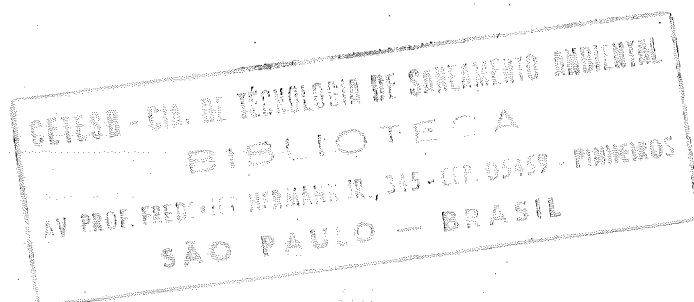


CETESB

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL

DIRETORIA DE PESQUISA

GERENCIA DE PESQUISAS DE AR E RUÍDO



ESTUDO DO POTENCIAL POLUIDOR DE
COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM
FONTES ESTACIONÁRIAS

RELATÓRIO FINAL

O.S. Nº 454.651

MARÇO/1985

CLASS	8203
AUTOR	G 116 e
TOMBO	15314



800-00

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Assessoria de Planejamento

Unidade 1 - 22 de Maio

DIRETORIA

Werner Eugênio Zulauf
Diretor-Presidente

Antônio Alves de Almeida
Diretor Administrativo

Fredmar Corrêa
Diretor de Planejamento Ambiental

Nelson Mansour Nabhan
Diretor de Engenharia

Nelson Vieira de Vasconcelos
Diretor de Controle

Paulo Bezerril Júnior
Diretor Financeiro

Samuel Murgel Branco
Diretor de Pesquisa

DIRETORIA DE PESQUISA

Prof. Samuel Murgel Branco

ASSISTENTE TÉCNICO-CIENTÍFICO

Prof. Aristides Almeida Rocha

ASSISTENTE ADMINISTRATIVA

Eng.^a Neusa Monteiro de Arruda Juliano

GERÊNCIA DE PESQUISA DO AR E RUÍDO

Eng^o Gabriel Murgel Branco

EQUIPE TÉCNICA

Eng^o Flavio Gaddini

Eng^o Homero Carvalho

Estagiário: Kenji Yosida

Datilógrafa: Maria Helena de Oliveira

OK. Rep

APRESENTAÇÃO

Com o advento do aumento acentuado do preço do petróleo, de flagrado pelos países produtores e exportadores, as pesquisas e a utilização de novas fontes de energia tornaram-se objeto de intensa preocupação.

No caso específico de São Paulo, a busca por combustíveis alternativos foi incentivada devido ao Plano de Controle de Dióxido de Enxôfre estabelecido pela CETESB, em maio de 1982.

Assim, resolveu-se conduzir uma pesquisa visando estudar os possíveis problemas criados por estes combustíveis, bem como procurar determinar fatores de emissões mediante amostragens em chaminé.

Foram estudados os combustíveis lenha, carvão vegetal, gás de lenha e de carvão vegetal e utilizou-se trabalhos desenvolvidos, em anos anteriores, pela extinta Divisão de Alternativas Energéticas e pela Divisão de Amostragem em Chaminé.

O projeto ficou prejudicado devido à dificuldade de se conseguir indústrias que permitissem a utilização de suas instalações para efetuar as amostragens e pela sobrecarga de trabalho e prioridades da Divisão de Amostragem em Chaminé.

Desta forma, foram apenas efetuadas amostragens de chaminé em caldeiras à lenha, podendo-se concluir, com base na literatura consultada e nos resultados obtidos que, para caldeiras sem controle, a combustão da lenha atende às atuais exigências da CETESB para óxidos de enxôfre. Entretanto, com relação a material particulado a emissão é superior àquela apresentada pela combustão de combustíveis líquidos derivados de petróleo.

Í N D I C E

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Madeira	02
1.1.1. Uma Curta Análise Econômica	02
1.1.2. Propriedades da Madeira	04
1.1.3. Química da Madeira	06
1.1.4. Combustão da Madeira	08
1.1.4.1. Tecnologia de Combustão da Madeira	12
1.1.4.2. Pesquisas de Alternativas Energéticas	16
1.1.4.3. Potencial de Substituição de Óleo Combustível	17
1.2. Gaseificação da Madeira	20
1.2.1. Introdução	20
1.2.2. Fatores que Influenciam o Processo de Gaseificação	22
1.2.3. Equipamento de Gaseificação	27
1.2.4. Processo de Gaseificação da Madeira	28
1.2.4.1. Reações que Ocorrem no Leito	28
1.2.4.2. Gaseificação de Madeira x Utilização de Gás em Caldeiras Existentes, For- nos e Secadores	29
1.2.4.3. Gaseificação de Madeira x Utilização do Gás em Motores	30
1.2.4.4. Gaseificação de Madeira x Produção de Gás de Síntese e de Redução	30
1.2.5. Pesquisas de Gaseificação de Madeira	30

1.3. Carvão Vegetal	34
1.3.1. Introdução	34
1.3.2. Composição Química	34
1.3.3. Densidade	36
1.3.4. Reatividade	37
1.3.5. Resistência Mecânica	38
1.3.6. Higroscopicidade	39
1.3.7. O Carvão Vegetal no Contexto Energético Brasileiro	39
1.4. Gaseificação de Carvão Vegetal	42
2. OBJETIVO	44
3. MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1. Métodos e Equipamentos	44
3.2. Obtenção dos Resultados em Campo	45
3.2.1. Amostragem em Chaminé na Firma "Tin turaria e Estamparia Tintanyl Ltda."	46
3.2.1.1. Descrição Sobre a Operação da Caldeira	46
3.2.1.2. Identificação das Coletas	46
3.2.1.3. Resultado das Medições	47
3.2.2. Amostragem em Chaminé na "Companhia Suzano de Papel e Celulose"	48
3.2.2.1. Descrição Sobre a Operação da Caldeira	49
3.2.2.2. Identificação das Coletas	49
3.2.2.3. Resultado das Medições	49

4. COMENTÁRIOS	51
5. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Com o advento acentuado do preço do petróleo, deflagrado pelos países produtores e exportadores, as pesquisas e a utilização de novas fontes de energia tornaram-se objeto de uma intensa preocupação.

Nos países importadores de petróleo e em especial nos designados por "em desenvolvimento", a questão da utilização de combustíveis alternativos assume proporções dramáticas.

O processo de substituição do petróleo por outros combustíveis pode minimizar ou acentuar problemas ambientais existentes e/ou criar novos problemas.

A caracterização das emissões provocadas pela queima desses novos combustíveis é peça fundamental para o estabelecimento de estratégias de controle.

Especificamente em São Paulo, com relação ao poluente dióxido de enxofre, a CETESB estabeleceu um Plano de Controle das Emissões do Poluente em foco, que basicamente consta da fixação de um nível de emissão de SO_2 correspondente a 20 kg/tonelada de óleo consumido, referente a quota de 1981.

Dentro deste esquema, os infratores podem optar pelas seguintes alternativas:

- . controlar as emissões (dessulfurização);
- . melhorar a eficiência do processo produtivo de modo a reduzir o consumo;
- . utilizar outras alternativas energéticas, tais como, eletricidade, lenha, carvão vegetal, gaseificadores, etc., sendo que nestes casos os combustíveis alternativos devem possuir baixo teor de enxofre.

Com relação à utilização de óleo BTE (baixo teor de enxofre),

não está disponível nas quantidades e aos preços convenientes. O CNP autoriza o fornecimento para empresas que devido as características do produto não podem utilizar combustíveis com alto teor de enxofre (empresas do ramo de cerâmica, vidro, etc) e também algumas outras firmas durante a Operação Inverno.

Portanto, muitas empresas optaram pela substituição dos derivados de petróleo por combustíveis alternativos, devido a problemas técnicos e principalmente financeiros.

Assim, considerou-se oportuna a realização de uma pesquisa, visando efetuar um estudo mais profundo, uma vez que desde 1979, a CETESB vem estudando teoricamente as emissões destes combustíveis e com um programa suporte de amostragem em chaminé poderemos ter a possibilidade de concluir sobre as consequências destas substituições sob o ponto de vista do meio ambiente.

Para poder executar a tarefa proposta, necessitaríamos dos serviços da Divisão de Amostragem em Chaminé, do apoio das áreas de controle da DCON e de firmas que nos permitisse utilizar suas instalações industriais para a realização das amostragens em chaminé.

Assim, após consulta prévia à Divisão de Inventário e Cadastro de Fontes, decidiu-se estudar os seguintes combustíveis alternativos: lenha, carvão vegetal, gás de lenha e gás de carvão vegetal, que são as alternativas mais utilizadas além da eletricidade. No tocante a carvão mineral, a CETESB não permite sua utilização na Grande São Paulo e portanto, não vamos estudá-lo.

1.1. Madeira:

1.1.1. Uma Curta Análise Econômica:

No quadro de consumo de energia no Brasil, encontramos uma estrutura bastante diversificada, sendo que as fontes energéticas tem a seguinte

participação: a lenha, o bagaço de cana e o carv
ão vegetal suprem 27% do consumo total de ener
gia, o petróleo com 42% e a hidroeletricidade
com 26%. (10)

"Segundo os dados estatísticos disponíveis, o
consumo anual de madeira no país é estimado em
mais de 110 milhões de toneladas, distribuídas
da seguinte forma:

. Lenha	77%
. Carvão vegetal	15%
. Papel e celulose	5%
. Madeira processada	3%

Fonte: STI/MIC-1980

A madeira utilizada é na sua maioria, proveni
ente de matas e cerrados e em minoria de reflo
restamentos". (10)

Do ponto de vista das possibilidades de reflo
restamento, o Brasil está situado numa região
geográfica privilegiada (com grande incidência
de radiação solar) além de dispor de áreas ex
tensas, sendo que a utilização da madeira pode
ser a solução para uma parte da demanda energ
ética do país, diminuindo a dependência do petrô
leo.

