	13,9	15,3
20	12,7	16,0
30	11,7	16,7
40	10,8	17,4
50	10,0	18,1
60	9,4	18,9
70	8,9	19,6
80	8,3	20,3
90	7,9	21,0
100	7,5	21,7

Conhecendo CO₂ obtemos as
perdas e o excesso de ar.
Exemplo: CO₂ = 8,9%
tabela: Perdas = 19,6%
X = 70 %

TABELA XVI - Perdas de umidade e de excesso de Ar-Lenha

Perdas de Umidade p/ Qualquer Excesso Ar		Perdas de Excesso Para Umidade = 40 %	
U%	Perdas %	X%	Perdas %
0	7,5	0	6,8
10	9,0	10	7,5
20	18,9	20	8,1
30	13,3	30	8,8
40	16,5	40	9,4
50	21,0	50	10,0
60	27,7	60	10,7
70	39,0	70	11,3
80	61,4	80	12,0
87	97,7	90	12,6
		100	13,2

Exemplo:

Umidade U=40% (com Tg= 250°C)
Excesso de ar X = 50% Perdas
pela umidade Perdas pelo
excesso

$$\frac{16,5\%}{10,05\%}$$

Perdas totais 26,55%

Esta tabela tem a intenção de salientar a variação das perdas de umidade e do excesso de ar em caldeiras queimando lenha.

Quando a Tabela XIII é utilizada para outro excesso de ar que o de 40%, a Tabela XVI fornece a correção para outro excesso de ar.

Exemplo:

Excesso de ar real: X= 50%
Excesso pela tabela XIII: X = 40%
Perdas com X = 50% = 10,1
Perdas com $\frac{9,4}{0,70\%}$ =
Variação + 0,70%

No exemplo da Tabela XIII este valor foi usado para reduzir o R.T.

b) Rendimento Térmico Real:

Conforme vimos anteriormente pela fórmula (5-01), a produção da caldeira é igual a quantidade de vapor produzido e multiplicado pela diferença entre o calor do vapor e da água de alimentação, então:

$$H_o = E \times d_l \text{ kcal/h} \quad (5-08)$$

Chamando de I_v o calor do vapor que é obtido das tabelas de vapor, e da I_a o calor da água de alimentação, teremos:

$$d_l = I_v - I_a \text{ kcal/kg} \quad (5-09)$$

Lembrando que de acordo com (5-03) o calor desenvolvido é o produto da quantidade de combustível WF pelo seu PCS, teremos combinando as fórmulas:

$$H_o = \frac{E \times d_l}{RTS/100} = \frac{E(I_v - I_a)}{RTS/100} = \text{PCS} \cdot \text{WF} \quad (5-10)$$

donde se tira:

$$\frac{E}{WF} = \frac{\text{PCS}}{I_v - I_a} \frac{RTS}{100} \quad (5-11) \text{ ou}$$

ainda:

$$RTS = 100 \cdot \frac{E}{WF} \frac{I_v - I_a}{\text{PCS}} \quad (5-12)$$

Assim o RTS é facilmente obtido pela fórmula (5-12) conhecendo-se:

E = Evaporação - kg/h
I_v = Calor do vapor - kcal/kg
I_a = Calor de água - kcal/kg
PCS = Poder calorífico superior kcal/kg.

Seja uma caldeira onde ao medirmos a quantidade de água gasta (que é a mesma que a evaporada) obtivemos 6000 kg/h e queimamos 1700 kg/h de combustível com

um PCI = 2620 kg/kg; a pressão de vapor e de 8 kg/cm e a temperatura da água 60 °C.

Teremos então:

$E = 6000 \cdot WF = 1700 \text{ PCI} = 2620 \cdot Iv = 662 \text{ kcal/kg}$
 $Ia = 60 \text{ kcal/kg}$ (= temperatura de 60°C)

$$RTI = 100 \times \frac{600}{1700} \times \frac{662 - 60}{2620} = 81,1 \%$$

A Tabela XVII foi elaborada mantendo-se constante a

$\frac{Iv - Ia}{PCS}$ relação

para a pressão de 8 kg/cm² água de 60°C e PCS = 3050 kcal/h e lenha com 40% de umidade.

TABELA XVII - Kg de Vapor por Kg de Lenha.

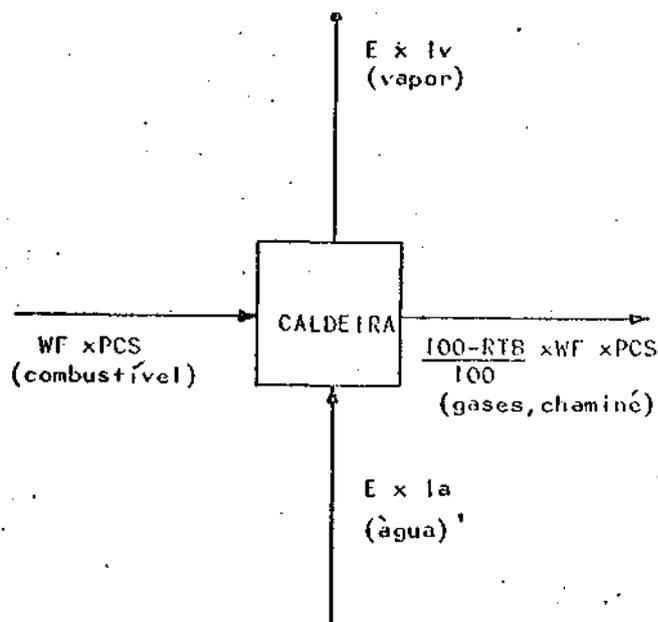
Tg °C	% do Umidade da Lenha							
	0	10	20	30	40	50	60	70
200	6,82	6,0	5,24	4,45	3,66	2,87	2,08	1,28
225	6,72	5,3	5,15	4,37	3,59	2,81	2,02	1,24
250	6,62	5,94	5,07	4,30	3,52	2,75	1,97	1,20
275	6,52	5,85	4,99	4,22	3,45	2,69	1,92	1,15
300	6,42	5,75	4,90	4,15	3,39	2,63	1,87	1,11
325	6,32	6,66	4,82	4,07	3,32	2,57	1,82	1,07
350	6,22	5,57	4,74	3,99	3,25	2,51	1,77	1,02

Nota: Pressão: 8,0 Kg/cm²
 Temp. água: 60°C
 Excesso ar: 401
 Perdas div. A%

Note-se que o RTS obtido já esta corrigido com 4% de perdas e se aplica com 40% de excesso de ar.

Trata-se de um processo simples de se obter o RTS, uma vez que se conhece a temperatura dos gases, ou a relação entre a evaporação e o consumo de lenha WF.

A figura 3 ilustra o balanço térmico que conduziu as formulas acima.



Entrando: Combustível - WF x PCS
 Água - E x Ia

Saindo: Vapor -

$$\text{Gases} = \frac{E \times Iv}{100 - RTB} \times WF \times \dots$$

FIGURA 3 - Balanço Térmico

4.6. CONVERSÃO DE COMBUSTÍVEL

Ja podemos começar as discussões praticas a que se propõe este trabalho. Para tornar claro o que ocorre numa caldeira queimando óleo, quando é convertido para queimar lenha, passaremos a um exemplo prático de uma caldeira de 4000 kg/h. Escolhemos este tamanho por ser este trabalho destinado a unidades industriais, e este é o plano.

4000 kg/h
 Dados Ger 8 kg/cm² : Pressão de trabalho: saturado
 Temperatura: 60°C temperatura ambiente: 270°C
 Problema:

Converter para lenha.

Caldeira a óleo:

Cor: 292,2 kg/h combustível
 Ten: 275°C gases:
 RT: 78,9 %
 P: kcal/kg 0445/9886
 Ex: 20%
 CO₂ 12,7 %

Trata-se de uma caldeira, com fornalha circular interna com diâmetro de aproximadamente 700mm e comprimento 3.400 mm, o que dá uma SA. da fornalha de 7,5 m² on-, de se realiza a combustão, com um volume de 1,31 m³.

A quantidade de calor desenvolvida e de: $Hil = PCI.WF - 9886 \times 292,2 = 288900 \text{ kcal/h}$

A relação WF/SA dá 39 kg/cm²h de combustível, por superfície de aquecimento, e isto fornece uma temperatura de combustão de cerca de 1140 C.

Levando este valor na expressão (4-02), teremos a absorção na fornalha: $HABS = 157100 \times 7,5 = 1778250 \text{ kcal/h}$.

O calor produzido na caldeira é: $Ho = 4000 (662 - 60) = 240800 \text{ kcal/h}$.

Como podemos observar, cerca de 70% do calor produzido na caldeira é absorvido na fornalha.

Se pretendemos queimar lenha com PCS= 3050 kcal/kg, 40% de umidade e 401 de excesso de ar, adotando como 70% o RTS, teremos para o consumo de lenha: (5-11)

$$WF = \frac{Ho}{\frac{RTS}{100} \times PCS} = \frac{2408000}{0,7 \times 3050} = 1128 \text{ kg/h}$$

Se a lenha tiver um peso de 500 kg/m³, o volume da lenha será:

Usualmente, limitamos a liberação na fornalha, isto é, o calor desenvolvido por unidade de volume em torno de 300000 kcal/m³h

No nosso caso teremos necessidade de um volume de:

$$V = \frac{1128 \times 3050}{300000} = 11,5 \text{ m}^3$$

Como podemos observar, a fornalha da caldeira a óleo tem um volume de 1/10 do requerido.

O volume por si só limitara a capacidade da caldeira. Por esta razão recorre-se normalmente ao que chamamos de jante fornalha ou pré-fornalha, que nada mais é do que acrescentar uma câmara de combustão que atenda as condições de combustão da lenha.

Admitindo-se que o problema assim seja resolvido, ainda teremos que considerar outros aspectos ligados ao escoamento dos gases, seu volume, perda de pressão, etc.

No caso do óleo a quantidade de gases é:

$$WGO = (14 \times 1,2 + 1) \times 292,2 = 17,8 \times 292,2 = 5200 \text{ kg/h.}$$

E para a lenha:

$$WGL = \{6,1(1 - 04) \times 1,4 + 1\} \times 1128 = 6,12 \times 1128 = 6910 \text{ kg/h.}$$

Ou seja, teremos uma vazão de gases 33% maior, o que representa (1,33)²=1,76 vezes a resistência dos gases na tiragem.

Em geral as caldeiras a óleo funcionam com tiragem forçada

c uma vez feita a conversão para a lenha ha um aumento considerável de resistência e recorra-se a um ventilador para a tiragem.

Por esta razão c comum que se faça a conversão para a lenha e se obtenha menor capacidade de produção. Ao se reduzir a capacidade da caldeira, estaremos praticamente mantendo as velocidades dos gases nas diversas passagens. Em geral limitamos estas velocidades em torno de 15 m/s.

