

1200  
E11-1170

SÃO PAULO, 1990



Orientador : PROF. DR. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JR.

Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da USP  
para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica

COMBUSTÃO PULSATIVA DA CASCA DE DENTE

EDNILDO ANDRADE TORRES  
Eng. Mecânico, Escola Politécnica da UFBA, 1981

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor João A. Carvalho Jr. pela dedicação e empenho pessoal prestado durante a realização deste trabalho, além de ter colocado à disposição o Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - LCP - do Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE - de Cachoeira Paulista, para que se realizasse a parte experimental desta pesquisa.

Os agradecimentos são extensivos ao Professor José M. S. Jabardo, da Escola Politécnica da USP, por ter colaborado para que este trabalho fosse realizado.

Também agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CEPED - do Estado da Bahia, a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - e a Secretaria das Minas e Energia do Estado da Bahia - SME.

Estendo os agradecimentos aos técnicos do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE, em especial, aos engenheiros Marco Aurélio Ferreira e Jorge Luiz G. Ferreira, ao técnico em eletrônica José R. Sodero Victório, ao desenhista Antônio G. Comorian. Aos engenheiros Sérgio Catão Aguiar do CEPED, e a Fernando Antonio G. Alcotorado, Coordenador de Energia da SME, pelo empenho e apreço.

Finalmente, aos meus pais, a esposa Sílvia Andrade e aos filhos Felipe e Pedro, pela paciência e amor.

Dedico este trabalho aos  
meus pais, a esposa Sílvia  
aos filhos Felipe e Pedro,  
com carinho e amor.

ALIAN KARDEC

"Não há fé inabalável senão  
aquela que pode encarar a  
razão face a face, em todas  
as épocas da Humanidade".

INDICE

AGRADECIMENTOS..... 11  
LISTA DAS TABELAS..... VIII  
LISTA DAS FIGURAS..... VII  
SIMBOLOGIA..... VIII  
RESUMO..... XI  
ABSTRACT..... XI

1 - INTRODUÇÃO..... 1

2 - O COMBUSTÍVEL..... 11

2.1 A casca de dende  
2.2 Características físico-químicas  
2.3 Disponibilidade da casca de dende - Bahia  
2.4 Avaliação do custo de transporte  
2.5 Respectivas futuras para o dende

3 - A UNIDADE EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS..... 19

3.1 Combustor pulsante  
3.2 Linha de ar de combustão  
3.3 Água de refrigeração  
3.4 Linha de amostragem dos gases de exaustão  
3.5 Sistema de aquisição de dados  
3.6 Curva de calibração do alimentador de combustível  
3.7 Vazão na placa de orifício  
3.8 Teste de distribuição do combustível na grelha  
3.9 Procedimentos de ignição do combustor  
3.10 Procedimentos parada/partida do combustor  
3.11 Avaliação térmica do combustor  
3.11.1 Conservação da massa  
3.11.2 Conservação da energia  
3.11.3 Eficiência de combustão

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 45

- 4.1 Teste típico
- 4.2 Experimentos realizados
- 4.3 Particulado ejetado e os gases de exaustão
- 4.4 Eficiência de combustão
- 4.5 Temperatura dos gases de exaustão
- 4.6 Amplitude das pressões e as frequências geradas
- 4.7 Energia transferida para água de refrigeração
- 4.8 Potência gerada no combustor
- 4.9 Comparação dos parâmetros obtidos em relação aos sis-  
temas de combustão existentes

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 77

APÊNDICE A - Balanço de massa no combustor..... 79

APÊNDICE B - Dendzeiro..... 93

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 105

2.1	Composição físico-química.....	12
2.2	Produção de óleo de dende - BRASIL.....	13
2.3	Disponibilidade da casca de dende - BAHIA.....	14
2.4	Custo de transporte.....	15
3.1	Vazão de combustível com o reator operando a frio.....	30
3.2	Vazão do ar de combustão.....	31
3.3	Distribuição do combustível por quadrante.....	32
3.4	Coefficientes da polinomial.....	42
4.1	Testes realizados para a versão L = 2.400 mm.....	52
4.2	Testes realizados para a versão L = 3.200 mm.....	53
4.3	Percentual da análise das partículas elutriadas.....	55
B.1	Principais países produtores de óleo de dende.....	100
B.2	Importações de óleo de palma efetivamente realizadas.....	102

LISTA DAS TABELAS

1.1	Tubo de Rijke.....	3
1.2	Tubo de Schmidt.....	5
3.1	Combustor pulsativo.....	20
3.2	Fotografia do combustor pulsativo.....	21
3.3	Linha do ar de combustão.....	23
3.4	Linha de amostragem dos gases de exaustão.....	25
3.5	Fotografia do sistema de aquisição de dados.....	28
3.6	Fotografia da linha de ar.....	29
3.7	Esquema de alimentação do combustível.....	33
3.8	Distribuição do percentual em massa na grelha.....	34
3.9	Volume de controle para o balanço de massa no combustor.....	38
3.10	Volume de controle para o balanço de energia no combustor.....	41
4.1	Temperaturas dos gases de exaustão e frequências.....	47
4.2	Temperaturas da água de refrigeração.....	47
4.3	Concentrações dos gases de exaustão e eficiências de combustão.....	48
4.4	Fotografia da amplitude da pressão.....	49
4.5	Amplitudes das pressões.....	49
4.6	Percentual da concentração de CO Grupo I.....	56
4.7	Percentual da concentração de CO Grupo II.....	56
4.8	Percentual da concentração de CO Grupo III.....	57

4.9	Percentual da concentração de CO	Grupo IV	59
4.10	Percentual da concentração de CO	Grupo V	59
4.11	Percentual da concentração de CO	Grupo VI	60
4.12	Eficiências de combustão	Grupo I	63
4.13	Eficiências de combustão	Grupo II	63
4.14	Eficiências de combustão	Grupo III	64
4.15	Eficiências de combustão	Grupo IV	64
4.16	Eficiências de combustão	Grupo V	65
4.17	Eficiências de combustão	Grupo VI	65
4.18	Temperaturas dos gases de exaustão para versão L=2.400 mm		67
4.19	Temperaturas dos gases de exaustão para versão L=3.200 mm		67
4.20	Variação da amplitude das pressões	Grupo I	69
4.21	Variação da amplitude das pressões	Grupo II	69
4.22	Variação da amplitude das pressões	Grupo III	70
4.23	Variação da amplitude das pressões	Grupo IV	70
4.24	Variação da amplitude das pressões	Grupo V	71
4.25	Variação da amplitude das pressões	Grupo VI	71
4.26	Percentuais da taxa de calor transferida para água de refrigeração versão L = 2.400 mm		73
4.27	Percentuais da taxa de calor transferida para água de refrigeração versão L = 3.200 mm		73
4.28	Potências por unidade de área para versão L = 2.400 mm		74
4.29	Potências por unidade de área para versão L = 3.200 mm		75
A.1	Balanco de massa		80
B.1	Balanco de massa para o dende		94
B.2	Fluxograma do processo		96
B.3	Produção mundial e cenários de consumo		101
B.4	Zonamento do dende na Bahia		104

SIMBOLOGIA

- Cp : Calor específico a pressão constante (kJ/kg.K)
- Cp : Calor específico medio a pressão constante (kJ/kg.K)
- Eg : Energia transferida para os gases de exaustão (kJ/h)
- Ea : Energia transferida para a água de refrigeração (kJ/h)
- f : Fração mássica do combustível
- h : Entalpia (kJ/kg)
- L : Comprimento (m)
- m : Vazão mássica (kg/s)



A : Agua  
 Ar : Argônio  
 AR : Ar atmosférico  
 BS : Base seca  
 BU : Base úmida  
 comb : Combustível  
 conv : Convecção  
 C : Carbono  
 CZ : Cinzas  
 C,CO : Carbono convertido em monóxido de carbono  
 C,CO<sub>2</sub> : Carbono convertido em dióxido de carbono  
 C,comb : Carbono presente no combustível  
 C,nc : Carbono não queimado  
 Est : Estequiométrico ou teórico  
 e : Entrada  
 f : Final  
 H : Hidrogênio  
 H<sub>2</sub> : Molécula de hidrogênio  
 H<sub>2</sub>O : Agua  
 k : Espécie química genérica  
 l : Espécie química genérica  
 N : Nitrogênio  
 N<sub>2</sub> : Molécula de nitrogênio  
 o : Oxigênio  
 O<sub>2</sub> : Molécula de oxigênio

### SUBSCRITOS

MM : Massa molecular  
 PA : Peso atômico  
 P : Pressão (mbar)  
 R : Constante universal dos gases (kJ/kg.K)  
 T : Temperatura (K)  
 t : Tempo (s)  
 X : Fração molar dos componentes do ar atmosférico  
 Y : Fração molar dos componentes dos gases de exaustão  
 W : Teor de umidade do combustível (%)  
 Z : Fração molar

- α. Razão ar/combustível normalizada( $\text{mar}/\text{mcomb}$ ) $\text{REAL}/(\text{mar}/\text{mcomb})\text{EST}$
- Δ. Variação de uma grandeza entre dois estados
- η. Eficiência de combustão (%)
- Σ. Somatório
- ρ. Massa específica ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

**SÍMBOLOS GREGOS**

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de investigar experimentalmente as características de queima pulsativa da casca de dendê que é um resíduo agrícola proveniente da extração do óleo de palma. O combustível foi queimado em um combustor pulsativo do tipo Rijke com 200 mm de diâmetro interno, montado nas paredes de L = 2.400 mm e L = 3.200 mm de altura. As paredes do reator foram refrigeradas por uma camisa d'água. A combustão pulsativa da casca se dendê gerou uma potência máxima em torno de 1,9 MW/m<sup>2</sup>. A eficiência de combustão máxima foi de 96 %, obtida para um excesso de ar de 10 %. As frequências no combustor variaram de 63 a 70 Hz na versão de 3.200 mm e de 85 a 90 Hz para a versão de 2.400 mm. A amplitude de pressão acústica dentro do reator atingiu cerca de 40 mbar, o que corresponde a uma intensidade sonora de 165 dB. A máxima percentagem do calor gerado transferido para a água de refrigeração foi de 60 %.

Este trabalho tem o objetivo de investigar experimentalmente as características de queima pulsativa da casca de dendê que é um resíduo agrícola proveniente da extração do óleo de palma. O combustível foi queimado em um combustor pulsativo do tipo Rijke com 200 mm de diâmetro interno, montado nas versões de  $L = 2.400$  mm e  $L = 3.200$  mm de altura. As paredes do reator foram refrigeradas por uma camisa d'água. A combustão pulsativa da casca se dendê gerou uma potência máxima em torno de  $1,9 \text{ MW/m}^2$ . A eficiência de combustão máxima foi de 96 %, obtida para um excesso de ar de 10 %. As frequências no combustor variaram de 63 a 70 Hz na versão de 3.200 mm e de 85 a 90 Hz para a versão de 2.400 mm. A amplitude de pressão acústica dentro do reator atingiu cerca de 40 mbar, o que corresponde a uma intensidade sonora de 165 dB. A máxima percentagem do calor gerado transferido para a água de refrigeração foi de 60 %.

#### RESUMO

The objective of this work is to investigate experimentally the characteristics of "dende" peel pulsating combustion. "Dende" is a fruit of the Brazilian state of Bahia and its peel is available from the process of palm oil extraction.

The fuel was burned in a Rijke type pulsating combustor whose internal diameter was 200 mm. It was mounted in two different lengths: 2.400 mm and 3.200 mm. The wall was refrigerated by a water jacket. The pulsating combustion of "dende" peel produced a maximum power output of  $1.9 \text{ MW/m}^2$ . The maximum combustion efficiency was 96%, which was obtained for an excess of air of 10%. The frequencies ranged between 65 to 70 Hz in the 3.200 mm configuration and between 85 to 90 Hz in the 2.400 mm configuration. The acoustic pressure amplitude inside the combustor achieved a value of 40 mbar, which corresponds to a sound intensity of 165 dB. The maximum percentage of the generated heat transferred to the cooling water was 60%.

#### ABSTRACT

Este trabalho faz parte de um projeto que vem sendo desenvolvido no CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - visando o beneficiamento da cultura do dende no Estado da Bahia, a fim de desenvolver e adaptar tecnologias para extração do óleo e dos derivados do dende .

O Governo do Estado da Bahia, através da Secretaria das Minas e Energia, da Secretaria da Indústria, Comércio e Turismo e da Secretaria de Ciência e Tecnologia, lançou no início do ano de 1990 o projeto PRO-DENDE que prevê o plantio de 50.000 hectares nos próximos dez anos e, de 2000 a 2010, de outros 50.000 hectares da palmeira, colocando o Brasil entre os maiores produtores do mundo.

O processo de extração do óleo de dende divide-se nas seguintes etapas: esterilização, debulhação, digestão, extração de óleo (prensagem) e clarificação. Estas etapas ocorrem tanto no processo industrial de grande porte, ou em unidades menores chamadas de micro usinas, desenvolvidas pelo CEPED. O processo artesanal diferencia-se do industrial apenas no grau de sofisticação dos equipamentos, influenciando decisivamente no rendimento do óleo. Todos os processos têm como subprodutos o coco do dende que, em seguida, será quebrado dando dois produtos: as amêndoas que, depois de prensadas, produzirão o óleo palmiste e a casca, resíduo sólido de grande potencial energético que vem sendo pouco utilizado na geração de energia térmica.

Este trabalho busca avaliar técnica e operacionalmente o uso da casca do dende em combustores pulsativos do tipo Rijke.

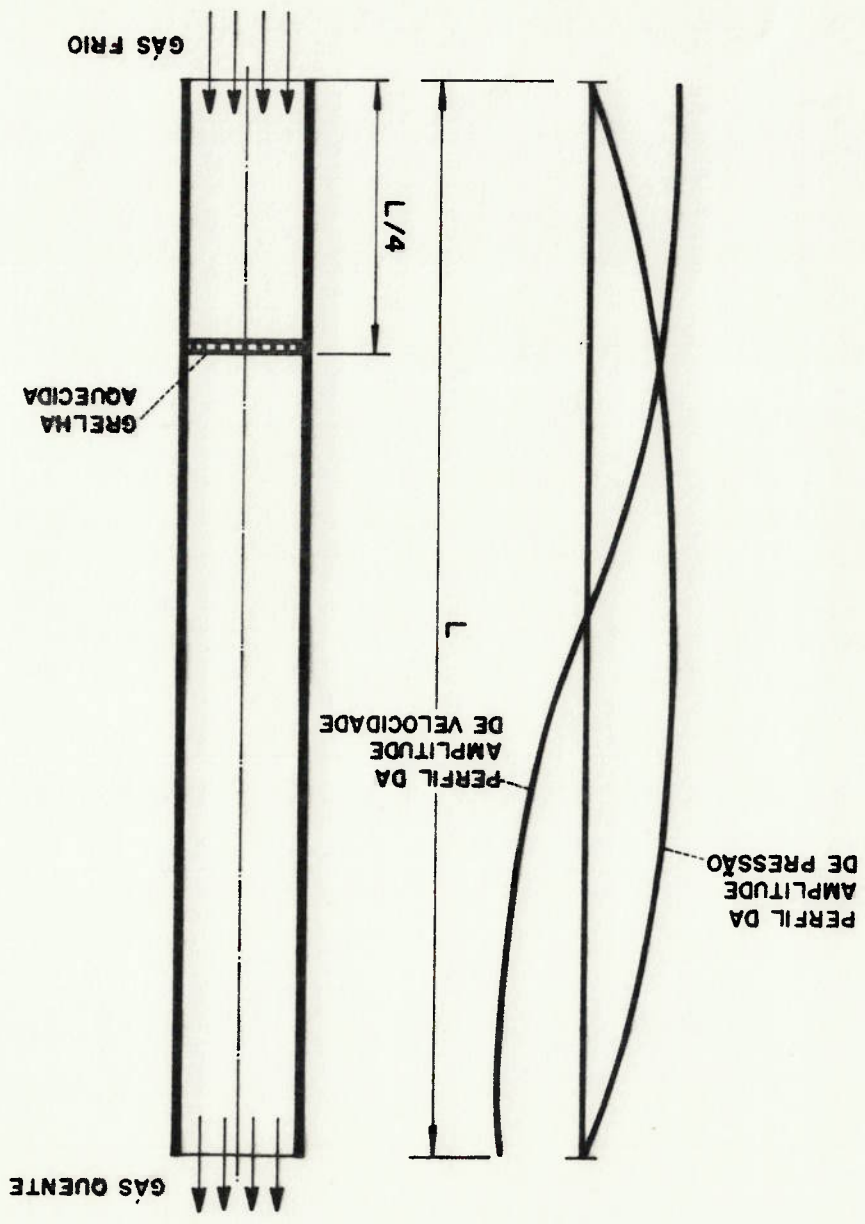
A combustão pulsativa ou oscilatória foi provavelmente observada pela primeira vez por Higgins [1] em 1777 com o fenômeno da "chama sonora" que ocorria quando uma mistura de hidrogênio e ar era queimada em um tubo aberto em ambas as extremidades. Em 1859, Rijke [1,2] observou que as oscilações acústicas eram excitadas espontaneamente quando uma tela metálica aquecida era introduzida na metade inferior de um tubo vertical aberto nas extremidades. Um esquema do experimento original de Rijke é mostrado na figura 1.1.

Um combustor do tipo Rijke [3] é obtido pela substituição da tela metálica original por um leito em combustão. O ar primário percola o combustível e por uma abertura lateral faz-se a ignição. Dependendo do local ao longo do tubo onde se coloca o leito em combustão, ocorre a excitação de ondas acústicas, provocando ruído e vibrações no sistema. A frequência e a amplitude das oscilações geradas dependem da posição da grelha dentro do tubo, das dimensões (comprimento e diâmetro) e das características do processo de combustão (tipo de combustível e razão ar/combustível, etc).

Nas pesquisas realizadas em combustão pulsativa até o presente, a maior ênfase foi dirigida para os combustores pulsativos que queimam combustíveis líquidos ou gasosos utilizando normalmente um tubo de Schmidt. Para a queima de combustíveis sólidos, a maior parte dos trabalhos publicados tem como combustível o carvão mineral.

As primeiras experiências realizadas por Rijke [2] foram em tubos de 1.520 mm de comprimento e 120 mm de diâmetro. Segundo ele a corrente interna de convecção natural ascendente no tubo se expande na região da grelha e se contrai na parte superior do tubo devido à troca de calor das paredes com o ar ambiente, sendo essa a origem das oscilações acústicas no tubo.

figura 1.1 Tubo de Rijke





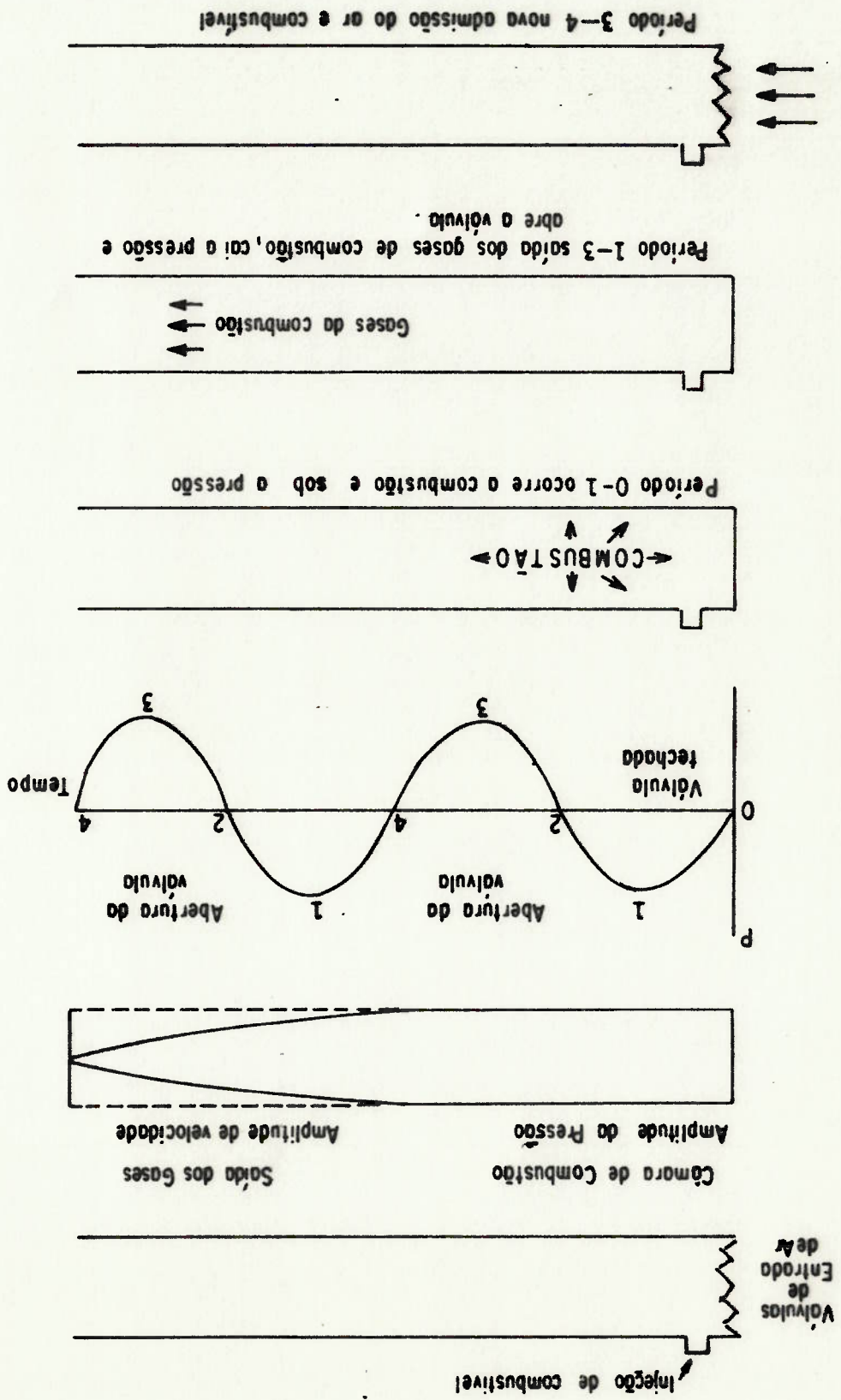
Uma experiência similar foi realizada por Bosscha e Riess [2] usando uma tela metálica restrita na parte superior do tubo e fluxo de ar quente descendente, obtendo o mesmo fenômeno. Não se tem informações na literatura disponível de trabalho subsequente seguindo este caminho.

Por volta de 1930, Schmidt [4] desenvolveu o projeto de uma máquina de propulsão que foi usada para propelir as bombas alemãs VI, lançadas em território Inglês durante a segunda guerra mundial. Um combustor do tipo Schmidt ou de quarto de onda é um tubo aberto em uma extremidade e fechado na outra, como mostra a figura 1.2.

A primeira tentativa para quantificar, em detalhes, o fenômeno que ocorreu no tubo de Rijke foi realizada por Lehmann, em 1937 [5]. Ele admitiu que a energia era adicionada ao ciclo acústico somente quando o ar estava em movimento ascendente, uma vez que as camadas de ar aquecidas não mais extraíam energia no retorno do ciclo oscilante, através da grelha. Lehmann concluiu dizendo que a intensidade do som aumentaria indefinidamente com o incremento do fluxo de ar. Entretanto, esta afirmação não foi confirmada experimentalmente, sendo que os resultados em testes mostravam que a amplitude das oscilações tem um máximo numa dada velocidade de escoamento e decresce para valores maiores ou menores.

Sommers [6] testou uma planta piloto que consumia carvão mineral pulverizado, cuja vazão variava de 1,0 a 2,0 t/h. O tubo era do tipo quarto de onda e o diâmetro 400 mm. O volume da câmara de combustão era de 0,64 m<sup>3</sup> e uma potência gerada por unidade de volume 20,93 MW/m<sup>3</sup> (18 x 10<sup>6</sup> kcal/m<sup>3</sup> h). A superfície de troca era de 6,0 m<sup>2</sup>, a taxa de transferência de calor pela superfície de 0,453 MW/m<sup>2</sup> (3,9x10<sup>5</sup> kcal/m<sup>2</sup> h) e a perda de calor de 0,714 MW/m<sup>2</sup> (1,5 x 10<sup>5</sup> kcal/m<sup>2</sup> h). Durante o processo

figura 1.2 Tubo de Schmitt



de combustão do carvão mineral pulverizado houve dificuldades em manter a chama estável devido ao projeto dos queimadores.

Taylor [7], usando a pesquisa de Sommers como base, desenvolveu um projeto de queima com carvão betuminoso pulverizado em um combustor pulsativo cuja potência estava por volta de  $10,35 \text{ MW/m}^3$  ( $8,9 \times 10^6 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}$ ). No desenvolvimento dos testes verificou-se uma instabilidade na combustão e foi necessário adicionar grandes quantidades de gás de ruá para manter a estabilidade da queima. Severyanin [8], na busca de aperfeiçoamento da tecnologia, desenvolveu um combustor pulsativo em escala industrial, tendo operado o reator com carvão mineral em uma indústria na União Soviética.

Putnam e Dennis [9,10] relatam em uma análise experimental o uso de queimadores pulsativos com diversas configurações: a) uma câmara de mistura e queimador de múltiplo-portal para tubos de combustão abertos em ambas as extremidades; b) similar ao anterior, isto é, com câmara de mistura (combustível e comburente) e queimador de múltiplo-portal com ar secundário bloqueado na entrada; c) similar ao item (b), mas utilizando uma separação do combustível do ar primário provocando a difusão da chama. Os autores testaram queimadores com diversos comprimentos e notaram que as frequências e intensidades do som eram aproximadamente constantes. Em outro artigo [11], os pesquisadores testaram amortecedores sonoros buscando a diminuição do ruído provocado pela queima e exaustão dos gases.

Speich e Putnam [12], usando os conhecimentos acumulados anteriormente, testaram combustores pulsativos onde queimavam combustíveis líquidos e ou gasosos, para aplicação no setor residencial. O trabalho levou cerca de quatro anos para ser concluído e, no final da pesquisa, um equipamento foi colocado no mercado americano. Paralelamente, outros pesquisadores se

dedicavam ao desenvolvimento de combustores pulsativos que operam com combustível sólido. Hanby [13] testou um combustor que consumia aproximadamente 0,0063 kg/s (22,7 kg/h) de carvão mineral, tendo uma taxa de transferência de calor na câmara de combustão de  $8,26 \text{ MW/m}^2$  ( $7,1 \times 10^6 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}$ ).

Carvalho [14] desenvolveu e operou um combustor pulsativo do tipo Rijke para queimar carvão mineral em um tubo de 140 mm de diâmetro e 2.740 mm comprimento, trocando calor com o ar ambiente. A vazão mássica testada variou entre 0,0005 a 0,00166 kg/s (30 a 100 g/min) e a taxa de transferência de calor média foi de 2,79  $\text{MW/m}^2$  ( $2,4 \times 10^6 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}$ ). A eficiência máxima de combustão foi de 99% para o excesso de ar variando entre zero e 13%. Foi demonstrado que a taxa de transferência de calor e a pressão não necessitam estar em fase desde que ocorra a transferência líquida de calor para a massa gasosa ao longo de cada ciclo de oscilação.

Wang [15] testou o combustor descrito anteriormente usando outro tipo de carvão mineral e conseguiu eficiência máxima de combustão de até 99% com o excesso de ar variando de zero a 10%. O pesquisador testou a hipótese de Carvalho confirmando que a diferença de fase ocorre.