"Nas regiões próximas das áreas de floresta o
custo da madeira é hoje, e continuará no futu
ro próximo, sensivelmente menor do que o preço
do óleo combustível. Para se extrair uma potên
cia efetiva de aproximadamente 110 CV durante
6500 horas (um ano) são necessários 2,25 ha de
floresta energética. Considerando que o tempo
de crescimento de uma árvore é de aproximada
mente oito anos, até estar pronta para o corte,

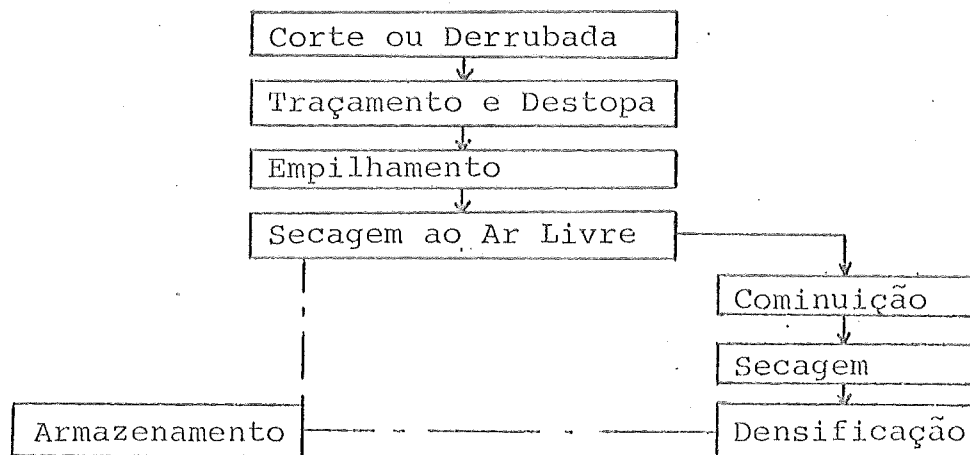
são necessários 18 ha para se extrair continuamente a potência referida. A equivalência energética de 3,3 kg de madeira é 1 kg de óleo combustível, e supondo que 1 ha de floresta energética produz cerca de 12 toneladas de madeira por ano". (12)

Para o nosso estudo interessam, dentro das diversas formas de uso, a madeira para queima direta, para produção de carvão vegetal e para gaseificação da lenha e do carvão vegetal.

O potencial energético da madeira é condicionado por fatores como a disponibilidade local de outras fontes de energia, a adequação da fonte energética ao processo considerado, a solução de problemas ambientais (no caso a emissão de poluentes na atmosfera) e o custo das várias formas de energia.

1.1.2. Propriedades da Madeira

Antes de abordarmos as diferentes propriedades, teores de umidade, etc., vamos citar a maneira como a madeira é processada para o uso como alternativa de energia. Esquematicamente temos:



Traçamento e Destopa - é a operação de se tirar a casca da árvore e corte dos galhos, deixando-se apenas os troncos e galhos desfolhados.

Secagem ao Ar Livre - a secagem consiste simplesmente em expor a madeira às condições atmosféricas, pois ela perde 1 a 3% de sua umidade por dia. O objetivo é reduzir a densidade da madeira, a fim de economizar no transporte.

Cominuição e Densificação - o processo de redução de dimensão da madeira é denominado de cominuição e após isto temos o processo de densificação, onde poderemos obter um combustível uniforme, poder calorífico elevado, umidade uniforme, queima uniforme, etc. Os processos de densificação consistem na aplicação de presão a uma massa de partículas com ou sem a adição de ligantes ou tratamento térmico.

Os processos comerciais de densificação de biomassa são:

- Peletização - (usado na manufatura de rações) emprega uma matriz de aço com um denso arranjo de orifícios de 0,3 a 1,3 cm de diâmetro. A matriz gira e a pressão interna dos cilindros forçam a passagem da biomassa através dos orifícios com pressões de $7,0 \text{ kg/mm}^3$.
- Briquetagem - compacta a biomassa entre cilindros com cavidades, produzindo formas como o carvão briquetado. As dimensões variam de 15 a 250 mm de comprimento, com diâmetro de 50 mm.
- Extrusão - usa uma rosca para forçar a biomassa sob alta pressão contra uma matriz,

formando grandes cilindros de 2,5 a 10 cm de diâmetro. Agentes ligantes como piche ou parafina são frequentemente adicionados para aumentar a força estrutural e o poder calorífico.

Embora todos estes processos de "tratamento" sejam conhecidos, observamos que em geral utiliza-se a madeira diretamente sem estes processos, chegando inclusive a se usar restos de madeiras de material de construção civil.

1.1.3. Química de Madeira

Uma análise química elementar nos mostra que os constituintes da madeira são basicamente carbono, oxigênio e hidrogênio, com uma proporção de 50:44:6 em peso. Nitrogênio e outros elementos aparecem em quantidades não representativas. A composição elementar média da madeira seca é:

T A B E L A - I

ELEMENTO	% EM PESO
Carbono	49,0
Oxigênio	44,0
Hidrogênio	6,0
Nitrogênio	0,2
Enxôfre	traços

O teor de cinzas na madeira é geralmente baixo, variando de 0,2% a 1% na madeira seca. (3).

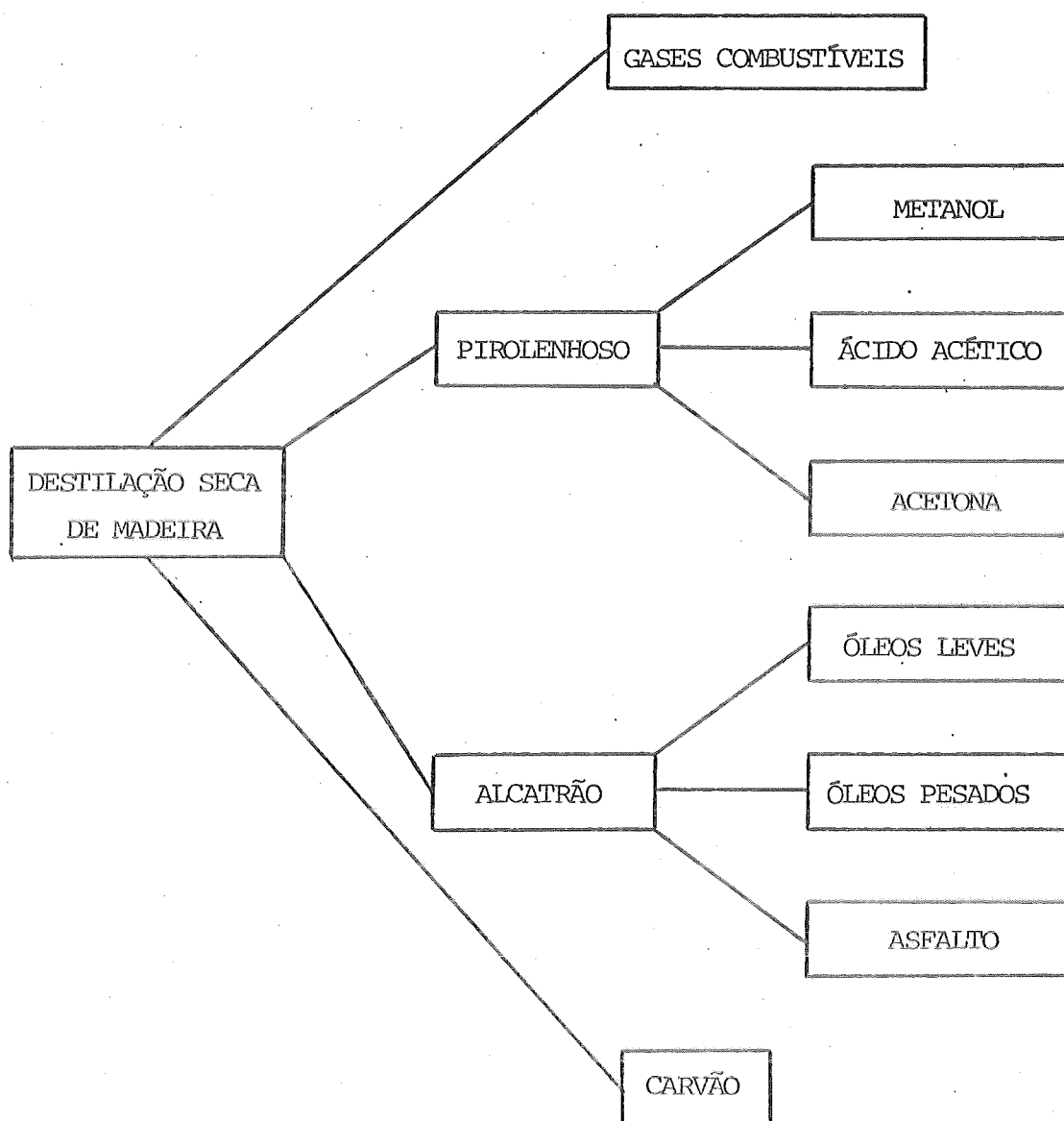
TABELA - I I

	CEDRO	CIPRESTE	PINHO	CARVALHO	MÉDIA
C	48,80	54,98	25,55	49,49	51,46
H	6,37	6,54	6,08	6,62	6,40
O	44,46	38,08	41,25	43,74	41,88
S	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	-
Cinza	0,37	0,40	0,12	0,15	0,26
PCS	4667	5484	4944	4828	4980
PCI	4322	5130	4616	4665	4683
CO ₂ máx	20,2	19,5	20,2	19,9	20,0

Fonte: Diniz - CETEC/1983

Quimicamente a madeira é heterogênea, constitui-se principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina. Estas substâncias aparecem na proporção aproximada de 50:20:30. Outros componentes como fenóis, taninos, óleos essenciais, resinas, graxas, corantes e terpenos, são encontrados principalmente na casca e habitualmente são considerados em conjunto com a denominação de extrativos. (12)

A madeira tem usos variados obtidos da destilação seca:



1.1.4. Combustão da Madeira

As características da combustão da madeira são as seguintes:

- a) Entra em ignição facilmente;
- b) Produz uma chama longa e luminosa denominada chama difusa, quando se queima com excesso de ar;
- c) A cerragem queima facilmente;
- d) Não queima bem quando está na forma de troncos grandes, devido a formação de capas de

cinzas semi-fundidas em sua superfície.