Admitamos uma caldeira a óleo operando com as seguintes características:
 Temperatura dos gases: 250°C
 Temperatura do óleo: 60°C
 Pressão dos gases: 8 kg/cm^2

Pela Tabela XIV temos 13,77 kg de vapor por kg de óleo. Também admitamos que iremos queimar, em substituição ao óleo, lenha com 40% de excesso de ar, com os gases a 250 C.

Pela Tabela XVII teremos 3,52 kg vapor por kg de lenha. Usando estes dois resultados e lembrando que o m^3 da lenha pesa cerca de 500 kg, teremos:

$$E_c = 100 - \frac{\text{Custo Lenha}}{1,28 \text{ custo Óleo}} \% \quad (6-01)$$

A Tabela XVIII foi computada com base na fórmula (6-01) para facilitar os cálculos, e usa. dos apenas números inteiros.

TABELA XVIII - Economia Lenha x Óleo

Lenha Cr\$/m ³	Preços óleo Cr\$/Kg											
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
400	84	85	86	86	87	87	88	88	89	89	90	
500	80	81	82	83	84	84	85	86	86	87	87	
600	76	77	78	79	80	81	82	82	83	84	84	
700	72	74	75	76	77	78	79	30	80	81	82	
800	68	70	71	72	73	75	75	76	77	78	79	
900	64	66	67	69	70	71	72	73	74	75	76	
1000	60	62	64	65	67	68	69	71	72	73	73	

No exemplo acima, se a lenha custar Cr\$ 600,00 m³ e o óleo Cr\$ 28,00/kg, teremos pela fórmula (6-01) :

$$E_c = 100 - \frac{600}{1,28 \times 28} = 83,26\%$$

Pela tabela obtemos 83%, valor arredondado.

Tudo indica que ha um desempenho de preços de combustíveis, pois, quem tem uma fatura mensal: de Cr\$ 5.000.000,00, isto e, opera uma caldeira a óleo queimando 300 kg/h durante 24 horas por dia, e 28 dias por mês, com óleo a Cr\$ 24,80/kg, terá uma economia mensal de Cr\$ 4.150.000,00, isto e, paga a caldeira a lenha dentro de poucos meses.

Para ajudar em estimativas rápidas, elaboramos a Tabela XIX que indica a percentagem de custo que se teria se todos os KW consumidos nas caldeiras a lenha, fossem convertidos energeticamente em lenha.

TABELA XIX - Comparação KWh x Lenha

Lenha Cr\$/m ³	Preços do KWh Cr\$/KWh									
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	
400	67	78	83	87	89	90	91	92	93	
500	59	73	79	83	86	88	89	91	91	
600	51	67	75	80	83	86	87	89	90	
700	43	62	71	77	81	83	85	87	88	
800	35	57	67	74	78	81	83	85	87	85
900	27	51	63	71	75	79	81	83	85	
1000	19	46	59	67	73	77	79	82	83	

Nesta tabela, com o KWH a Cr\$ 2,00 e a lenha a Cr\$ 600,00/m³ a economia e de 75% do total da energia elétrica. Este é um dado importante na avaliação comparativa de duas caldeiras.

Foi calculada a tabela tendo em vista:

$$\begin{aligned} 1\text{m}^3 \text{ lenha} &= 3050 \text{ kcal/kg} \times 500 = \\ &= 1525000 \text{ kcal} \\ \text{KWH} &= 860 \text{ kcal.} \end{aligned}$$

Adotando-se como 701 o RTS da caldeira, teremos:

$$1\text{m}^3 \text{ lenha} - 1525000 \times 0,7 = 1067500 \text{ kcal}$$

Estes valores levam a fórmula:

$$\%ECON = 100 - \frac{\text{Custo lenha}}{12,41 \text{ Custo KWH}} \quad (6-02)$$

-

FORNALHAS E CALDEIRAS A LENHA

5. FORNALHAS

Fornalha é o lugar onde ocorre a queima do combustível, ou seja, onde a energia química potencial do combustível transforma-se em energia térmica (calor). É o lugar onde o combustível em contato com uma quantidade mínima de ar em excesso é queimado, havendo uma pequena perda de calor ao ambiente. O volume da fornalha e um dos principais requisitos, pois o calor liberado deve ser incorporado aos gases antes de atingir o secador. Não devem entrar fagulhas nem labaredas dentro do secador e todos os voláteis devem ser queimados antes de chegar a ele.

O tamanho e a forma da fornalha dependem do tipo de combustível, do dispositivo usado para queimá-lo e da quantidade de calor que deve ser liberada num dado intervalo de tempo. A construção de uma fornalha é baseada nos 3T da combustão: temperatura, turbulência e tempo.

O volume da fornalha depende da taxa de liberação de calor. Esta taxa é função do tipo de fornalha, do comprimento e temperatura da chama, da quantidade de excesso de ar e da turbulência. Em geral a taxa de liberação de calor varia entre 100.000 a 500.000 Kcal/h.m³ (120 a 580 KW/m³).

Quanto a natureza dos combustíveis as fornalhas são classi-

ficadas em:

- . fornalhas para combustíveis sólidos;
- . fornalhas para combustíveis sólidos pulverizados;
- . fornalhas para combustíveis líquidos;
- . fornalhas para combustíveis gasosos.

Apenas a primeira será discutida neste trabalho, pois é a mais usada na secagem de grãos.

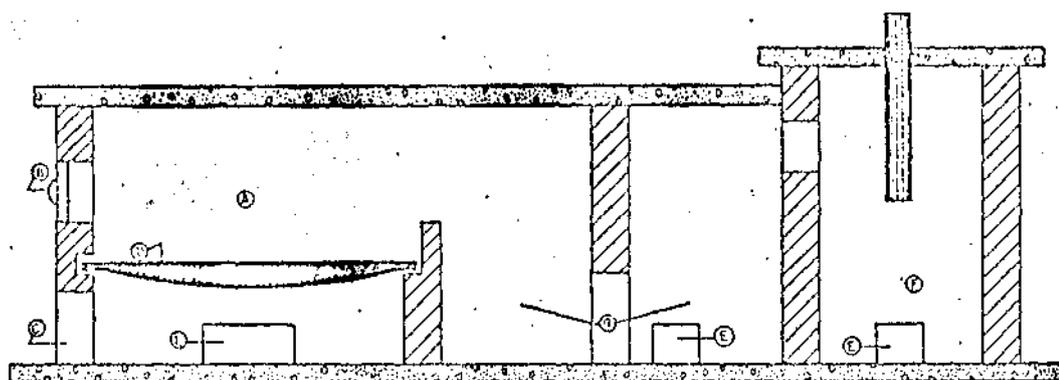
5.1. FORNALHAS PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

5.1.1. **Fornalha** sem Trocador de Calor

A queima da lenha em toras apresenta baixa eficiência de combustão devido à dificuldade de contato íntimo entre o ar e a tora, pois a combustão é um fenômeno de superfície. Essa deficiência pode ser sanada picando a lenha em pedaços, contudo aumenta-se o custo operacional.

Um tipo de fornalha adequado para queimas de lenha em pedaços está esquematizado nas Figuras 6 e 7.

Fonte: Andrade et alii (1)



- A. CAMARA DE COMBUSTÃO
- B- PORTA DO ACESSO P/CARREGAMENTO
- C- ENTRADA DE AR
- D- ORELHA
- E- PORTA DE LIMPEZA DAS CINZAS F-MISTURADOR TANGENCIAL (QUEBRA-FAGULHA)
- 8-CAMARA DE COMBUSTÃO DOS VOLÁTEIS

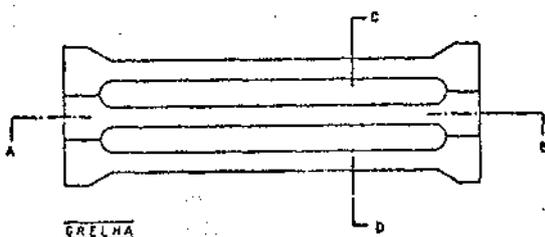
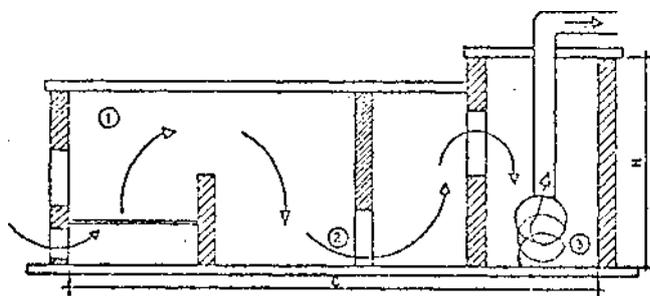


FIGURA 6 - Esquema de uma fornalha para queima de combustíveis sólidos



- 1. Câmara de combustão
- 2. Câmara de turbulência
- 3. Câmara quebra-fagulha

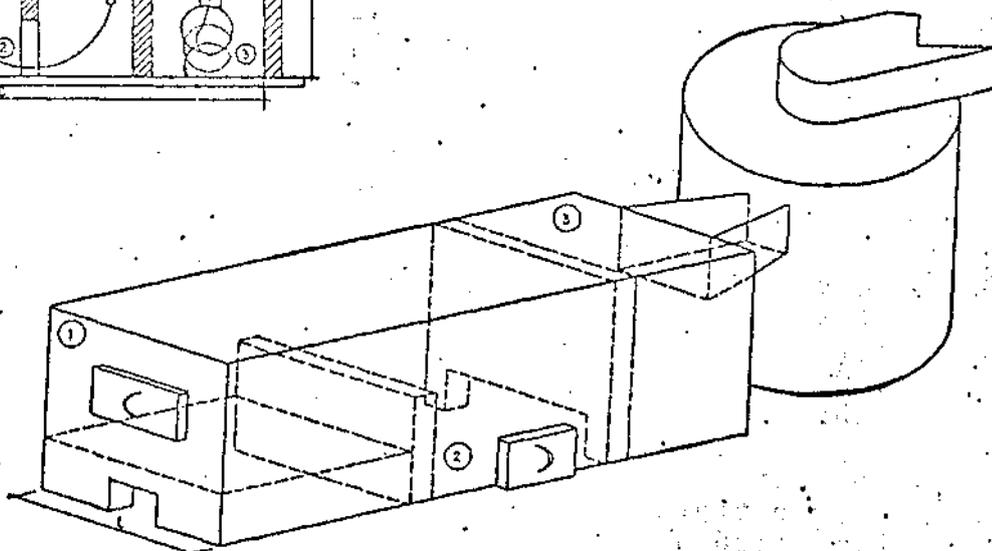


FIGURA 7 - Fornalha para queima de combustíveis sólidos , vista em corte e perspectiva.