Ferreira [16] testou um combustor do tipo Rijke, com diâmetro de 200 mm e comprimentos de 2.400 e 3.200 mm, queimando carvão vegetal com granulometria de 2,0 a 4,0 mm. As frequências se situaram entre 70 e 90 Hz e a potência máxima desenvolvida foi de  $1,7 \text{ MW/m}^2$ . Para as condições dos testes, a queima foi estável durante vários minutos da experiência. No entanto, devido ao acúmulo de combustível na grelha, o nível das pulsações decaía com o tempo. A metodologia de cálculo usada por Ferreira é similar aos procedimentos de Carvalho.

Várias modelagens foram propostas para combustores pulsativos. Ainda na década de 50, Chu [17] fez uma modelagem usando como

argumento principal que as oscilações do escoamento eram originadas na fonte de energia e obteve a formulação matemática do critério de Rayleigh [2] a partir das equações de conservação. Maling [18] fez uma simulação simplificada do tubo de Rijke, partindo da equação da onda unidimensional e mais o termo de fonte de calor. Afirma o pesquisador que há uma dependência do início das oscilações com a velocidade média da corrente gasosa através do tubo. A simulação foi realizada para três diferentes valores de potência, 1.290 W, 1.100 W e 930 W, e os resultados obtidos estão de acordo com os parâmetros experimentais quando ocorrem velocidades da ordem de 0,91, 0,87 e 0,84 m/s, respectivamente. Entretanto, o modelo não é satisfatório para valores com velocidades menores da corrente gasosa.

Jones [19] modelou o tubo de Rijke diferentemente dos trabalhos existentes até então. Ele demonstra que o mecanismo gerado das instabilidades está subordinado à dinâmica da combustão numa pequena zona de reação, considerada, para efeito de modelagem, como tendo espessura nula, não dependendo diretamente de um escoamento secundário, tal como a corrente de convecção proposta em modelos anteriores. O autor não verificou experimentalmente a modelagem.

Couto [20] usando a formulação proposta por Jones sem, contudo, usar a hipótese de espessura nula da zona de combustão, desenvolveu uma modelagem que foi verificada por experimentação. Couto foi o primeiro autor a estudar o fenômeno da combustão pulsativa de combustíveis líquidos nebulizados em tubo de Rijke. A combustão pulsativa apresenta algumas vantagens sobre as características da combustão tradicional e, dentre elas, podem ser citadas: eficiência de combustão elevada [3,4,6,13,14,15], baixa formação de CO e NOx [15], aumento da taxa convectiva de transferência de calor para tubo de Schmidt [5,6,14,15], aumento

da eficiência térmica [3,14,15], elevada geração de potência/m<sup>3</sup> do combustor [3,5,14,15], capacidade de auto-aspiração para pequenas taxas de alimentação de combustível [3,4] e queima de resíduos sólidos de variada granulometria [14,15,16].

A combustão de sólidos tem evoluído ao longo dos anos passando de equipamentos rudimentares, no passado, a sistemas sofisticados controlados atualmente por computadores. Genericamente as fornalhas foram desenvolvidas para combustíveis pulverizados ou não pulverizados, sendo os mais comuns o carvão mineral e madeira. No entanto, apesar do crescimento tecnológico, o excesso de ar de combustão em equipamentos que queimam combustíveis sólidos situa-se na faixa de 20 a 40%, provocando uma diminuição no rendimento do equipamento. Os combustores de leito fluidizado são o resultado de um esforço para aumentar a eficiência combustão em relação aos sistemas de grelha, mas outras dificuldades têm aparecido tais como: sinterização das cinzas, alimentação do combustível, manutenção da fluidização e limitação da granulometria do combustível. O combustor pulsativo é uma contribuição tecnológica em desenvolvimento para a queima de combustíveis sólidos e de outros tipos, na tentativa de melhorar a eficiência do sistema, reduzindo o excesso de ar e queimando combustíveis de variada granulometria. Apesar das vantagens dos combustores pulsativos, eles apresentam como desvantagens o ruído e a vibração da estrutura. Porém, estas dificuldades são resolvidas com o dimensionamento adequado para cada caso.

O sistema proposto consta de um reator que é constituído por uma câmara de desacoplamento, um tubo vertical como câmara de combustão, uma camisa de água de refrigeração, uma câmara de retenção dos particulados elutriados, um sistema de alimentação de ar e de combustível. O comprimento do reator é regulável nas cotas 2.400 mm e 3.200 mm. O objetivo é investigar

experimentalmente as características de queima da casca de dende  
em um combustor pulsativo do tipo Rijke e analisar a eficiência de  
combustão, potência do reator, amplitude de pressão, excesso de  
ar e taxa de transferência de calor para a água e os gases.

óleo de palma, em substituição à lenha, desde que haja um combustível alternativo para a indústria de processamento de calorífico e um baixo teor de cinzas, qualificando o resíduo como dende assim como os outros resíduos, tem um grande poder

Análise realizada em laboratório constatou que a casca de com conseqüente diminuição da temperatura na zona de combustão casca de dende na grelha impedindo a percolação do ar de combustão diminuição da eficiência dava-se notadamente pelo acúmulo das mas qualificada pela queda da pressão do vapor. Observou-se que a maior proporção havia uma queda do rendimento, não quantificada, de processo. Notou-se que quando a unidade utilizava a casca em fornalha para queimar juntamente com a lenha para geração do vapor identificou-se que uma parte das cascas é às vezes colocada na Em visitas a unidades industriais de processamento de óleo, óleo, é um resíduo sólido que não tem uma utilização industrial. A casca de dende subproduto proveniente do beneficiamento do

farmacologia na produção de vitamina A a partir do caroteno. de soja. Na siderurgia é empregado na laminação de chapas, na resulta em um óleo de mesa, substituindo o já tradicional óleo Discritos, maioneses, etc. Depois de refinado e desodorificado, produção mundial de óleo de palma para fabricação de margarinas, industriais. A indústria alimentícia processa a maior parte da matéria prima utilizada em grande escala por importantes setores O óleo de palma, extraído da polpa do fruto da palmeira, é

2.1 A casca de dende



investimentos dos empresários do setor na modernização dos sistemas de geração de vapor.

## 2.2 Características físico-químicas

As características físico-químicas da casca de dende foram quantificadas em dois laboratórios, como pode ser visto na tabela 2.1. Adotaram-se, para efeito de cálculo, os parâmetros fornecidos pela CIENTEC - Fundação Centro Tecnológico do Rio Grande do Sul.

Tabela 2.1 - Composição físico-química

Resíduos de Dende		Elementos			
	Casca de dende (1)	Fibra da bucha (1)	Fibra do cacho (1)	Casca de dende (2)	
Carbono fixo %	52,0	47,4	43,2	53,7	
Hidrogênio %	5,9	5,9	5,6	4,5	
Oxigênio %	40,8	36,5	39,5	39,5	
Nitrogênio %	0,2	0,8	-	0,4	
Umidade	19,0	40,0	64,0	9,9	
Cinzas	1,1	9,4	11,1	2,2	
PCS (Cal/g)	4.315	4.303	3.727	4.195	
PCI (Cal/g)	3.882	-	-	3.893	

Fontes (21,22)

(1) Laboratório do CEPED

(2) Laboratório de CIENTEC valores adotado no trabalho

## 2.3 Disponibilidade da casca de dende - Bahia

Não há dados estatísticos sobre a produção de casca de dende no Brasil, pois esse é um resíduo ainda não comercializado. Entretanto, pode-se fazer uma estimativa partindo do balanço de massa apresentado no Anexo B e dos valores da tabela 2.2.

De acordo com o balanço de massa, para a variedade Tenera, 7,9% em massa de cachos será transformada em casca de dende usando este parâmetro, estimar-se-á a disponibilidade de casca de dende na Bahia para os anos de 1980 a 1990, apresentada no tabela 2.3. Neste potencial não foi considerado o crescimento de casca de dende gerado pela implantação do projeto Pró-Dende que prevê a introdução de 100.000 hectares da cultura da palmeira nos próximos 20 anos.

Estes valores são indicativos principalmente porque uma grande parte do dende é da variedade dura e a estimativa considera a variedade tenera. Nota-se que na variedade híbrida há maior produção de óleo e, por isso, menor produção de casca de dende. Portanto, os valores da tabela 2.3 são subestimados.

Fontes: [22,23]  
(1) Estimativa

COMPANHIAS	A N O S										
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989 <sup>(1)</sup>	1990 <sup>(1)</sup>
Oidesa/Ba	3.500	4.519	3.142	3.700	5.000	6.000	8.000	10.000	12.000	12.000	12.000
Pindorama/Ba	-	-	-	-	2.000	2.000	2.000	2.000	3.000	3.000	3.000
Opalma/Ba	5.033	4.728	3.850	4.176	5.000	6.000	8.000	9.000	17.000	18.000	19.000
Denpasa/Pa	6.097	8.142	8.725	9.916	12.000	14.000	17.000	18.000	18.000	18.000	19.000
Codepa/Pa	-	-	-	-	3.000	5.000	8.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Mendes Jr.	-	-	-	-	-	-	5.000	8.000	10.000	13.000	13.000
CRAI	-	-	-	-	-	-	-	3.000	5.000	8.000	10.000
Outras	-	-	-	-	-	-	-	-	3.000	5.000	8.000
TOTAL	14.630	17.389	15.717	17.792	21.900	29.000	42.000	57.000	70.000	78.000	84.000

Tabela 2.2 - Produção de óleo de dende em toneladas - Brasil

## 2.4 Avaliação do custo de transporte

Para quantificar os custos de transporte fez-se consultas às entidades que operam no ramo de transporte de combustíveis via rodoviária. Com isso a parcela relativa a transporte contida no custo total do produto pode ser avaliada.

A Associação Brasileira de Carvão Vegetal - ABRACAVE - entidade que normaliza a comercialização, uso e transporte do carvão vegetal no país, elabora periodicamente tabelas de custo do transporte para cada região. A tabela 2.4 fornece os valores por metro cúbico do carvão por distância percorrida.

Fonte [22]  
(1) Valores estimados pelo balanço de massa e a produção de óleo de dende

ANOS	RESÍDUOS (1)	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	(1) 1988	(1) 1989	(1) 1990
Casca		3.210	3.478	2.630	2.960	4.515	5.267	6.771	7.900	9.029	9.029	9.029
Dende												

Tabela 2.3 - Disponibilidade da casca de dende em toneladas - BAHIA

Tabela 2.4 - Custo de transporte

Distância	Cr\$/m <sup>3</sup> (1)	Cr\$/m <sup>3</sup> (2)
0 - 50	61,0	98,0
51 - 100	83,0	133,40
101 - 150	108,0	173,60
151 - 200	121,0	194,50
201 - 250	137,0	220,20
251 - 300	155,0	249,10
301 - 350	182,0	292,50
351 - 400	194,0	311,80
401 - 450	202,0	324,60
451 - 500	301,0	483,80
501 - 550	307,0	493,40
551 - 600	315,0	506,30
601 - 650	330,0	530,40
651 - 700	337,0	541,60
701 - 750	354,0	568,90
751 - 800	359,0	577,00

1 Custo fornecido pela ABRACAVE maio/90  
 2 Custo calculado para a casca de dende levando-se em  
 conta a massa específica  
 p = 280 kg/m<sup>3</sup> carvão vegetal  
 1,0 m<sup>3</sup> de carvão vegetal = Cr\$ 325,00  
 p = 450 kg/m<sup>3</sup> casca de dende  
 1,00 US\$ = Cr\$ 51,00

No caso do uso da casca de dende o custo de produção é zero,

já que é um resíduo de processo e, por outro lado as distâncias do centro produtor para o centro consumidor são sempre inferiores a 300 km. Além disso, na maioria das vezes, o próprio produtor da casca de dende será o consumidor, uma vez que a unidade industrial necessita de energia térmica para produção de vapor, a qual atualmente é suprida por lenha ou carvão vegetal.

O custo de transporte para a casca de dende foi baseado nos valores fornecidos pela ABRACAVE, corrigidos pela massa específica. Ressalta-se que para o carvão vegetal, além do transporte, agrega-se o custo de produção na avaliação do preço final do combustível.

## 2.5 Respectivas futuras para o dende

O dende na Bahia tem uma conotação peculiar no que diz respeito à preparação dos pratos típicos da culinária baiana. Mas nos anos oitenta, a visão artesanal da produção de óleo com fins culinários começou a ser modificada com a introdução dos grandes plantos para seu emprego industrial.

No início deste ano, o Governo do Estado da Bahia, confiante no grande potencial de desenvolvimento do óleo de palma no mercado nacional e internacional, lançou o projeto Pró-Dende integrando três Secretarias de Estado: Minas e Energia, Indústria, Comércio e Turismo, e de Ciência e Tecnologia.

O projeto prevê a plantação nos próximos dez anos de 50.000 hectares e, no período entre 2000 e 2010, mais 50.000 hectares, colocando o país entre os maiores produtores de óleo de palma.

O projeto fornecerá assistência técnica e linha de crédito especial aos pequenos e médios agricultores. Está prevista a instalação de 120 micro usinas com capacidade de processar 1,0 t/h de cachos e 5 unidades de 30 t/h de cachos. Estão também previstos a extração de óleo palmiste, bem como o aproveitamento de seus subprodutos para fins energéticos.

Na Amazônia, notadamente no Pará, é onde se concentram os grandes projetos agroindustriais, sendo que cerca de 30.000 hectares estão em fase de produção, destacando-se o Grupo Real através da Cia Agroindustrial - CRAI - que já aplicou aproximadamente 100 milhões de dólares em seu projeto. No Brasil estima-se uma área plantada com a palmeira de 48.500 hectares, sendo 30.000 hectares no Pará, 13.000 na Bahia, 4.000 no Amapá e 1.500 no Amazonas.

O óleo de palma, extraído da polpa do fruto e o óleo palmiste retirado da amêndoa são matérias-primas utilizadas por grandes segmentos industriais.

Na alimentação, o óleo de dendê pode ser usado na fabricação de margarinas com uma vantagem sobre o óleo de soja, pois não necessita de hidrogenação.

Como combustível, a Comissão para produção da Javouira cacaueteira - CEPLAC - testou o óleo de dendê adicionado a 15 % de álcool e operou veículos configurados com motores do ciclo diesel por cerca de 80.000 Km. Encontra-se em fase de testes na Universidade Federal da Bahia - UFBA - um motor marca Agrale com 4,91 kW ( 6,5 cv ), ciclo diesel, operando com óleo de dendê na forma "in natura", apenas sendo filtrado para eliminar as partículas sólidas em suspensão . As curvas de potência obtidas para as diferentes rotações, com o motor operando com óleo de dendê são similares às curvas fornecidas pelo fabricante quando operado com óleo diesel [24].

O dendê poderá ser uma opção de reflorestamento para a Amazônia nas áreas já desmatadas, trazendo para região as condições endoclimáticas similares à original, portanto, uma cultura energética e ecológica.

Cita-se também a contribuição que a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA - prestou à comunidade ao desenvolver recentemente uma espécie híbrida de alta produtividade e grande resistência a doenças, como resultado do cruzamento do dendê africano com o catanenativo da Amazônia.

Portanto, investir na cultura da palmeira é proporcionar a geração de novos empregos, a produção de óleo de palma e palmiste para uso no setor alimentício, cosmético, saboaria, saboneteria, farmacêutico, siderúrgico, químico, etc, e a produção das fibras para o setor de celulose e as cascas de dendê para a geração de

energia térmica, obtendo um aproveitamento integral do fruto da planta.

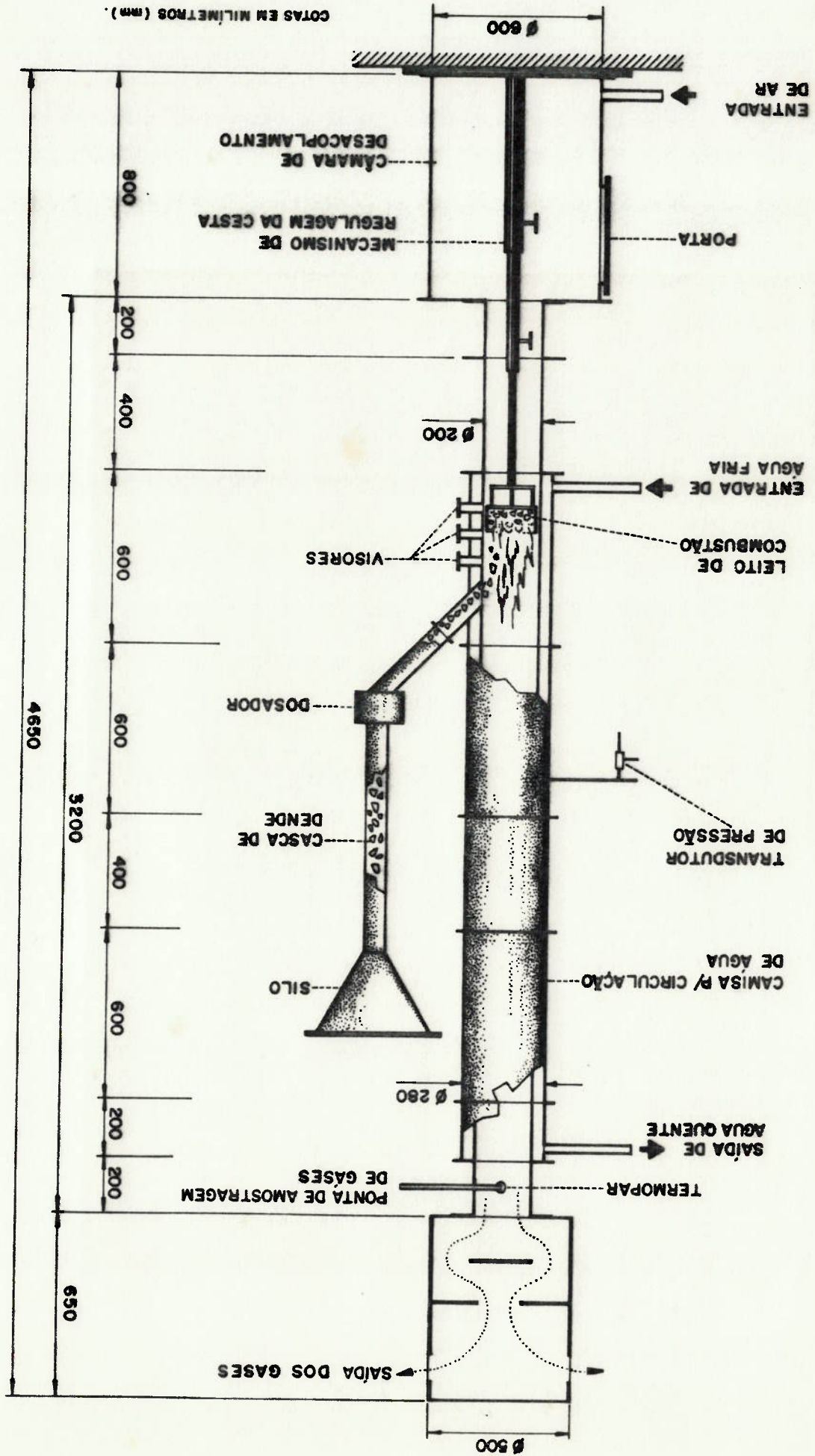
3.1 O combustor pulsativo

Para a execução dos testes, usou-se o combustor pulsativo desenvolvido no INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais - em Cachoeira Paulista. O combustor, mostrado nas figuras 3.1 e 3.2 é constituído basicamente de um tubo vertical contendo em sua extremidade inferior uma câmara de desacoplamento acústico e em sua extremidade superior uma câmara de retenção de particulados. O comprimento do combustor é regulável nas alturas, 2.400 mm e 3.200 mm, composto de módulos de 100 mm, 200 mm, 400 mm e 600 mm. Os módulos por onde circulam os gases quentes são encamisados, para a passagem da água de refrigeração. O diâmetro interno é de 200 mm. A câmara de desacoplamento, com 600 mm de diâmetro e 800 mm de altura, que tem a finalidade de reduzir as velocidades e pressões, simula condições de um tubo aberto em ambas as extremidades. Na câmara, existe uma porta de visita para manuseio da grelha e limpeza das cinzas.

O módulo de alimentação do combustível possui uma entrada em ângulo com um pescoco de 80 mm de diâmetro interno, flangeado, sobre o qual é montado o motor do alimentador. A grelha foi colocada a um quarto da altura total. A grelha foi construída com tela de aço inoxidável cujo arame possui diâmetro de 0,81 mm e abertura de 1,81 mm. A tela é presa a um anel de aço carbono que serve para dar rigidez a estrutura da grelha. A grelha é montada sobre um sistema de tubos concêntricos, de forma telescópica, possibilitando seu deslocamento no interior do tubo.



figura 3.1 Combustor pulsativo



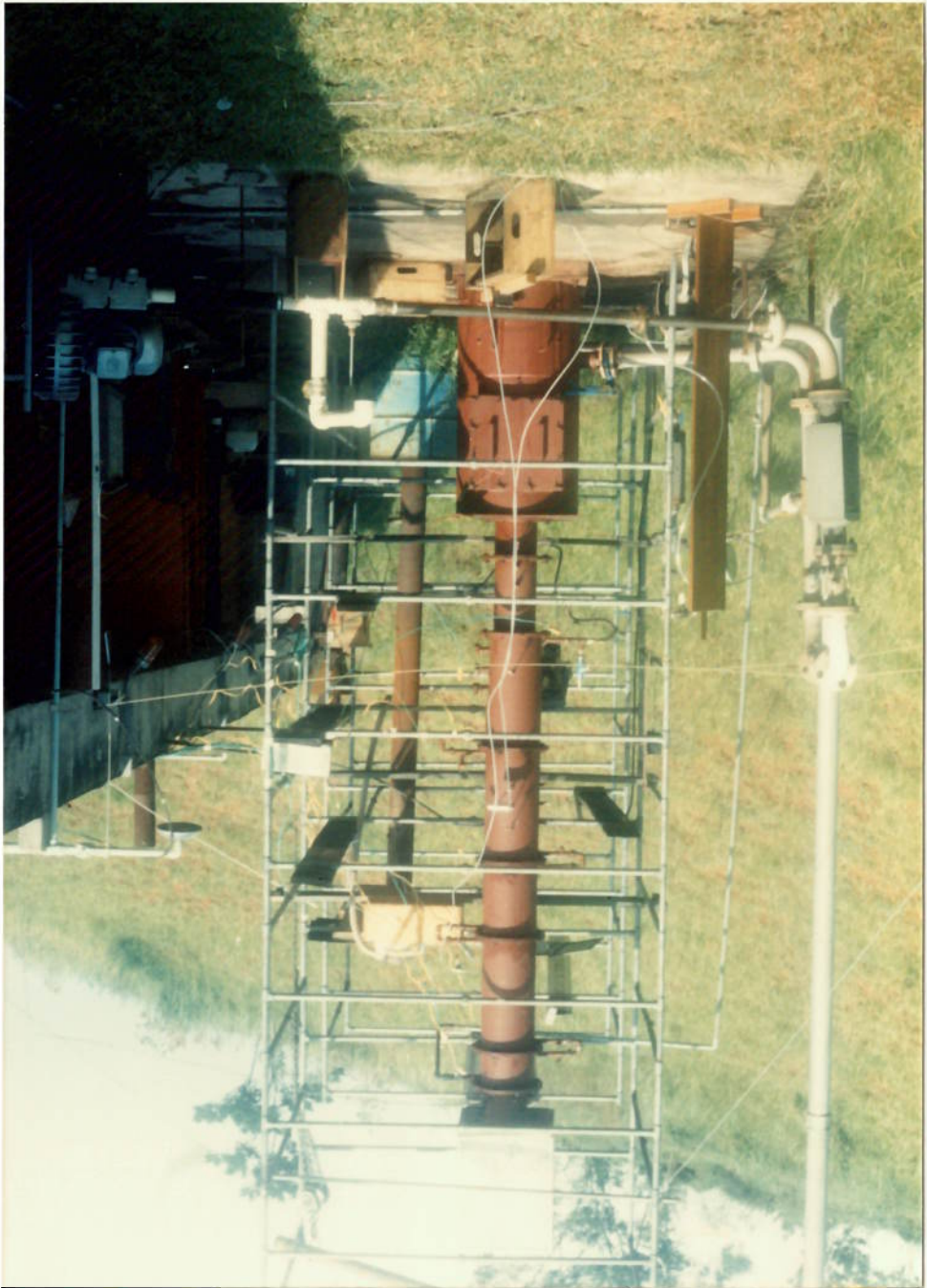


figura 3.2 Fotografia do combustor pulsativo

A linha de ar de combustão é mostrada na figura 3.3. O ar de combustão é fornecido por um compressor radial, marca IBRAM modelo CR-8 com vazão volumétrica de até 9,0 Nm<sup>3</sup>/min. O ar escoa por uma tubulação de cobre com 44 mm de diâmetro interno. Na linha existe uma derivação com uma válvula que permite a regulação da vazão do ar que segue para o combustor. Para a medição da vazão, instalou-se uma placa de orifício de 17,76 mm de diâmetro interno, com tomada de pressão no tubo. Para as leituras das pressões dinâmicas, instalou-se um manômetro de coluna em U permitindo medir até 1.300 mm H<sub>2</sub>O. Para a leitura da pressão estática, utilizou-se um manômetro tipo Bourdon, com tomada de pressão antes da placa de orifício. A medição da temperatura do

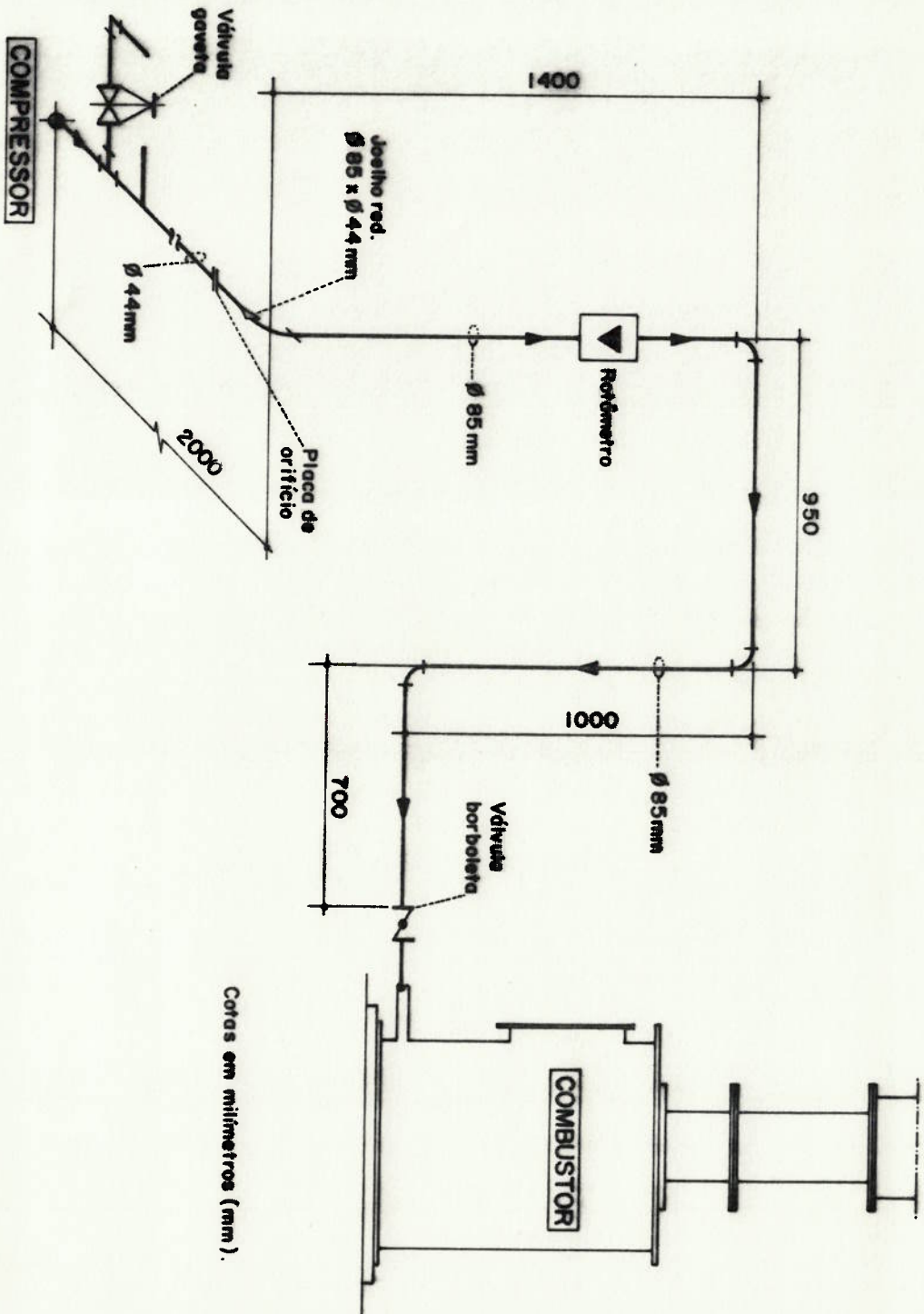
### 3.2 Linha de ar de combustão

Na parte superior do combustor instalou-se uma câmara para recolhimento dos particulados eutriados pela corrente gasosa. para visualização do nível do combustível.