Em geral a lenha apresenta a seguinte análise aproximada:

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

"Considera-se de uso corrente a classificação de que madeira úmida para uso é aquela que contém mais que 30% de umidade, enquanto que a madeira seca é aquela que contém menos de 30% de umidade". (3)

No que se refere ao teor de umidade, temos que quanto maior este teor, menor será a eficiência de combustão.

Para se ter uma idéia da influência do teor de umidade da madeira temos a seguir a tabela da variação dos poderes caloríficos

TABELA III - 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

TABELA III - CONTINUAÇÃO

UMIDADE %	PCS Kcal/kg	PCI Kcal/kg
60	2033	1551
70	1525	1016
80	1017	482
90	508	-

Fonte: Diniz - CETEC/1983

Para calcularmos o poder calorífico inferior de um combustível podemos utilizar a fórmula

$$PCI = 81C + 288(H_2 - \frac{O_2}{8}) + 255 - 6F$$

onde: PCI = poder calorífico inferior

C = % de carbono em peso no combustível seco

H₂ = % de hidrogênio em peso no combustível seco

O₂ = % de oxigênio em peso no combustível seco

S = % de enxofre em peso no combustível seco

F = % de umidade em peso no combustível seco

Para a madeira esta fórmula pode ser simplificada para: $PCI = 4590 - 52 \times F$. (3)

Temos também uma tabela (IV) que inter-relaciona os PCI e PCS para as mais variadas condições.

TABELA IV - CONVERSÃO DE PODER CALORÍFICO

PCSS = PCS Seco

PCSU = PCS Úmido

PCIS = PCI Seco

PCIU = PCI Úmido

H = % Hidrogênio / 100

U = % Umidade / 100

Nota: $K = 9H (1-U) + U$

Conhecidos PCSS e U

PCSU = PCSS (1-U)

PCIU = PCSS (1-U) - 586 K

PCIS = PCSS - 586 K

Conhecidos PCSU e U

PCSS = PCSU/(1-U)

PCIU = PCSU - 586 K

PCIS = PCSU/1 - U - 586x9xH

Conhecidos PCIU e U

PCSU = PCIU + 586 K

PCSS = $\left| \frac{PCIU}{(1-U)} \right| + \left| \frac{586}{(1-U)} \right| K$

PCIS = (PCIU + 586 U) / (1-U)

Conhecidos PCIS e U

PCSU = PCIS (1-U) + 586x9xH(1-U)

PCSS = PCIS + 586x9xH

PCIU = PCIS (1-U) - 586 U

Fonte: Diniz - CETEC/1983

O processo de combustão da madeira está associado a três fases:

- a) Evaporação dos gases presentes no combustível;
- b) Destilação e combustão dos voláteis;
- c) Combustão do carbono fixo.

A chama difusa é característica de processos de combustão em que o combustível e o comburente são introduzidos separadamente, sendo que a taxa de combustão é controlada pela difusão do comburente no combustível. A medida que o oxigênio vai sendo consumido, a região interior da chama possibilita a formação de átomos livres de carbono e fragmentos de hidrocarbonetos. Caso estes elementos consigam escapar da região de combustão de alta temperatura antes de serem oxidados, irão formar partículas de fuligem e uma variedade de hidrocarbonetos.

Os produtos resultantes da combustão de madeira tem sido estudados basicamente em termos dos principais produtos ou seja: vapor de água, CO_2 , CO , NO_x , SO_x e material particulado.

Estudos recentes demonstram a presença de várias substâncias químicas orgânicas originadas da combustão, sendo diversas delas irritantes, tóxicas e cancerígenas (3). Em vista disso, recomenda-se a queima completa para que não haja emissões dos compostos tóxicos.

1.1.4.1. Tecnologia de Combustão da Madeira

A tecnologia em uso ou em desenvolvimento da combustão de madeira para produção de energia pode-se processar basicamente de quatro formas:

- a) Combustão em grelhas;
 b) Combustão em leito fluidizado;
 c) Combustão em suspensão;
 d) Combustão em combinação com outros combustíveis.

Declinamos de descrever cada um destes processos, pois não está dentro do objetivo deste trabalho.

Sempre se atribui a uma boa combustão a condição de se ter turbulência, tempo e temperatura.

Nos cálculos de combustão, sempre recorreremos à quantidade de gases, e então é oportuno fornecer alguns dados das quantidades de ar e os produtos de combustão (tabela V) e a variação do CO₂ com o excesso de ar da madeira (tabela VI).

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	-	8,82	-
Hidrogênio	8,00	34,48	-	9,00	26,48	-
Enxôfre	1,00	4,31	-	-	3,31	2,00

Fonte: Diniz - CETEC/1983

TABELA VI - VARIAÇÃO DO CO₂ COM O EXCESSO DE AR DA MADEIRA

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

Fonte: Diniz - CETEC/1983

Para os cálculos de combustão recorreremos à / quantidade de gases e então utilizamos expresões que fornecerão as quantidades de água, de ar, de CO₂, etc. Não apresentamos no presente trabalho estas fórmulas, porém elas poderão ser encontradas no trabalho de Caldeiras a Lenha de Victor Yves Diniz - CETEC, 1983 (4).

Em relação à temperatura de combustão, damos as temperaturas teóricas de combustão calculada

das para os diversos teores de umidade da ma
deira.

**TABELA VII - TEMPERATURA TEÓRICA DE COMBUSTÃO
DA MADEIRA**

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

Fonte: Diniz - CETEC/1983

onde, WG = gases totais = gases secos + vapor
d'água + ar total

To = temperatura teórica de combustão

A madeira pode ser queimada em pilhas, em
leito quando picada, em suspensão, ou em for
nalhas ciclônicas.

Os tipos usuais de caldeiras que utilizam a
madeira como combustível são:

a) Caldeira fogotubular $\left\{ \begin{array}{l} \text{Vertical} \\ \text{Horizontal} \end{array} \right.$ com fornalha $\left\{ \begin{array}{l} \text{interna} \\ \text{externa} \end{array} \right.$

b) Caldeira aquatubular $\left\{ \begin{array}{l} \text{caldeiras de câmaras} \\ \text{caldeiras de dois tambores} \\ \text{caldeiras de vários tambores} \end{array} \right.$

c) Caldeira mista - tem o corpo da caldeira fogotubular e a fornalha da aquatubular.

1.1.4.2. Pesquisas de Alternativas Energéticas

Com o propósito de substituir energia oriunda de derivados do petróleo a COPENE, empresa central do Complexo Petroquímico de Camaçari - Bahia, inicia em 1980 estudos relativos a queima de madeira pulverizada em suspensão para utilização em geradores de vapor de grande porte. Em meados de 1981, foi decidida a compra de uma caldeira com capacidade de geração de vapor de 400 t/h a 120 kg/cm²G e 538°C, o que fará substituir anualmente 200.000 t de óleo combustível, a partir de 1986. (8)

O Convênio celebrado em 1980 entre o Ministério das Minas e Energias e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. IPT, deu origem ao estudo de substituição de óleo combustível e do diesel em processos de queima em fornalhas e caldeiras denominado Projeto Babaçu, que vem operando um sistema de processamento de resíduos florestais, para a produção de carvão e alcatrão combustível. Uma usina piloto, instalada em Teresina - Piauí, processando casca de babaçu está abastecendo

as indústrias locais. A capacidade de produção desta usina é de 200 t/mês de carvão e 150 t/mês de alcatrão. O sucesso alcançado motivou o início da instalação de uma segunda usina, em escala industrial. Ela produzirá 600 t/mês de carvão e 450 t/mês de alcatrão e sua operação é contínua e automatizada.

O processo do IPT de carvoejamento contínuo a apresenta rendimento de 25% de carvão e 20% de alcatrão em relação à matéria prima utilizada, casca de babaçu e/ou outro material lenhoso, quando a 20% de umidade.

O alcatrão combustível tem as seguintes vantagens: os gases da combustão apresentam um teor desprezível de enxôfre na sua constituição; é um combustível líquido e portanto de fácil manuseio, uso e transporte; apresenta poder calorífico bastante superior à lenha e permite usar sem alterações significativas, os equipamentos disponíveis para a queima de óleo combustível. (6,7)

1.1.4.3. Potencial de Substituição do Óleo Combustível

Passamos a apresentar alguns quadros que tratam do potencial de substituição de óleo combustível por madeira e seus derivados em setores das indústrias de papel e celulose, cimento, cerâmica, alimentos, bebidas e textil, que são responsáveis por cerca de 60% do consumo total.

Nas indústrias de papel e celulose a opção em termos de substituição do óleo combustí

vel foi baseada, segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Papel e Celulose, nos seguintes aspectos:

- disponibilidade
- investimentos necessários para a substituição
- custo de operação
- influências sobre o ambiente

A utilização de madeira e os resíduos florestais apresentou-se como a melhor solução, tanto em termos técnicos como econômicos. (10)

TABELA VIII - INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

. Potencial de substituição de óleo combustível expresso em madeira

PERÍODO 1980 A 1985

10⁶ t

ANO	OFERTA DE PAPEL E CELULOSE (1)	CONSUMO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL (2)	CONSUMO ESPERADO DE MADEIRA (3)
1980	5.494	1,1	0,32
1981	5.993	1,2	0,70
1982	6.407	1,3	1,51
1983	6.927	1,4	2,86
1984	7.514	1,5	4,37
1985	8.152	1,6	4,67

Fonte: STI/MIC, 1980

(1) ANFPC - Relatório estatístico de 1978 - V. Perspectivas futuras-páginas L III e L IV demanda de papel e celulose

- (2) ANFPC - Relatório "Avaliação da Oferta e Demanda de Madeira para 1985". Prange, Murat e Vilas Boas - página 25.
- (3) Adotou-se o indicador 4,2 t de madeira por tonelada de óleo combustível. A substituição de 70% de madeira está proposta gradualmente às taxas de 10%, 20%, 40%, 70% e 100%.