As fornalhas de grelhas horizontais (Figura 6) não devem ter mais de 2 m de profundidade (comprimento) e devem ter uma porta de carregamento para cada metro de largura.

A taxa de combustão, ou seja, a quantidade de combustível queimado por unidade de tempo e por unidade de superfície da fornalha, varia entre 80 a 150 kg/h.m² (0,1 a 0,2 KW/m³).

Uma fornalha não deve ter ar em demasia nem em falta. De maneira prática para saber se a quantidade de ar é suficiente procede-se do seguinte modo: verificar constantemente a chama e as

cinzas; se junto as cinzas existir muito carvão indica falta de ar devido à má queima; se a queima do combustível for muito rápida indica grande excesso de ar.

As fornalhas para combustíveis sólidos geralmente produzem fagulhas que são carregadas pelo ar e podem causar incêndios no secador. Para apagar essas fagulhas e tira-las do ar são construídos os misturadores tangenciais ou ciclones (Figura 8), nos quais o ar entre tangencialmente as paredes internas.

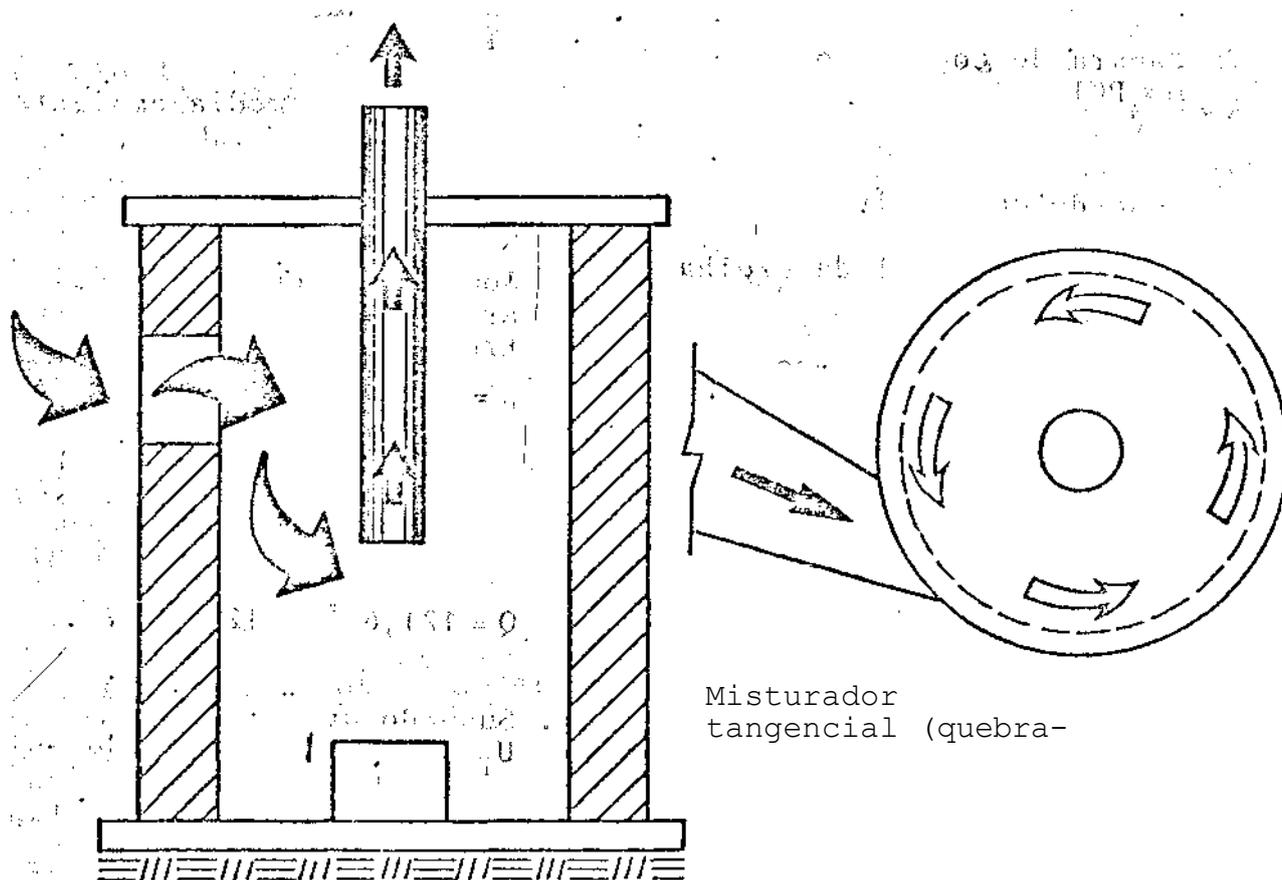


FIGURA 8 - Ciclone ou misturador tangencial, para apagar as fagulhas

5.1.1,1. Dimensionamento

Existe um método teórico, bastante complexo e outro prático que poderão ser usados no dimensionamento das fornalhas. Neste trabalho será usado o método prático.

O cálculo da superfície de uma grelha pode ser baseado em:

a) Na taxa de combustão

$$T_c = m/h \quad (\text{kg/h.m}^2) \quad (\text{Eq. 30})$$

$$mQ_a = 3600 V.S_e \quad (\text{Nm}^3/\text{h}) \quad (\text{Eq. 31})$$

$$\frac{S_e}{S} = s$$

b) No consumo de ar

$$(\text{Eq. 32})$$

c) Na câmara de combustão

$$K = \frac{m \times \text{PCI}}{V} \quad (\text{Eq. 33})$$

onde

m = peso do combustível a ser queimado (kg/h) = superfície total da grelha

T = taxa de combustão. lenha, palhas, bagaço de cana, para fornalhas com grelha plana, carga manual e ar forçado 150 a 300 (kg/h.m²)

carvão, para fornalhas com grelha plana, carga manual e ar forçado 200 a 300 (kg/h.m²)

S = superfície livre da grelha, ou seja, superfície dos vazios por onde passa o ar para a combustão (m²) v = velocidade de escoamento do ar (m/s). Na prática v=0,75 a 1,6 m/s nas fornalhas com tiragem mecânica (com venti-ladores). Qa = volume de ar necessário a Qa queima de 1 kg de combustível (Nm³/kg) s = varia conforme o tipo de grelha s = 0,2 a 0,5 para grelha com

carga manual s = 0,1 a 0,3 para grelha com carga mecânica

k = taxa de liberação de calor - 150.000 a 200.000 para lenha, palhas, bagaço de cana e carvão (Kcal/h.m³) (630.000 a 840.000 KJ/h.m³) PCI PODER calorífico inferior (Quadro 2)

V = volume da fornalha (m³)

Um exemplo ilustra o cálculo de uma fornalha a lenha com carga manual e grelha plana.

1. Características do ventilador utilizado

Fluxo, 220 m³/min

Pressão estática = 170 mm c.a.

2. Acréscimo máximo de temperatura esperado

ΔT = 30°C

3. Temperatura média ambiente

$$T_a = 15^\circ\text{C}$$

4. Quantidade Q = mC_pΔT necessário

Tomando a densidade média do ar entre 20 e 80 C, segundo Kreith (11),

$$\rho = \frac{1,166 + 1,026}{2} = 1,096 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 1,096 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 22 \left(\frac{\text{Umidade inicial}}{60 \text{ s/min}} \right) \times 24$$

$$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times 30^\circ\text{C} \times 4.186 \frac{\text{KJ}}{\text{kcal}}$$

$$Q = 121,6 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} = 121,6 \text{ KW}$$

5. Supondo que:

U_i = 22 b.U %

do produto a ser secado

U_f = 13 b.u.% - Umidade final.

Logo a quantidade de água a evaporar por kg de produto umido

$$= \frac{U_i - U_f}{100 - U_f} = \frac{22 - 12}{100 - 12} = \frac{10}{88} =$$

do será:

q_{agua}

$$= 0,1136 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de produto umido}}$$

6. Quantidade máxima de produto a

■ ■ ■ secar por hora:

a) Quantidade de água a evaporar por hora, supondo um rendimento

$$m_a = 0,0194 \text{ kg água/s}$$

$$\therefore m_a = 70 \text{ kg de } \frac{H_2O}{h}$$

$$b) m_p = \frac{70 \text{ kg água/h}}{0,1136 \text{ kg água/kg produto}} =$$

$$= 614,8 \frac{\text{kg de produto}}{h}$$

$$\therefore m_p = 0,6 \frac{\text{ton}}{h}$$

7. Cálculo da superfície da grelha através da taxa de combustão admitida. Quantidade de lenha que o secador consome por hora. m.

$$m_L = \frac{Q}{PCI} = \frac{121,6 \text{ KJ/s}}{13.400 \text{ KJ/kg}} =$$

$$= 9,07 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$m_L = 32,69 \frac{\text{kg de lenha}}{h}$$

Taxa de combustão admitida para grelha plana, carga manual e ar forçado

$$T * 200 \text{ kg/h.m}^2$$

A superfície total da grelha será:

$$S_1 = \frac{m_L}{T_c} = \frac{32,69}{200} = 0,1634 \text{ m}^2$$

7a. Cálculo da superfície da grelha através do consumo de ar necessário.

7a.1. Cálculo do volume de ar necessário para a queima de 1

kg de lenha (Nm³/kg)

$$\text{ar teórico } 0,232 \times 1,251 \times 4 =$$

$$= \frac{P_{O_2}}{32} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

supondo a composição da lenha segundo Andrade (1) onde:

$$C - 50\% \quad N - 0,2\%$$

$$O - 43,3\% \quad \text{ref.} - 0,5\%$$

$$H - 6\%$$

$$\therefore (Q_{ar})_{\text{teórico}} = \frac{32}{0,232 \times 1,251} \left(\frac{0,5}{12} + \right.$$

$$\left. + \frac{0,06}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,433}{32} \right) \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} =$$

$$= 4,76 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

$$\therefore (Q_{ar})_{\text{real}} = 4,76 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \times 1,3 = 6,19 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

excesso de ar para combustível sólido e carga manual

$$mQ_a = 3600 V S_e$$

$$\therefore S_e = \frac{mQ_a}{3600 V}$$

Supondo

$$S_e = \frac{32,69 \frac{\text{kg de lenha}}{h} \times 6,19 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg de lenha}}}{3600 \times \frac{2m}{s}} =$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

$$= 0,0281 \text{ m}^2$$

$$S_e = 0,0281 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{0,0281}{0,2} = 0,1405 \text{ m}^2,$$

onde 0,2 é a razão entre Se/s, as. sumido.