Acima do rotor colocou-se um silo de armazenagem de combustível, tendo na lateral um visor de acrílico transparente de aço. Lá onde é depositada nestes canais e o excesso é retirado por uma de comprimento, formando canais, dispostos a 180°. A casca do rotor é constituído de um cilindro de aço carbono, com 100 mm de diâmetro e abertura 31 mm de largura, 12 mm de altura e 38 mm de comprimento. O rotor é constituído de um par de polias e correia V.

O alimentador é constituído de um motor elétrico, com potência de 246 W (0,33 hp), acoplado a um variador de velocidade marca ASTEM, possibilitando a regulação de 1 a 13 rpm. O motor aciona o alimentador por um par de polias e correia V.

Observação da grelha com o material em combustão. No módulo de alimentação existem três visores circulares de 50 mm de diâmetro, cada um, disposto de tal maneira a permitir a



Coras em milímetros (mm).

figura 3.3 Linha do ar de combustão

Um esquema da linha de amostragem dos gases de exaustão é mostrado na figura 3.4. Os gases são coletados a 100 mm do topo do combustor por uma ponta de prova de aço inoxidável com 13 mm de diâmetro nominal e 80 mm de comprimento. Ao longo do comprimento existem furos axiais revestidos por uma tela metálica de 100 mesh de malha por onde passam os gases. Os gases são aspirados continuamente, escoando por uma tubulação de 6,0 mm de diâmetro interno. A aspiração é feita por uma bomba de vácuo, existindo um filtro para coleta de particulados sólidos de no mínimo 2 microns para a proteção da bomba. Depois deste filtro, os gases passam por um banho de gelo e em seguida por um filtro separador de umidade e particulados. A seguir, os gases passam pela bomba de vácuo marca KNF NEUBERGER, modelo VDE 0530, com capacidade de

### 3.4 Linha de amostragem dos gases de exaustão

A circulação da água de refrigeração do combustor é feita por uma bomba centrífuga. A vazão de água é regulada por um conjunto de válvulas e o valor é indicado no rotâmetro, marca OMEI, modelo 26110 de 0 a 50 NL/min. A água circula na camisa d'água removendo calor dos gases de combustão.

### 3.3 Água de refrigeração

ar foi efetuada com um termômetro de mercúrio de 0-100 °C. Utilizou-se um rotâmetro marca OMEI, modelo 26110, de 0 - 4000 NL/min, para servir de indicador durante o processo de ignição. A partir do rotâmetro, a linha foi construída em PVC rígido de 85 mm de diâmetro. Uma válvula borboleta foi instalada junto à câmara de desacoplamento com a finalidade de regular a entrada de ar durante a partida/parada.

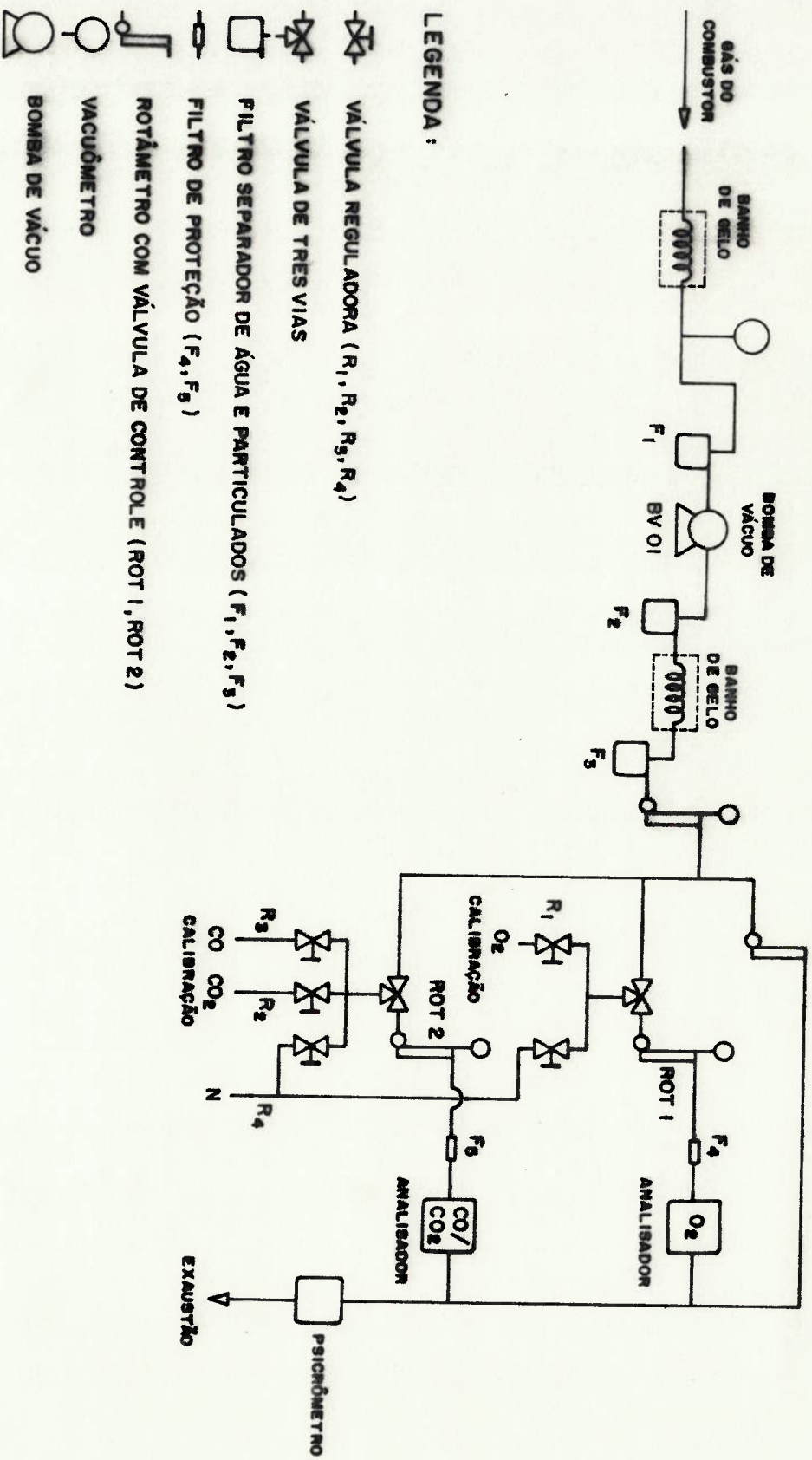


figura 3.4 Linha de amostragem dos gases de exaustão

aspiração de até 10 NL/min. Ao sair, já na linha de pressão, os gases passam pelo segundo filtro separador de umidade e particulados, entrando no segundo banho de gelo, saindo praticamente secos, para serem introduzidos nos analisadores contínuos de gases.

A determinação dos teores em base seca de CO<sub>2</sub> e CO foi realizada por analisador contínuo, marca BRUMARK, modelo AR-BR-412, munido de célula infravermelha, com faixa de operação de 0 a 20 % para CO<sub>2</sub> e 0 a 10 % para CO. O sinal de saída é gerado de 0 a 5 V corrente contínua em escala linear com relação aos respectivos teores. A determinação dos teores de O<sub>2</sub> foi realizada por analisador contínuo marca CUSSENS, modelo P8334, que utiliza sensor paramagnético. O instrumento opera na faixa de 0 a 25 % de O<sub>2</sub>, em volume, com sinais de saída para o sistema de coleta de dados de 0 a 10 V corrente contínua em escala linear aos respectivos teores.

A vazão dos gases amostrados é controlada por meio de um rotametro de 0 a 10 NL/min dotado de válvula de controle de vazão. Os gases, após a análise, são introduzidos em um psicrômetro dotado de termômetro de bulbo seco e bulbo úmido, ambos de bulbos de mercúrio e de 0 a 50 °C.

Os analisadores foram calibrados no início de cada teste, calibrando o ponto zero com nitrogênio e o fim da escala para os respectivos gases. Esta operação foi repetida no final do teste (procedimento de partida/parada descreve esse passo em detalhe).

A primeira calibração foi realizada com misturas padrões de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CO para fim de escala e pontos intermediários. O zero foi feito com nitrogênio para todos os gases. As misturas padrões usadas foram as seguintes: para o O<sub>2</sub>: 9,2 %, 6,06 %, 2,9 %; para

O combustível era depositado no silo e, com a ação do rotor provido de canais, transferia a casca de dende para a grelha. O combustível.

Inicialmente fez-se o levantamento da curva de calibração para a casca do dende com o combustor pulsativo a frio, isto é, sem

### 3.6 Curva de calibração do alimentador de combustível

imprimido a média das leituras efetuadas. O sistema dispunha de uma programação que permitia o acompanhamento dos dados fazendo quatro leituras por minuto e de fita magnética, marca HP, modelo 8261A foram utilizados.

82 9058 e um sistema de aquisição de dados acoplado a um gravador computador marca HP, modelo 75C, uma impressora marca HP, modelo combustível e concentrações dos gases CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e CO. Um micro temperaturas, pressões, velocidade de rotação do alimentador de Foram usados simultaneamente doze canais para medição das consiste de um datalog marca HP, modelo 3421A de dezesseis canais. O sistema de aquisição de dados, usado mostrado na figura 3.5

### 3.5 Sistema de aquisição de dados

$$VJ - VI$$

$$Y = \frac{(YJ - YI) \cdot (V - VI) + YI}{V - VI}$$

Admitindo que os analisadores tenham um comportamento linear entre os pontos calibrados (YI, VI, YJ, VJ), a relação entre a tensão de resposta V, a fração molar Y do gás analisado na exaustão, é dada pela seguinte relação:

o CO<sub>2</sub>: 18,01 %, 11,96 %, 5,96 %; para o CO: 9,2 %, 4,3 %, 0,9 %.



figura 3.5 Fotografia do sistema de aquisição de dados

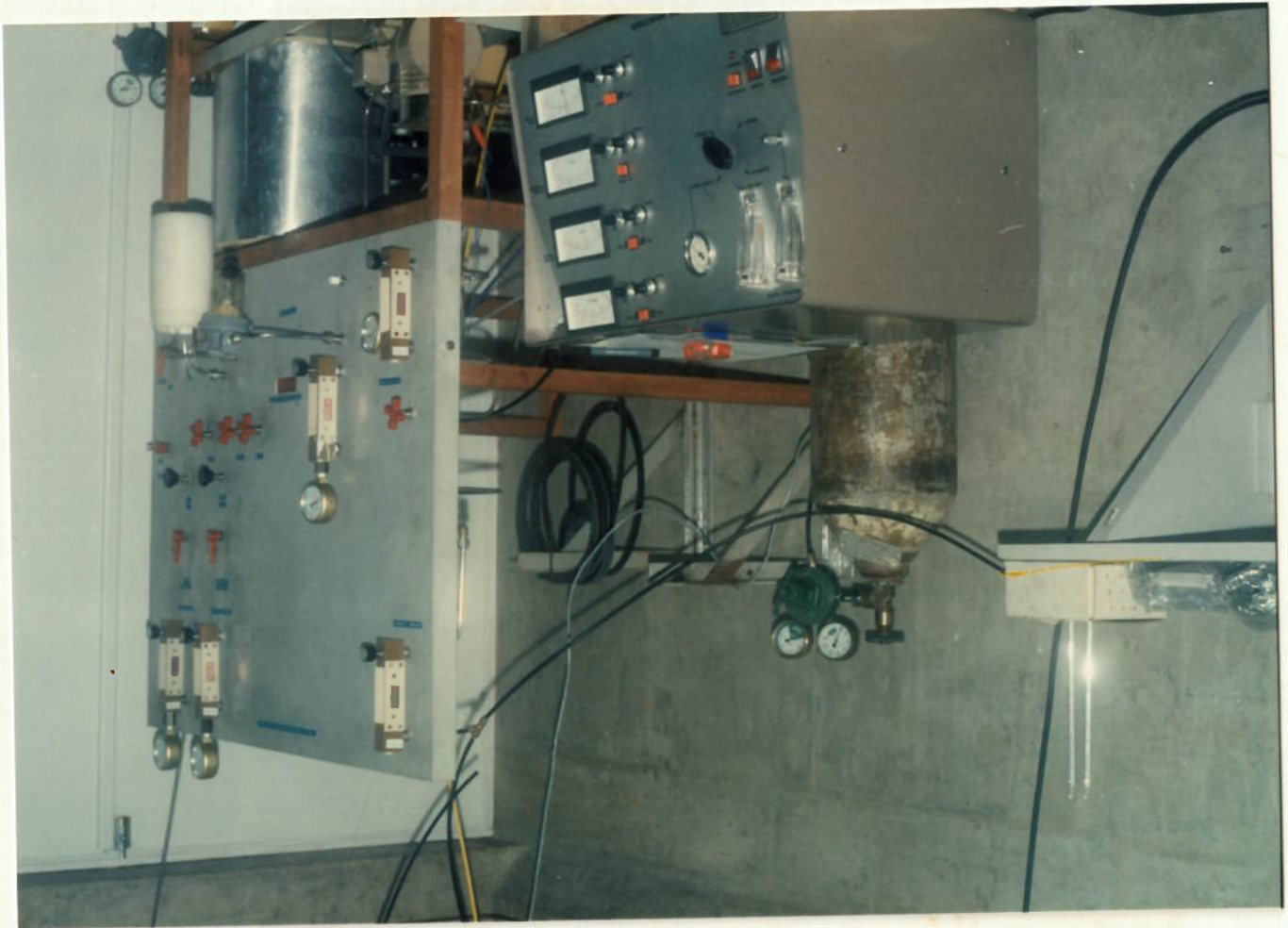
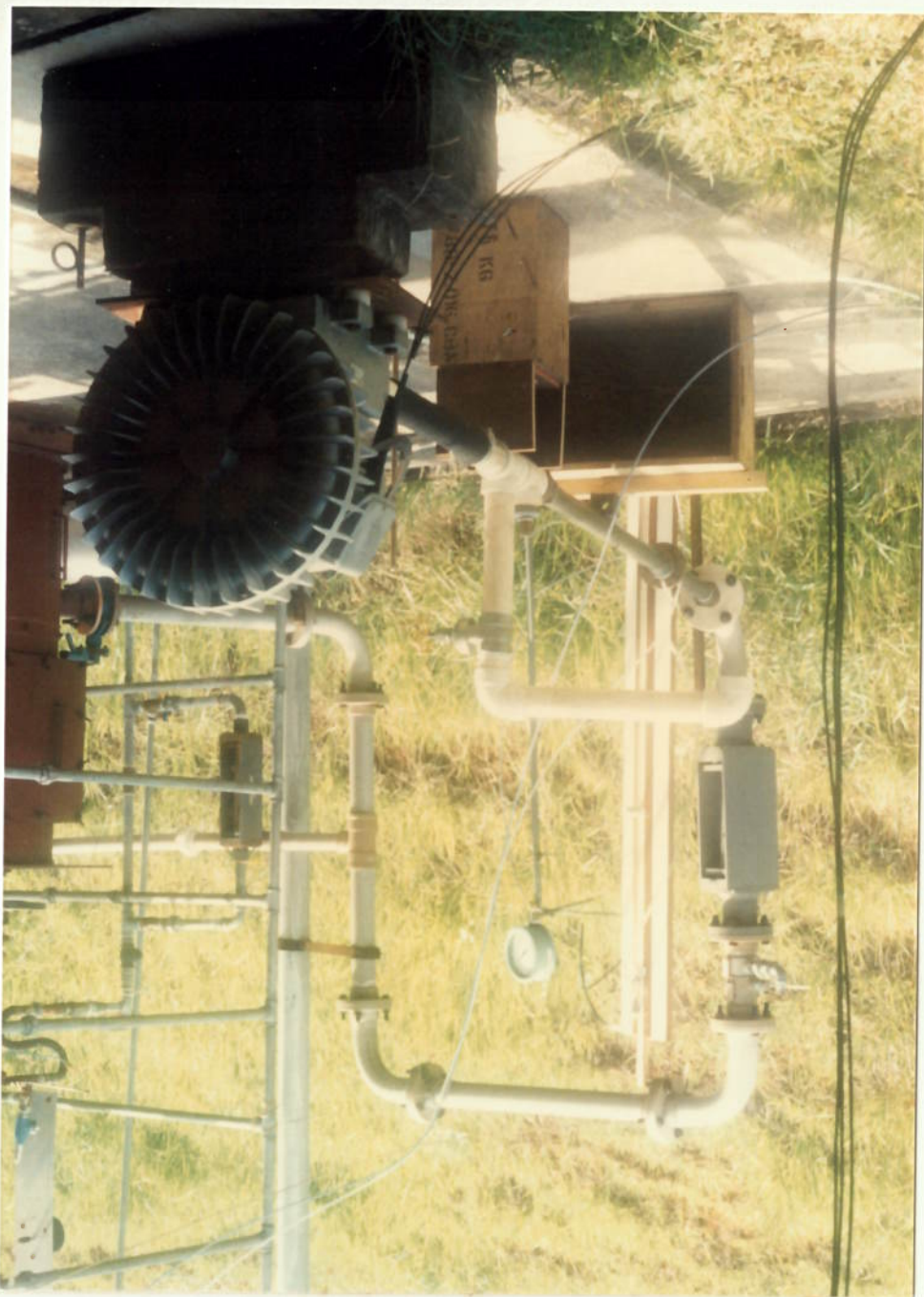


figura 3.6 Fotografia da linha de ar



3.7 Vazão na placa de orifício

A tabela 3.1 mostra, para cada rpm, o tempo do teste e os valores das massas, a média, o desvio padrão e a vazão de combustível. Ressalta-se que esta operação ocorreu com o combustor operando a frio, portanto, sem a influência das vibrações. A vazão do combustível aumenta com o reator operando com o leito em combustão.

TESTES							
rpm	tempo (min)	teste01 (g)	teste02 (g)	teste03 (g)	média	desvio padrão	vazão (g/min)
1	10	-	-	-	-	-	-
2	10	734,5	781,7	781,8	766,0	27,3	76,6
3	10	1033,7	1077,3	1076,2	1062,4	24,8	106,2
4	10	1295,7	1293,1	1318,6	1302,5	14,0	130,2
5	10	1604,3	1650,2	1613,2	1622,2	24,3	162,2
6	10	2004,6	1999,2	1969,6	1991,1	18,8	191,1
7	10	2323,1	2242,2	2327,7	2297,8	48,2	229,8
9	10	2786,3	2654,7	2789,4	2739,8	73,8	274,0

Tabela 3.1 Vazão do combustível com reator operando a frio

procedimento foi o seguinte: inicialmente escolheu-se a rotação do rotor, em seguida depositou-se o combustível no silo. Pela porta de visita da câmara de desacoplamento, colocou-se um reservatório para aparar o combustível. O motor era acionado durante 10 minutos e, posteriormente, o material era recolhido, pesado e, com o tempo cronometrado, determinava-se a vazão de combustível para a rotação escolhida com o reator frio. Em cada regime de rotação, a operação era repetida três vezes, e depois calculava-se a média. Os resultados estão mostrados na tabela 3.1.

Para medição da vazão do ar de combustão, utilizou-se uma placa de orifício com diâmetro interno de 17,76 mm, em aço inoxidável, colocada na linha de acordo com a figura 3.6 seguindo a norma AMCA 210. Na linha colocou-se de um manômetro, marca OML, modelo 112610, que servia como indicador da vazão. A seguir apresenta, na tabela 3.2, os parâmetros levantados e calculados para a vazão de ar.

Tabela 3.2 Vazão do ar de combustão na placa de orifício

$\Delta P$ mmCA	pressão estática mbar	temperatura °C	vazão placa de * orifício (g/min)
264	0,020	45	-
338	0,026	45	668,8
392	0,031	45	815,0
428	0,039	45	853,9
576	0,045	46	986,6
758	0,060	47	1.131,5
986	0,080	49	1.428,8
1.214	0,100	52	1.428,8
1.258	0,104	53	1.450,6

(\*) Valores calculados  
 $P_{atm} = 947$  mbar  
 $T_{amb} = 27$  °C

### 3.8 Teste de distribuição do combustível na grelha

O objetivo deste teste era verificar a distribuição do combustível na grelha, isto é, observar se haveria acúmulo de material em uma determinada região, favorecendo assim, o surgimento de caminhos preferenciais do ar de combustão o que se queria evitar. O reator estava montado na configuração de 2.400 mm de altura. A grelha estava a 600 mm da base. Para executar os testes, foi necessário dividir a grelha com duas lâminas metálicas no formato de cruz, dispostas a 90°.

formando quatro quadrantes de mesma área, numerados no sentido anti-horário, conforme mostra a figura 3.7. A rotação escolhida foi de 4,0 rpm, por se encontrar aproximadamente na parte intermediária da curva. As partículas, ao serem empurradas pelo rotor, descrevem uma curva parabólica e, portanto, a altura da grelha modificaria a distribuição do combustível conforme mostra a figura 3.8. Para verificar esta conjectura, escolheu-se as alturas da grelha de: 600 mm, 550 mm e 650 mm. O tempo de operação do alimentador foi de 2,0 min.

Para as alturas de 600 mm e 650 mm, o teste foi repetido três vezes e para a altura de 550 mm apenas duas, isto porque os valores de distribuição das massas de cada quadrante mostraram não ser necessário a realização de demais provas adicionais, devido às disparidades constatadas. O melhor resultado foi para a altura de 600 mm, onde verificou-se a melhor distribuição das massas nos quadrantes. Conforme se pode observar na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Distribuição de combustível por quadrante

Quadrantes	(g)	L = 600 mm				L = 650 mm				L = 550 mm					
		1	2	3	Média	%	1	2	3	Média	%	1	2	Média	%
m <sub>1</sub>	1	64,9	55,0	57,8	59,2	21,0	75,0	106,7	122,5	101,4	32,0	34,4	30,5	32,5	10,5
m <sub>2</sub>	2	92,6	108	94,3	98,3	35,0	171,4	188,5	148,1	169,3	53,0	41,1	38,2	39,7	12,8
m <sub>3</sub>	3	68,9	47,8	64,3	60,3	22,0	36,2	20,3	15,3	23,9	8,0	132,5	140,4	136,5	43,9
m <sub>4</sub>	4	76,7	42,7	60,5	59,9	22,0	27,0	19,7	15,4	20,7	7,0	101,2	106,2	103,7	33,4
TOTAL		303,1	251,6	276,4	277,0	-	309,7	335,2	301,9	315,6	-	309,2	315,3	310,8	-

3.9 Procedimentos de ignição do combustor

figura 3.7 Esquema de alimentação do combustível

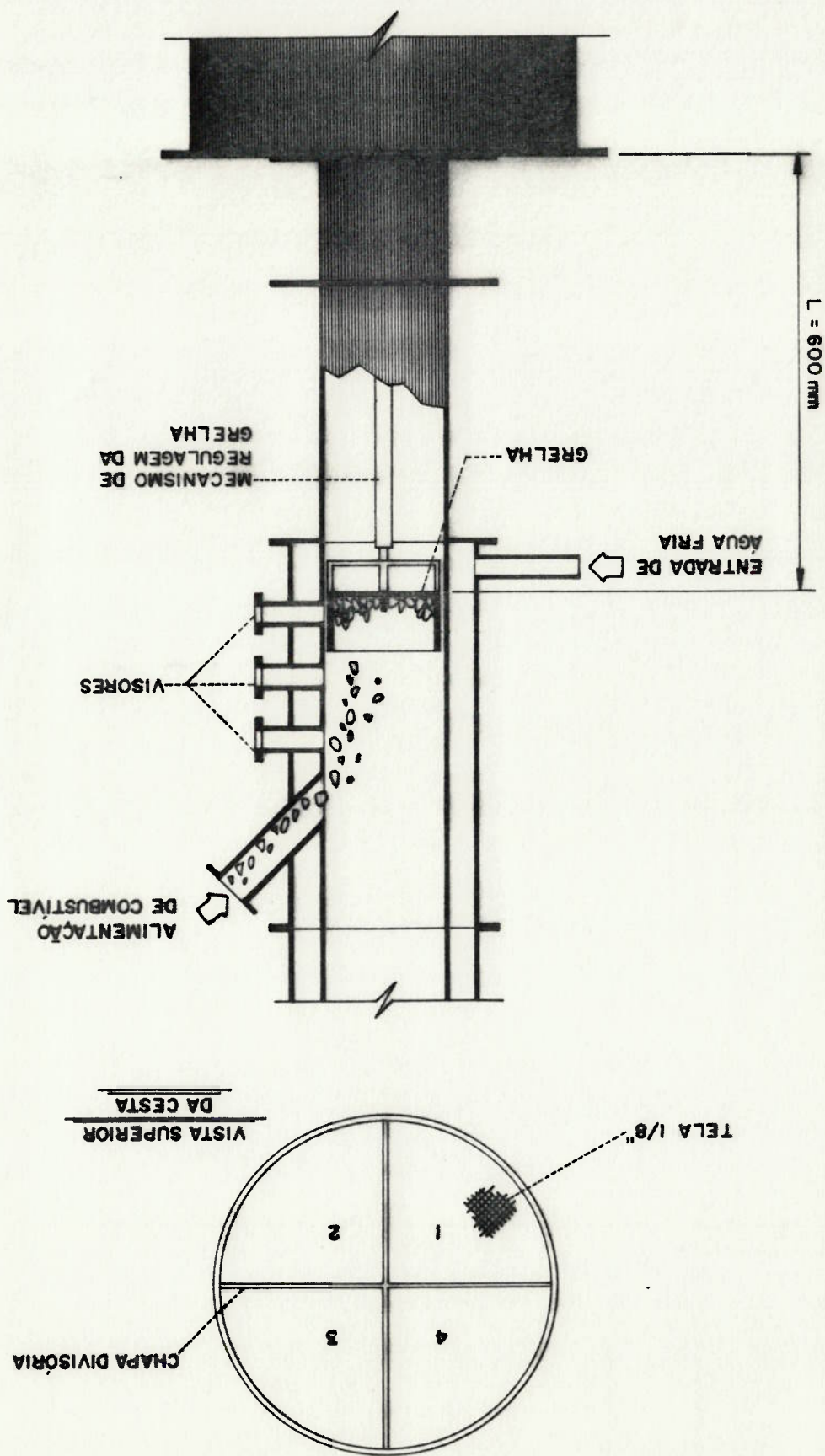
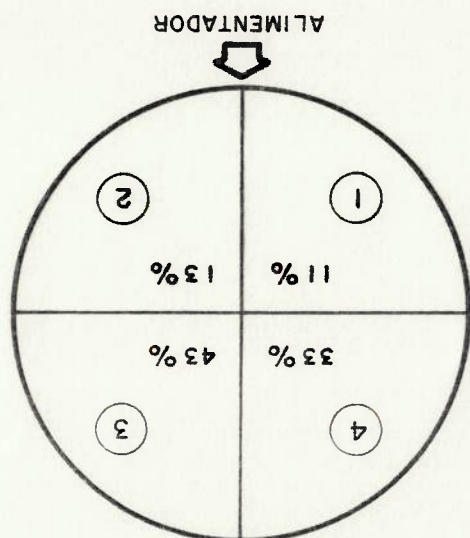
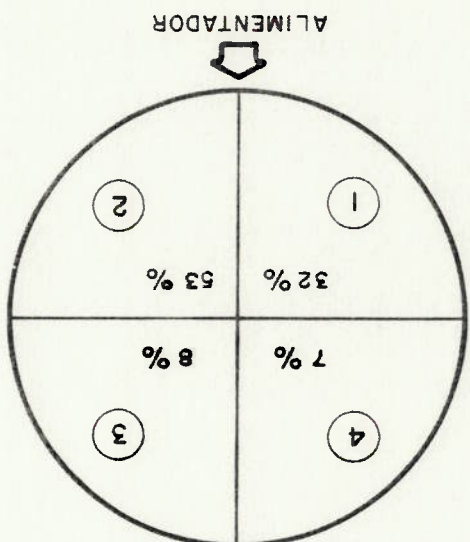


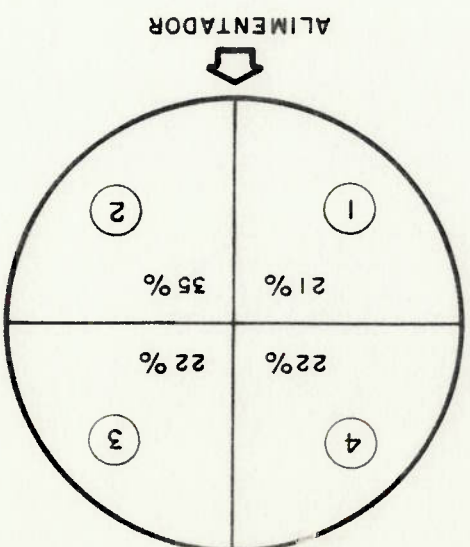
figura 3.8 Distribuição do percentual em massa na grelha



tempo = 2 min.  
L = 550 mm  
M = 159 g/min.  
4,0 rpm



tempo = 2 min.  
L = 650 mm  
M = 157 g/min.  
4,0 rpm



tempo = 2 min.  
L = 600 mm  
M = 138 g/min.  
4,0 rpm

### 3.10 Procedimentos de partida / parada do combustor

similar aquele de um leito fluidizante.

caiam novamente retornando para a grelha, iniciando um movimento nucleos até uma determinada altura. Esses nucleos, em seguida, atingiam um determinado diametro e o ar, ao passar, arrastava os entre o quinto e o sexto minuto, quando os nucleos do combustivel alimentação do combustivel ( casca de dende ) era no intervalo De acordo com as observações, o melhor ponto para começar a

máximo depois do quinto ou sexto minuto.

iniciava-se o fenômeno da instabilidade acustica, atingindo um primeiros tres minutos não havia oscilação e a partir deste ponto Executaram-se os testes variando sempre a vazão de ar. Nos se a vazão do ar.