Nas indústrias de cerâmica, alimentícia, beidas e têxtil, devido à falta de informações a nível de cada indústria e a pouca confiabilidade dos dados existentes e levando em conta as possibilidades de substituição de óleo combustível, arbitrou-se um valor médio de 50% de substituição por lenha, carvão vegetal e gás, a partir de carvão vegetal, as taxas anuais de 10%, 20%, 30%, 40%, 60% e 100% no período de 1980 a 1985. (Tabela IX).

**TABELA IX - INDÚSTRIAS DE CERÂMICA, ALIMENTÍCIA
E BEBIDAS E TEXTIL**

. Potencial de substituição de óleo combustível por
madeira e derivados

PERÍODO 1980 A 1985

ANO	CERÂMICA (1), (2)			ALIMENTÍCIA E BEBIDAS (1), (2)			TEXTIL (1), (2)			TOTAL M.T.
	C.V.	M.	M.T.	C.V.	M.	M.T.	C.V.	M.	M.T.	
1980	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2	1,2
1981	0,1	0,2	0,6	0,2	0,2	1,0	0,1	0,1	0,4	2,0
1982	0,2	0,2	1,0	0,3	0,3	1,5	0,1	0,2	0,6	3,1
1983	0,3	0,3	1,5	0,3	0,5	1,7	0,1	0,3	0,7	3,9
1984	0,4	0,5	2,1	0,6	0,7	3,1	0,2	0,5	1,3	6,5
1985	0,8	1,0	4,2	1,1	1,3	5,7	0,4	0,8	2,4	12,3

Fonte: STI/MIC, 1980

Observações: (1) C.V.: Carvão Vegetal

M. : Madeira

M.T.: Madeira Total = Madeira + Carvão Ve
getal equivalente em madeira

(2) A substituição por 50% de madeira e deri
vados está proposta gradualmente às taxas
de 10%, 20%, 30%, 40%, 60% e 100%.

1.2. Gaseificação da Madeira

1.2.1. Introdução:

Uma das alternativas de energia em substitui
ção do óleo combustível é a utilização do gás
de lenha (ou madeira) que é obtida pelo pro
cesso de gaseificação. Para tanto, vamos abor
dar alguns aspectos fundamentais para compre
ensão do mesmo com enfoque de atualização dos

trabalhos desenvolvidos nesta área.

A gaseificação de combustíveis é realizada com o objetivo de produzir um combustível gasoso com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e para que possa ser utilizado como matéria prima.

Nos processos de combustão, o gás resultante da gaseificação da madeira é uma mistura de substâncias e contém principalmente: CO_2 , CO , H_2 , N_2 , CH_4 , C_2H_6 , traços de H_2S , SO_2 , NO , NH_3 e alcatrões constituídos basicamente de hidrocarbonetos de massa molecular relativamente elevada, álcoois, ácidos orgânicos, éteres e óleos crezotos.

A composição e concentração dos gases e a produção de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos (alcatrões) dependem de:

- tipo de gaseificador utilizado;
- forma de fornecimento de energia ao processo;
- fatores externos responsáveis pelo deslocamento do equilíbrio das reações;
- tempo de retenção da carga;
- sistema de retirada de gases e outros produtos;
- tipo de matéria prima utilizada para gaseificação.

O tipo de madeira empregado na gaseificação é o que menos influi na composição dos gases extraídos, sendo que a maior influência se deve ao tipo de equipamento empregado e aos fatores de operação, como por exemplo, umidade da matéria prima, relação ar/carga, pressão, etc.

O poder calorífico depende da sua composição e está diretamente relacionada com a fração combustível, representada pelo CO , H_2 , CH_4 e hidrocarbonetos. Quanto ao PCI (Poder Calorífico Interior do gás que é a energia que se consegue liberar, por unidade de massa, ao proceder-se a combustão do gás, quando a água produzida na combustão se encontra toda na fase vapor), é indicada uma faixa de valores entre 900 e 1300 Kcal/Nm³.

Para ilustrar, temos os resultados da variação da composição dos gases para madeiras e condições de umidades diferentes (Tabela I).

Os gases produzidos, podem ser usados em diversas aplicações:

- a) Como combustível em fornos de cal, fornos cerâmicos, motores diesel e a gasolina, turbinas a gás, geradores de vapor, etc.;
- b) Como redutor direto em fornos siderúrgicos;
- c) Como matéria prima para produção de gás de síntese para metanol, amônia, etc.

1.2.2. Fatores que Influenciam o Processo de Gaseificação

A) Temperatura:

A temperatura na zona de reação é um fator importante, pois as constantes de equilíbrio das reações que ocorrem dependem da temperatura.

Um outro fato importante, é que temperaturas elevadas podem provocar a fusão das cinzas do combustível, podendo haver a formação

T A B E L A I

MATERIAL	GASEIFICADOR	GÁS RESULTANTE (% VOL.)					PCI (Kcal/Nm ³)
		CO	H ₂	CH ₄	CnHm	CO ₂	
Madeira Dura (a)	Contracorrente	22.0	18.2	1.6	0.4	10.5	1250
Madeira Mole (a)	Contracorrente	20.6	15.5	1.2	0.1	11.0	1145
Madeira - 15% umid. ^(b)	Co-Corrente	22.2	17.5	0.8	-	12.2	1190
Madeira - 25% umid. ^(b)	Co-Corrente	23.0	14.1	0.9	-	16.0	1130

Fonte: (a) DUBBEL H., Manual do Engenheiro Mecânico, Vol. II

Experiências feitas na Alemanha com madeira seca ao ar.

(b) SKOV N.A. & PAPWORTH M.L., The Pegasus * Unit, USA, 1974.

ção de um bloco de material sinterizado que obstruirá o gaseificador, impedindo o escoamento do material. De um modo geral, temperaturas altas favorecem as reações endotérmicas.

Num gaseificador a temperatura da zona de reação é definida como a temperatura na qual as reações principais atingem o equilíbrio.

B) Pressão no gaseificador:

O efeito do aumento de pressão é o deslocamento do equilíbrio das reações nas zonas de oxidação e redução, principalmente da reação favorecendo a produção de metano.

Alguns gaseificadores de grande porte, visam a produção de gás de sínteses químicas a partir do metano, operam a pressões relativamente altas, em torno de até 70 kg f/cm².

A elevada pressão e conseqüentemente a maior concentração de gases por unidade de volume permite conseguir taxas de reação relativamente altas mesmo à temperaturas moderadas, evitando altas temperaturas máximas no leito com sinterização ou fusão das cinzas.

A pressão tem influência acentuada na composição dos gases, pois favorece aquelas reações em que há redução do número de moles.

C) Umidade:

A umidade da lenha ao ser introduzida no gaseificador é muito importante, pois a relação

ção vapor d'água - material seco quando au
mentada, mantidos os demais fatores constante
tes, acarreta a diminuição da temperatura /
média no leito.

A umidade do agente de gaseificação tem in
fluência na composição dos gases obtidos.
Alta umidade do material pode levar a um
"resfriamento" demasiado do leito, aumentando
do a fração de carbono não convertido nas
cinzas. Baixos valores da umidade devem au
mentar a temperatura máxima do leito e as
concentrações de H_2 e CH_4 no gás resultante
serão muito baixas levando, portanto, à di
minuição do poder calorífico.

D) Relação ar-material:

É a relação entre a vazão em massa do ar
(ou comburente) injetado no gaseificador e
a vazão em massa da lenha.

O aumento excessivo desta relação pode acar
retar um aumento demasiado na temperatura
máxima do leito, com as consequências já co
mentadas no item da influência da temperatu
ra.

Por outro lado, uma diminuição desta rela
ção abaixa demais a temperatura do leito fa
vorecendo a produção maior de CO_2 e menor
de H_2 e ainda, pode ocasionar uma falta de
energia para que se processem as reações en
dotérmicas. Relações ar-material muito bai
xas, podem levar a um aumento na quantidade
de carbono não convertido ou mesmo inter
romper as reações de gaseificação, funcio
nando o gaseificador na melhor hipótese co

mo forno de carvoejamento (ocorrendo apenas a secagem e a destilação).

E) Vazão de material:

O aumento da vazão do material (seco), mantidas as demais condições fixadas, deve levar a um aumento na fração não convertida do processo.

Esta vazão é normalmente levada em consideração num parâmetro do gaseificador que é a taxa de gaseificação e se refere à vazão de material que passa na seção mais estreita das zonas de oxidação e redução. Estas taxas muito baixas podem levar a uma subutilização do equipamento, sendo que os valores comuns são da ordem de $0,20 \text{ kg/m}^2.\text{s}$.

F) Granulometria:

A granulometria do material a ser alimentado no gaseificador deve ser analisado com cuidado. As partículas muito pequenas podem ser arrastadas com os gases. Pedacos muito grandes exigem um tempo de secagem demasiadamente longo, implicando em necessidade de se construir gaseificadores muito altos e, ainda resultam em muito carbono não convertido no processo, caso não tenham tempo de retenção suficiente.

Pequenas granulometrias podem acarretar o bloqueio do gaseificador, além de causar altas perdas de carga nos gases, exigindo altas potências nos ventiladores de insuflamento de ar.

1.2.3. Equipamento de Gaseificação

O gaseificador é constituído basicamente de um cilindro vertical, dotado de sistemas para introdução do material, retirada de cinzas, insuflamento de ar e captação dos gases. Em seu interior se mantém o leito de material em processamento.