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{0,1620 + 0,1405}{2} = 0,1513 \text{ m}^2$$

$$S = 0,1513 \text{ m}^2 .$$

8. Cálculo do volume de câmara de combustão

$$K = \frac{m \times PCI}{V}$$

$$V = \frac{m \times PCI}{K} = \frac{32,69 \frac{\text{kg}}{h} \times 3200 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}}{175.000 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^3}} = 0,5978 \text{ m}^3$$

$$V = 0,5978 \text{ m}^3$$

Este é o volume total da fornalha. Quando esta possuir câ

mara para queima de lenha e tam-
bem dos voláteis , o volume deve
ser dividido conforme as dimen-
sões de cada parte.

O redimensionamento da for-
nalha pelas câmaras é feito por
tentativa fixando-se uma das di-
mensões. Deve-se considerar que a
área da grelha e o volume foram
calculados anteriormente e não
podem ser muito diferentes (va-
riação máxima em torno de 10%).

5.1.2. Fornalha com Trocador de Calor

A queima de combustível na
fornalha também define o tipo de
secador. Nos secadores de fogo di-
reto os gases de combustão se mis-
turam ao ar de secagem e são lan-
çados dentro da câmara de secagem
(Figuras 6 e 7). Nas de fogo indi-
reto o ar de secagem se aquece em
contato com superfícies aqueci-
das pelos gases de combustão quê"
são lançados na atmosfera (Fig.9)

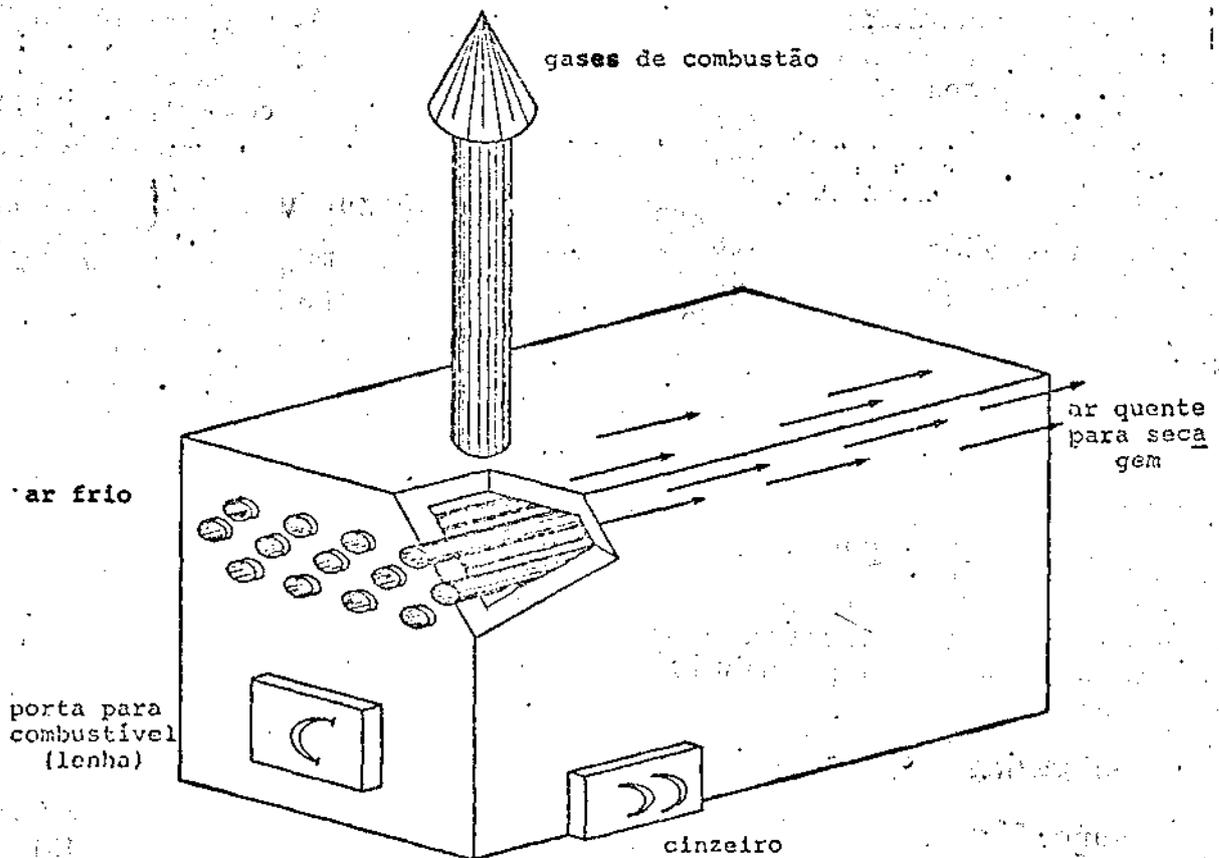


FIGURA 9 - Esquema de uma fornalha de fogo indireto

O secador de fogo direto
aproveita melhor a energia produ-
zida pelo combustível. No secador
de fogo indireto ha muita energia
perdida nos gases de combustão; a
eficiência térmica deste secador
é menor que no fogo direto.

Alguns produtos agrícolas
como o cacau e o café despulpado
absorvem o gosto dos gases de
combustão depreciando a qualidade.
Estes dois produtos só podem
ser

secados com fogo indireto. O fei-
jão pode absorver gosto se o ar
de secagem tiver muito carregado
de gases (fumaça) ; neste caso de-
ve-se usar fogo indireto.

6. CALDEIRA A LENHA*

Finalmente, apesar de passarmos superficialmente, pelas diversas etapas, com rigor matemático, tentando apenas rumos práticos, passaremos ao estudo das caldeiras queimando lenha.

6.1. A COMBUSTÃO DA LENHA

Em geral a lenha tem a seguinte análise aproximada:

Material Volátil	70	a	75 %
Carbono Fixo	20	a	27 %
Cinzas	0,5	a	2 %

A queima da lenha se dá em três estágios :

O primeiro é o da secagem que ocorre de fora para dentro e que requer certo tempo, sendo maior o tempo para os pedaços maiores.

O segundo é o da destilação e queima dos voláteis. Convém aqui salientar que a lenha, em virtude do seu alto teor em material volátil, produz chama longa.

O terceiro e último estágio é o da queima do carbono fixo que necessita de 400 a 550 C de temperatura para queimar ou a chama se extingue se a temperatura for inferior.

É óbvio que analisamos apenas um pedaço de madeira úmido, mas numa fornalha temos as três fases ocorrendo simultaneamente, pois a lenha é continuamente alimentada e há interferência do vapor d'água que se desprende no primeiro estágio com a destilação do segundo e assim por diante.

Deve ser analisado o caso de um tronco grande e um tronco de pequeno tamanho. Numa fornalha alimentada manualmente, o foguista alimenta a caldeira quando há

demanda de vapor, porém, se os troncos são grandes, a sua ação reguladora de produção somente ocorre quando talvez já não haja demanda de vapor e então temos grandes flutuações de carga. Deve-se sempre que possível, evitar troncos de grande diâmetro o que, aliás, é também recomendável para a proteção de soleira de fornalha.

Se nos reportarmos a fórmula (4-06) e usarmos a temperatura da inflamação do carbono fixo como sendo de 500 C, teremos:

$T = 500^{\circ}\text{C}$ e $ic=132$ kcal/kg, logo

$$132 = 429 - \frac{12000}{WF} \quad e$$

SA

$$\frac{WF}{SA} = 6,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$\frac{WF}{SA} \text{ min} = 6,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}, \text{ isto é, com}$$

uma fornalha onde apenas 6,6 kg/h de combustível são queimados por metro quadrado de superfície de aquecimento, teremos o risco de extinção da chama e precisamos de um queimador auxiliar para entreter a chama.

Razões econômicas de construção das caldeiras não permitem que trabalhem com valores tão baixos, pois conduzirão a fornalhas muito grandes.

Devemos ter em mente que se caminharmos para o oposto, isto é, tivermos uma fornalha onde WF/SA é de mais de 200 kg/m^2 , (ver Tabela XI) que poderiam atingir o ponto de fusão das cinzas com graves consequências.

As cascas das árvores podem influenciar no abaixamento do ponto de fusão das cinzas e então, maiores cuidados devem ser tomados para a seleção da fornalha. A título de ilustração informamos que as cinzas variam com as espécies, havendo nas mesmas predomí-

nio de oxido de sódio ou de cal
cio e variável grau de sílica.
Seus pontos de fusão vão de 1200 C
a 1450 C, dependendo da procedência

A lenha pode *ser* queimada em
pilhas, em leito fino quando
picada, em suspensão, ou em forna
lhas ciclônicas.

Para cada um dos casos exis
tem vantagens, desvantagens e li
mitações.

A introdução do ar pré-aque
cido é de muita vantagem para a
secagem do primeiro estagio e per
mite elevar a taxa de combustão 7
0 ar não deve exceder 200 C de
temperatura para não deformar as
grelhas que ele ajuda a resfriar.
O ar quente permite queimar, nas
mesmas grelhas, até mais 25% da
capacidade nominal.

Cumpre salientar que é ex
tremamente difícil queimar lenha
em toras com excesso de ar inferior
a 40%.

Quanto mais dividido o comb
ustível maior se torna a sua su
perficie de contacto com o ar. O
oposto é também verdadeiro, é co
mo se queimássemos óleo combustí
vel em blocos sólidos, como o ca
so da queima de pneus.

Para garantir a turbulência
precisamos mais ar e mais longas
ou altas câmaras de combustão pa
ra que exista mais tempo para se
completar a combustão.

Uma câmara de combustão bem
dimensionada reduz considerável
mente a elutriação de partículas
não-queimadas, Novamente voltamos
ao adágio dos 3T.

No caso do nosso exemplo an
terior, admitamos que a temperatu
ra dos gases da fornalha seja de
900 C, então, aqueles 5910 kg/h
de gases darão 9,2 m³, de gases. Pa
ra que exista tempo de residência
de 2 segundos na câmara de combus
tão, deveríamos ter: Admitindo U
na fornalha com 3m² de grelha, e por
consequente de seção transver
sal, teremos uma velocidade de
propagação dos gases de 9,2/3
3,07 m/s. Para um tempo de 2 se
gundos, a altura da câmara será:
2x3,07 = 6,13 metros.

Temos aí dois parâmetros a
mais que determinarão se a combus
tão se processara integralmente
na câmara ou se se alongara pelos
tubos de convecção ou mesmo se ex
tinguirá.

Os gases combustíveis depen
dera de sua percentagem com rela
ção ao ar para se ter maior ou me
nor velocidade de propagação da
chama. O hidrogênio, por exemplo,
na propagação de cerca de 40%
no ar, tem sua velocidade máxima
de propagação da chama que é de
5,0 m/s, porém, com 70% já cai
para 0,2 m/s e com 61 tem apenas
0,15 m/s. Em geral, nas proporções
usuais de combustão, os gases
como etano, metano, etileno, etc.,
têm uma velocidade máxima em torno
de 1,0 m/s e mínimo de 0,2 m/s.