Antes de despejar combustivel, ligava-se o compressor e fixava-

repetido durante todo o experimento.

embebido em álcool, acendia-se o combustor. Este procedimento foi com um pedaco de arame tendo uma bucha amarrada na ponta (tucho), combustivel sobre a grelha. O visor lateral era, então, aberto e e pela parte superior do combustor, despejava-se o material e o Em seguida, pesava-se 900 g de combustivel (álcool + madeira),

houvesse a saturação.

embebidos no álcool de um dia para o outro, de tal forma que Cubos de madeira de (2,0x2,0x2,0)x10<sup>-2</sup>m foram deixados embebimento da madeira com o álcool foi o seguinte:

revelou-se como a melhor opção. Assim, o procedimento para o testado havia sido embebido em álcool, até a saturação. A madeira de dende Em todos os casos, o combustivel iniciador a ser ignição do combustor, usando o carvão vegetal, madeira e a casca Para iniciar-se o processo de combustão testou-se o processo de



Para calibração dos instrumentos adotaram-se os seguintes procedimentos:

1. limpeza dos filtros separadores e de proteção F1, F2, F3, F4

e F5; (Vide figura 3.9)

2. colocação do gelo nas serpentinas B1 e B2;

3. teste dos termopares fazendo registrar as voltagens no sis -

tema de aquisição de dados;

4. calibração dos analisadores contínuos de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CO;

Para a calibração dos analisadores O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CO em cada caso,

abria-se a válvula R4 do nitrogênio, deixando circular o gás

para que fossem obtidos três ou quatro registros, pelo sistema de

aquisição de dados, obtendo-se, assim, o ponto zero. Em seguida

abriam-se as válvulas R1, R2 e R3, respectivamente, deixando

circular a mistura de calibração de cada um dos gases,

separadamente, para a obtenção de três ou quatro registros, para o

ponto de máxima concentração. Com os dois pontos, para cada gás e

sendo as concentrações funções lineares da voltagem, obtinha-se

as retas de calibração inicial. A vazão do gás de calibração

permanecia em 1,0 NL/min.

O acionamento do compressor radial com a vazão inicial do ar de

combustão que era em torno de 500 g/min. O acionamento da bomba

d'água com vazão da água que era ajustada para 10 L/min.

Para ignição, pesava-se 900 g da mistura madeira e álcool, a

qual era colocada pela parte superior do combustor. O combustível

previamente pesado era colocado no silo.

Para execução dos testes os seguintes procedimentos eram

adotados:

1. ignição do combustor pelo orifício do visor lateral;

2. acionamento da bomba de vácuo;

3. controle dos rotâmetros Rot 1 e Rot 2, fixando a vazão em

siduos no local.

na câmara de desacoplamento porque não havia acumulo de re -  
na parte superior do combustor. Não era coletado o material  
6. coleta e pesagem do particulado retido na câmara de exaustão

duo retido na grelha;

5. abertura da porta de visita para inspeção e pesagem do resi-

se a massa queimada no teste;

do-se, assim, a massa final; com a massa inicial, calculava-

4. retirada e pesagem do combustível que sobrou no silo, obten-

3. recalibração dos analisadores de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$ ;

2. desligamento do compressor;

1. desligamento do alimentador de combustível;

adotados:

Para encerrar os testes, os seguintes procedimentos eram

7. monitoração dos parâmetros de interesse do teste.

6. acionamento do alimentador de combustível (casca de dendê

va-se o alimentador de combustível.

cinco a seis minutos depois da ignição. Neste ponto aciona-

começavam a fluidizar; o tempo situava-se em torno de

para identificação do ponto em que os núcleos de combustível

5. observação visual da zona de combustão pelo visor lateral,

lado para o teste;

4. transcorridos cerca de três minutos, após o início da igni -

1,0 NL/min;

Nesta seção serão realizados os balanços de massa e energia para o combustor, e também serão calculadas as eficiências médias de combustão para cada trecho do experimento ao qual se denominou de "tempo de regime".

3.11.1 Conservação da massa

Inicialmente delimitou-se um volume de controle que envolvesse a seção de entrada da água do combustor, isto é, a zona onde a temperatura é praticamente a ambiente e a seção de saída da água quente, de acordo com a figura 3.9.

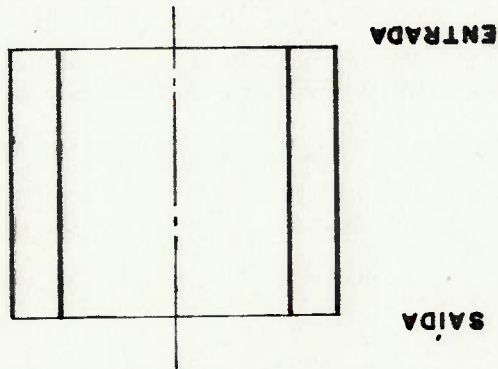


figura 3.9 Volume de controle para o balanço de massa no combustor

A conservação da massa é expressa por:

$$(3.1) \quad \frac{d}{dt} \int \rho dv + \int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0$$

Considerando o reator operando em regime permanente, o primeiro termo da equação (3.1) é nulo resultando em:

$$(3.2) \quad \sum_{i=0}^n m_i = 0$$

Aplicando a equação (3.2) para a água de refrigeração entre as secções de entrada e saída, tem-se:

$$m_{Ae} - m_{As} = 0 \quad (3.3)$$

Como a faixa de operação da temperatura da água de refrigeração situa-se entre 60 a 80 °C e a pressão é ambiente, admite-se que não haja ebulição. No entanto, é possível que a camada da água em contato com a parede quente do tubo evapore, mas ao longo da trajetória da água, a pequena quantidade de vapor gerada condensará saindo água no estado líquido.

Aplicando a equação (3.2) para o combustível e ar de combustão na entrada do combustor, e na secção de saída tem-se os gases de exaustão as cinzas e o carbono não queimado resultando em:

$$m_{comb} + m_{ar} - m_{cz} - m_{c,nc} = m_g \quad (3.4)$$

A vazões do combustível e do ar de combustão são medidas para cada experimento. A vazão das cinzas é calculada de acordo com o percentual em massa apresentado na tabela 2.1 e a vazão de combustível. A vazão dos gases de exaustão é calculada pela equação (A.47) apresentada no apêndice A.

$$m_g = m_{MM} \left[ \frac{m_{comb}}{F_N} + \left( \frac{m_{AR} \cdot m_{N_2}}{X_{N_2}} + \frac{m_{AR}}{X_{AR}} \right) \right] \cdot \left( 1 - (Y_{O_2} + Y_{CO_2} + Y_{CO}) \right) \quad (A.47)$$

Portanto, pode-se calcular a massa de carbono não queimado para cada experimento.

De acordo com o volume de controle da figura 3.10, a energia do combustível é transferida dos gases de exaustão para a água de refrigeração. O restante são perdas, particularmente associadas ao carbono não queimado e ao monóxido de carbono. O balanço de energia é expresso por:

$$E_{comb} = E_A + E_g + E_{c,nc} + E_{c,co} \quad (3.5)$$

A energia térmica do combustível é quantificada pela a vazão da casca de dende e pelo poder calorífico inferior cuja representação encontra-se explicitada na equação :

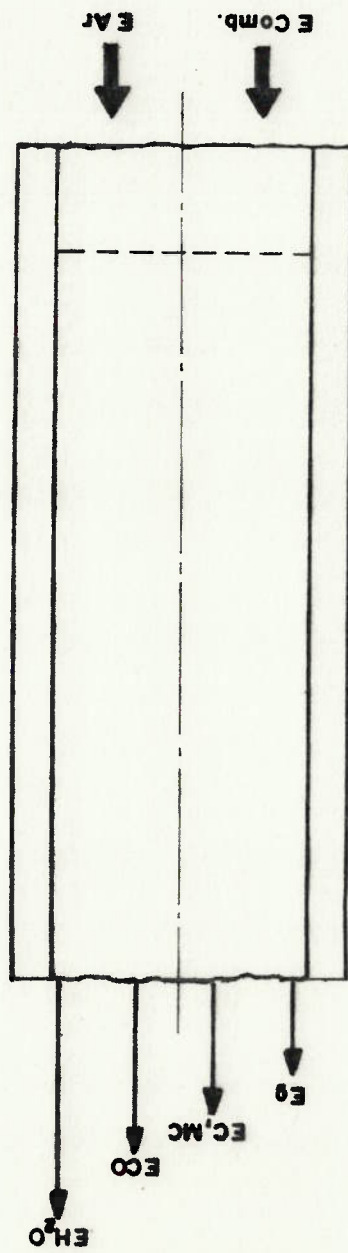
$$E_{comb} = m_{comb} \cdot Bu \cdot PCI + m_{ar} \cdot C_p \Delta T \quad (3.6)$$

A parcela da energia do combustível transferida para a água é calculada conhecendo-se a temperatura da água na entrada e na saída do combustor, o calor específico e a vazão da água. Assim,

$$E_A = m_A \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

A energia do combustível transferida aos gases de exaustão é calculada levando-se em conta a vazão dos gases calculada de acordo com a equação (A.47) do apêndice A. A temperatura dos é medida na entrada e na saída, isto é, a 200 mm antes do topo. Neste ponto, a seção correspondente foi dividida em três áreas concêntricas iguais, sendo medida a temperatura no ponto médio de cada área. O calor específico médio de gases de exaustão é

figura 3.10 Volume de controle para o balanço de energia no combustor



Define-se eficiência de combustão como sendo a relação entre o calor transferido aos gases de exaustão e o calor produzido pela queima do combustível, ou seja, a taxa de calor que entra. Como os gases de exaustão são liberados na pressão e na temperatura em que a água contida está sob a forma de vapor, então toma-se como parâmetro para calcular a

### 3.11.3 Eficiência de combustão

Fonte: [26]

Gases	A1x10 <sup>0</sup>	A2x10 <sup>-1</sup>	A3x10 <sup>-2</sup>	A4x10 <sup>-3</sup>	A5x10 <sup>-4</sup>
N <sub>2</sub>	0,02500	-0,01208	0,23240	-0,06321	-0,225770
O <sub>2</sub>	0,36748	-0,01878	0,70555	-0,67635	2,155590
CO	0,03625	-0,01619	0,369235	-0,20219	0,239530
CO <sub>2</sub>	0,37100	0,08735	-0,660700	-0,20021	0,006320
H <sub>2</sub> O (G)	0,04070	-0,01100	0,415211	-0,29637	0,807020
H <sub>2</sub> O (L)	0,12712	-0,17662	-0,255660	20,82090	240,78610
AR	0,25000	0,00000	0,000000	0,00000	0,00000

Tabela 3.4 Coeficientes da polinomial

$$C_p = R ( A_1 k T + A_2 k T^2 + A_3 k T^3 + A_4 k T^4 + A_5 k T^5 ) \quad (3.9)$$

O calor específico de uma espécie química é função somente da temperatura podendo ser expresso pela seguinte polinomial, no tabela 3.4 são apresentados os valores das constantes para cada gás:

$$\bar{c}_{p,i} = \frac{MM_i \cdot (T_s - T_e)}{\int_{T_s}^{T_e} C_{p,i} \cdot dT} \quad (3.8)$$

calculado para cada gás e totalizado para a mistura:

eficiência, o poder calorífico inferior, ou seja, abatida a parcela do calor transferida para vaporizar a água. Assim, define-se a eficiência máxima como:

$$\eta_c = \frac{\text{taxa de calor liberada na combustão}}{\text{taxa de calor transferida aos gases}} \quad (3.10)$$

A casca de dende é o combustível testado e, como é mostrado na tabela 2.1, é um resíduo agrícola sólido e, composto basicamente por carbono, hidrogênio e oxigênio. Para avaliar a eficiência da combustão, usou-se a metodologia sugerida por Carvalho [14], o qual a utilizou na queima de carvão mineral. Ferreira [16] seguindo a referida metodologia avaliou a eficiência de combustão para a queima de carvão vegetal.

As principais equações termoquímicas que ocorreram no reator em combustão, para efeito de cálculo da eficiência de combustão, são:



Então, para se calcular a eficiência de combustão, deve-se abater as perdas que estão associadas ao processo de combustão da casca do dende sendo elas a parcela de carbono não queimado, e a

parcela de monóxido de carbono. Assim a equação 3.10 fica:

$$\frac{\dot{m}_{C,CO}}{\dot{m}_{C,CO}^{comb}} = \frac{2PA_{C,CO} \cdot Y_{CO}}{2 - Y_{CO}} = \left[ \frac{F_{N_2} + F_{O_2} \cdot MM_{N_2}}{F_{N_2}} - \frac{2MM_{H_2}}{F_{N_2}} + \frac{(1^3 X_{H_2O}) \cdot \dot{m}_{AR}^{comb}}{MM_{AR}} \right] \quad (3.14)$$



Do balanço do Apêndice A, obtêm-se as expressões para  $m_{C,CO}/m_{comb}$  e  $m_{C,NC}/m_{comb}$ :

$$(3.15) \quad n_C = 1 - \left[ \frac{m_{C,CO}}{m_{C,CO} \cdot \Delta h_{C,CO} - \Delta h_{C,CO}} + \frac{m_{C,NC} \cdot \Delta h_{C,CO_2}}{m_{C,CO} \cdot \Delta h_{C,CO_2}} \right]$$

$$(3.16) \quad \frac{m_{C,NC}}{m_{C,comb}} = F_C + \frac{m_{AR} \cdot m_{comb}}{PAC \cdot X_{CO_2} \cdot m_{AR}} - \frac{2PA_C(Y_{CO} + Y_{CO_2})}{F_N} + \frac{MM_{N_2}}{F_O} - \frac{F_H}{MM_{H_2}} + \frac{MM_{H_2}}{(1-X_{H_2O})m_{AR}} + \frac{MM_{AR} \cdot m_{comb}}{MM_{H_2}}$$

Então, substituindo as equações 3.15 e 3.16 na equação 3.14

tem-se:

$$(3.17) \quad n_C = 1 - \left[ PAC \cdot X_{CO_2} \cdot \frac{m_{AR} \cdot m_{comb}}{m_{AR}} + \frac{\Delta h_{C,CO_2}}{PAC} - 2PA_C(Y_{CO} + Y_{CO_2}) + \frac{MM_{AR} \cdot m_{comb}}{MM_{H_2}} + \frac{MM_{O_2}}{O} - \frac{MM_{H_2}}{MM_{H_2}} + \frac{MM_{N_2}}{N} \cdot (1-X_{H_2O}) \cdot \frac{m_{AR} \cdot m_{comb}}{m_{AR}} \right]$$

Portanto, pela equação 3.17 calcula-se a eficiência de combustão.

4.1 Teste típico

Neste capítulo discutir-se-ão os resultados dos experimentos, bem como efetuar-se-á uma avaliação dos parâmetros dos testes. Em particular, serão objeto de descrição a metodologia e a análise de um teste típico, desde a sua ignição até a parada do reator.

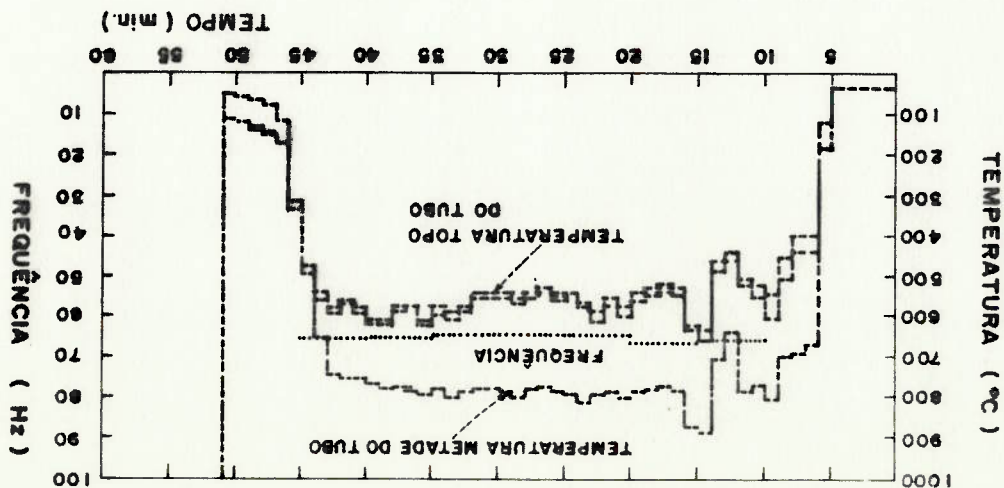
A primeira etapa de um experimento é a limpeza dos filtros da linha de amostragem dos gases de exaustão, aferição e calibração dos instrumentos. O combustível para ignição, cubos de madeira embebidos em álcool, é alimentado pela parte superior do combustor, alojando-se na grelha.

Paralelamente, os gases de calibração ( $O_2$ , CO,  $CO_2$ ) são escoados na linha de amostragem, efetuando-se as leituras iniciais de acordo com a metodologia descrita no item 3.7. Neste ponto, liga-se o compressor radial de ar com vazão regulada em torno de 500 g/min. Simultaneamente, aciona-se a bomba de água com vazão previamente escolhida que, neste teste, foi de 12.000 g/min (720 kg/h). Imediatamente, pela abertura lateral (visor), próxima a grelha, faz-se a ignição do reator. Durante três ou quatro minutos iniciais, mantém-se a vazão do ar. Em seguida, regula-se o valor estabelecido no teste, sendo neste caso 1.427 g/min (85,6 kg/h). Entre o quinto e sétimo minuto após a ignição, a amplitude da onda acústica aumenta, e ao atingir o ponto de máximo, provoca um som com nível da ordem de 160 decibéis.

Observando-se a combustão pelo visor lateral, verificou-se que a quantidade de combustível contida na grelha, forma uma camada de aproximadamente 10 mm de espessura. No movimento das partículas em combustão, nota-se que os núcleos rubros são consumidos rapidamente e, quando atingiam um determinado diâmetro, começavam a fluir. Através do osciloscópio é realizada a leitura da amplitude da onda acústica, observando-se a diminuição de intensidade da mesma. Liga-se o alimentador de combustível, no período entre o sétimo e décimo minuto, observando-se, em seguida, que o valor da amplitude volta a crescer e se estabiliza. Este período vai desde o início da combustão até o acionamento do alimentador de combustível foi denominado de "tempo de ignição". Os sinais de temperaturas, pressões, rotações por minuto do alimentador, concentrações dos gases de exaustão, etc, são transmitidos para o sistema de aquisição de dados que aciona o programa de computador imprimindo os valores e fazendo uma cópia em fita magnética.

As frequências geradas no combustor são medidas no frequencímetro e anotadas na planilha de acompanhamento do teste, sendo, para este exemplo, de 65 Hz, conforme dados da figura 4.1. Essa figura também mostra dados de temperatura dos gases de exaustão. As temperaturas dos gases de combustão foram medidas na região intermediária do combustor, isto é, logo após a zona de combustão, tendo permanecido, neste teste, em torno de 800 °C. A 200 mm da saída do reator são efetuadas duas medidas de temperatura, sendo uma no centro do tubo e a outra na parte intermediária, ou seja, entre o centro e a parede do tubo. Notou-se que não houve variação relevante entre as mesmas e o valor médio foi de 580 °C, neste caso.

figura 4.1 Temperaturas dos gases de exaustão e frequências de oscilação acústica do combustor



A água de refrigeração que circula na camisa d'água, apresentou, nesse caso típico, uma temperatura na entrada em torno de 30 °C, no módulo intermediário, por volta de 45 °C, e na saída, isto é, na parte superior do combustor, de 87 °C, conforme dados da figura 4.2. Observa-se aumento considerável da temperatura da água à medida que o combustor entra em operação oscilatória, intensificando a transferência de calor.

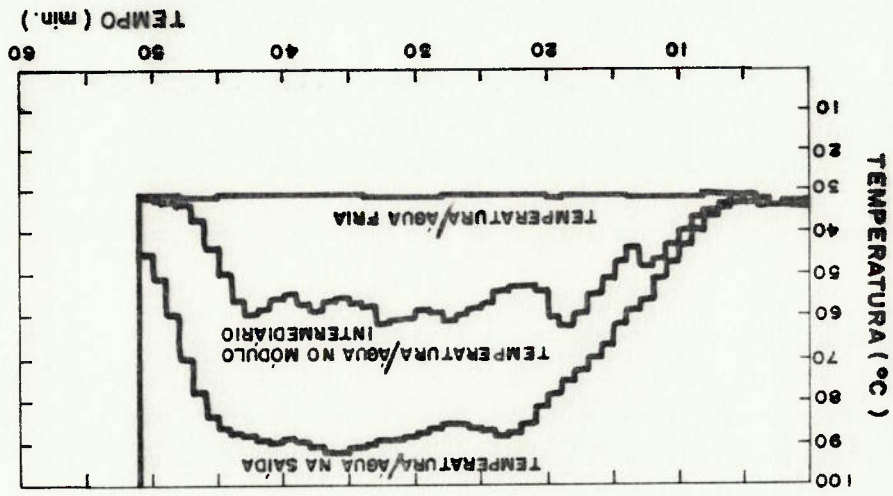


figura 4.2 Temperaturas da água de refrigeração

Logo após o "tempo de ignição", o combustor entra na segunda fase do teste, o que corresponde ao período que foi denominado de "tempo de regime". Neste caso, em particular, esse tempo corresponde ao intervalo de tempo entre o décimo sexto e o quadragésimo quarto minuto, conforme mostra a figura 4.3 que também apresenta dados de eficiência de combustão e de concentrações de CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. Para este período, obteve-se uma eficiência média de 90%. Ressalta-se que o coeficiente entre a razão ar/combustível real e a razão ar/combustível estequiométrica para o referido teste foi de 95%. Isso pode ser evidenciado pela geração de monóxido de carbono, conforme mostrado na figura 4.3. A concentração de CO, em termos médios, ficou em 2,3%, e a de CO<sub>2</sub> em torno de 18,0%.