Para a gaseificação da madeira são usados os gaseificadores de leito fixo, onde o material é alimentado pelo topo do equipamento e se move lentamente no sentido descendente, sendo que as cinzas são retiradas em sua base. O ar pode ser introduzido em diversas posições e o mesmo ocorre em relação a captação dos gases. O movimento relativo entre o material sólido e o fluxo gasoso permite a subdivisão dos gaseificadores de leito fixo em:

- a) Gaseificadores de fluxo contracorrente / (UPDRAFT). São caracterizados por sua forma de operação em que o combustível e os gases gerados se movimentam em direções contrarias;
- b) Gaseificadores de fluxo co-corrente ("DOWN DRAFT"). Nele o combustível e os gases gerados se movimentam na mesma direção, tipo chama invertida.
- c) Gaseificadores de fluxo cruzado (CROSSDRAFT) Recebe esta denominação, quando parte do gaseificador opera em contracorrente e parte em co-corrente ou então com fluxo transversal.

Os gaseificadores de leito fluidizado, que são aqueles em que o material é geralmente introduzido numa posição intermediária e o ar é sempre insuflado pela base, é o equipamento mais recente, sendo que a sua tecnologia começou a ser desenvolvida na segunda metade deste século. As primeiras unidades industriais foram instaladas nos E.U.A., em 1979, no Brasil ainda não há equipamento de gaseificação de leito fluidizado.

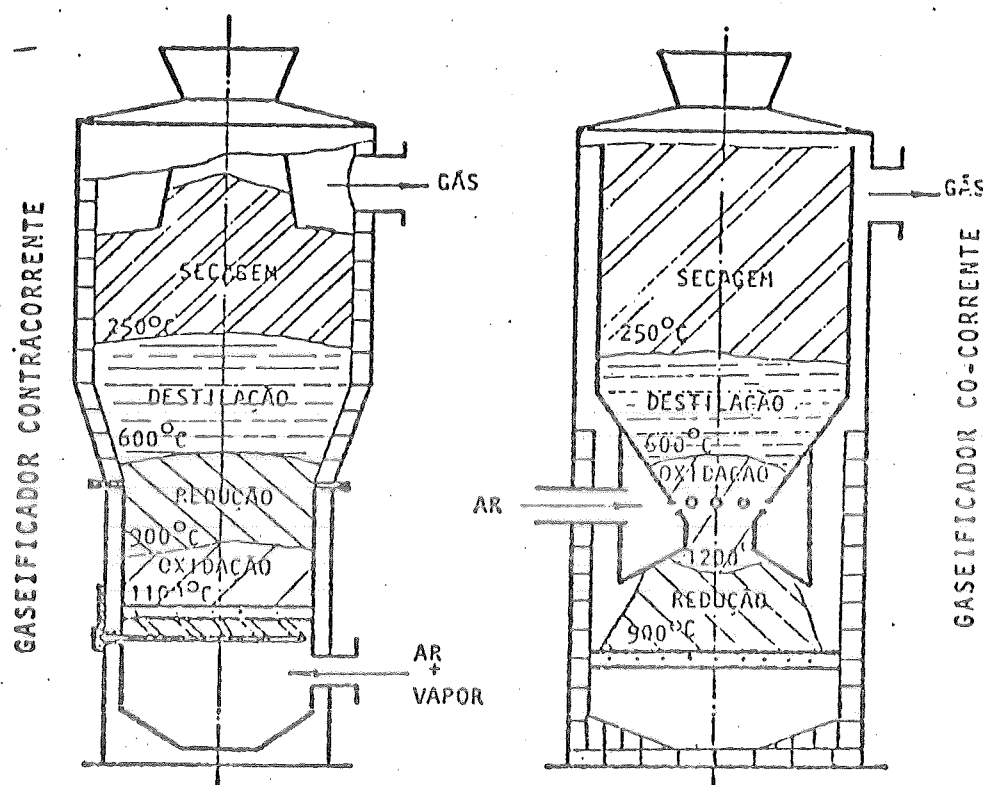
1.2.4. Processo de Gaseificação da Madeira

1.2.4.1. Reações que Ocorrem no Leito:

No interior de um gaseificador típico, de leito fixo, encontramos zonas de reação bastante distintas ao longo do leito. A identificação precisa destas zonas é bastante difícil, pois as fronteiras entre uma e outra não são definidas, ocorrendo nelas fenômenos de transição.

Os esquemas a seguir, apresentam as diversas zonas de reação. Para se definir as interfaces entre elas foram consideradas secções / transversais do leito, nas quais a temperatura média se encontra na região de transição entre um determinado e característico grupo de reações e de outro.

As quatro zonas de reação seriam: secagem, destilação, redução e oxidação.



Fonte: Stiubiener, U. "Um Estudo sobre a Gaseificação da Madeira", 1981

1.2.4.2. Gaseificação de Madeira x Utilização de Gás em Caldeiras Existentes, Fornos e Secadores.

O gás de madeira é uma das formas alternativas para substituição de óleo combustível em caldeiras existentes. Embora a queima direta de madeira seja uma solução mais interessante, principalmente do ponto de vista energético, não é possível transformar uma caldeira existente a óleo em caldeira a lenha, sem que sejam realizadas extensas modificações nos equipamentos. Com o gás de madeira a transformação é mais fácil, bastando uma adaptação dos queimadores.

1.2.4.3. Gaseificação de Madeira x Utilização do Gás em Motores

Uma das possíveis utilizações do gás de madeira é em motores ciclo Diesel ou ciclo Otto . No caso da utilização de gás combustível em motores, o teor de pirolenhosos é fundamental, pois determinará a maior ou menor complexidade do sistema de limpeza. Os pirolenhosos não podem atingir o motor, pois causarão sérios transtornos ao seu desempenho.

1.2.4.4. Gaseificação de Madeira x Produção de Gás de Síntese e de Redução.

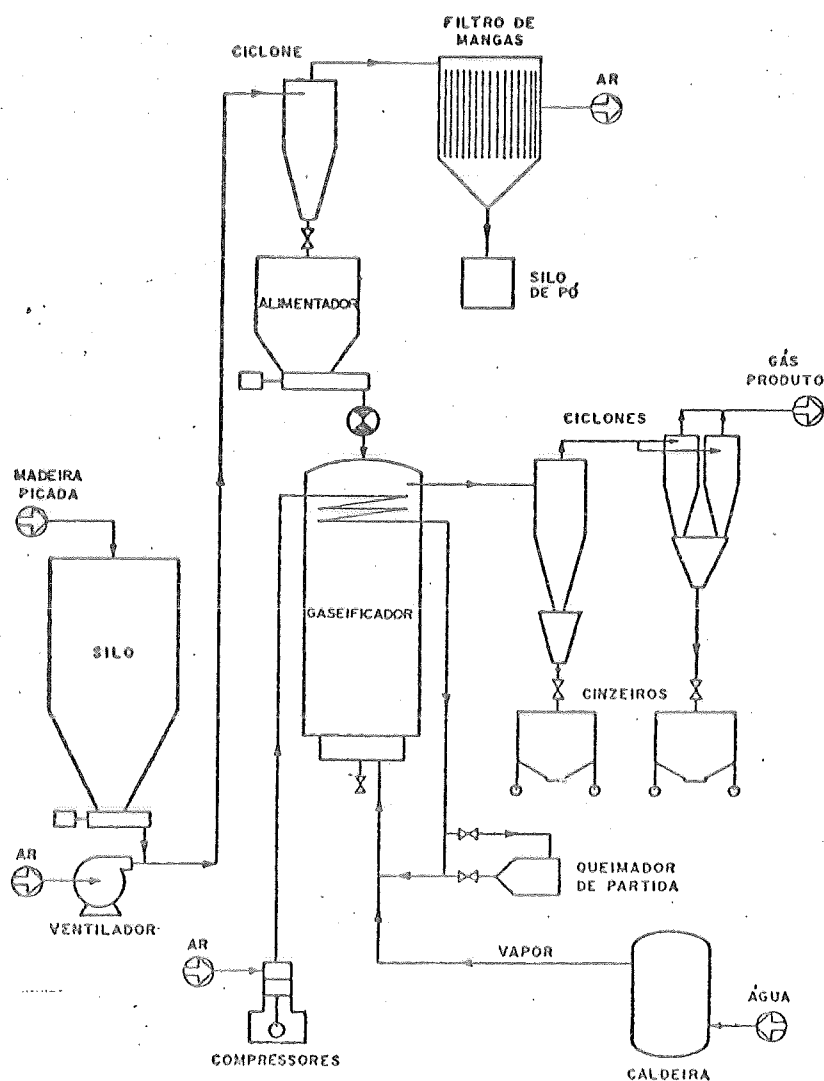
Uma outra utilização do gás de madeira é como matéria prima para síntese de metanol, amônia ou hidrocarbonetos.

Nesse caso o gás deve ser de médio poder calorífico e no caso de processos autotérmicos (a energia provém da combustão parcial do próprio combustível), estão sendo considerados processos que utilizam oxigênio puro, ou então oxigênio puro e vapor d'água, de modo a enriquecer os gases em hidrogênio. O gás a ar não é recomendado, pois os gases seriam produzidos, diluídos com nitrogênio o que acarretaria dificuldades na separação posterior, além de problemas na síntese, onde funciona como inerte.

1.2.5. Pesquisas de Gaseificação de Madeira

Visando a produção de gás combustível de baixo poder calorífico, realizou-se uma pesquisa da gaseificação de madeira na unidade piloto de leito fluidizado da CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia - Porto Alegre - RS. Este tra

balho teve a denominação de Projeto MADEGÁS ,
que contou com a participação da PETROBRÁS e
da CIENTEC, motivados pelo interesse mútuo de
explorar esta alternativa energética.



Unidade Piloto de Gaseificação de Leito Fluidizado

A figura acima apresenta o fluxograma simplificado da unidade piloto que opera continuamente a pressões levemente acima da atmosférica e possui capacidade nominal para produzir 1 Gcal/h de gás combustível de baixo poder calorífico.

O programa experimental de ensaios de gaseificação de madeira, visou a obtenção de dados relativos a pesquisa de parâmetros de processo como a concentração do vapor d'água, umidade da madeira, temperatura de operação e a capacidade de alimentação de madeira. Para o desenvolvimento deste programa foram realizadas a proximadamente 600 horas de operação na unidade piloto, onde consumiu-se mais de 200 toneladas de madeira.