6.2. CÂMARAS DE COMBUSTÃO

é de primordial importância
a dosagem certa de ar na combustão

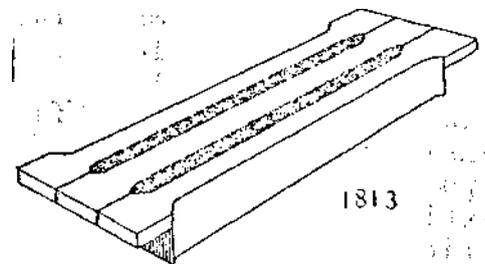


FIGURA 4 Grelha

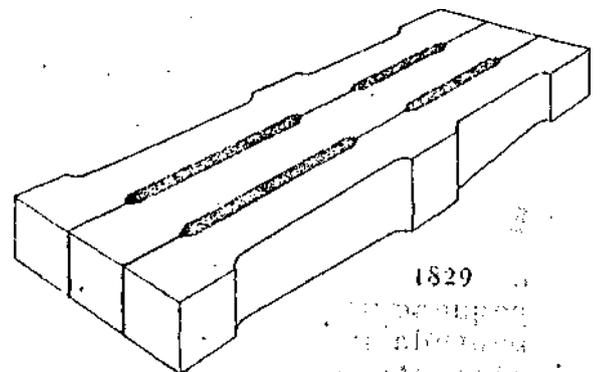


FIGURA 5 - Grelha

As figuras 4 e 5 indicam,

com as respectivas datas, as grelhas que de acordo com o catalogo" da coleção de Engenharia Mecânica do Museu de Ciência de Londres enfatiza:

"Grelhas consistem de um arranjo de barras de ferro fundido. Consideráveis esforços têm sido feitos para melhorar a combustão aumentando o número e diminuindo os espaços entre as barras, de tal sorte a proporcionar uma corrente de ar mais difusa e fina".

Temos então aí, o nascedouro das grelhas de ferro fundido para as câmaras de combustão, que conforme o Museu já enfatizou, têm sido alvo de constantes tentativas de melhora.

Estas grelhas existem em diversos tamanhos e formas. Apresentam vantagens quanto a sua fácil substituição. Quebram-se e empenam facilmente. Sua única refrigeração possível é o ar que penetra de baixo para cima para atingir o leito da lenha.

Sofre grandes deformações principalmente quando se quer extinguir o fogo e então se veda o ar para cortar a combustão. Sem ar para a sua refrigeração e as vezes com um cinzeiro baixo onde brasas estão ardendo ainda, entram em inevitável colapso. Em certos casos arremessam sobre as grelhas, isto é, sobre a lenha, a água para apagar o fogo e esta água atinge as barras quentes, conseqüentemente, temos as fraturas.

Para as lenhas em toras, a lenha metrada, não temos muita escolha se não o uso de grelhas. Tornou-se então necessário que se criasse uma grelha que fosse suficientemente forte para resistir o impacto da lenha, e ao mesmo tempo que não sofresse com as severas condições de variações de temperatura.

Foi assim criada e patenteada a grelha constituída de tubos de água pertencente ao circuito de circulação natural da caldeira.

Estas grelhas são mantidas a uma temperatura igual à de saturação da água mais cerca de 50 C, o que lhes garante total imunidade

de as variações de temperatura. Sendo construídas de tubos de parede grossa apresentam grande resistência mecânica ao impacto e ao desgaste.

Salientamos que o impacto não é tão grande quanto se imagina pois a lenha é em geral arremessada sobre um leito de lenha já queimando o que amortece o choque.

A figura 6 mostra estas grelhas.

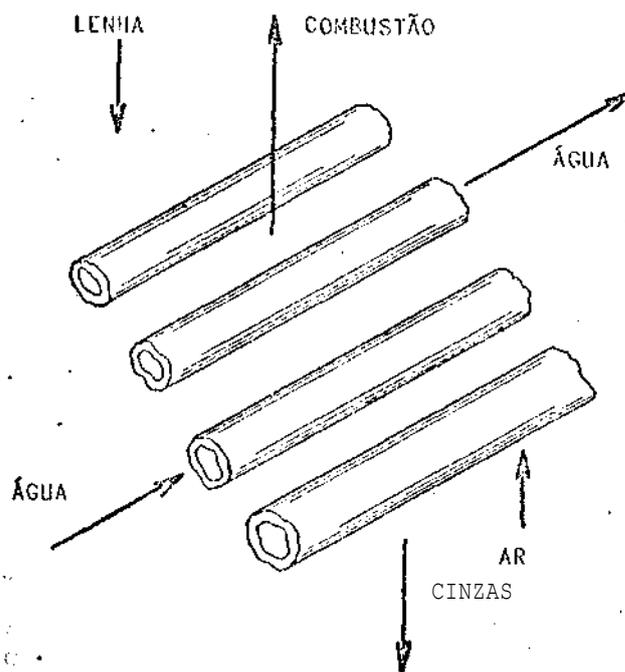


FIGURA 6 - Grelha tubular refrigerada a água.

Estas são as duas maneiras usuais de se queimar lenha em toras.

Como dissemos no início, uma caldeira é tão boa quanto a sua fornalha, de modo que uma vez conseguida uma combustão satisfatória, o restante da caldeira se comporta como uma caldeira convencional.

•Reiteramos nossa recomendação quanto à queima de lenha fina pois os troncos grandes apresentam dificuldades no controle de produção da caldeira e no excesso de ar.

Tem sido discutido recentemente a introdução de pisadores

de lenha como utilizado exaustivamente nas fábricas de celulose.

Como desde o início frisamos que nos atearíamos às unidades industriais, damos apenas a indicação de que a lenha picada pode ser queimada em pilha, em fornalhas celulares, conforme a figura 7.

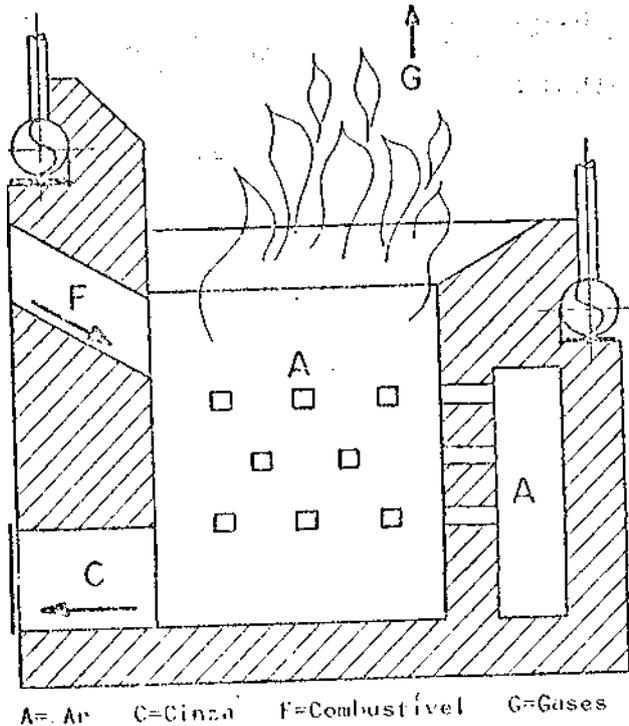


FIGURA 7 - Célula refratária
Queima em pilha.

A figura 8 mostra uma fornalha interna de uma caldeira fogotubular.

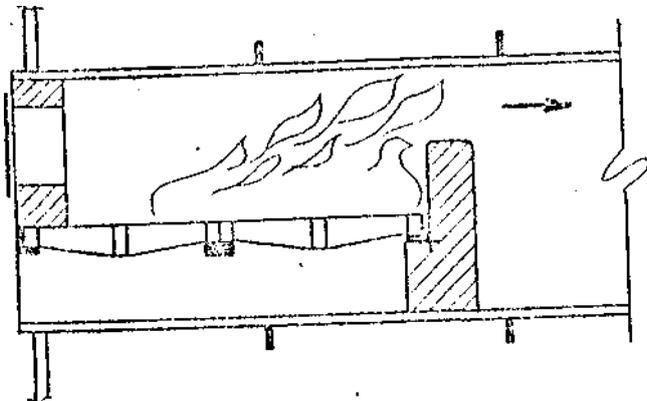


FIGURA 8 - Grelha plana em fornalha interna.

A figura 9 mostra as grelhas instaladas em uma caldeira tipo locomotiva.

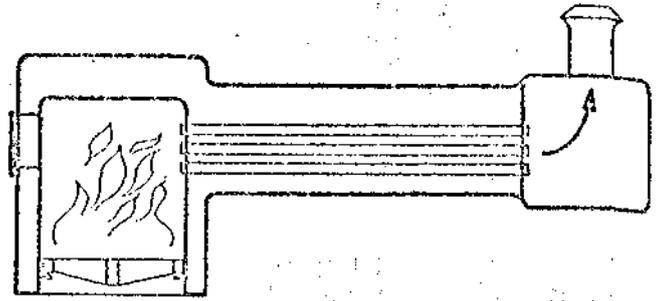


FIGURA 9 - Grelha plana em caldeira tipo locomotiva.

A figura 10 mostra uma caldeira chamada M.H., multitubular horizontal.

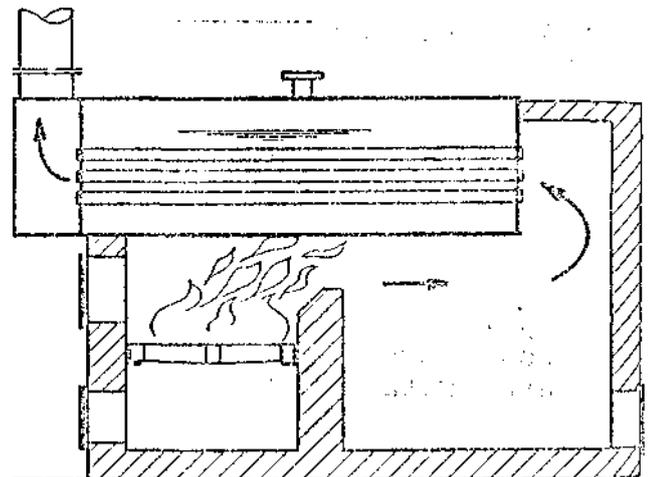


FIGURA 10 - Grelha plana em fornalha externa. Caldeira M.H.

Também usamos para pequenas capacidades os chamados alimentadores "Under-Feed", que não são outra coisa que a queima em pilha, porém, o combustível caminha de dentro para fora da pilha e não como no caso anterior. A figura 11 indica o "Under-Feed".