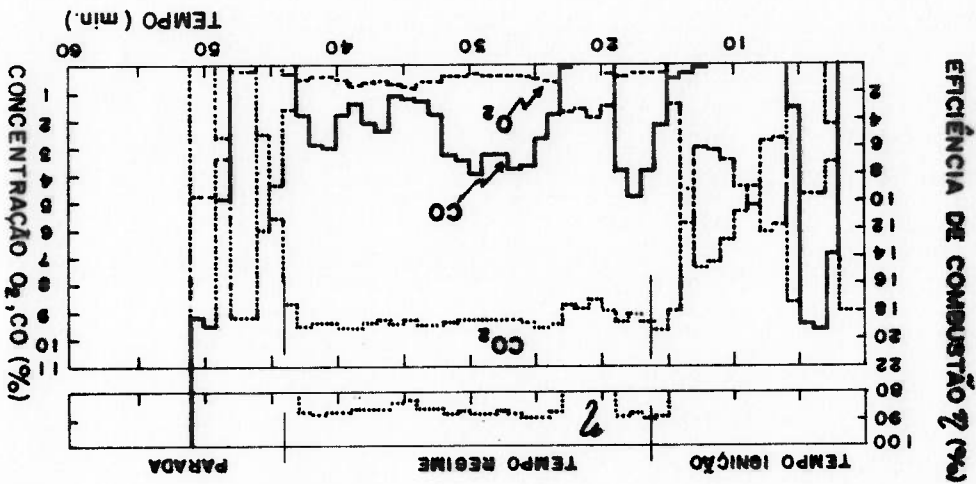


figura 4.3 Concentrações dos gases de exausto e eficiência de combustão

figura 4.5 Amplitudes das pressões

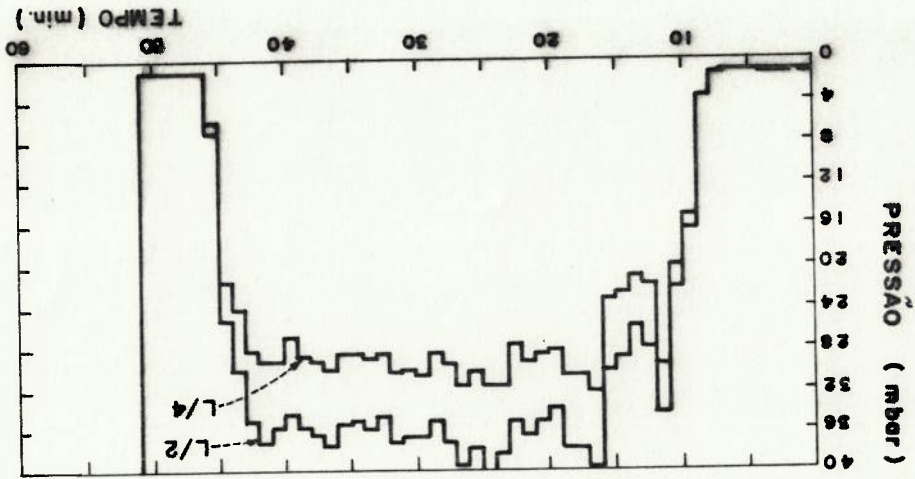
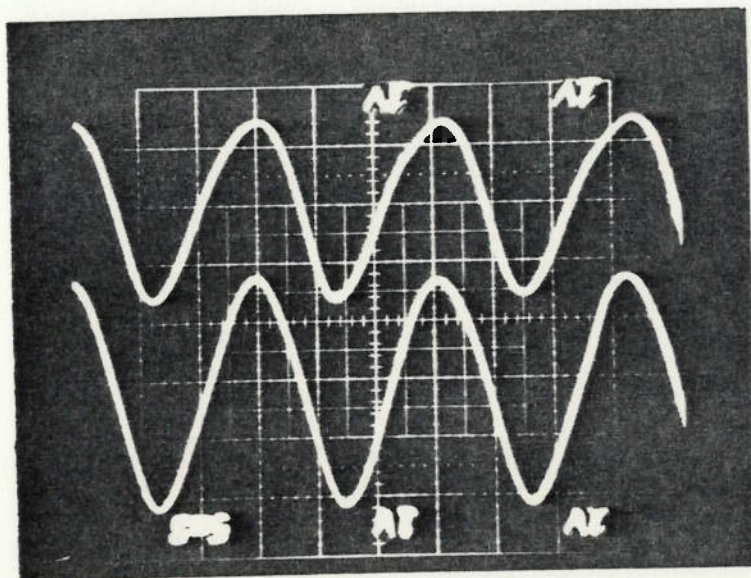


figura 4.4 Fotografia da amplitude da pressão



de 2,2 V, o que corresponde à uma intensidade sonora de 165 decibéis. As amplitudes de pressão estão apresentadas na figura 4.5. Observa-se que as pressões acústicas são maiores na metade do reator (L/2) do que na região da grelha (L/4).

A vazão de combustível em base seca, neste teste, foi de 250 g/min (15,0 Kg/h), sendo consumidos 9,4 Kg de casca de dende durante todo o teste. Na câmara de coleta dos particulados situada na parte superior do combustor, ficou retida uma massa de 1,4 g de carbono não queimado. No entanto, esta câmara não conseguiu reter todo o material ejetado, sendo parte perdida para o ambiente.

O teste completo desde a ignição até a recalibração dos analisadores dos gases de exaustão durou cinquenta e um minutos (51 min), sendo aproximadamente 16 min o que se denominou "tempo de ignição", 28 min a "tempo de regime" e o restante para recalibração dos analisadores, recalibração essa que se procedeu conforme metodologia descrita no item 3.7.

Na parada do reator, o compressor radial de ar e o alimentador de combustível foram desligados simultaneamente. Não existindo oxigênio no reator, a combustão cessou imediatamente.

Alguns minutos depois da parada do reator, retirou-se a grelha pela porta de visita lateral situada na câmara de desacoplamento. Realizou-se uma inspeção visual do residuo na grelha. Em seguida, foi feita a pesagem do material, obtendo-se 71,8 g, e, em uma avaliação qualitativa, observou-se que só havia cinzas.

Avaliando-se o desempenho do reator queimando casca de dende neste teste típico, observou-se que a relação ar/combustível real esteve abaixo da relação estequiométrica. Portanto, o combustor operou com deficiência de oxigênio, consequentemente produzindo o monóxido de carbono (2,3 %).

A tabela 4.1 descreve a vazão de ar, a vazão de combustível e a razão ar/combustível normalizada dos experimentos realizados para a vazão de 2.400 mm, em um total de 15 testes que foram divididos em três grupos. Em todos os testes, a altura da grelha ficou na posição de um quarto da altura ( $L/4$ ), ou seja, a 600 mm da altura da base do combustor. A vazão da água em todos os testes foi de 10 L/min (600 Kg/h).

O coeficiente entre a razão ar/combustível real e a razão ar/combustível estequiométrica, denominou-se de razão ar/combustível normalizada, situou-se entre 0,88 e 1,55, ou seja, de uma operação onde existia deficiência de oxigênio a um excesso de 55 % do ar teórico

Os experimentos foram realizados com o combustor montado em duas versões:  $L = 2.400$  mm e  $L = 3.200$  mm de altura. Os experimentos foram projetados para atender a um consumo de casca de dendê em base seca entre 67 a 200 g/min (4,0 a 12,0 Kg/h). Portanto, a vazão de combustível por unidade de área da seção transversal variou de 127,3 a 381,4 Kg/m<sup>2</sup>.h, e a vazão de ar de combustão situou-se no intervalo de 600 a 1.200 g/min.

Os experimentos foram realizados com o combustor montado em

#### 4.2 Experimentos realizados

Outro parâmetro importante a ser considerado é a potência por unidade de área de grelha. Neste teste, a potência gerada foi de 1,918 MW/m<sup>2</sup>, considerada a eficiência de combustão média que neste teste foi de 90 %. A vazão do combustível no alimentador (base úmida) por unidade área de grelha foi de 534,8 Kg/m<sup>2</sup>.h.



Tabela 4.1 Testes realizados para versão L = 2.400 mm

GRUPO	α	normaliz.	M <sub>comb</sub> (g/min)	M <sub>ar</sub> (g/min)	TESTES
I	1,11	86,8	581,5	28/02/9C	
	1,45	66,9	587,2	01/03/9A	
	0,88	108,9	585,2	01/02/9B	
II	1,36	109,8	901,5	27/02/9B	
	1,40	106,6	904,5	27/02/9C	
	1,56	106,0	995,8	27/02/9D	
	1,55	96,5	900,9	27/02/9E	
	1,14	129,2	890,8	28/02/9A	
	1,07	137,4	886,5	28/02/9B	
	0,97	152,0	896,7	01/02/9C	
III	1,25	159,3	1.204,0	24/02/9A	
	1,46	136,1	1.201,2	24/02/9B	
	0,99	199,7	1.192,8	24/02/9C	
	1,27	155,9	1.198,9	24/02/9D	
	1,15	171,3	1.185,6	27/02/9A	

Obs: 1) As vazões do ar e do combustível estão em base seca.  
 2) A vazão da água foi de: 10 L/min ( 600 kg/h )

Para facilitar a descrição, os testes foram divididos em três

grupos, segundo o critério vazão crescente de ar de combustão.

Para o grupo I, composto de cinco testes, a vazão nominal de ar

foi de 600 g/min. Para grupo II, a vazão nominal situou-se em 900

g/min e para grupo III em 1.200 g/min, nesta versão a posição da

grelha foi de 600 mm de altura da base do combustor.

A tabela 4.2 indica os valores da vazão de ar, a vazão de

combustível e a razão ar/combustível normalizada para os

experimentos realizados na versão L = 3.200 mm de comprimento.

Neste caso, também dividiu-se o conjunto dos testes em três grupos

que, para efeito de descrição com relação ao conjunto anterior,

foram denominados de grupos IV, V e VI, nesta versão a posição da

grelha foi de 800 mm de altura da base do combustor.

Para a versão do combustor L = 2.400 mm de altura, observou-se a ocorrência de particulado elutriado, especialmente em vazões de ar de combustão de 1.200 g/min. Ressalta-se que, para as três

#### 4.3 Particulado elutriado e os gases de exaustão

Nesse conjunto de testes, a vazão de combustível em base seca variou de 11,3 a 280,2 g/min ( 6,68 a 16,8 Kg/h ), o que resultou numa vazão por unidade de área de 212,6 a 535,2 Kg/m<sup>2</sup>.h. A razão ar/combustível normalizada situou-se na faixa de 0,88 a 1,47. A vazão de ar de combustão situou-se entre 900 e 1.450 g/min e a vazão de água foi de 10.000 g/min ( 600 Kg/h ) para os grupos IV e V. Como a temperatura da água de saída chegou a níveis em torno de 90 °C, decidiu-se, para o grupo VI, adotar uma vazão de água de 12.000 g/min ( 720 Kg/h ).

Obs: 1) A vazão do ar e do combustível estão em base seca.  
 2) A vazão da água no grupo IV e V foi de 10.000 g/min ( 600 Kg/h ) e no grupo VI foi de 12.000 g/min ( 720 Kg/h ).

GRUPO	α	normaliz.	mm <sub>comb</sub>	(g/min)	mm <sub>ar</sub>	(g/min)	TESTES
VI	1,33	0,85	280,2	1.430,2	07/03/9E	1.442,6	07/03/9B
	1,47	0,94	250,1	1.427,5	06/03/9A	1.438,2	07/03/9A
	1,09	0,85	216,4	1.425,9	06/03/9C	1.438,2	06/03/9C
	1,33	0,85	179,7	1.427,5	03/03/9F	1.442,6	06/03/9A
	1,47	0,85	162,8	1.430,2	03/03/9E	1.442,6	06/03/9A
	1,09	0,85	216,4	1.427,5	03/03/9D	1.438,2	06/03/9A
V	1,35	0,89	223,4	1.203,2	03/03/9B	1.199,0	03/03/9E
	1,14	0,88	226,4	1.202,4	03/03/9C	1.196,7	03/03/9D
	1,14	0,88	174,3	1.196,7	03/03/9D	1.196,7	03/03/9D
	1,35	0,89	146,8	1.199,0	03/03/9E	1.199,0	03/03/9E
IV	1,34	0,94	158,1	894,5	02/03/9A	989,0	03/03/9A
	1,40	1,06	138,9	898,3	02/03/9B	902,6	02/03/9B
	1,40	1,06	106,7	902,6	02/03/9C	902,6	02/03/9C
	1,34	0,94	111,3	894,5	03/03/9A	989,0	03/03/9A

Tabela 4.2 Testes realizados para versão L = 3.200 mm

vazões de ar testadas e, em especial, para a maior vazão, a chama no interior do tubo chegava até o topo do reator, isto é, na câmara de retenção do particulado. Esse efeito da chama ao longo do tubo pode ser explicado devido ao combustor ter um comprimento em que o tempo de residência não era suficiente para a queima completa do combustível. Para uma melhor avaliação dividiu-se o combustor em duas zonas. A primeira zona é a da combustão na grelha ou próxima a ela, onde acontecem as reações químicas primárias do carbono, oxigênio, hidrogênio, etc.. A segunda zona, de menor temperatura, encontra-se após a zona anterior e nela acontecem as reações químicas secundárias, ou seja, o monóxido de carbono se converte em dióxido de carbono, assim como também outras reações. Portanto, a medida que o carbono não queimado na primeira zona de combustão vai sendo elutriado, o oxigênio presente no reator reage, produzindo uma chama ao longo do combustor.

Para os testes do grupo I, onde a vazão do ar de combustão foi a menor, 600 g/min, a velocidade do gás de exaustão não provocou um arrasto significativo do particulado de maior diâmetro, 1,0 a 2,0 mm. Porém, o particulado de menor diâmetro, com tamanho menor que 0,35 mm, foi encontrado na câmara coletora de particulado, com percentual médio de 36 %. ( ver tabela 4.3 ).

No grupo II, correspondente à vazão de ar de 900 g/min, constatou-se que a maior parte do particulado elutriado era de menor diâmetro, com tamanho abaixo de 0,35 mm, com percentual médio de 68 %. Para o grupo III, correspondente à maior vazão de ar, 1.200 g/min, o percentual retido na câmara, de particulados menores que 0,35 mm foi de 90 %. Portanto, evidencia-se o efeito da velocidade do ar no arrasto do particulado para o comprimento experimentalado.

Tabela 4.3 Percentual em base mássica da análise granulométrica das partículas elutriadas

GRUPO	DIAMETROS	TESTES	I	II	III	IV	V	VI
1,0 a	24/02/9A	14,49	53,06	8,44	17,53	65,58	70,44	70,44
	24/02/9B	6,40	30,60	15,86	12,38	34,77	45,67	17,07
2,0	27/02/9A	4,94	17,30	16,26	15,92	45,67	17,07	17,07
	27/02/9B	0,65	7,79	8,44	17,53	65,58	70,44	70,44
2,0	27/02/9C	1,26	4,40	6,92	16,98	70,44	70,44	70,44
	27/02/9E	0,32	3,79	7,26	19,24	69,40	69,40	69,40
2,0	28/02/9A	0,53	5,32	7,45	17,55	69,15	69,15	69,15
	28/02/9B	1,15	4,51	6,77	17,29	69,92	69,92	69,92
2,0	01/02/9C	2,50	6,67	10,56	16,94	63,33	63,33	63,33
	28/02/9C	2,56	1,03	2,05	5,13	89,23	89,23	89,23
1,0 a	01/03/9A	0,75	0,75	0,75	6,02	91,73	91,73	91,73
	01/02/9B	1,03	1,03	1,03	8,25	88,66	88,66	88,66
1,0 a	02/03/9A	-	-	-	-	-	-	-
	02/03/9B	0,63	5,66	9,43	16,35	67,92	67,92	67,92
1,0 a	02/03/9C	0,50	4,00	11,00	16,50	68,00	68,00	68,00
	03/03/9A	-	-	-	-	-	-	-
1,0 a	03/03/9B	19,46	56,73	4,08	3,67	16,05	16,05	16,05
	03/03/9C	20,94	58,45	5,57	3,55	11,49	11,49	11,49
1,0 a	03/03/9D	6,01	62,92	10,97	5,48	0,00	0,00	0,00
	03/03/9E	-	-	-	-	-	-	-
1,0 a	03/03/9F	45,03	47,66	2,10	1,52	3,6	3,6	3,6
	06/03/9A	29,61	57,24	7,26	2,63	3,29	3,29	3,29
1,0 a	06/03/9C	30,95	58,73	6,35	2,38	1,59	1,59	1,59
	07/03/9A	13,89	50,00	15,74	10,19	10,19	10,19	10,19

Análise granulométrica realizada no Laboratório do INPE C. Paulista.

O particulado deixa a zona de combustão com um determinado diâmetro e, a medida que vai ascendendo ao longo do tubo, reage com o oxigênio presente no reator, provocando aquecimento e chama por todo tubo. A parte que não consegue ser queimada é expulsa do tubo e retida na câmara.

Nas figuras 4.6 a 4.8, mostram-se as concentrações de monóxido de carbono nos testes dos grupos I, II e III.

As concentrações dos componentes dos gases de exaustão foram medidas em analisadores contínuos. Em todos os ensaios passaram-

figura 4.7 Percentual da concentração de CO Grupo II

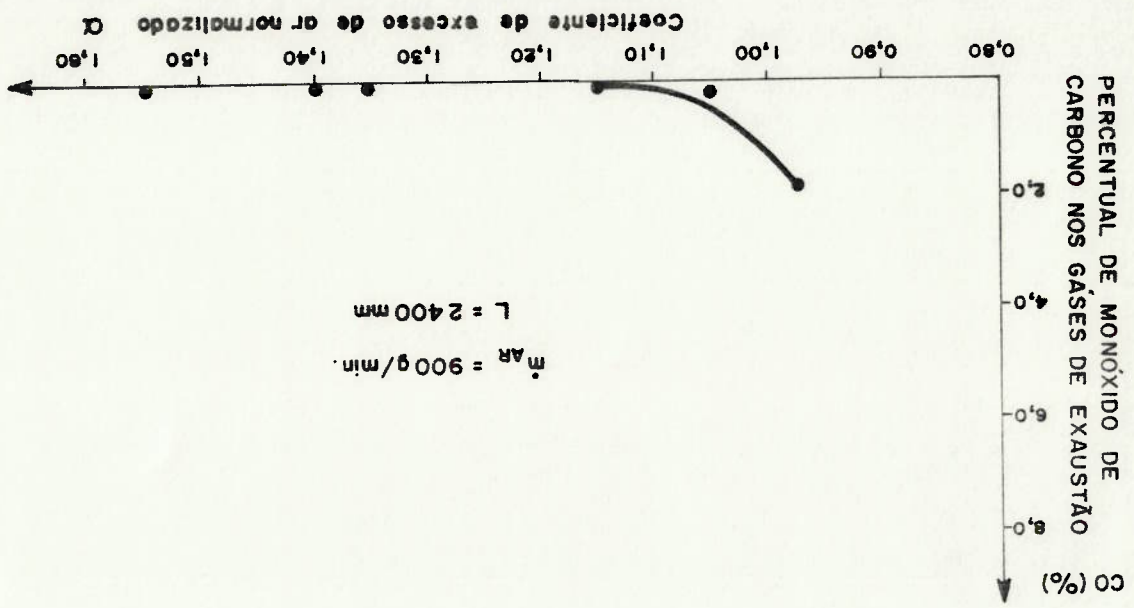


figura 4.6 Percentual da concentração de CO Grupo I

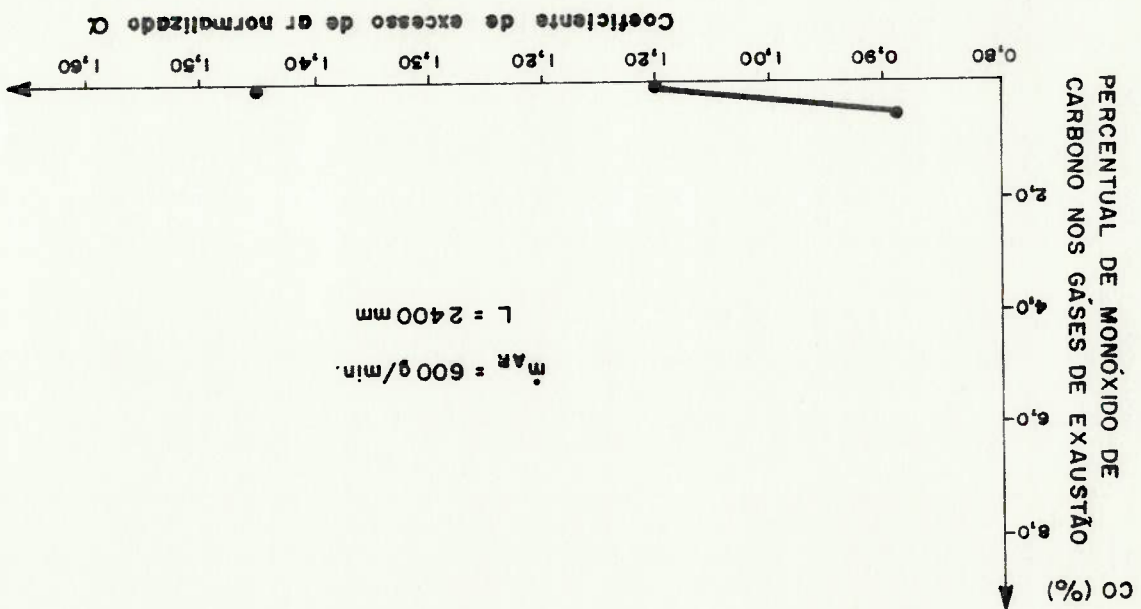
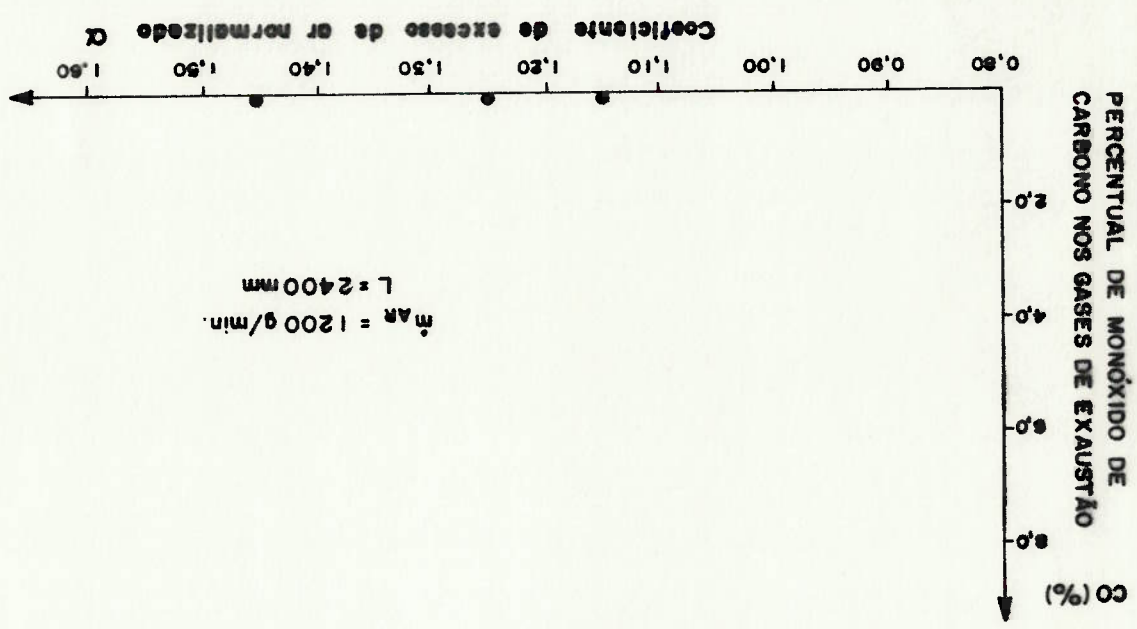


figura 4.8 Percentual da concentração de CO Grupo III



se os gases de calibração no início e no final do teste, observando-se uma diminuição dos valores de concentração, medidos em volts, do final dos testes com relação ao início. Admitiu-se que essa variação era linear com o tempo e, consequentemente, com os valores medidos no início e no final do teste foi traçada uma reta corrigindo-se os pontos intermediários.

Analisando o grupo II com relação ao grupo I, houve uma maior taxa de emissão de CO para o primeiro, apesar do coeficiente de excesso de ar encontrado próximo de um. Mas no caso do grupo II, a vazão de combustível esteve acima da do anterior e não houve tempo necessário para a queima total do combustível nas condições de operação. Porém, com excesso de ar normalizado de 1,07, a produção de CO decresceu para valores próximos a zero e, a partir deste valor, não houve mais geração de CO, conforme se pode observar na figura 4.7.

Para o grupo III, foi testada a maior vazão de ar de combustível, para a versão L = 2.400 mm. O excesso de ar normalizado situou-se entre 1,14 e 1,46. Neste grupo não foi constatada a presença de monóxido de carbono durante a realização dos testes, conforme mostra a figura 4.8, uma vez que o coeficiente do excesso de ar esteve acima da razão estequiométrica.

Para a versão L = 3.200 mm de comprimento, ocorreu a produção de monóxido de carbono quando o combustor operou com deficit de ar de combustível. Como mostram as figuras 4.9 a 4.11 no entanto, quando o excesso de ar esteve em 1,06 para o grupo IV, onde existia teoricamente excesso de oxigênio, mesmo assim ainda existiu produção de monóxido de carbono. Analisando a figura 4.9, observa-se que no ponto onde o excesso de ar de combustível é superior a 1,10 não mais ocorre a geração de monóxido de carbono.

figura 4.10 Percentual da concentração de CO Grupo V

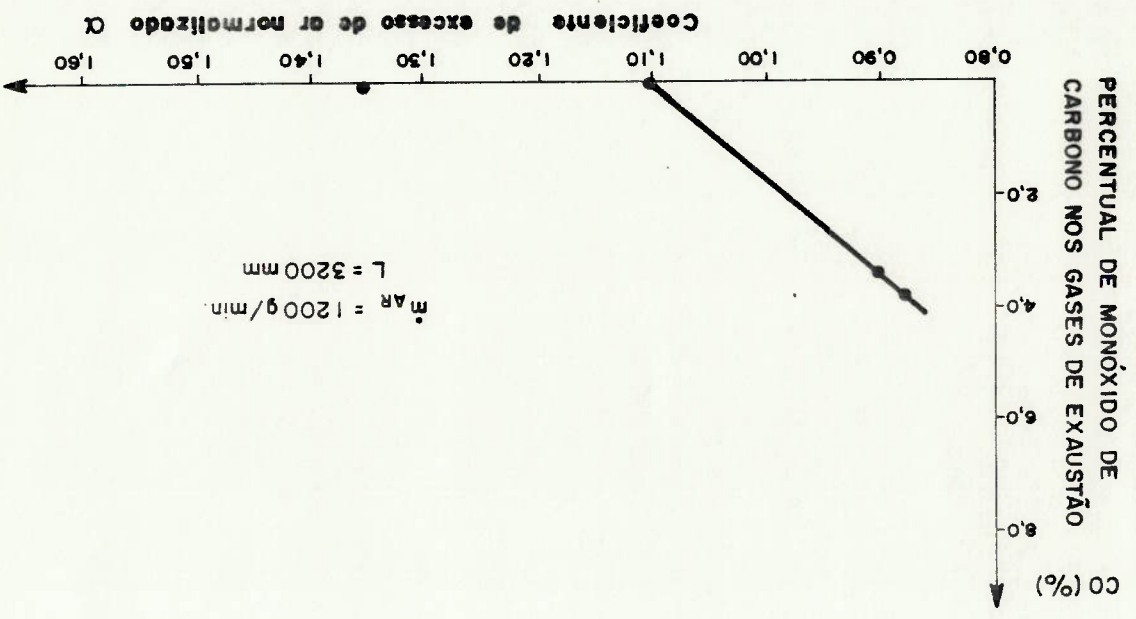


figura 4.9 Percentual da concentração de CO Grupo IV

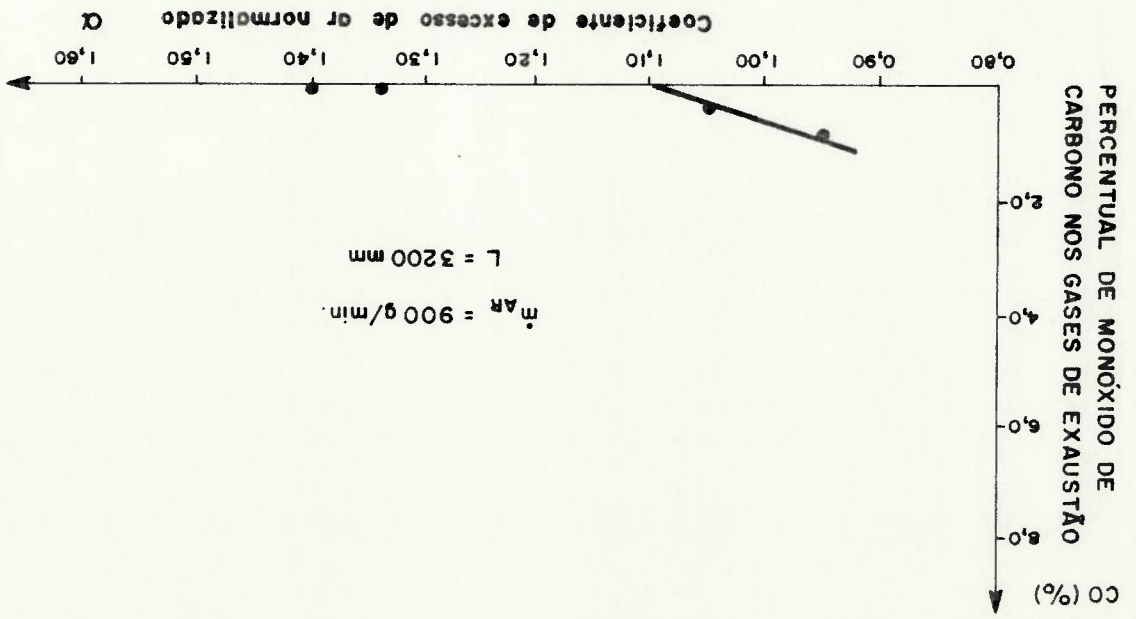
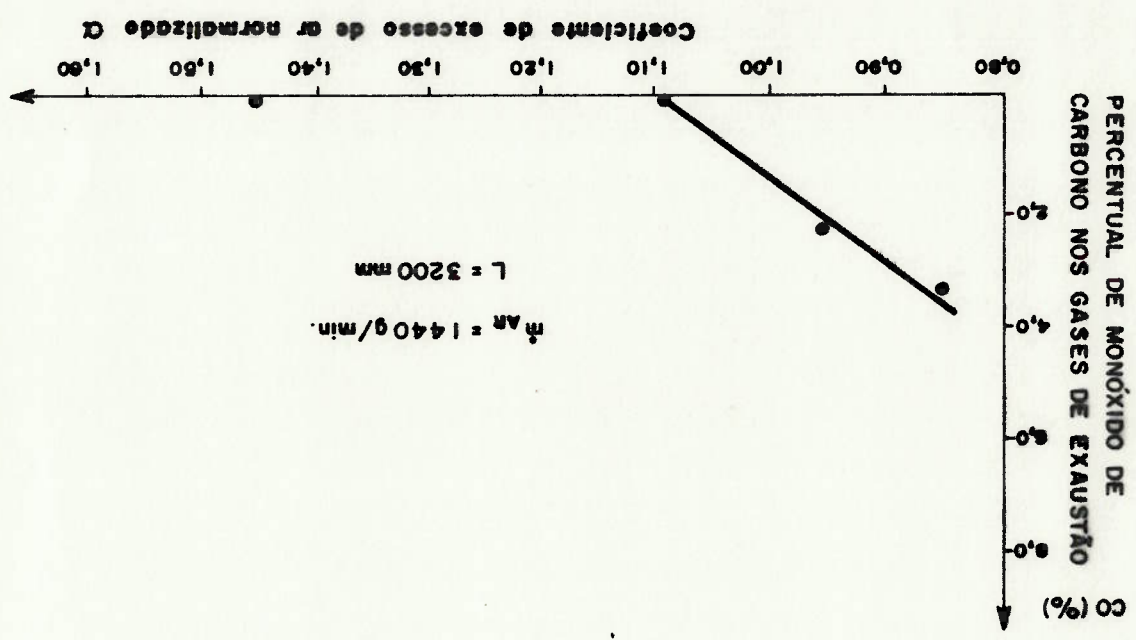




figura 4.11 Percentual da concentração de CO Grupo VI



Em caráter geral, observou-se que a produção de monóxido de carbono deixava de ocorrer para coeficientes de excessos de ar normalizados acima de 1,10 em todos os grupos de testes. No que se refere ao particulado elutriado, é significativo dizer que, para o grupo IV, as partículas elutriadas eram de diâmetros inferiores a 0,35 mm, que ocorriam com percentual médio de 70 %, similar ao percentual verificado na versão de 2.400 mm para igual vazão de ar. Para o grupo V, a composição do particulado arrastado mudou de perfil. Neste grupo, o maior percentual em massa retido na câmara de particulados foi de diâmetro maior que 1,0 mm, o que

constatado na figura 4.11.