Utilizou-se madeira picada, com granulometria abaixo de 75 mm, composta por 60% de eucalipto Grandis e 40% de eucalipto Saligna, com idade média de 8,5 anos.

As condições ótimas da gaseificação de madeira em leito fluidizado, foram obtidas nas temperaturas de operação compreendidas entre 800 e 900°C, quando adotou-se somente ar como agente gaseificante e umidades das madeiras reduzidas. Nestas condições foram atingidas conversões de madeira superiores a 95% em peso, proporcionando a obtenção de rendimentos de até 75% em gás seco e frio, 84% em gás seco e quente ou 94% em gás úmido e quente.

A gaseificação de madeira em leito fluidizado é muito promissora, tanto pelos resultados obtidos como pelas características operacionais e aproveitamento integral de diversas matérias

primas (madeira, carvão, resíduos e outros materiais carbonosos).

Outro trabalho interessante desenvolvido no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, é a da modelagem matemática e simulação em computador de gaseificador de leito fixo contracorrente para carvões e biomassa, com inclusão de processos de pirólise, secagem e alternativas de processo.

Várias versões do programa de simulação de gaseificador para diversos materiais foram obtidas com crescente precisão, quando comparado a dados experimentais em unidades piloto e industriais e ainda crescente ampliação no campo de aplicação, com relação a variações, tanto de concepção do gaseificador, variedade de materiais processados e variações no processo.

Uma nova versão do programa de simulação de gaseificador contracorrente de leito fixo para carvões e madeira foi desenvolvida e fornece:

- todas as principais variáveis de processo ao longo do leito como: composições e vazões de 13 gases e 6 sólidos; temperaturas de fase sólida e gasosa independente, taxas de reações dos processos de combustão, gaseificação, pirólise e secagem;
- composição, vazão, temperatura, entalpia de combustão e outras propriedades físicas e químicas dos gases produzidos;
- possibilidade de analisar alternativas de processo como: reciclagem de voláteis para zonas e alta temperatura, com a finalidade de eliminar alcatrões, dupla retirada de ga

ses e combinações dessas.

1.3. Carvão Vegetal

1.3.1. Introdução

O carvão vegetal constitui uma matéria prima, cujas características permitem usá-lo como combustível e redutor. A maior área de utilização do carvão vegetal é, ainda, a siderurgia, em razão da importância que aqueles aspectos adquirem no processo do alto forno. Entretanto, quando se pretende ampliar o universo de utilização do carvão, torna-se necessário colocar em relevo aquelas propriedades que formarão a base sobre a qual as novas propostas tecnológicas deverão estar assentadas. Neste contexto, as propriedades do carvão vegetal, importantes para o desenvolvimento de novas utilizações são: composição química, densidade, reatividade, resistência mecânica e higroscopicidade.

1.3.2. Composição Química

O carvão vegetal pode ser considerado como sendo constituído, em termos de análise química, de três partes: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. O item mais importante é a quantidade de carbono que é fixado ao carvão durante o processo de carbonização.

TABELA I - VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO CARVÃO E DO RENDIMENTO DA CARBONIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO (°C)	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA		RENDIMENTO* EM CARVÃO (%) (BASE SECA)
	C.FIXO	MAT.VOLÁT.	
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

*Obtido por:
$$\frac{\text{Peso madeira seca em estufa, a peso constante}}{\text{Peso do carvão obtido}}$$

Fonte: Matos, M. et alii (9)

Estudos realizados no CETEC para o eucalipto grandis, da região de Caeté - MG, vistos na tabela I, mostram como variam os teores de carbono fixo e materiais voláteis, bem como o rendimento da carbonização (peso de carvão/peso de madeira seca), em função da temperatura de carbonização. Estes resultados foram obtidos em estufas elétricas, ou seja, não houve queima de madeira para o processo.

Na tecnologia atual de carbonização, utilizando fornos de alvenaria, a atuação na temperatura de carbonização é praticamente impossível, uma vez que a energia necessária à carbonização é gerada internamente no forno. Além disso, deve-se ressaltar que valores de temperaturas diferentes são atingidos em diferentes partes do forno, resultando em quantidades de carbono fixo diferentes, dependendo do ponto de amostragem.

O desenvolvimento de operações com fonte externa de calor é a meta a ser atingida, possibilitando assim, o controle da temperatura e da taxa de carbonização e a consequente obtenção de uma porcentagem pré-determinada de carbono fixo.

1.3.3. Densidade

Os parâmetros que atuam na densidade do carvão são a temperatura de carbonização e a densidade da madeira que lhe deu origem. Quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade do carvão produzido, conforme resultados do CETEC, descritos abaixo para o eucalipto grande, de idades de 6 a 10 anos.

TABELA II - VARIAÇÃO DAS DENSIDADES APARENTE E VERDADEIRA E POROSIDADE DO CARVÃO COM A TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO (°C)	DENSIDADE APARENTE g/cm ³	DENSIDADE VERDADEIRA g/cm ³	POROSIDADE TOTAL %
100	0,611	1,33	54,0
320	0,412	1,11	62,9
500	0,408	1,27	67,1
600	0,402	1,30	69,0
700	0,415	1,34	70,0
800	0,489	1,29	60,5
900	0,414	1,27	66,3

Fonte: Matos, M. et alii (9)

**TABELA III - RESULTADOS DE CARBONIZAÇÃO DE EUCALIPTUS
GRANDIS NA REGIÃO DE CAETÉ - MG**

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO (°C)	DENSIDADE APARENTE RELATIVA	DENSIDADE RELATIVA VERDADEIRA	POROSIDADE CALCULADA %
300	0,39 ± 0,08	1,36 ± 0,04	71,6 ± 6,2
500	0,35 ± 0,03	1,40 ± 0,04	74,6 ± 2,2
700	0,39 ± 0,05	1,67 ± 0,04	76,8 ± 3,2

Fonte: Matos, M. et alii (9)

1.3.4. Reatividade

Uma das mais importantes propriedades do car
vão está relacionada com o seu comportamento em
reações com gases (O_2 , CO_2 , H_2O , etc). Dentre
elas, devido a sua importância para o processo
do alto forno, a única reação gás-sólido, en
volvendo o carbono, que tem merecido atenção,
é aquela com o CO_2 . A reação carbono - CO_2 tem
importância especial no alto forno, por regener
ar o poder redutor do gás e interferir no ba
lanço térmico global do processo.

Testes de reatividade a CO_2 com carvão vegetal
na faixa granulométrica de 3,4 a 5,6 mm, mos
tram que, para uma vazão de 2,4 l/min. de CO_2
puro, quanto mais alta a temperatura de carbon
ização maior a reatividade, expressa através
do gráfico % CO_2 no gás de saída versus temper
atura. Os resultados da tabela IV, indicam um
aumento na reatividade com o carbono fixo e
consequentemente, com a temperatura de carboniz
ação.

TABELA IV - VARIAÇÃO DA REATIVIDADE COM A TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO (°C)	% CARBONO FIXO (BASE SECA)	MED.DA REAT. -%CO ₂ NO GÁS DE SAÍDA A 830°C	AUM.DA REAT. EM RELAÇÃO A 300°C
300	68	56	-
500	85	48	14%
700	92	45	19%

Fonte: Matos, M. et alii (9)

1.3.5. Resistência Mecânica

Dos testes de resistência mecânica destacam-se:

- . compressão de flanco
- . tamboramento
- . teste de queda

O teste de compressão, mede a resistência do carvão a esforços de compressão como o próprio nome indica. Estudos realizados no CETEC revelaram a grande influência da temperatura de carbonização na resistência à compressão do carvão vegetal.

O teste de tamboramento mede o grau de friabilidade do material, sujeito ao manuseio e transporte. Os resultados realizados no CETEC demonstraram que a maior ou menor resistência do carvão, à geração de finos, depende principalmente do diâmetro, comprimento e umidade da madeira a ser carbonizada.

**TABELA V - RESULTADOS DOS TESTES DE COM
PRESSÃO DE FLANCO PARA CARVÃO
VEGETAL PRODUZIDO EM DIFEREN
TES TEMPERATURAS**

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO °C	LIMITE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO kg/cm ²
300	28,6 ± 2,3
500	20,9 ± 2,4
700	34,3 ± 5,9
900	51,3 ± 13,1

Fonte: Matos, M. et alii (9)

1.3.6. Higroscopicidade

A umidade contida no carvão vegetal exerce uma grande influência no rendimento dos processos em que ele é utilizado. O carvão absorve durante as chuvas, perdendo-a parcialmente com a sua exposição ao sol, dependendo este comportamento da umidade relativa do ambiente a que esta exposto.

1.3.7. O Carvão Vegetal no Contexto Energético Brasileiro.

A par do esforço de desenvolvimento da siderurgia brasileira a carvão vegetal, deve ser considerada a contribuição dessa matéria prima nacional no programa de substituição de óleo combustível nos diversos setores produtivos. As previsões do aumento de consumo de óleo combustível por esses setores, que é função dos programas setoriais traçados, são mostrados na tabela VI.

TABELA VI - ESTIMATIVAS DE CRESCIMENTO DO
CONSUMO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL
(10⁶ t)

ANO	CIMENTO	SIDERURGIA	PAPEL E CELULOSE	CERÂMICA	ALIMENTÍCIA E BEBIDAS	TEXTIL	TOTAL
1980	2,8	1,6	1,4	1,3	1,6	0,7	9,4
1981	2,9	1,6	1,5	1,4	1,7	0,8	9,9
1982	3,2	1,6	1,6	1,4	1,8	0,9	10,5
1983	3,5	1,8	1,7	1,4	1,9	0,9	11,2
1984	3,8	2,0	1,8	1,4	2,0	1,0	12,0
1985	4,2	2,1	1,9	1,5	2,1	1,1	12,8

Fonte: STI/MIC, CDE, ANFPC, CDI/MIC, 1980

Os percentuais de substituição de óleo combustível por carvão vegetal adotados foram expressos, segundo o programa de desenvolvimento do uso racional da madeira e seus derivados, do Ministério da Indústria e Comércio - Secretaria de Tecnologia Industrial, feito em 1980, em função da região, Estado da Federação e justificativas.