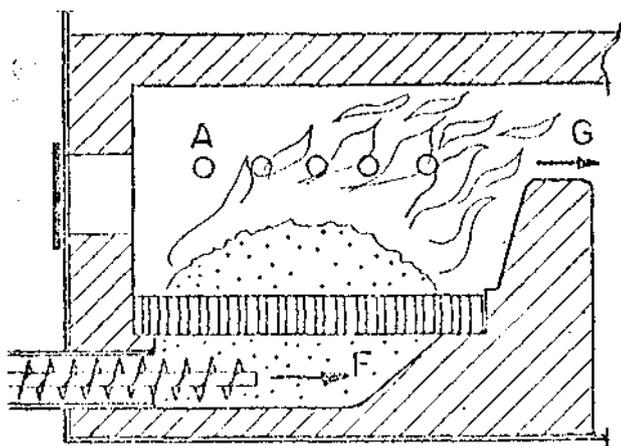


FIGURA 11 - Sistema 'Under-Feed' A = Ar; F= combustível; G = gases

Alem destes métodos podemos ainda ter a queima em suspensão, em grelhas viajantes, em fornalhas ciclônicas, em leito fluidizado.

No caso das células da figura 7, a remoção das cinzas é feita com paradas da operação. Estas fornalhas têm uma excelente distribuição de ar que adequadamente supre as necessidades de ar nos diversos estágios de combustão. A alimentação é feita por cima.

A câmara "Under-Feed" alimenta por rosca sem fim ou por êmbolos, a lenha picada, e a cinza cai lateralmente.

As caldeiras fogotubulares, não comportam fornalhas internas com as dimensões requeridas pela combustão da lenha. Por esta razão, para as caldeiras com capacidade acima de 4000 kg/h as fornalhas são localizadas externamente.

A razão de não comportarem estas fornalhas internas é de caráter construtivo e econômico, pois a caldeira fogotubular somente pode ter maior capacidade quando se aumenta o seu diâmetro. Como as espessuras são proporcionais ao diâmetro, acabaremos tendo chapas muito grossas e diâmetros exagerados.

Quando a faixa excede as 4 t/h de vapor, já se torna mais econômico ter-se uma fornalha externa, e as considerações do dimensionamento e seleção até aqui apresentadas prevalecem para estas fornalhas.

6.3. CALDEIRAS

Finalmente passamos à descrição dos tipos usuais de caldeiras a lenha, comentando suas características, vantagens e limitações.

Para que a descrição das caldeiras seja mais geral, deixaremos de fazer distinção quanto à lenha picada, em toras, aparas ou serragem, e comentaremos os pontos que merecem atenção especial.

Existem duas grandes famílias de caldeiras: Fogotubulares (FT) Aquatubulares (AT)

Estas caldeiras existiam com características bem-definidas, mas grandes modificações e melhoramentos foram introduzidos de tal sorte a torna-las sofisticadas e em alguns casos houve uma mistura das duas.

Por definição são caldeiras fogotubulares, aquelas cujos tubos conduzem o fogo e/ou os gases de combustão. Melhor dizendo, a maior temperatura na transmissão do calor está "dentro dos tubos".

Ja as aquatubulares, têm o lado quente por fora dos tubos e no seu interior temos água, vapor ou sua mistura.

6.3.1. Caldeiras Fogotubulares (FT)

Estas caldeiras podem ser verticais ou horizontais. Podem ter fornalha interna (FI) ou externa (FE).

6.3.1.1. Fogotubulares verticais (FTV)

A Figura 12 mostra uma caldeira FTV com fornalha interna. Consta de uma câmara de combustão interna com grelha e uma passagem convectiva.

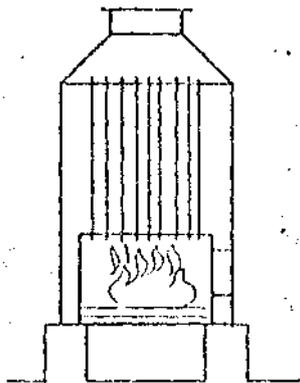


FIGURA 12 - FTV - Fl - 2P

A figura 13 mostra a mesma caldeira anterior, com fornalha externa.

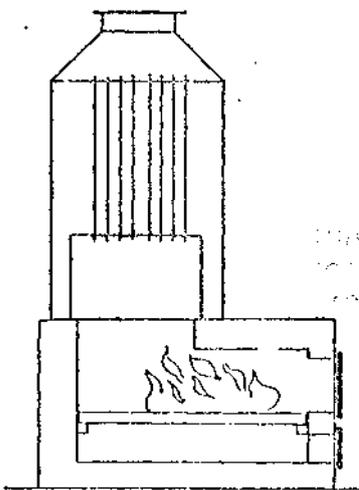


FIGURA 13 - FTV - FE - 2P

Usualmente designamos como passagem as regiões onde há variação brusca de velocidade dos gases, ou de direção, ou mesmo distinguindo radiação de convecção. Assim é que chamamos as caldeiras anteriores de duas passagens (2P).

A caldeira da figura 14 indica uma fogotubular vertical (FTV) de 3 passagens (3P), dotada de fornalha interna (Fl).

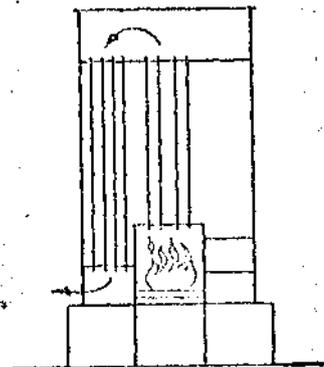


FIGURA 14 - FTV - Fl - 3P

Estas caldeiras em geral trabalham com tiragem natural pois a zona de convecção é curta e apresenta pouca resistência ao fluxo dos gases.

Existe um recurso muito comum usado para melhorar a transferência de calor em caldeiras fogo tubulares que é provocar turbulência no escoamento dos gases. Assim é que alguns fabricantes instalam chapas retorcidas dentro de um trecho do tubo.

Com isso, há uma melhora na transferência do calor e um aumento na resistência ao escoamento dos gases.

Além disso, há aumento da erosão e deposição das partículas de sólidos arrastadas com os gases de combustão.

Se por exemplo, os gases escoam a 1,5 m/s em um tubo de 2 polegadas, e o coeficiente de transmissão é 10 kcal/h.m²/C, e a perda 5 mm C.A., com a introdução de uma tira retorcida com passo de 250 mm, teremos uma transmissão de calor de duas vezes maior, e a perda é quatro vezes maior.

Na figura 14 temos uma fogotubular de três passagens com uma fornalha interna. Procura-se aumentar o número de passagens dos

gases para que haja maior queda de temperatura dos gases e : por conseqüência melhor rendimento térmico.

Eis nesta figura uma caldeira vertical fogotubular e aquatubular; e o caso especial (FTV-E) onde os tubos transversais inclinados contem água e não gás de combustão como nos casos anteriores (Figura 15).

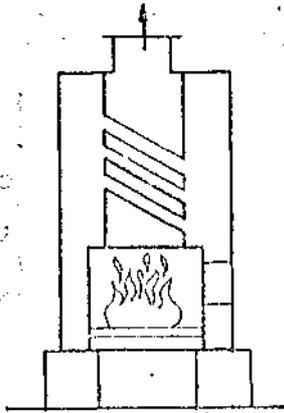


FIGURA 15 - FTV - F1 - 2P-E.

Esta caldeira apresenta as características da anterior, porém, os tubos não cruzam de lado a lado o tubo central. São dedais soldados no tubo interno. Trata-se também de uma construção especial (Figura 16).

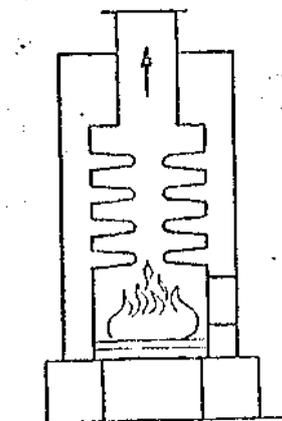


FIGURA 16 FTV - F1 - 2P-E.

Deve ser chamada a atenção **para** as complicações introduzidas com problemas de fabricação e mui

tas vezes na própria manutenção da caldeira. Esta caldeira e usa da para recuperação de calor de gases.

As caldeiras verticais, dada a sua disposição, são geralmente, de pequena capacidade.

6.3.1.2. Fogotubulares horizontais (FTH)

Em nossa descrição de fornalha já mostramos algumas caldeiras fogotubulares horizontais.

Assim, a figura 9 mostrou uma caldeira tipo locomotiva, que é uma fogotubular horizontal com fornalha interna.

Aqui na fig 17 temos uma outra caldeira que se enquadra nos FTH com fornalha especial; é conhecida como "caldeira de saia" por ter as paredes internas partindo do corpo e formando a câmara de combustão. É uma caldeira de duas passagens, podendo ter três passagens.

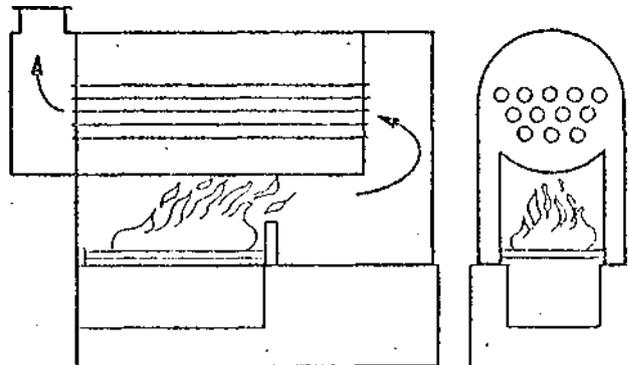


FIGURA 17 - FTH - F1 - 2P-E.

Convém nesta altura salientar, que chamamos de parede fria, aquela que contém água e reveste ou refrigera uma fornalha. Esta caldeira é o caso típico de caldeiras com parede fria, o mesmo ocorrendo com a anterior tipo locomotiva e todas aquelas com fornalhas internas.

A figura 18 mostra uma caldeira que tem uma fornalha interna fria e duas passagens de gases

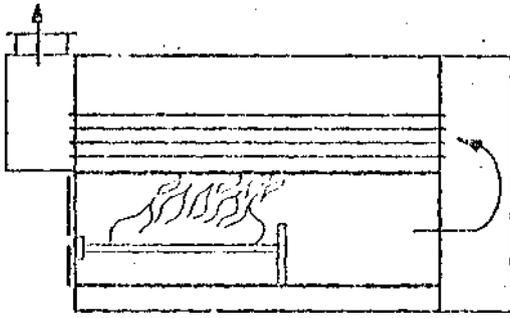


FIGURA 18 - FTH - F1 - 2P

A fig. 19 mostra a mesma caldeira anterior porém, os gases têm mais uma passagem para percorrer. Sua construção é simples, porém, temos as mesmas limitações de espaço já comentadas para alojar uma fornalha grande.