Por último, analisa-se o grupo VI, que apresentou coeficiente de excesso de ar normalizado entre 0,85 e 1,47. Neste caso, a produção de monóxido de carbono foi grande para o primeiro teste, mas quando o coeficiente de excesso de ar normalizado aumentou para 1,09, não houve mais a geração do poluente, o que pode ser

4.10.

No grupo V, o coeficiente de excesso de ar normalizado esteve entre 0,88 e 1,35. Nos dois primeiros testes, onde havia deficiência de ar, a produção de monóxido de carbono foi alta correspondendo a 4,0 %. No entanto, quando o coeficiente de excesso de ar normalizado cresceu a 1,10, não houve mais a geração do monóxido de carbono, o que pode ser observado na figura

grupos IV e II.

Comparando os testes do grupo IV com os testes de mesma vazão de ar para versão L = 2.400 mm, grupo II, observou-se que no grupo IV há menor produção de monóxido de carbono do que no grupo II. O reator de maior comprimento prove tempo para que o gás reaja com o oxigênio existente ao longo do combustor. Este fato está coerente com a geração de particulados observadas nos

Para os grupos I, II e III da versão de 2.400 mm de altura, as eficiências estiveram, em geral, abaixo daquelas correspondentes aos grupos IV, V e VI da versão de 3.200 mm. Constatou-se, nos grupos I, II e III, que, no final de cada teste, a quantidade de material retido na grelha era tal que provocava a interrupção do experimento, devido ao acúmulo de material. Este fato afetou o cálculo da eficiência de combustão, pois a taxa de alimentação do combustível era diferente da taxa de consumo na grelha, isto é, a

são apresentadas nas figuras 4.12 a 4.17.

regime", e para este período obtiveram-se as eficiências médias, que análise se restringiram, aqueles correspondentes ao "tempo de calculado a cada minuto em operação. Os valores considerados para fluido entre a saída e a entrada. O valor da eficiência foi seu calor específico médio e pela diferença de temperatura do para a água corresponde ao produto da vazão mássica de água pelo temperatura dos gases de exaustão. A taxa de energia transferida intervalo de temperatura entre a temperatura de entrada e a respectivos calores específicos à pressão constante e integrado no somatório das vazões dos gases de exaustão multiplicado pelos efetiva do calor transferido para os gases corresponde ao calorífico inferior multiplicado pela vazão de combustível. A taxa ideal do calor transferido aos gases corresponde ao poder carbono não queimado e parte é liberada para a atmosfera. A taxa refrigeração, parte é perdida sob a forma de monóxido de carbono e parte é transferida para os gases de exaustão, para a água de Da energia térmica liberada na combustão da casca de dende

#### 4.4 Eficiência de combustão

similar ao grupo anterior. correspondeu a 70 % do total. Para o grupo VI, a situação foi

figura 4.13 Eficiência de combustão Grupo II

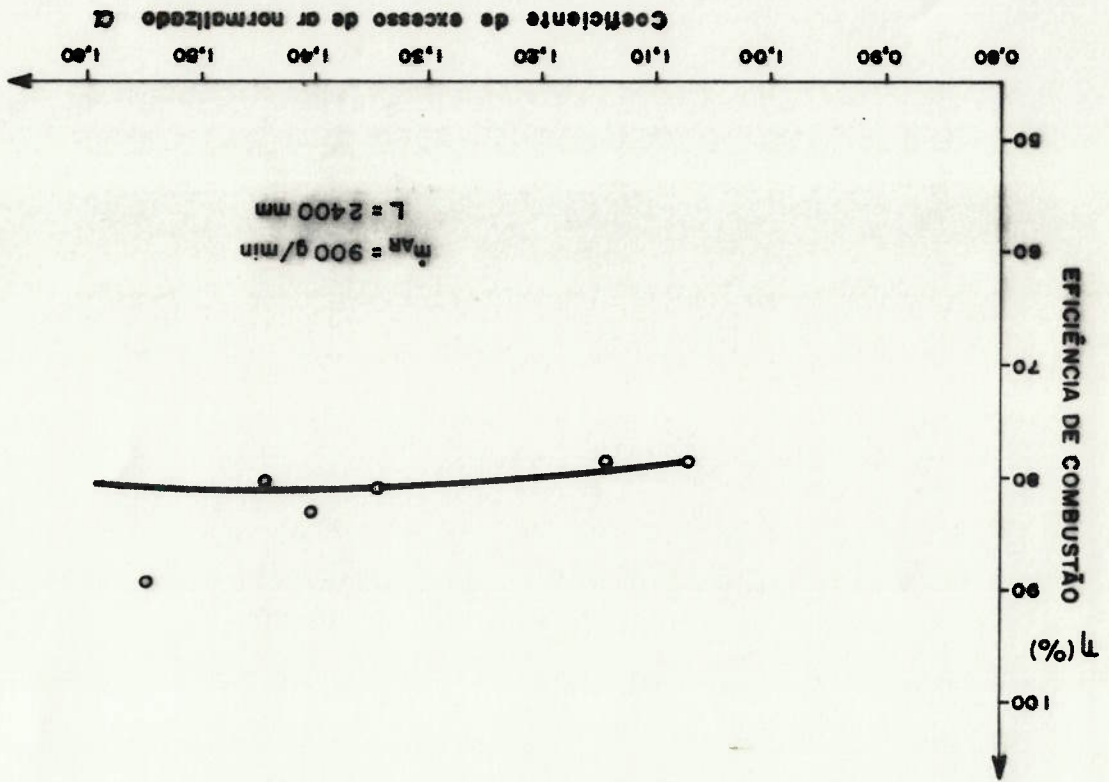


figura 4.12 Eficiência de combustão Grupo I

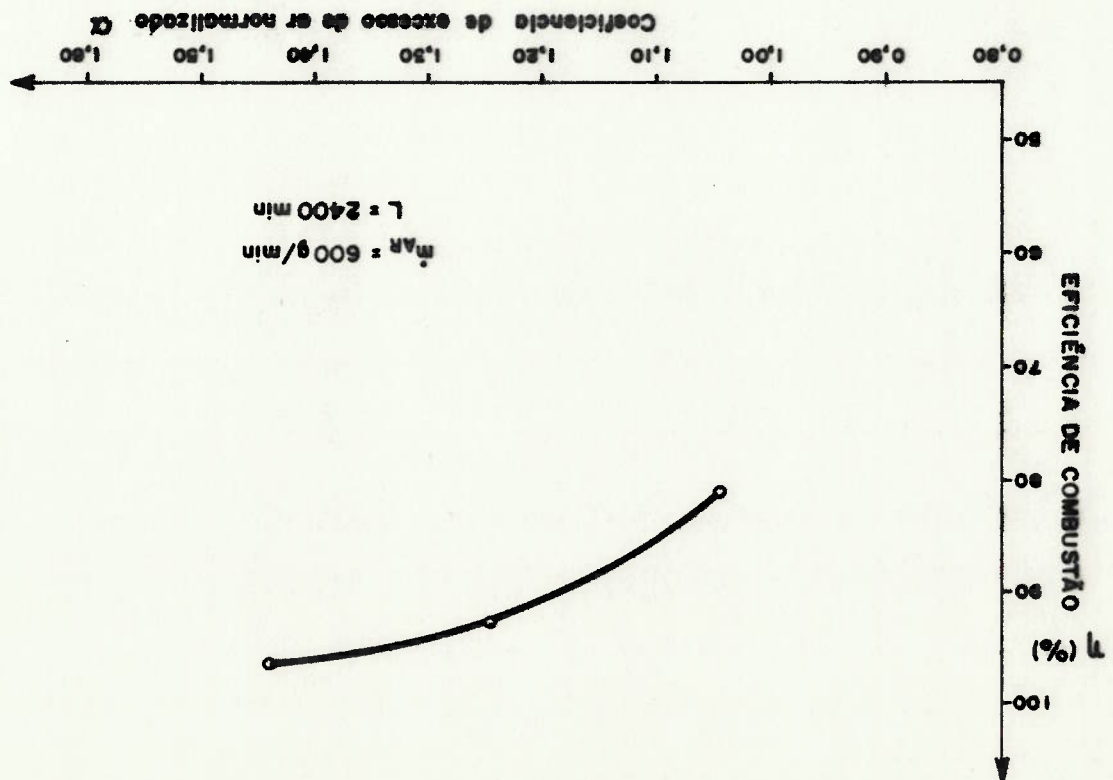


figura 4.15 Eficiência de combustão Grupo IV

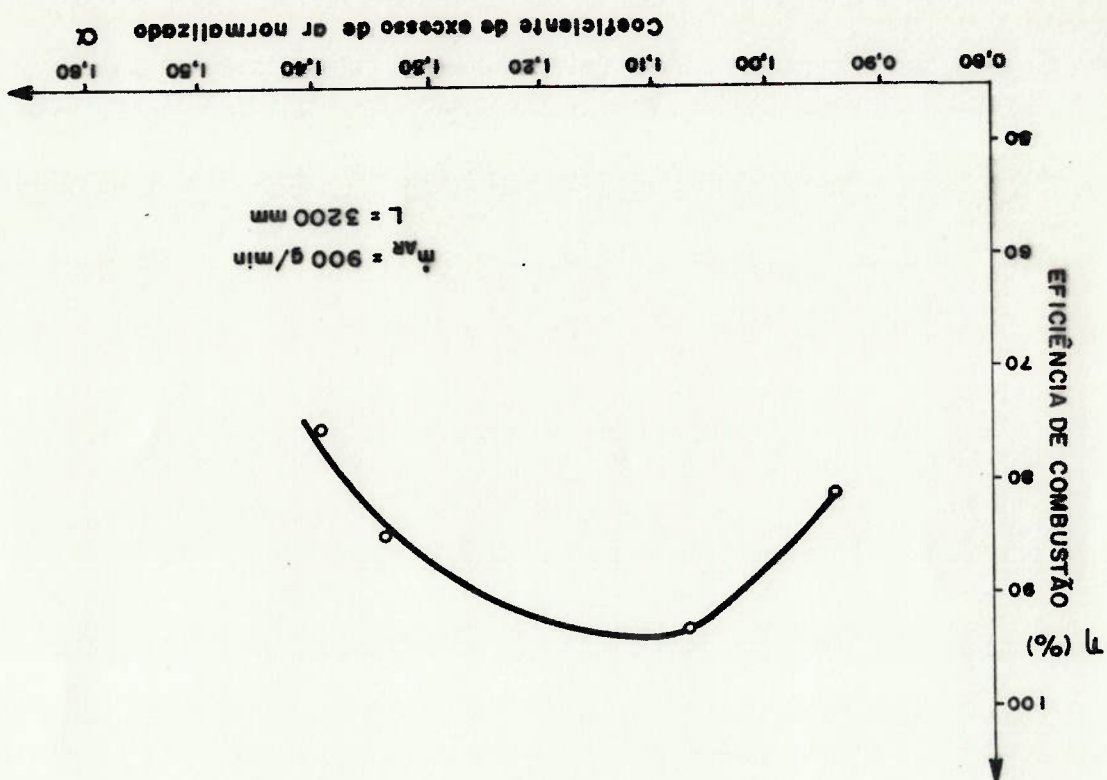


figura 4.14 Eficiência de combustão Grupo III

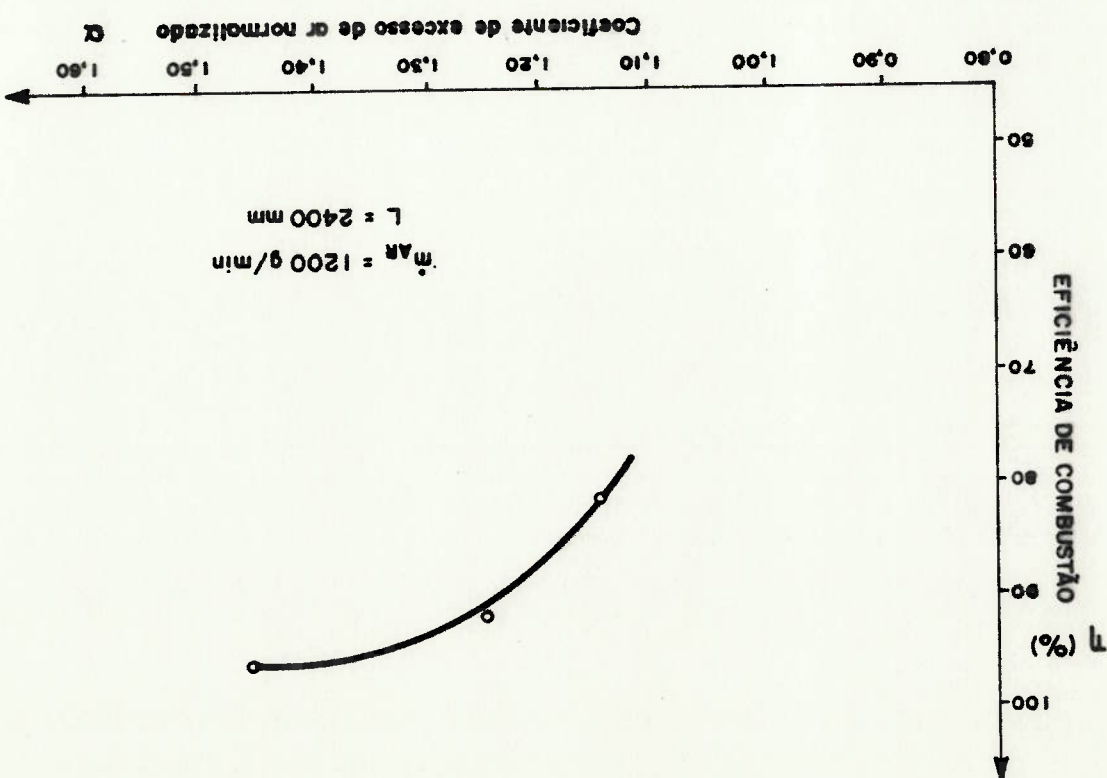


figura 4.17 Eficiência de combustão Grupo VI

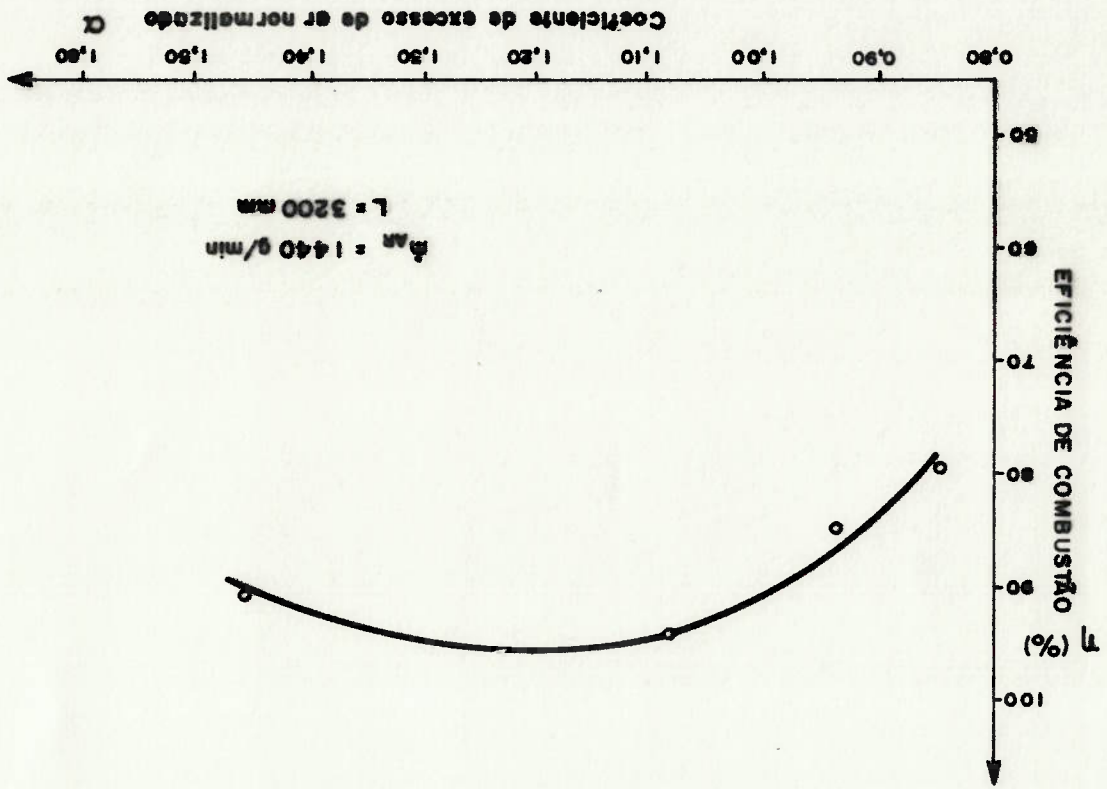
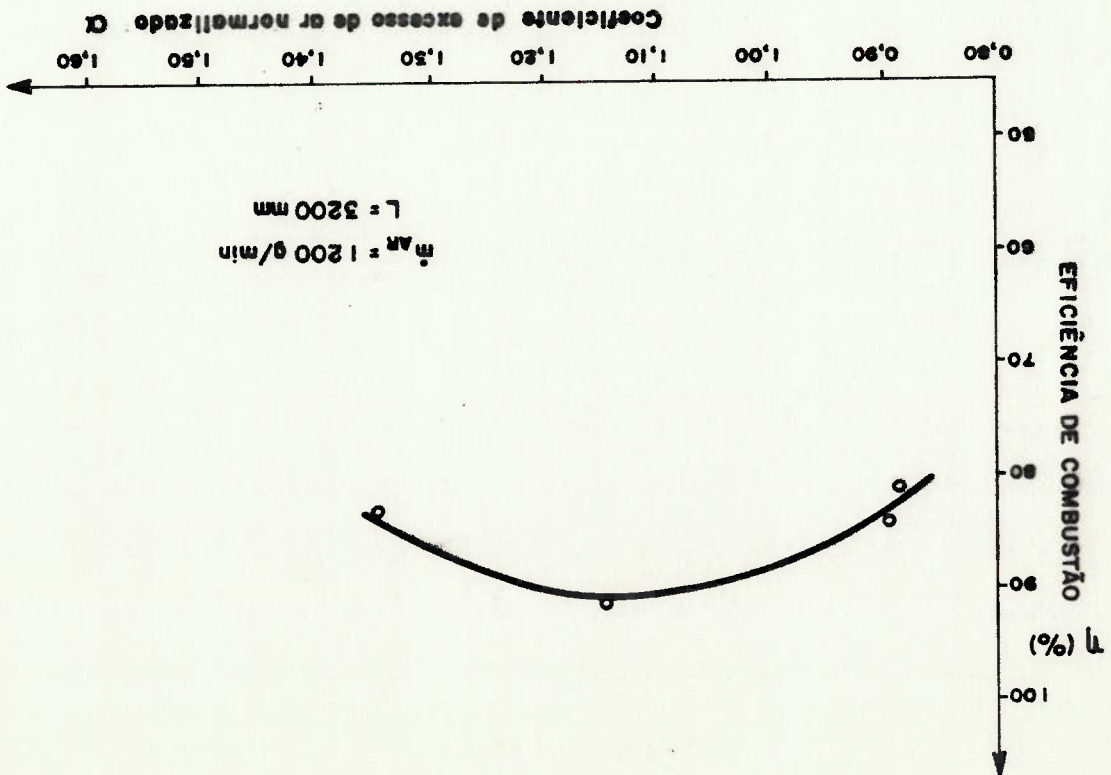


figura 4.16 Eficiência de combustão Grupo V



do tubo. formação de CO, com a chama se estendendo praticamente até o topo. Uma das explicações para o fato é que, no grupo II, houve maior temperaturas obtidas em testes do grupo II e III são comparáveis. Apresentar a uma temperatura menor nos testes do grupo I. As com L = 2.400 mm, os gases de exaustão deveriam efetivamente Como a vazão de água de refrigeração foi a mesma para os testes alimentação de combustível. testes do grupo I, que corresponderam às menores taxas de figuras 4.18 e 4.19. As menores temperaturas foram observadas nos As temperaturas dos gases de exaustão estão mostradas nas

#### 4.5 Temperatura dos gases de exaustão

dos grupos IV e VI. na grelha, o que ocorreu com muito menor intensidade nos testes desempenho nos testes do grupo V é o observado acúmulo de material de ar de 6%, 14% e 9%, respectivamente. A explicação para o V foi de 91,5% e do grupo VI de 94,6%, correspondendo a excessos eficiência máxima do grupo IV foi de 96%, enquanto que a do grupo observou-se que o melhor desempenho se deu para o grupo IV. A Em uma análise global dos três grupos da vazão L = 3.200 mm, caso, devem ser considerados como afetados de alguma imprecisão. fenômeno. Portanto, os valores calculados das eficiências, neste todos os testes da vazão L = 2.400 mm houve a ocorrência deste consequentemente, o amortecimento das oscilações acústicas. Em na temperatura dos gases, ocorrendo o restrição do reator e, outro lado, a diminuição da taxa de queima causava uma redução perda de carga, e dificultando a circulação do ar no reator. Por alimentador. O material que ficava retido na grelha aumentava a taxa de queima na grelha era inferior à vazão fornecida pelo

figura 4.19 Temperatura dos gases de exaustão para verso  
 $L = 3.200 \text{ mm}$

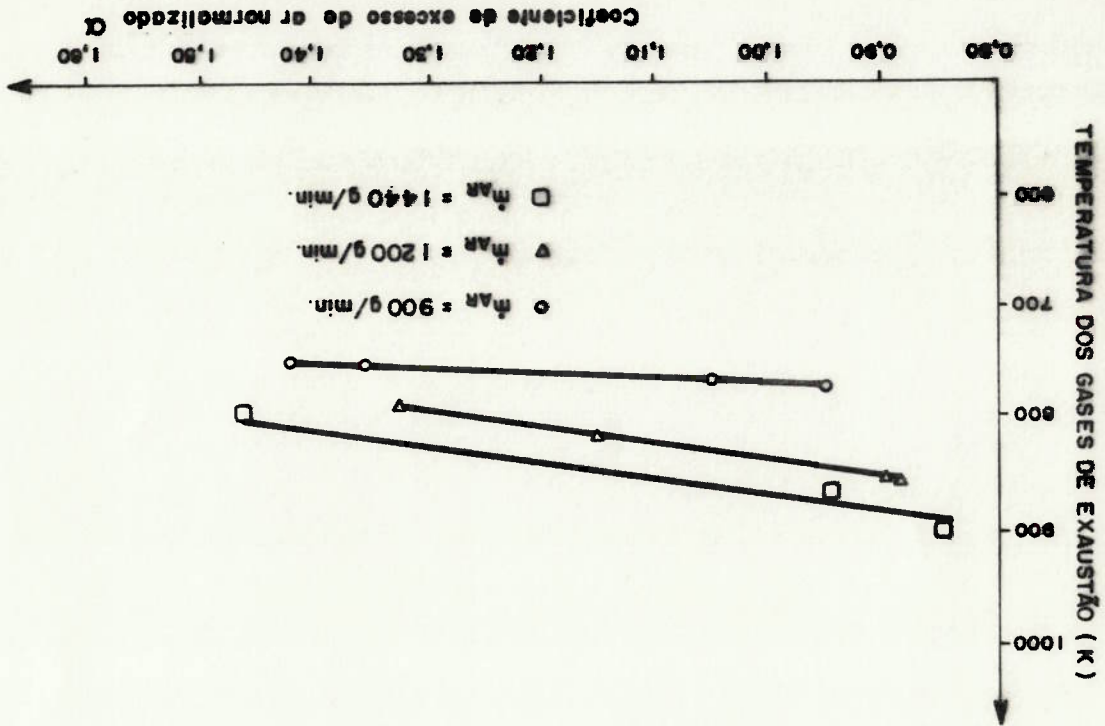
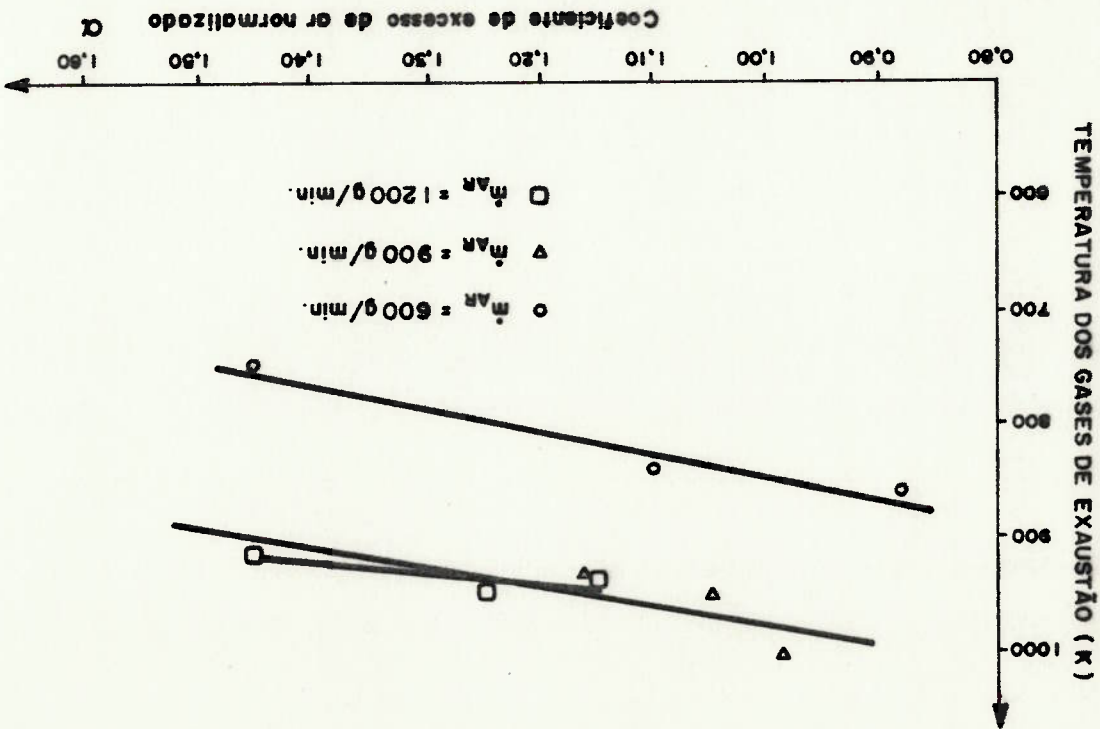


figura 4.18 Temperatura dos gases de exaustão para verso  
 $L = 2.400 \text{ mm}$





As amplitudes das pressões acústicas e suas faixas de variação são apresentadas nas figuras 4.20 a 4.25. Os dados correspondem ao trecho de operação denominado "tempo de regime".