Na região Sudeste, o percentual adotado para Minas Gerais foi de 100%, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo de 20%, considerando-se a impossibilidade do uso de carvão mineral devido a fatores tais como poluição, características da matéria prima, deficiências de suprimento de carvão mineral. No caso de Minas Gerais, o interesse do Estado em promover o uso do carvão vegetal (Programa BDMG) e a adoção de uma solução nitidamente regional conduziram a este percentual.

Na tabela VII temos o potencial de substituição de óleo combustível por carvão vegetal no setor cimenteiro.

TABELA VII - SETOR CIMENTEIRO

PERÍODO DE 1980 A 1985

ANO	PRODUÇÃO DE CIMENTO	CONSUMO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL	CONSUMO DE MADEIRA	10 ⁶ t
				CONSUMO DE CARVÃO VEGETAL
1980	27,135	2,667	2,0	0,5
1981	29,345	2,881	2,8	0,7
1982	32,120	3,163	4,8	1,2
1983	34,690	3,479	6,0	1,5
1984	37,466	3,826	9,6	2,4
1985	40,464	4,209	10,4	2,6

Fonte: STI/MIC, 1980

1.4. Gaseificação de Carvão Vegetal

A gaseificação de carvão vegetal do ponto de vista técnico é bem mais simples que a gaseificação direta da madeira. Praticamente pode substituir carvão mineral, com vantagens, em todos os inúmeros processos existentes de gaseificação, pois tem maior reatividade, baixo teor de cinzas é facilmente reduzido a pó e possui baixo teor de enxofre.

Há basicamente duas alternativas para obtenção de carvão vegetal:

- 1) Sistema medas - bastante primitivo e não possui recuperação de voláteis. O rendimento térmico é bastante baixo. A carbonização é feita com baterias de fornos estrategicamente localizados na floresta;
- 2) Sistema com recuperação de voláteis - o rendimento térmico é melhor, porém envolvem investimentos e

custos maiores, particularmente aqueles custos ligados a transporte de madeira, pois são instalações centralizadas e fixas.

A alternativa de produção intermediária de carvão vegetal para gaseificação, não deve ser descartada, pois é sabido que a realização da pirólise em dois estágios permite um melhor controle de cada um deles.

A gaseificação de madeiras, resíduos e carvão vegetal é sem dúvida uma opção alternativa para os problemas energéticos nacionais. Embora seja uma tecnologia conhecida há muito tempo, ainda comporta desenvolvimentos quer para gás de síntese, quer para gás combustível. Sem dúvida a gaseificação para produção de gás combustível de baixo poder calorífico é a mais simples e que poderá ser implantada a prazo mais curtos. A gaseificação é sempre parte de um contexto, onde os objetivos e metas tem que ser atingidos técnica e economicamente.

Na utilização de sistemas de gaseificação para produção de gás combustível para substituir óleo em caldeiras existentes, este será responsável praticamente pelo investimento total. Deve-se portanto, pensar em sistemas simples e fáceis de operar para que estes possam ser competitivos com a substituição total das caldeiras por caldeiras de combustão direta ou mesmo outros combustíveis. Somente se justificam, também se o gás for gerado próximo ao ponto de sua utilização.

2. OBJETIVO

O objetivo básico do presente estudo é de procurar determinar os fatores de emissão de material particulado e de óxidos de enxôfre do combustível proposto, mediante amostragens em chaminé.

Estudaremos também, as vantagens e desvantagens do uso destes combustíveis alternativos com relação a emissão de poluentes, comparando com combustíveis líquidos derivados do petróleo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Métodos e Equipamentos:

As amostragens em chaminé foram realizadas de acordo com os métodos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, publicados pela U.S.E.P.A. (Agencia de Proteção Ambiental) e adotados pela CETESB. Para a execução das coletas, foi utilizado o "trem" de amostragem fabricado pela RAC (Research Appliance Company) e a determinação dos produtos de combustão foi realizada com o aparelho de ORSAT. As amostragens foram efetuadas pelos técnicos da Divisão de Amostragem em Chaminé e acompanhadas pelos técnicos da Gerência de Pesquisas de Ar e Ruído.

A pretensão inicial era de aproveitar estudos efetuados pela extinta Divisão de Alternativas Energéticas e Amostragens em Chaminé, realizadas pela Divisão de Amostragem em Chaminé; além de pelo menos duas amostragens para cada tipo de combustível alternativo, visando procurar determinar taxas de emissão de material particulado e dióxido de enxôfre e estudar as vantagens e desvantagens destes combustíveis com relação aos derivados de petróleo, no tocante aos dois poluentes, anteriormente mencionados.

Assim, efetuou-se nova consulta à Divisão de Inventário e Cadastro de Fontes e as Divisões das Gerências de Controle de Poluição Ambiental, no sentido de conseguir empresas que permitissem a utilização de seus equipamentos industriais para efetuarmos as amostragens. Foram consultados os relatórios de andamento dos Programas de Controle de Material Particulado e de Dióxido de Enxôfre, desenvolvidos pela Diretoria de Controle.

Com as informações levantadas e a colaboração dos Engenheiros da DCON, foram selecionadas, dentro do universo de firmas que compõe os dois programas de controle citados, especialmente o de dióxido de enxôfre, algumas empresas que se dispuseram a fornecer suas instalações industriais para efetuarmos as amostragens em chaminé.

Do universo de firmas pesquisadas, verificou-se que a grande maioria das empresas estavam substituindo os derivados de petróleo por eletricidade ou lenha; apenas algumas, cerca de cinco firmas, adotaram gaseificadores a lenha e carvão vegetal e, somente uma está utilizando carvão vegetal para produção de vapor em suas caldeiras.

3.2. Obtenção dos Resultados em Campo:

Algumas dificuldades, que serão explicadas adequadamente no item comentários, impediram que efetuássemos as amostragens programadas, prejudicando o andamento do projeto.

A seguir, apresentamos os resultados de duas amostragens em caldeiras a lenha, sendo que a primeira é referente a uma das firmas por nós selecionadas e a outra dos arquivos da Divisão de Amostragem em Chaminé.

3.2.1. Amostragem em Chaminé na Firma "Tinturaria e Estamparia Tintanyl Ltda."

Trata-se de uma firma de porte médio, situada no município de Guarulhos, que optou por adaptar suas caldeiras a óleo combustível para queima de toras de eucalipto, visando controlar a emissão de dióxido de enxofre.

3.2.1.1. Descrição Sobre a Operação da Caldeira:

A amostragem foi realizada na chaminé que serve a duas caldeiras instaladas para a queima, sendo que a capacidade máxima de produção de vapor eram respectivamente 1200 kg/h e 1000 kg/h e suas pressões máximas de 150 psig. É preciso salientar que essas caldeiras foram adaptadas para a queima de madeira e a segunda caldeira estava acoplada a um gerador de fluido térmico com capacidade de $1,2 \times 10^6$ Kcal/h.

Durante a amostragem (1 h.), foi pesada a madeira para a alimentação das caldeiras aonde foram consumidas cerca de 1040 kg de toras de eucalipto. Uma segunda amostragem foi realizada nas mesmas condições de operação, porém o tempo dela foi de 1h e 20 min., sendo consumidos 1388 kg de madeira.

3.2.1.2. Identificação das Coletas

FONTE DE EMISSÃO	TIPO DE POLUENTE	DATA DA COLETA	PERÍODO DA COLETA	IDENTIFICAÇÃO DA COLETA
Caldeira a Lenha	M.P.	12.09.84	10:50-11:50	1. ^a
		14.09.84	10:25-11:45	2. ^a
Caldeira a Lenha	SO ₂	12.09.84	10:50-11:50	1. ^a
		14.09.84	10:25-11:45	2. ^a

3.2.1.3. Resultado das Medições:

TABELA I - TOMADAS DE VELOCIDADE, TEMPERATURA, PRESSÃO E UMIDADE

FONTE DE EMISSÃO	CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE NA CHAMINÉ	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	
		1 ^a	2 ^a
Caldeira a Lenha	Velocidade (m/min)	473,394	464,666
	Vazão (m ³ /min)	314,807	309,003
	Vazão (Nm ³ /min)	157,216	151,955
	Temperatura (°C)	184	192
	Pressão Absoluta (mm Hg)	700	698
	Umidade (%)	14	14

TABELA II - TAXA DE EMISSÃO E CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

FONTE DE EMISSÃO	DETERMINAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	TAXA DE EMISSÃO (kg/h)	CONCENTRAÇÃO
				(mg/Nm ³) (1)
Caldeira a Lenha	Material Particulado	1 ^a	2,19	232,175
		2 ^a	1,78	195,283

(1) Base seca, nas condições normais (0°C e 1 atm.)

TABELA III - FATORES DE EMISSÃO

FONTE DE EMISSÃO	DETERMINAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	FATORES DE EMISSÃO (1)
Caldeira a Lenha	Material Particulado	1. ^a	2,106
		2. ^a	1,282

(1) kg de poluente/t de madeira queimada na caldeira

Com relação a óxidos de enxôfre, informamos que não foram detectados nas duas amostras.

TABELA IV - RESULTADO DA ANÁLISE DO COMBUSTÍVEL

TIPO DE COMBUSTÍVEL	DATA DA COLETA	ENXÔFRE % S	PODER CALORÍFICO SUPERIOR cal/g
Tora de Eucalipto	12.09.84	ND	3.213
Tora de Eucalipto	14.09.84	ND	3.873

3.2.2. Amostragem em Chaminé na "Companhia Suzano de Papel e Celulose"

Os resultados da amostragem da Cia. Suzano, foram retirados dos arquivos da Divisão de Amostragem em Chaminé e servirão para fornecer mais dados sobre emissões de material particulado, pela combustão de madeira

3.2.2.1. Descrição Sobre a Operação da Caldeira:

A amostragem foi realizada na chaminé do sistema de controle de poluentes (multiciclone), instalado para queima de madeira e resíduos florestais em caldeira, cuja capacidade máxima contínua de produção de vapor é 100 t/h, a pressão de 50 kg/cm². Durante o período de amostragens, a caldeira produzia vapor em torno de 85 t/h.