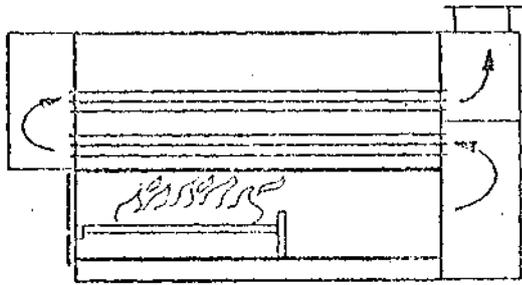


FIGURA 19 - FTH - FI - 3P.

A figura 10 mostrou a caldeira FTH com fornalha externa de duas passagens. Nestas caldeiras o costado, que é o cilindro que recebe a pressão da caldeira, esta sujeito a incidência direta das chamas.

Trata-se, na fig.20 do mesmo caso anterior, porém, com mais uma passagem de gases, FTH-FE-3P.

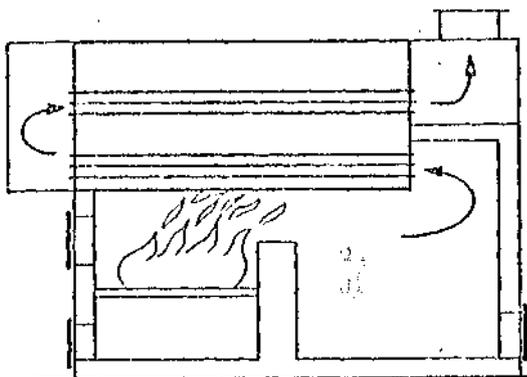


FIGURA 20 - FTH - FE 3P

A fig. 21 mostra uma unidade que foi a de maior capacidade, pois incorpora duas fornalhas internas, o que dota as câmaras de combustão de maior volume. Esta também é uma FTH-2FI-3P.

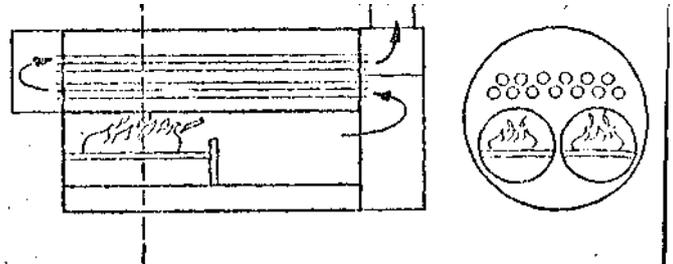


FIGURA 21 - FTH - 2FI - 3P

A fig.22 mostra outra caldeira dota-

da de fornalha externa que ela possui três espelhos, sendo que o do meio é parcial para apenas caminhar os gases a segunda passagem. Mais uma vez se trata de um novo artifício para se dotar de maior volume a câmara de combustão. Esta é uma FTH-FE-3P-E

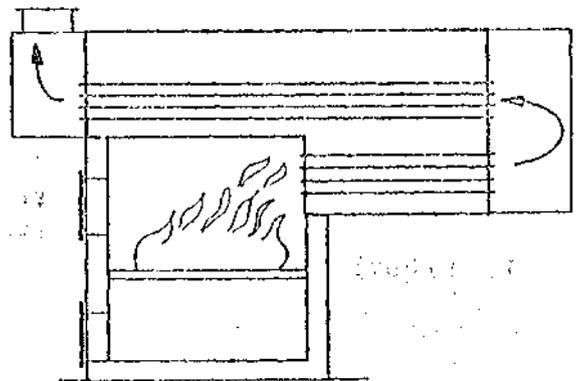


FIGURA 22 - FTH - FE - 3P - E,

6.3.2. Caldeiras Aquatubulares (AT)

Até este ponto insistimos na tese da limitação física das fornalhas nas fogotubulares e agora vamos ter unidades que não têm limites quanto a sua sofisticação nem quanto as suas dimensões.

As caldeiras fogotubulares, sempre permitiram aos projetistas grandes possibilidades de formas

e arranjos pois, no seu interior, a água ferve como numa panela de pressão. Com isso queremos dizer que não há preocupação quanto a ter superfícies de aquecimento expostas ao fogo e que não tenham sempre adequada refrigeração de água. Quando temos uma panela fervendo temos na parte inferior em contacto com o fogo, o despreendimento de bolhas de vapor que por serem leves sobem e provocam uma corrente ascendente de bolhas de vapor e uma descendente de água. Estabelece-se uma circulação natural.

Um kg de água no interior de uma caldeira com pressão de 8 kg/cm², tem um volume de cerca de 1 litro, mas um kg de vapor, nas mesmas condições tem o volume de 219 litros, ou seja, a densidade do vapor é 219 vezes menor do que a densidade da água. Então é fácil compreender que uma mistura de água mais vapor nestas condições pode variar sua densidade entre estes dois limites. Numa caldeira fogotubular existe uma grande agitação no seu interior com a água descendo e a mistura subindo mas não há preocupação quanto a fazer chegar a água no lugar onde o vapor é gerado, isto ocorre naturalmente porque o espaço é grande.

Quando passamos para as caldeiras aquatubulares os espaços são os dos tubos e não mais aqueles grandes das fogotubulares, e começamos a esbarrar em problemas de circulação natural, que nada mais é do que fazer com que haja uma judiciosa distribuição das superfícies de aquecimento em circuitos que estarão, mesmo sob as mais severas condições de trabalho, sempre cheios de água. Todas as caldeiras aquatubulares levam em conta estas considerações. Não entraremos em nenhum cálculo neste sentido, porém, indicaremos no desfile de caldeiras que se seguirão, como se dá a circulação natural da água.

Podemos subdividir as caldeiras aquatubulares para efeito deste trabalho em:

- . Caldeiras de câmaras
- . Caldeiras de dois tambores
- . Caldeiras de vários tambores.

6.3.2.1. Caldeiras de câmaras (AT-C)

Temos aqui, fig 23, uma caldeira aquatubular AT-CL com o corpo longitudinal. Esta caldeira apresentava as vantagens de tubos retos de fácil limpeza interna e de substituição. A circulação natural era garantida com a água descendo nas câmaras traseiras e a mistura água + vapor ascendendo nas câmaras frontais. Estas caldeiras são limitadas quanto à sua capacidade em virtude de termos problemas para aumentar o número de tubos, bem como não é econômica a construção das câmaras.

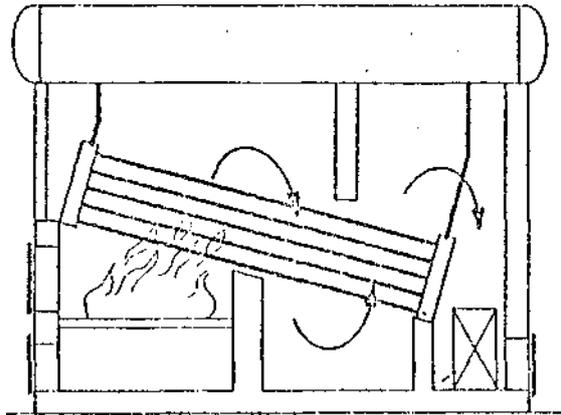


FIGURA 23 - AT - CL.

Da mesma forma que a anterior, temos a fig. 24, uma AC-CT onde se

pode aumentar o número de câmaras dispondo-se o corpo transversalmente. É idêntica a anterior. Com o correr do tempo as paredes refratárias, que eram sempre expostas a chama, passaram a ter paredes d'água, absorvendo maior quantidade de calor, e reduzindo a manutenção das paredes refratárias

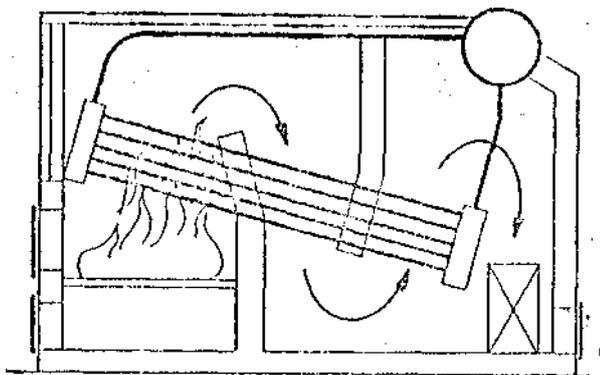


FIGURA 24 - AT - CT.

6.3.2.2. Caldeiras de dois tambores (AT-2T)

A figura 25 mostra uma caldeira de dois tambores com uma fornalha tipo poço. Estas caldeiras apresentam uma infinidade de combinação da altura, largura e comprimento, bastando aumentar a distância entre centros dos tambores para se acomodar maior superfície de aquecimento e dar a fornalha a altura adequada para quais quer condições de trabalho. Na largura aumentamos o comprimento dos tambores e temos as dimensões requeridas. Além de ser possível aumentar a altura da fornalha com o aumento da distância entre centros, os coletores das paredes d'água podem descer a qualquer nível pratico de modo que estas caldeiras se constituirão no mais versátil arranjo de dimensões.

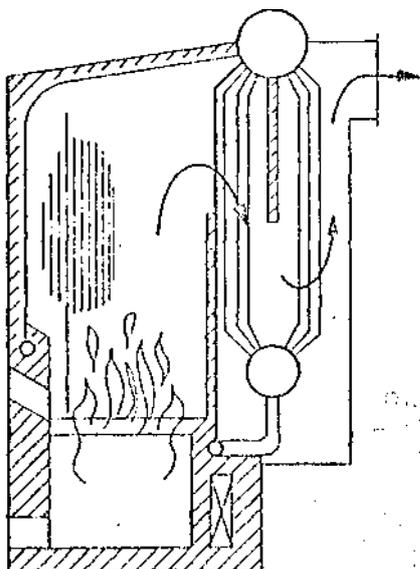


FIGURA 25 - AT - 2T

O problema da circulação natural é resolvido mantendo-se uma zona fria, isto é, sem grande absorção de calor que permita manter um fluxo contínuo descendente de água, para alimentar os tubos geradores de vapor e os coletores das paredes.

Apenas a título de ilustração e mostrada na fig. 26 outra caldeira que pode ter 3, 4 ou mais tambores, se prestando a diversos arranjos de superfície de aquecimento e de fornalhas. As unidades de dois tambores são mais econômicas pois realizam a mesma tarefa com menos tambores.

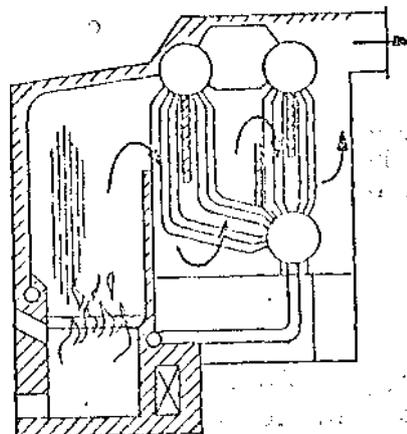


FIGURA 26 - AT - 3T.