Observa-se que a amplitude de pressão no início do "tempo de regime", nos testes do grupo I foi a menor de todos os grupos. Isso se explica pelo fato do grupo I compreender as menores vazões mássicas de combustível. Em contrapartida, o grupo VI apresentou as mais altas amplitudes no início do "tempo de regime", sendo esse grupo justamente aquele com maiores vazões mássicas de combustível. As taxas de calor gerado pela combustão dependem basicamente das vazões mássicas de combustível e, em primeira análise, a energia absorvida pela perturbação acústica é tanto maior quanto maior for a energia disponível no combustor.

O material retido na grelha dificulta o escoamento de ar, diminuindo a taxa de queima e a taxa de geração de calor no combustor, aumentando a perda de carga no leito. Assim, a taxa de calor absorvida pela perturbação diminui e a perda de carga aumenta conforme o material se acumula, sendo estas as possíveis explicações para o decréscimo de amplitude da oscilação acústica durante os testes.

#### 4.6 Amplitude das pressões e as frequências geradas

Para os grupos IV, V e VI, as temperaturas dos gases de exaustão foram maiores devido ao aumento da taxa de alimentação do combustível. Para os grupos IV e V, manteve-se a mesma vazão da água de refrigeração. No último grupo, como anteriormente comentado, foi necessário aumentar a vazão da água de refrigeração para diminuir sua temperatura, o que teve efeito na temperatura dos gases de exaustão.

figura 4.21 Variação da amplitude da pressão da presso Grupo II

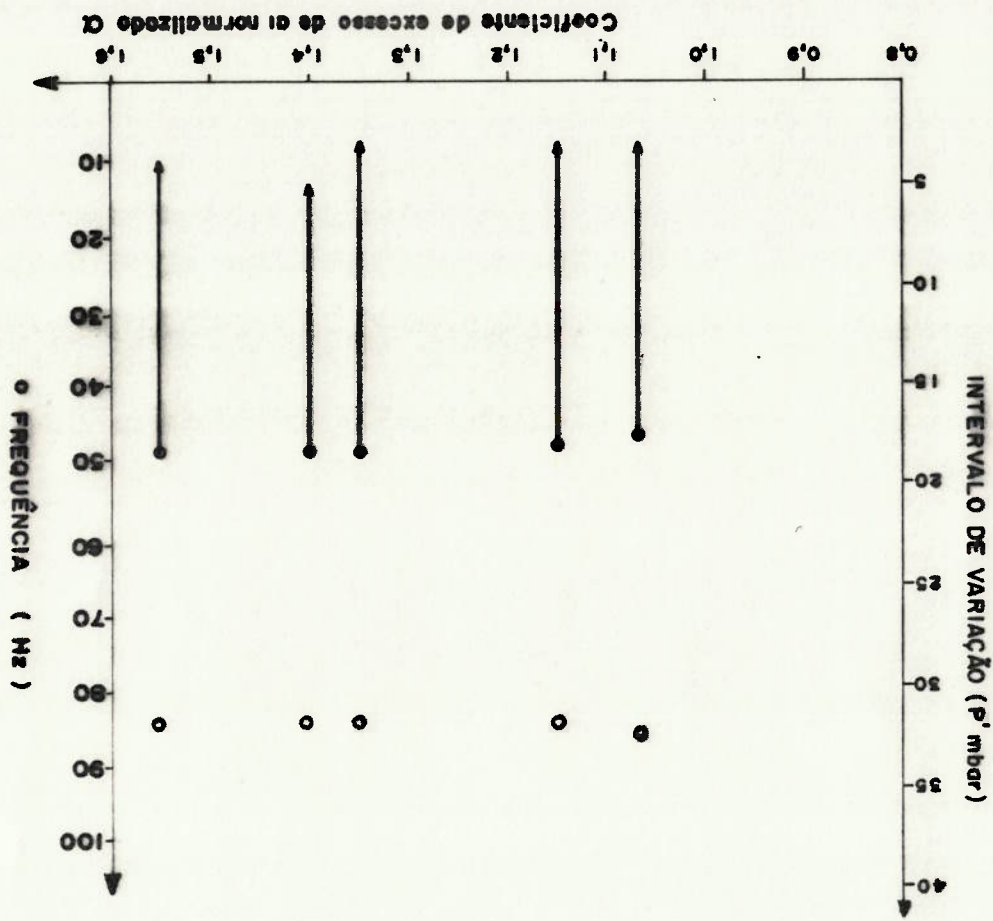


figura 4.20 Variação da amplitude da presso Grupo I

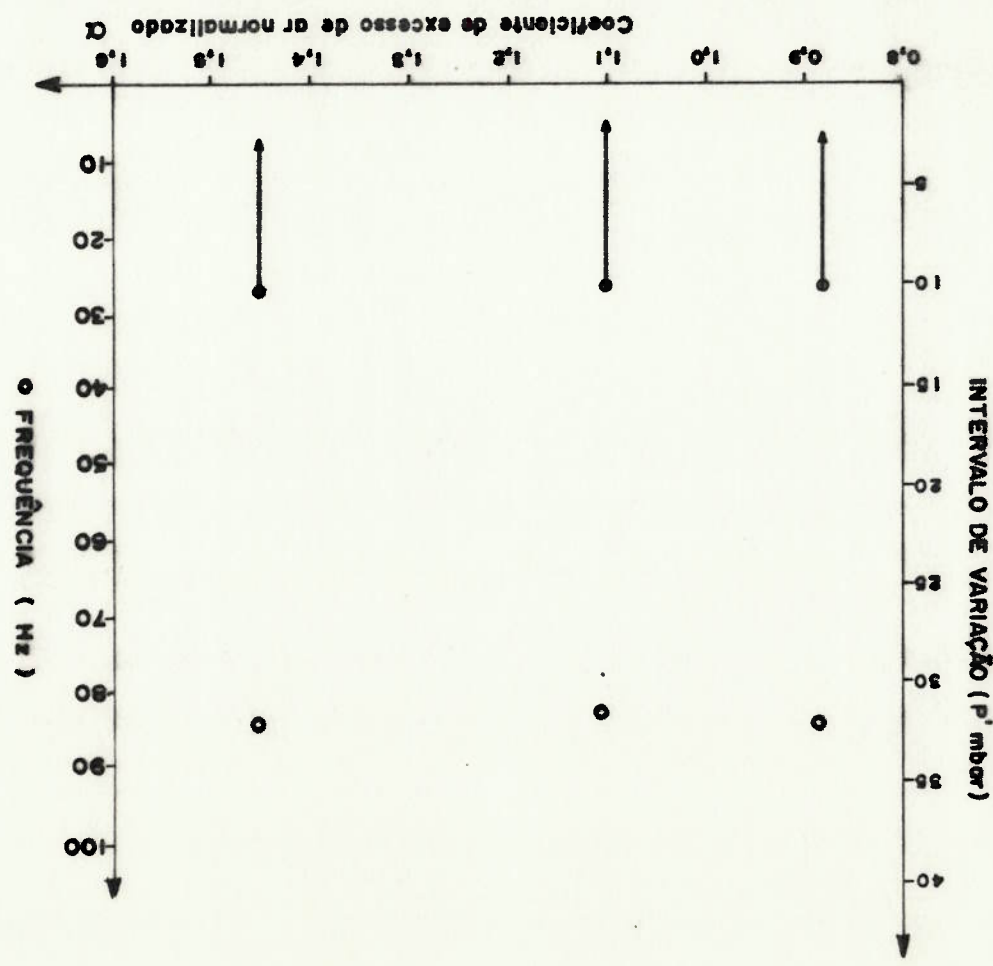


figura 4.23 Variação da amplitude da pressão da presso Grupo IV

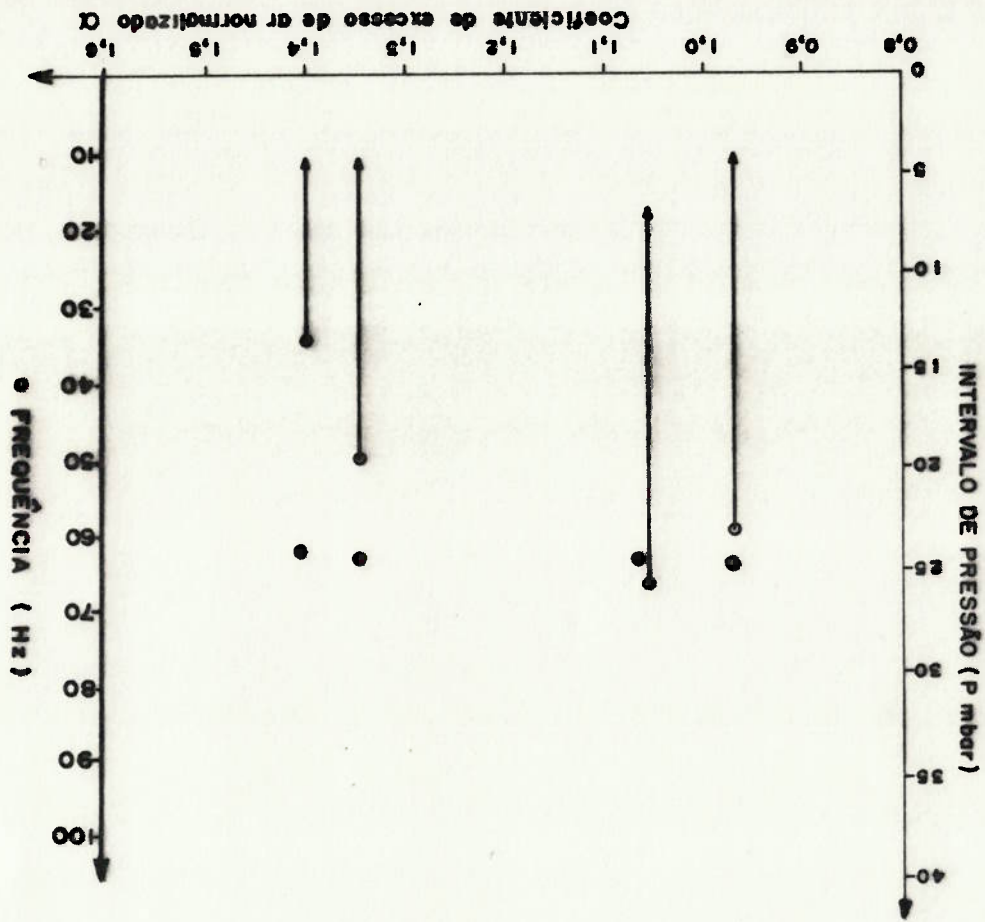


figura 4.22 Variação da amplitude da presso Grupo III

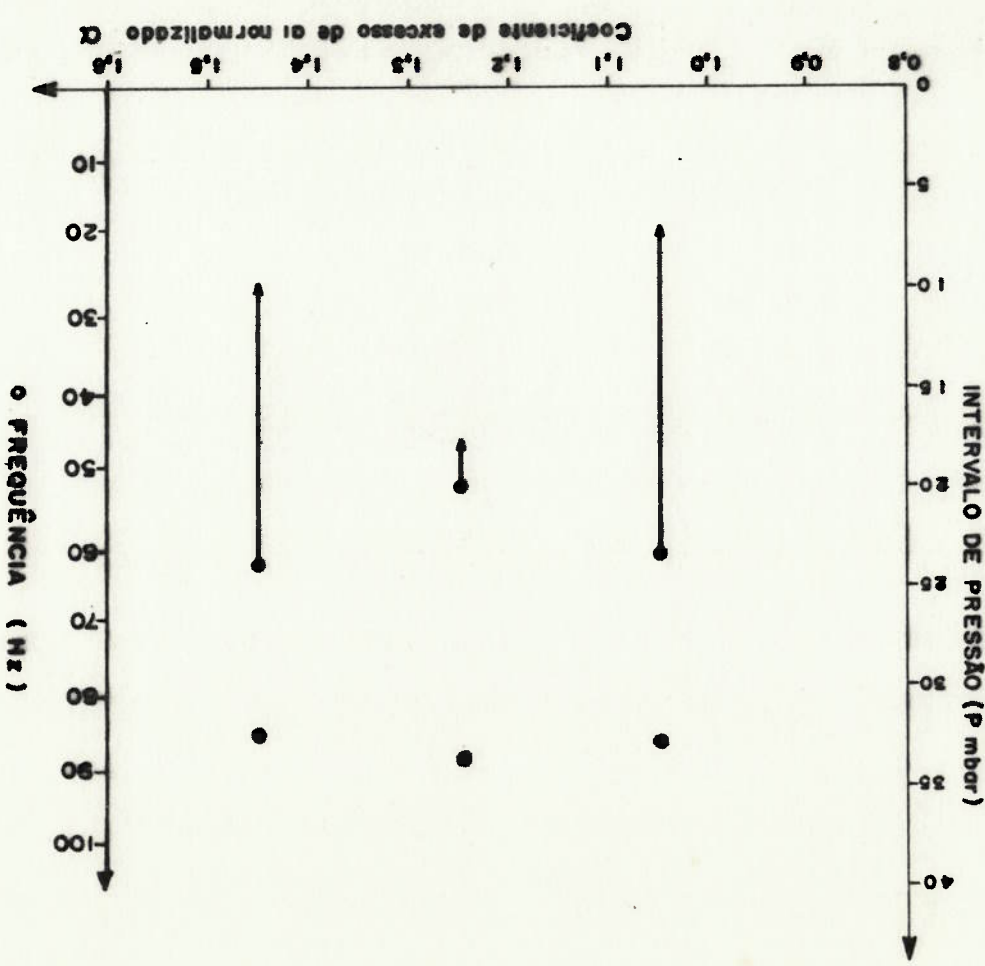


figura 4.24 Variação da amplitude da pressão da presso Grupo V

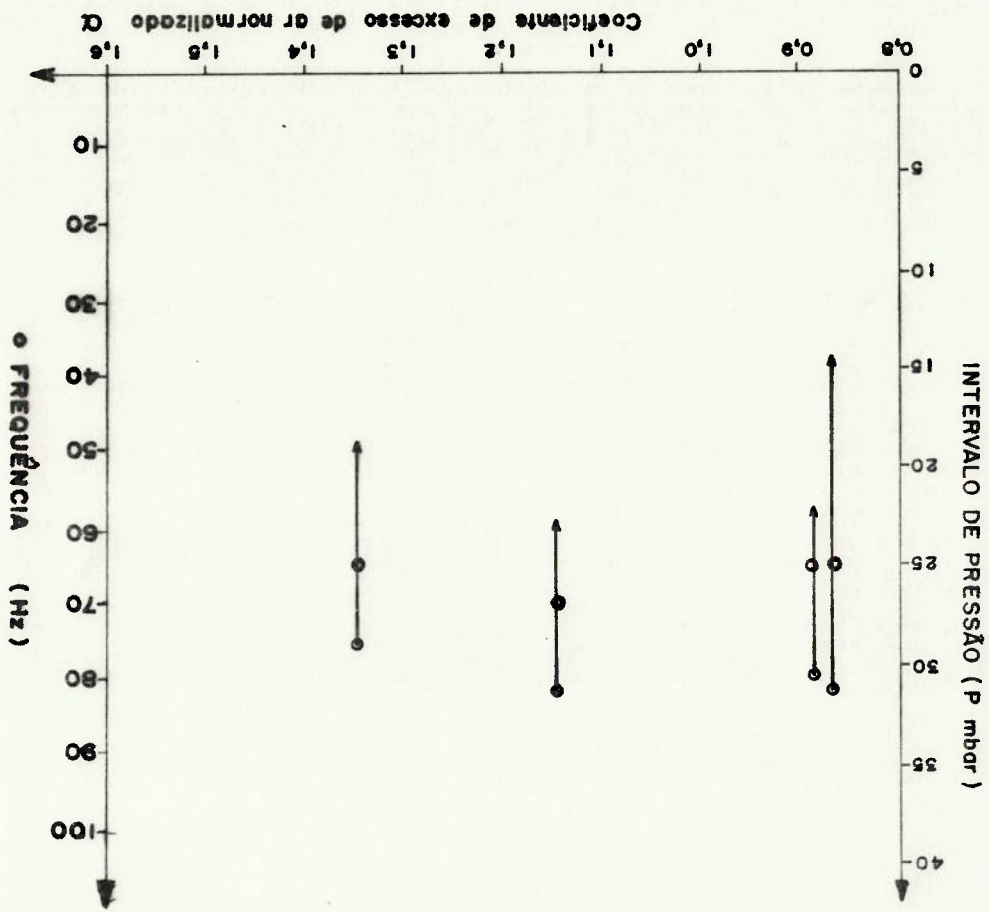
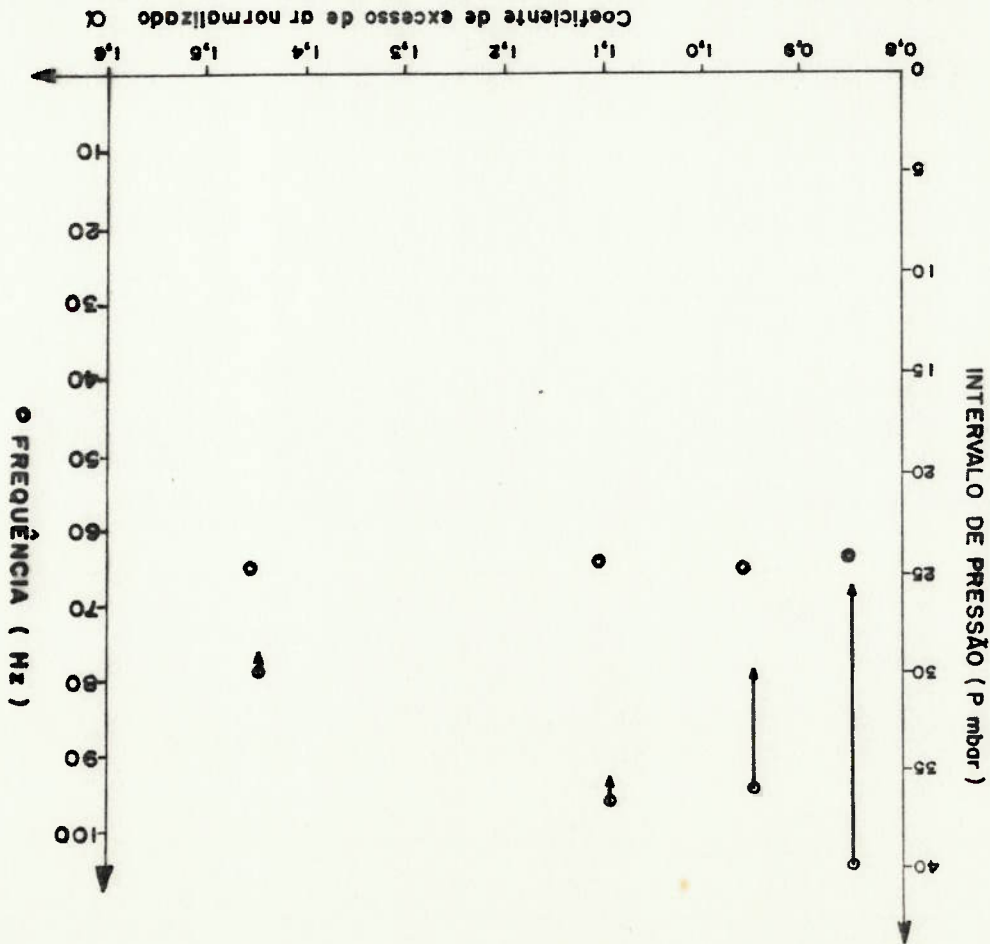


figura 4.25 Variação da amplitude da presso Grupo VI



As potências por unidade de área da seção transversal geradas no combustor são mostradas nas figuras 4.28 e 4.29. O valor calculado foi encontrado multiplicando a vazão de combustível medida em cada teste pelo poder calorífico inferior do combustível e a eficiência média calculada. Observa-se que taxas da ordem de  $1,9 \text{ MW/m}^2$  foram obtidas para testes com as maiores vazões de massa de combustível, na versão  $L = 3.200 \text{ mm}$ , operando com excesso de ar em torno de  $10 \%$  e eficiência de combustão em torno de  $95 \%$ .

#### 4.8 Potência gerada no combustor

Os percentuais das taxas de calor transferidos para a água de refrigeração são mostrados nas figuras 4.26 e 4.27. Observa-se que esses percentuais se situam entre  $40 \%$  e  $60 \%$  para a versão  $L = 2.400 \text{ mm}$ , enquanto que, para a versão  $L = 3.200 \text{ mm}$ , esses percentuais sobem para a faixa de  $60$  a  $80 \%$ . Esse fato é consequência direta da maior área de camisa e das maiores temperaturas que ocorreram na versão mais longa.

#### 4.7 Energia transferida para a água de refrigeração

As frequências geradas no combustor apresentadas nas figuras 4.20 a 4.25. Os dados correspondem ao trecho de operação denominado de "tempo de regime". Observa-se que as frequências geradas nos grupos I, II e III situaram-se entre  $65$  a  $90 \text{ Hz}$ . e que as frequências dos grupos IV, V e VI situaram-se entre  $65$  a  $70 \text{ Hz}$ .

figura 4.27 Percentuais da taxa de calor transferida para água de refrigeração versus  $L = 3.200\text{mm}$

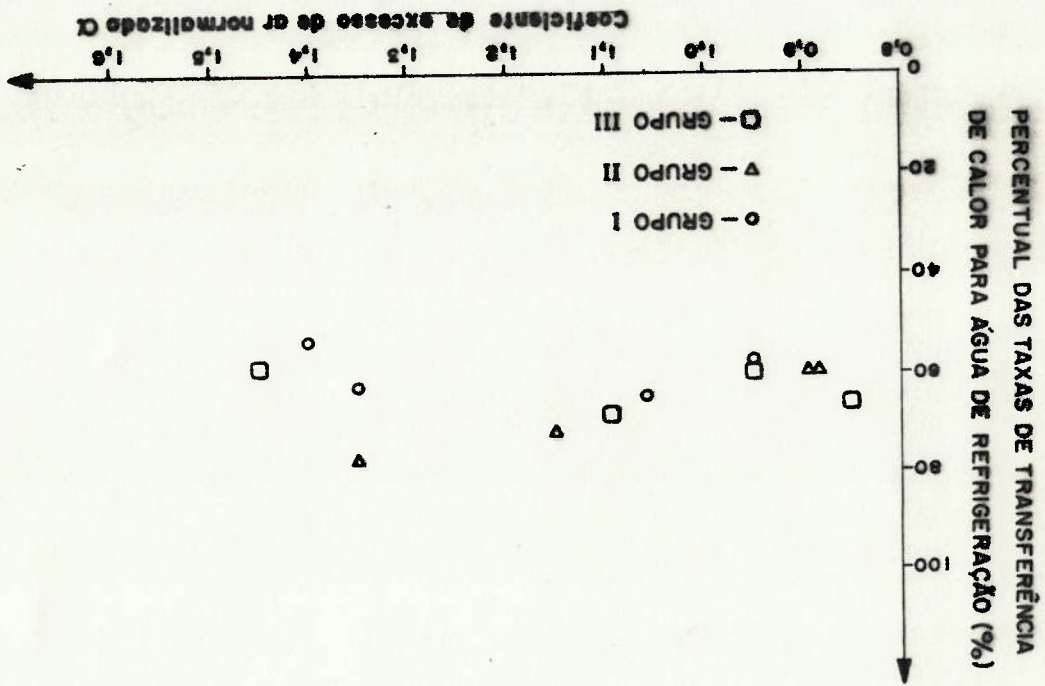


figura 4.26 Percentuais da taxa de calor transferida para água de refrigeração versus  $L = 2.400\text{mm}$

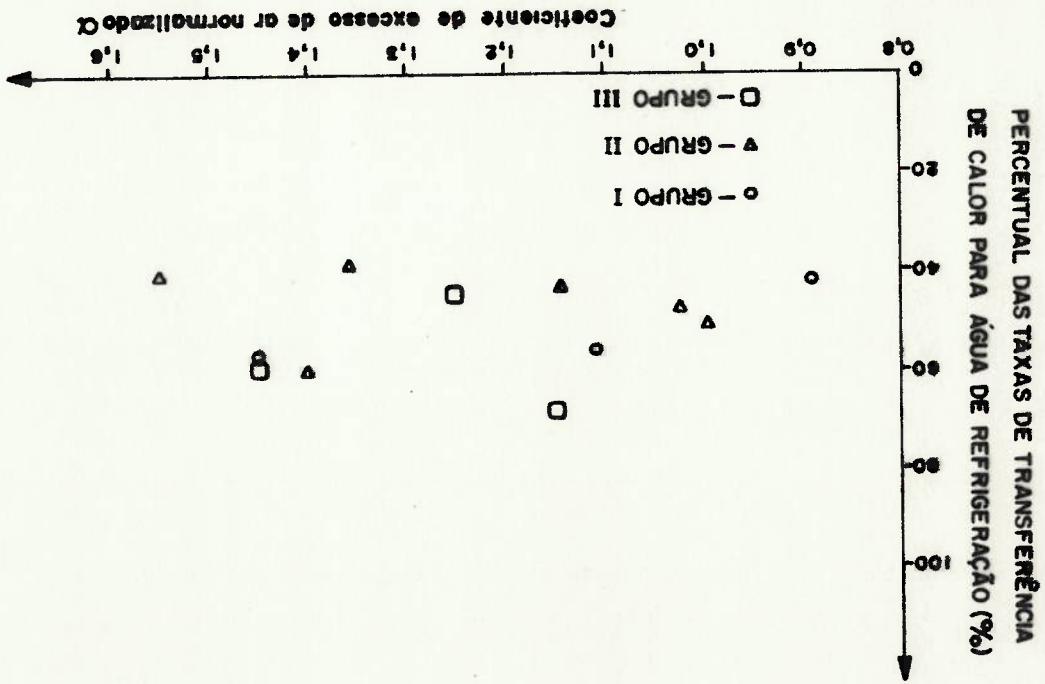


figura 4.28 Potências por unidade de área transversal do combustor Versão L = 2.400 mm