3.2.2.2. Identificação das Coletas:

FONTE DE EMISSÃO	TIPO DE POLUENTE	DATA DA COLETA	PERÍODO DA COLETA	IDENTIFICAÇÃO DA COLETA
Caldeira a Lenha	M.P.	10.07.84	14:00 - 15:30	1 ^a
		12.07.84	11:17 - 12:40	2 ^a

3.2.2.3. Resultado das Medições:

TABELA I - TOMADAS DE VELOCIDADE, TEMPERATURA, PRESSÃO E UMIDADE

FONTE DE EMISSÃO	CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE NA CHAMINÉ (1)	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	
		1 ^a	2 ^a
Caldeira a Lenha	Velocidade (m/min)	595,953	613,323
	Vazão (m ³ /min) (2)	2.798,000	2.879,552
	Vazão (Nm ³ /min) (3)	1.432,711	1.448,406
	Temperatura (°C)	148	151
	Pressão Absoluta (mm Hg)	704	702
	Umidade (%)	14,8	15,4

- (1) Na seção onde estão situados os pontos de coleta
- (2) Nas condições da chaminé
- (3) Nas condições normais - Base seca (0°C e 1 atm).

TABELA II - TAXA DE EMISSÃO E CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

FONTE DE EMISSÃO	DETERMINAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	TAXA DE EMISSÃO (kg/h)	CONCENTRAÇÃO
				(mg/Nm ³) (1)
Caldeira a Lenha	Material Particulado	1. ^a	64,787	745,500
		2. ^a	61,686	717,586

(1) Base seca, nas condições normais (0°C e 1 atm)

TABELA III - FATORES DE EMISSÃO APÓS O EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE POLUENTES (MULTICICLONE)

FONTE DE EMISSÃO	DETERMINAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DAS COLETAS	FATORES DE EMISSÃO (1)
Caldeira a Lenha	Material Particulado	1. ^a	2,817
		2. ^a	2,682

(1) kg de poluente/t de resíduos florestais e madeira queimada na caldeira

4. COMENTÁRIOS

O projeto teve o seu desenvolvimento prejudicado devido às dificuldades verificadas na cessão de instalações industriais para a realização das amostragens, bem como devido as limitações de pessoal e equipamentos da Divisão de Amostragem em Chaminé, que deu prioridade às amostragens das indústrias de Cubatão.

Quanto a padrões de emissão de material particulado para combustíveis, estes ainda não foram definidos pela CETESB, sendo que o assunto é objeto de estudos da Divisão de Fatores e Padrões de Emissão. Portanto, para casos de controle destas fontes, utiliza-se a melhor tecnologia prática disponível.

Para o dióxido de enxofre, definiu-se o nível de 20 kg/t de óleo combustível consumido, com relação à cota de 1981 fornecida pelo CNP. Portanto, neste caso, o combustível lenha é perfeitamente adequado, uma vez que nas análises tanto da lenha como do efluente gasoso não se determinou a presença do enxofre.

Teceremos agora alguns aspectos das amostragens efetuadas na firma "Tintanyl", que podem ter influenciado o resultado dos valores descritos no item 4.2.1.:

- A chaminé serve às duas caldeiras e portanto, os valores encontrados são a somatória da emissão das caldeiras;
- Os produtos de combustão passam por um túnel subterrâneo contendo um reservatório com água, havendo contato apenas superficial;
- Alguns vazamentos existentes antes do início da amostragem foram eliminados porém, durante a primeira amostragem, houve um pequeno escape que foi prontamente reparado;

- O funcionamento das duas caldeiras não é contínuo, nem a alimentação das toras de eucalipto.

No tocante à amostragem efetuada na Companhia Suzano de Papel e Celulose, a sua inclusão no projeto tem caráter meramente ilustrativo e complementar em termos de dados, pois a mesma além de não ter sido acompanhada por técnicos da Gerência de Pesquisas de Ar e Ruído - GPAR, teve apenas o objetivo de determinar o teor de material particulado do efluente gasoso da queima de madeira e resíduo florestal em caldeira.

5. CONCLUSÕES

Apesar de todos os problemas ocorridos e que vieram a prejudicar substancialmente o andamento do projeto, algumas conclusões, embora de caráter preliminar, podem ser consideradas.

A queima de lenha e resíduos florestais em substituição a combustíveis derivados de petróleo com alto teor de enxôfre, praticamente elimina a emissão de óxidos de enxôfre, portanto superando o nível de controle exigido atualmente pela CETESB, qual seja, 80% em peso para o caso de utilização de óleo BPF.

Quanto ao material particulado, a queima de lenha acarreta uma emissão maior que os combustíveis derivados de petróleo. Para o caso do óleo BPF, o fator de emissão é de 6,965 kg/t e para a madeira o fator varia de 2,5 a 7,5 kg/t, de acordo com o "Compilation of Air Pollutant Emission Factors", atualizado até o suplemento 9 de março de 1979. O valor menor da escala no caso da madeira, pode ser adotado para caldeiras bem projetadas e operadas, e com a madeira sem cascas, o que não é o caso da "Tintanyl", cujas caldeiras foram adaptadas e as toras de eucalipto possuem cascas.

Portanto, considerando os fatores acima, a emissão de material particulado deve ser maior para a queima da madeira. Além disso, para produzir-se a mesma quantidade de vapor, o consumo de madeira será bem maior, pois o poder calorífico superior é cerca de 1/3 do óleo BPF e a eficiência da queima é menor.

Com relação aos valores de emissão encontrados nas amostragens efetuadas na "Tintanyl", 2,106 e 1,282 kg de poluentes por tonelada de madeira queimada nas caldeiras, os mesmos são de confiabilidade questionável, pelos motivos já explicados e pelo fato das caldeiras serem adaptadas e não ter operação eficiente, conforme verificado durante as amostragens.

No tocante à Companhia Suzano de Papel e Celulose, os níveis de emissão, 2,817 e 2,682 kg de poluentes por tonelada de resíduos florestais e madeira queimada na caldeira, foram determinados após o equipamento de controle de poluentes não tendo sido determinado a eficiência do sistema.

Considerando as informações dos fabricantes de equipamentos e a experiência da CETESB, no tocante à análise de projetos de controle de poluentes, estimou-se que a eficiência de coleta do sistema de multiciclones é de 84,0%, portanto, admitindo-se esta eficiência, a emissão da caldeira, sem nenhum controle, seria de 17,606 e 16,763 kg/t de resíduos florestais e madeira, respectivamente, portanto aproximadamente, 130% dos fatores apresentados no Compilation of Air Pollutant Emission Factors (14).

Finalizando, seria muito importante continuar o projeto, uma vez que com apenas a amostragem da firma "Tintanyl" não se pode concluir com relação a fatores de emissão e também novos combustíveis como, alcatrão de hulha, gaseificação de pneus, etc., que estão sendo utilizados e devem ser estudados, porém não no ano de 1985, devido aos mesmos mo

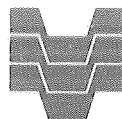
tivos que prejudicaram o andamento do projeto em 1984. Por tanto, recomendamos a sua continuação em anos futuros quando a Divisão de Amostragem em Chaminé puder atender adequadamente às necessidades do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. Assumpção, R.M.V. *Gaseificação e Gaseificadores de Biomassa*. São Paulo, IPT, 1981
02. Castellan, J.L. et alii. Gaseificação da madeira em leito fluidizado. In: Congresso Brasileiro de Energia, 3. Rio de Janeiro, 1984. *Anais III Congresso Brasileiro de Energia*, 1984. p. 263 - 272
03. CETESB, São Paulo. *Estudo preliminar sobre a utilização da madeira como combustível*. Alternativas de Energia e Poluição do Ar. São Paulo, 1981
04. Diniz, V.Y. *Caldeiras a lenha*. CETEC - Séries de Publicações Técnicas. Belo Horizonte, 1983
05. IPT, São Paulo. *Combustão de biomassa*
06. IPT, São Paulo. *Queima de alcatrão vegetal em caldeiras - substituição de óleo combustível e diesel*. São Paulo, 1983
07. ITP, São Paulo. *Substituição de óleo combustível e do diesel em processos de queima em fornalhas e caldeiras*. São Paulo, 1982
08. Lopes, B.D. et alii. Experiência da Copene no campo da biomassa como alternativa energética. In: Congresso Brasileiro de Energia, 3. Rio de Janeiro, 1984. *Anais III Congresso Brasileiro de Energia*, 1984. p. 1668 - 1676
09. Matos, M. et alii. *Característica dos produtos da carbonização da madeira*. CETEC - Séries de Publicações Técnicas. Belo Horizonte, 1983

10. Ministério da Indústria e do Comércio - Secretaria de Tecnologia Industrial, Brasília. *Programa de desenvolvimento do uso racional da madeira e seus derivados - subsídios*. Brasília, 1980
11. Oliveira, J.B. et alii. *Propriedades do carvão vegetal*. CETEC - Séries de Publicações Técnicas. Belo Horizonte, 1983
12. Stiubiener, U. *Um estudo sobre a gaseificação da madeira*. São Paulo. Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica, 1981
13. Sousa Santos, M.L. Modelagem matemática e simulação em computador de gaseificador de leito fixo contracorrente para carvões e biomassa com inclusão de processos de pirólise, secagem e alternativas de processo. In: Congresso Brasileiro de Energia, 3. Rio de Janeiro, 1984. *Anais III Congresso Brasileiro de Energia*, 1984. p. 281 - 292
14. U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Third Edition*. North Carolina, 1977. p. 1.6 - 2

Date:	25.3.86
Ref:	10059
Amount:	
Rate:	1.00
Date:	25.3.86



CETESB

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - Pinheiros
Fone: 210.1100 - Telex (011) 222-46-CTS - BR
CEP 05459 — São Paulo - SP — Brasil