6.4. CALDEIRAS MISTAS

Quanto as capacidades podemos atribuir as caldeiras fogotubulares o início da faixa indo até 15 t/h de vapor. Estes limites variam de fabricante para fabricante. Porém, quando se queima combustível sólido, as dimensões das fornalhas não permitem que estas caldeiras gerem mais do que 3 ou 4 t/h de vapor.

A caldeira fogotubular tem uma vantagem inextinguível a seu favor por poder conter num reduzido espaço uma grande superfície de aquecimento e usar tubos retos com facilidade de limpeza e substituição, e a custo baixo.

Por outro lado, as caldeiras aquatubulares apresentam uma

vantagem inenunciável quanto a permitir os mais variados arranjos de fornalhas que se buscamos para a queima de lenha.

Destas duas vantagens surgiu o projeto da caldeira mista (CM) que são as que têm o corpo da caldeira fogotubular e a fornalha da aquatubular.

A figura 27 mostra um dos arranjos possíveis para estas caldeiras.

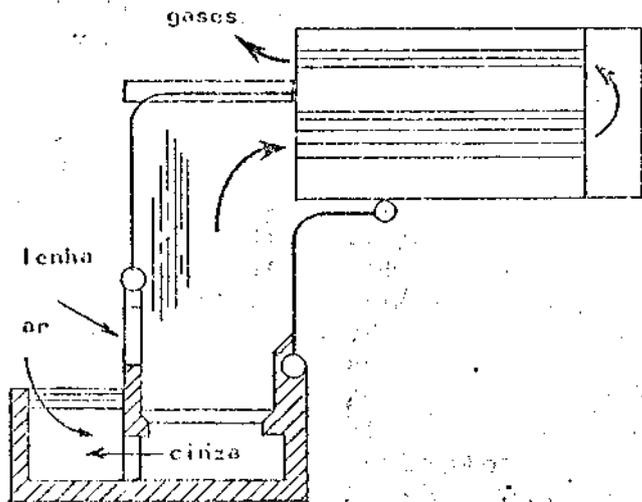


FIGURA 27.

A grande dificuldade nestas caldeiras é a obtenção de uma circulação natural adequada.

No Brasil já existem estas caldeiras em funcionamento com rendimento operacional excelente, são unidades dotadas de ampla câmara de combustão, com fornalhas refrigeradas por tubos d'água e apresentando grelhas refrigeradas. São unidades patenteadas.

É preciso que se tenha em mente os problemas de dilatação, facilidade de troca dos tubos e sua limpeza, além de dar garantia de circulação natural eficiente para evitar queima dos tubos.

6.5. GENERALIDADES

Não se pode, num trabalho tão curto como este, tratar todos

os detalhes de construção, operação e manutenção de caldeiras à lenha e sólidos em geral.

A Tabela XX permite aos futuros usuários fazerem uma comparação entre as diferentes unidades que lhes são oferecidas, para evitar que sejam adquiridas caldeiras inadequadas para seus requisitos.

TABELA XX - Comparação de caldeiras para avaliação.

	Unidades	A	B	C
1. Tipo				
2. Evaporação	Kg/h			
3. Temperatura d'água	°C			
4. Consumo combustível	Kg/h			
5. Relação (2)/(4)	Kg/Kg (1)			
6. Temperatura Gases	°C			
7. Rendimento Térmico	% (2)			
8. PCS	Kcal/Kg			
9. Umidade	%			
10. Excesso Ar	%		-	
11. S.A. Convecção	m ²			
12. S.A. Radiação	m ²			
13. S.A. Total	m ²			
14. Relação (2)/(13)	Kg/m ² .h			
15. Vol. Câmara Combustão	m ³			
16. Relação. [(4)/(11)] x PCS	. Kcal/h, m ³ .h			
17. Peso	Kg			
18. Potência Instalada	KW			
19. Resistência dos Gases	mm.C.A			

Notas:

(1) Comparar com Tabela -XVII

(2) Comparar com Tabela -XIII

(3) Limite usual 300.000 kcal/m³.h

Além de tudo o que acima se expôs, existem experiências sendo realizadas para a queima de lenha picada, rejeitos vegetais e carvão em leito fluidizado.

É lastimável que tenhamos sido surpreendidos com firmas estrangeiras tentando patentear aquilo que pesquisamos o que nos forçara a não produzir o nosso produto após gastos enormes com pesquisas, projetos e estudos, a-

lem de permitir que continue a es. calada de importações.

Na figura 28 e apresentada uma visão ligeira de uma fornalha de uma caldeira com base em combustão com leito fluidizado.

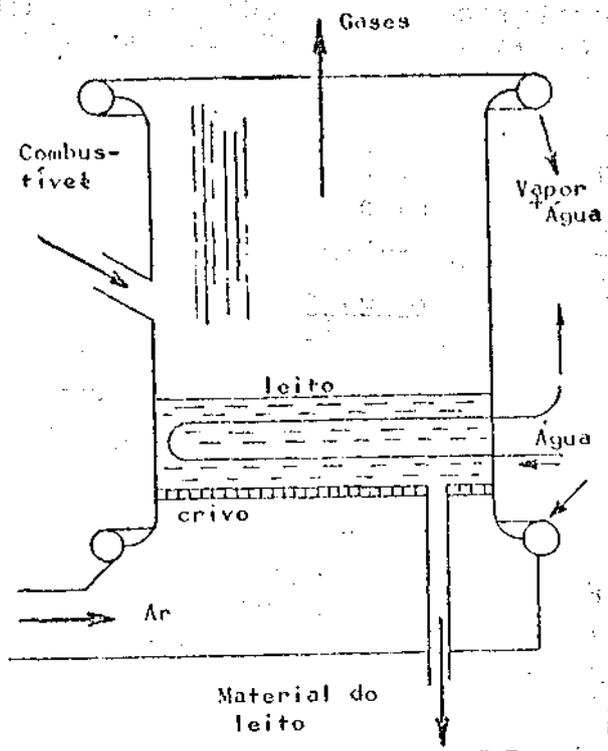


FIGURA 28 Fornalha de leito fluidizado

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. Acima do crivo temos o leito que nada mais é do que uma camada de material inerte como areia, por exemplo. 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. Após arremessarmos pedaços de madeira no leito esta se inflamará e fornecerá. Assim se estabelece uma alimentação de combustível contínua e o leito permanecerá em combustão permanente. Mas a madeira tem cinzas e estas permanecem no leito e tendem a elevar o seu nível; quando isto ocorre, extraímos pelo tubo de extração do material do leito, uma quantidade que restabeleça o nível ideal.

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 a queima do carvão brasileiro pois a cinza é extraída e seu ponto de fusão não é atingido. Mantém-se temperatura em torno de 850/900 C no leito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(CITADAS E A SEREM CONSULTADAS)

1. ANDRADE, E.B.ET.ALI "Princípios combustíveis sobre combustão e fornalhas" notas de aulas, 48p. 1984
2. ASAE, 'American Society of Agricultural Engineers"- YEARBOOK Can Agriculture Provide Enough Biomass for Fuels 22-36. 1981.
3. BACELAR, Corrêa. Manual do Engenheiro, Vol. II, Livraria Globo E-1 a E-11. 1939.
4. BAUMEISTER, T.; AVALLONE, E.A. e BAUMEISTER, T. Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers. Ed. McGraw, 1958.
5. CLAAR II, P.W.; COLUIN, T.J., MARLEY, S.J.'Economic and Energy Analysis of Potential Crop Residue Harvesting Systems."IN: AGRICULTURAL ENERGY :. Vol. (2), Biomassa Energy Crop Production 273-279, American Society of Agricultural Engineers, 1980.
6. DECOURT, R.R."Combustíveis sólidos." In: Manual do Engenheiro Globo Porto Alegre, Editora Globo,1977. Vol. 3, Tomo 2. p. 179-237.
7. DINIZ, V.Y. ; "Caldeiras a Lenha." IN: Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. 114-:.. 131. Belo Horizonte, 1981 .
8. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA-FIBGE; ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL, p. 795, 1981.
9. GARCIA, R.; TORRES, C; CALZADA, J. F.; MENCHÚ, J.F. e ROLZ, C. " Economic Evaluation of Alternative Energy Sources For Coffee Bean Drying." IN: FOOD DRYING proceeding of a workshop held at Edmonton , Alberta, 6-9 July - 1981. Canadá. 1981.
10. GONZALES, M."Combustíveis e Fornalhas"- Notas de Aula. 20p. CIEN-TEC, RS, 1980.
11. KREITH, F. Princípios de Transmissão de Calor. Ed. Edgard Blucher, 3f50 p. São Paulo, 1977.
12. LASSERAN, J.C."Combustíveis e Geradores de Ar Quente.'" IN: Revista Brasileira de Armazenamento.Viçosa, 4(2): 75-88, 1977.
13. MAGALHÃES, J.G.R."Tecnologia de Obtenção de Madeira.'" IN: Uso da Madeira para Fins Energéticos. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. 55-66. Belo Horizonte, 1980.
14. MANUAL DO ENGENHEIRO GLOBO. 79 Vol. 29 Tomo. 581-524. Porto Alegre, Editora Globo, 1979.
15. MARTINS, H."Madeira como Fonte de Energia." In: Uso da Madeira para Fins Energéticos. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. SPT-001 10-26. Belo Horizonte, 1980.
16. RIBEIRO, M.A. & OLIVEIRA FILHO, D. Florestas Sociais, Problemas, Perspectivas e Tarefas. Fund. João Pinheiro. Belo Horizonte 10 (1)2-18. Jan. 1980.
17. SILVA, J.S. "Adaptação da Fornalha de Fogo Direto Descendente, UFV. III, para Secagem de Cereais" Conselho de Extensão. Universidade Federal de Viçosa. Informe Técnico N9 28. 8 p. 1982.

APÊNDICE I

VARIAÇÃO DOS PODÊRES CALORÍFICOS DA LENHA COM A UMIDADE

UMIDADE (%)	PCI (KJ/kg)
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6483
70	4247
80	2015
90	-

APÊNDICE II

RENDIMENTO TÉRMICO DE FORNALHA A LENHA EM RELAÇÃO AO PODER CALORÍFICO SUPERIOR, SENDO ISOLAMENTO DE TIJOLOS REFRACTÁRIOS E EXCESSO DE AR DE 40% .

Temperatura de saída dos gases de combustão	U nidade da Lenha (b, ,u.)								
	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	78,7	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	25,2
275	77,8	76,3	74,4	72,0	68,7	64,1	57,3	45,9	32,0
300	76,6	75,1	73,2	70,7	67,4	62,7	55,7	44,1	28,9
325	75,5	73,9	71,9	69,4	66,0	61,3	54,2	42,4	28,8
350	74,3	72,7	70,7	68,1	64,7	59,9	52,7	40,7	16,7