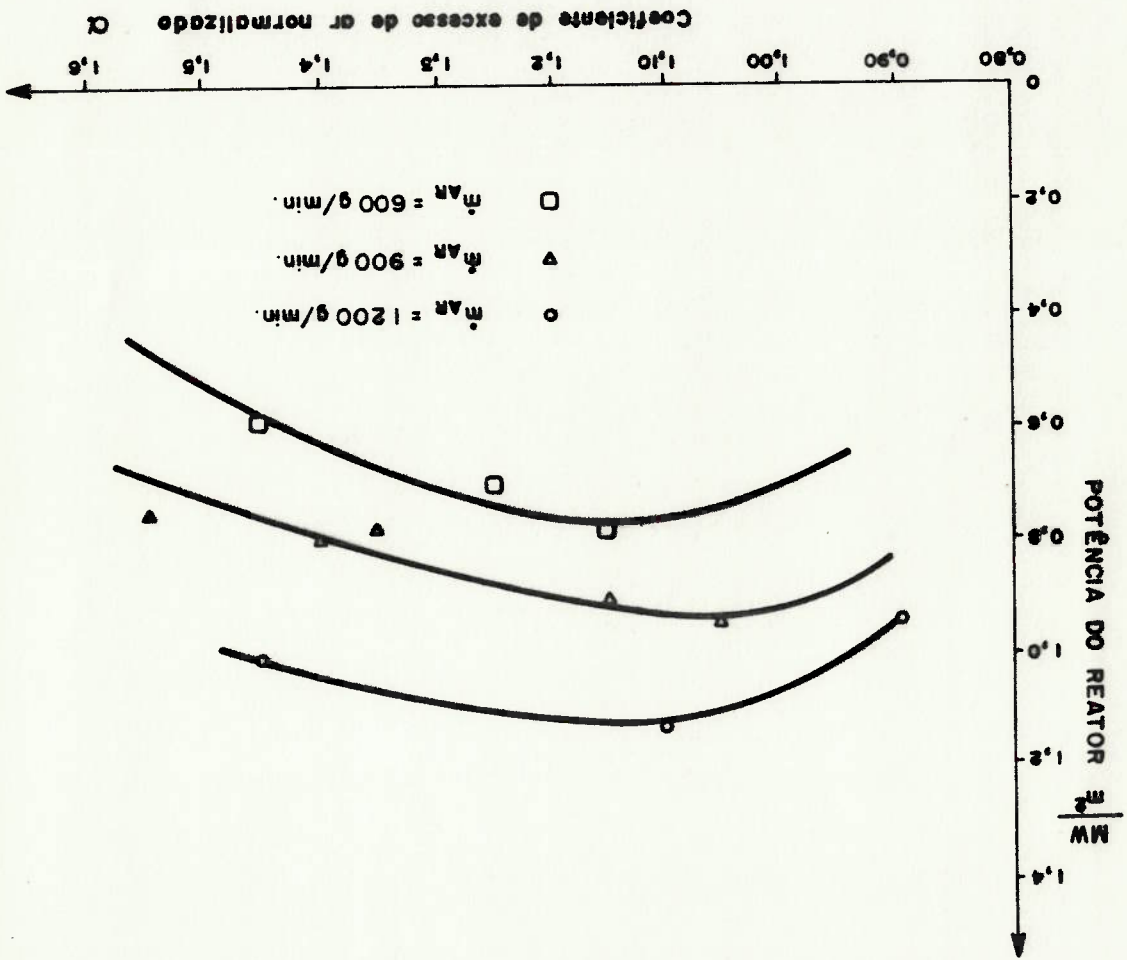
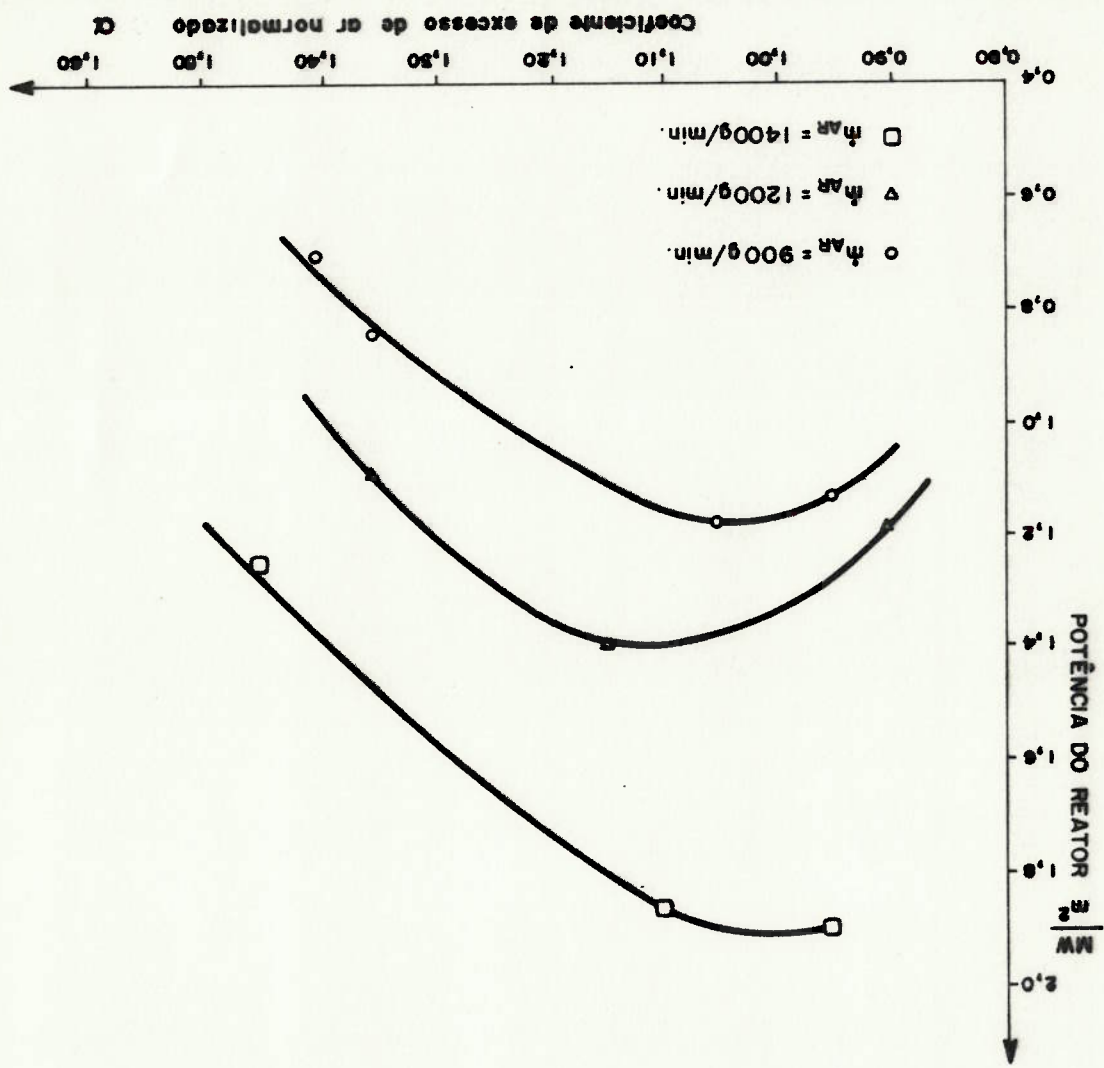


figura 4.29 Potências por unidade de área transversal do combustor Versão L = 3.200mm





#### 4.9 Comparação dos parâmetros obtidos em relação aos sistemas

##### de combustão existentes

No combustor pulsativo operando com casca de dendena versão 3.200 mm, obteve-se uma eficiência máxima de 96,0 %, sendo que a vazão do combustível variou de 204,0 a 535,1 kg/m<sup>2</sup>.h e a potência máxima em torno de 1,9 MW/m<sup>2</sup>.

Para caldeiras de grelha fixa operando com vazão de vapor variando de 300 a 13.000 kg/h, a vazão do combustível situa-se na faixa de 146,5 a 274,0 kg/m<sup>2</sup>.h [31]. Em grelhas móveis queimando antracita pulverizada, a vazão de combustível é de 107,0 a 122,0 kg/m<sup>2</sup>.h [31]. A potência produzida em uma caldeira de grelha fixa, operando com lenha ou bagaço, é de 1,42 MW/m<sup>2</sup>. Para um reator de leito fluidizado de 200 mm de diâmetro, operando com carvão vegetal com diâmetro de partículas variando de 0,20 a 1,7 cm, a vazão de alimentação de combustível situou-se entre 44,6 e 95,6 kg/m<sup>2</sup>.h, o que produziu uma potência máxima de 0,694 MW/m<sup>2</sup> [32].

Para uma caldeira marca ATA, modelo 25 LF, que usa lenha como combustível, a vazão máxima de combustível é de 310,0 kg/m<sup>2</sup>.h, produzindo uma potência máxima de até 0,890 MW/m<sup>2</sup> [33].

Assim, sobre o combustor pulsativo objeto desse estudo se compara favoravelmente sobre os aspectos térmicos com os sistemas de combustão existentes no mercado nacional.

comprovado pelo nível da queda da amplitude da pressão ao longo menor quando comparada com a versão anterior. Este fato pode ser quantidade de material retida na grelha foi significativamente excessos de ar superior a 10 %. Nesta versão observou-se que a despenho, com produção de monóxido de carbono de zero para o Na versão L = 3.200 mm, o combustor apresentou o melhor situou-se entre 40 e 60 %.

NW/m<sup>2</sup>. A taxa de energia transferida para a água de refrigeração entre 85 e 90 Hz. A potência máxima gerada no reator foi de 1,13 pressão actística foi da ordem de 24 mbar e as frequências variaram pressão ao longo do teste. Para esta versão, a máxima amplitude de trazendo consequências no que diz respeito à queda da amplitude da de queima. Este acumulo aumentou a perda de carga do reator de alimentação de combustível foi ligeiramente maior do que a taxa Observou-se o acumulo de material na grelha, indicando que a taxa 90 % das partículas com diâmetros menores do que 0,35 mm. aproximadamente zero. O particulado elutriado continha cerca de com excesso de ar de 10 %, a produção de monóxido de carbono foi 2.400 mm e L = 3.200 mm de altura. Para a primeira versão operando Um combustor do tipo Rijke foi testado nas versões de L =

tradicionalis como a lenha e o carvão vegetal. qual se aproveitado racionalmente, substituirá combustíveis combustível na Bahia para o ano de 1990 é de cerca de 9.000 t, o sólido proveniente da extração do óleo de palma. O potencial do condições de queima pulsativa da casca de dendêresíduo agrícola O objetivo deste trabalho foi investigar experimentalmente as

do teste. Em alguns testes, uma inspeção visual foi realizada observando-se que ficaram retidas na grelha apenas cinzas e, conseqüentemente, a taxa de alimentação do combustível foi aproximadamente igual a taxa de queima. As frequências no reator situaram-se entre 63 e 70 Hz. As amplitudes de pressão acústica chegaram a 40 mbar, as mais altas registradas durante os experimentos. As temperaturas dos gases de exaustão foram as mais altas. Como conseqüência, observaram-se, nesta versão, as maiores temperaturas da água de refrigeração. O percentual da taxa de energia transferida para a água de refrigeração situou-se entre 60 e 80 %. As potências máximas por unidade de área geradas no reator foram da ordem de  $1,9 \text{ MW/m}^2$ . Observou-se quantitativamente que para as maiores amplitudes das pressões acústicas obtiveram-se as mais altas taxas de transferência de calor.

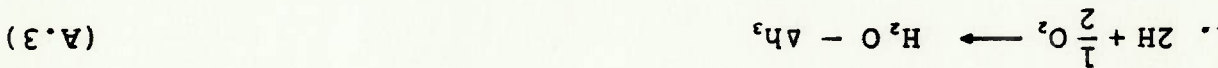
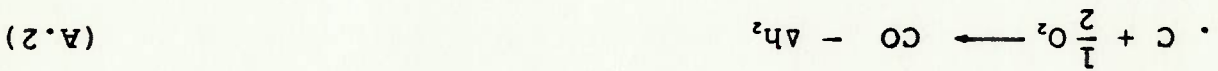
Para finalizar, as seguintes recomendações e sugestões são formuladas para futuros experimentos:

- a) verificar a dependência da pressão acústica com espessura do leito em combustão;
- b) construir a grelha dotada de mecanismo de movimentação para limpeza do leito;
- c) investigar a dependência entre as taxas de transferência de calor e o nível de pressão acústica;
- d) construir câmara de retenção de particulados com volume controlável ao volume da câmara de desacoplamento, para não amortecer as oscilações;
- e) estudar o efeito da relação diâmetro/altura do combustor, visando o projeto de combustores em escala aumentada.

APÊNDICE - A

A.1 Balanço de massa do combustor

Para a realização do balanço de massa é necessário o conhecimento da análise elemental do combustível, mostrada na tabela 2.1. A composição elemental da casca do dende é do tipo C, H, O, N, tendo as seguintes reações termoquímicas governantes, para efeito de balanço de massa:



Para a efetivação do balanço de massa, formulou-se as seguintes hipóteses de trabalho:

a) considerou-se que o combustor operando em regime permanente;

b) a vazão mássica do combustível é conhecida;

c) a composição elemental do combustível é conhecida;

d) a composição volumétrica do ar é conhecida, sendo :

nitrogênio 78,09 % , oxigênio 20,95 % , argônio 0,93 % e

díóxido de carbono 0,03 %;

e) o nitrogênio fornecido à combustão é inerte;

f) o hidrogênio contido no combustível sai nos gases de

exaustão sob a forma de vapor d'água;

g) é conhecida a composição dos gases de exaustão

CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> a cada instante.

Ressalta-se que a massa molecular média da mistura de k espécies químicas é dada por:

$$MM_j = \sum_{k=1}^k MM_{k,j}$$

(A.4)

e que a fração mássica do componente j em uma mistura de k espécies químicas é dada por:

$$Y_j = \frac{\sum_{k=1}^k m_{k,j}}{m_{z,j}} = \frac{\sum_{k=1}^k m_{k,j}}{m_{z,j}}$$

(A.5)

A transformação de uma fração em base úmida para seca e vice versa é dada pela equação:

$$W_{j,BU} = W_{j,BS} (1 - W_{H_2O})$$

(A.6)

O balanço de massa pode ser esquematizado pela figura A.1.

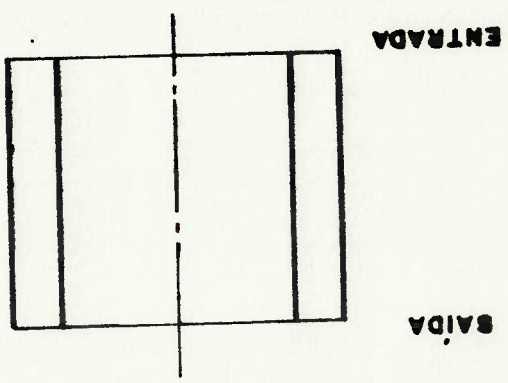


figura A.1 Volume de controle para o balanço de massa no combustor

A conservação da massa é dada por:

De acordo com a hipótese a, isto é, regime permanente, a

equação A.7 fica:

$$(A.7) \quad \frac{a}{at} \int_{AC}^x p dV + \int_{AC}^x \vec{p} \cdot d\vec{A} = 0$$

(A.8)

$$\sum_j^{j=1} m_j = 0$$

A conservação do carbono é dada por :

$$(A.9) \quad \dot{m}_{C,Comb} + \dot{m}_{C,AR} - \dot{m}_{C,NC} - \dot{m}_{C,CO} - \dot{m}_{C,CO_2} = 0$$

Dividindo a equação A.9 por  $\dot{m}_{Comb}$ , tem-se:

$$(A.10) \quad 1 + \frac{\dot{m}_{C,AR}}{\dot{m}_{Comb}} - \frac{\dot{m}_{C,NC}}{\dot{m}_{Comb}} - \frac{\dot{m}_{C,CO}}{\dot{m}_{Comb}} - \frac{\dot{m}_{C,CO_2}}{\dot{m}_{Comb}} = 0$$

porém,

$$(A.11) \quad \dot{m}_{C,AR} = \frac{PA_{C,X} \cdot \dot{m}_{AR}}{PA_{C,Y} \cdot \dot{m}_{CO_2,AR}}$$

e

$$(A.12) \quad \frac{\dot{m}_{C,CO}}{\dot{m}_{Comb}} = \frac{PA_{C,Y} \cdot \dot{m}_{CO_2,Comb}}{MM_g \cdot \dot{m}_{Comb}} - \frac{\dot{m}_{C,CO_2}}{\dot{m}_{Comb}} = \frac{PA_{C,Y} \cdot \dot{m}_{CO_2,Comb}}{MM_g \cdot \dot{m}_{Comb}}$$

Analisando a equação A.13 nota-se que a parcela  $f_C$  é conhecida pela análise elementar do combustível. Na segunda, quarta e quinta parcelas também as variáveis são conhecidas ou medidas, portanto da terceira parcela pode-se estimar a quantidade de carbono não queimado.

$$f_C + \frac{P_{A,C} \cdot X_{AR} \cdot m_{CO_2} \cdot m_{Comb}}{M_{AR}} - \frac{m_{C,NC}}{m_{Comb}} - \frac{P_{A,C} \cdot m_{CO} \cdot Y_{CO}}{M_{C,CO}} - \frac{P_{A,C} \cdot m_{CO_2} \cdot Y_{CO_2}}{M_{C,CO_2}} = 0 \quad (A.13)$$

então,

Dividindo a equação A.14 por  $m_{Comb}$ , tem-se:

$$m_{O,Comb} + m_{AR} - M_{O_2} - M_{O,CO} - m_{O,CO_2} - m_{O,H_2O} = 0 \quad (A.14)$$

A conservação do oxigênio é expressa por:

$$f_O + \frac{m_{O,AR}}{m_{Comb}} - \frac{m_{O_2,g}}{m_{Comb}} - \frac{m_{O,CO}}{m_{Comb}} - \frac{m_{O,CO_2}}{m_{Comb}} - \frac{m_{O,H_2O}}{m_{Comb}} = 0 \quad (A.15)$$

contudo,

$$(A.16) \quad \dot{m}_{O_2, AR} = (X_{O_2} + X_{CO_2}) \frac{MM_{O_2}}{MM_{AR}} \dot{m}_{AR, Comb}$$

$$(A.17) \quad \frac{\dot{m}_{O_2, Comb}}{g} = \frac{Y_{CO_2} \cdot MM_{O_2}}{MM_{O_2, Comb}} \dot{m}_{O_2, Comb}$$

$$(A.18) \quad \frac{\dot{m}_{O, CO}}{g} = \frac{Y_{CO} \cdot MM_{CO}}{MM_{O, Comb}} \dot{m}_{O, Comb}$$

$$(A.19) \quad \frac{\dot{m}_{O, CO_2}}{g} = \frac{Y_{CO_2} \cdot MM_{CO_2}}{MM_{O, Comb}} \dot{m}_{O, Comb}$$

$$(A.20) \quad \frac{\dot{m}_{O, H_2O, Comb}}{MM_{O_2} \cdot \dot{m}_{H_2O, Comb}} = \frac{\dot{m}_{O, Comb}}{2MM_{H_2O} \cdot \dot{m}_{H_2O, Comb}}$$

Então,

$$F_{O_2} + (X_{O_2} + X_{CO_2}) \frac{MM_{O_2}}{MM_{AR}} \dot{m}_{AR, Comb} - \frac{Y_{CO_2} \cdot MM_{O_2}}{MM_{O_2, Comb}} \dot{m}_{O_2, Comb} - \frac{Y_{CO} \cdot MM_{CO}}{MM_{O, Comb}} \dot{m}_{O, Comb} + \frac{Y_{CO_2} \cdot MM_{CO_2}}{MM_{O, Comb}} \dot{m}_{O, Comb} = 0$$

$$(A.21) \quad - \frac{Y_{CO_2} \cdot MM_{CO_2}}{MM_{O_2, Comb}} \dot{m}_{O_2, Comb} - \frac{2MM_{H_2O} \cdot \dot{m}_{H_2O, Comb}}{MM_{O_2} \cdot \dot{m}_{H_2O, Comb}} = 0$$

A conservação do nitrogênio é dada por:

$$(A.22) \quad \dot{m}_{N_2, Comb} + \dot{m}_{H_2, AR} - \dot{m}_{N_2, g} = 0$$

Dividindo por  $\dot{m}_{N_2, Comb}$ , tem-se:

$$(A.23) \quad F_N + \frac{\dot{m}_{N_2, AR}}{\dot{m}_{N_2, g}} - \frac{\dot{m}_{N_2, Comb}}{\dot{m}_{N_2, Comb}} = 0$$



$$\dot{m}_{N_2, AR} = \frac{\dot{m}_{N_2, Comb}}{X_{N_2} \cdot MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}}$$

contudo,

(A.24)

$$\frac{\dot{m}_{N_2, g}}{\dot{m}_{N_2, Comb}} = \frac{Y_{N_2} \cdot MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{Comb}}$$

Então,

(A.25)

$$\dot{F}_N = \frac{X_{N_2} \cdot MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{Y_{N_2} \cdot MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{Comb}} + \frac{MM_{AR} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{Comb}} = 0$$

A conservação do hidrogenio é expressa por:

(A.27)

$$\dot{m}_{H_2, Comb} - \dot{m}_{H_2, OComb} = 0$$

Dividindo a equação A.27 por  $\dot{m}_{Comb}$ , tem-se:

(A.28)

$$\dot{F}_H - \dot{m}_{H_2, OComb} = 0$$

Então,

$$\frac{\dot{m}_{H_2, OComb}}{\dot{m}_{H_2, OComb} \cdot \dot{m}_{H_2, OComb}} = \frac{\dot{m}_{Comb}}{\dot{m}_{H_2, OComb} \cdot \dot{m}_{Comb}}$$

(A.29)

$$\dot{F}_H + \frac{\dot{m}_{H_2, OComb}}{\dot{m}_{H_2, OComb} \cdot \dot{m}_{Comb}} = 0$$

(A.30)

A conservação do argônio é dada por:

$$\dot{m}_{Ar, AR} - \dot{m}_{Ar, g} = 0$$

(A.31)

(A.31)

$$\dot{m}_{Ar,AR} - \dot{m}_{Ar,g} = 0$$

A conservação do argônio é dada por:

(A.30)

$$\dot{F}_H + \frac{\dot{m}_{H_2O,Conv} \cdot MM_{H_2O}}{MM_{H_2O,Conv}} = 0$$

Então,

(A.29)

$$\frac{\dot{m}_{H_2O,Conv}}{MM_{H_2O,Conv}} = \frac{\dot{m}_{H_2O,Comb}}{MM_{H_2O,Comb}}$$

(A.28)

$$\dot{F}_H - \dot{m}_{H_2O,Conv} = 0$$

Dividindo a equação A.27 por  $\dot{m}_{Comb}$ , tem-se:

(A.27)

$$\dot{m}_{H,Comb} - \dot{m}_{H_2O,Conv} = 0$$

A conservação do hidrogênio é expressa por:

(A.26)

$$\dot{F}_N + \frac{\dot{m}_{AR,Comb} \cdot MM_{AR}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}} - \frac{\dot{m}_{N_2,g} \cdot MM_{N_2}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{N_2,g}} = 0$$

Então,

(A.25)

$$\frac{\dot{m}_{N_2,g}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{N_2,g}} = \frac{\dot{m}_{AR,Comb}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}}$$

(A.24)

$$\frac{\dot{m}_{N_2,AR}}{MM_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}} = \frac{\dot{m}_{N_2,Comb}}{MM_{AR} \cdot \dot{m}_{AR}}$$

contudo,

Dividindo a equação A.31 por  $\dot{m}_{Comb}$ , tem-se:

$$(A.32) \quad \frac{\dot{m}_{Ar,AR}}{\dot{m}_{Ar,g}} - \frac{\dot{m}_{Comb}}{\dot{m}_{Ar,g}} = 0$$

mas,

$$(A.33) \quad \frac{\dot{m}_{Ar,AR}}{Y_{Ar,PA} \cdot \dot{m}_{Ar}} = \frac{\dot{m}_{Comb}}{MM_{Ar} \cdot \dot{m}_{Comb}}$$

$$(A.34) \quad \frac{\dot{m}_{Ar}}{\dot{m}_{Ar}} = \frac{Y_{Ar,PA} \cdot \dot{m}_{Ar}}{MM_{Ar} \cdot \dot{m}_{Comb}}$$

então,

$$(A.35) \quad X_{Ar,PA} \cdot \dot{m}_{Ar} - \frac{MM_{Ar} \cdot \dot{m}_{Comb}}{Y_{Ar,PA} \cdot \dot{m}_{Ar}} = 0$$

A conservação da água relativa à unidade é dada por:

$$(A.36) \quad \dot{m}_{H_2O,Comb} + \dot{m}_{H_2O,AR} - \dot{m}_{H_2O,u} = 0$$

Dividindo por  $\dot{m}_{Comb}$ , tem-se:

$$(A.37) \quad \frac{\dot{m}_{H_2O,Comb}}{\dot{m}_{H_2O,u}} + \frac{\dot{m}_{H_2O,AR}}{\dot{m}_{H_2O,u}} - \frac{\dot{m}_{Comb}}{\dot{m}_{H_2O,u}} = 0$$

$$(A.38) \quad f_{H_2O} + X_{H_2O} \cdot MM_{H_2O} \cdot \dot{m}_{AR} - \frac{\dot{m}_{Comb}}{\dot{m}_{H_2O,u}} = 0$$

Para as cinzas tem-se:

$$(A.39) \quad m_{CZ, Comb} - m_{CZ} = 0$$

Dividindo por  $m_{Comb}$ , tem-se:

$$(A.40) \quad \frac{m_{CZ, Comb}}{m_{CZ}} - \frac{m_{Comb}}{m_{CZ}} = 0$$

Então,

$$(A.41) \quad \frac{m_{CZ}}{m_{Comb}} - \frac{m_{Comb}}{m_{CZ}} = 0$$

O somatório das frações molares dos gases de exaustão

(base seca) será:

$$(A.42) \quad Y_{CO_2} + Y_{CO} + Y_{O_2} + Y_{AR} + Y_{N_2} = 1$$

Portanto, pode-se fazer um resumo das equações demonstradas e

que serão úteis na quantificação dos experimentos:

$$(A.13) \quad F_C + \frac{P_A \cdot C \cdot X_{CO_2} \cdot m_{Comb}}{m_{AR}} - \frac{m_{C, NC}}{m_{Comb}} - \frac{P_A \cdot C \cdot m_{CO}}{m_{Comb}} - \frac{P_A \cdot C \cdot m_{CO}}{m_{Comb}} = 0$$

$$F_{O_2} + (X_{O_2} + X_{CO_2}) \frac{m_{O_2, AR}}{m_{AR}} - \frac{m_{O_2, Y}}{m_{O_2, Comb}} - \frac{m_{CO, Y}}{m_{CO, Comb}} +$$

$$(A.21) \quad - \frac{m_{CO_2, MM}}{m_{CO_2, Comb}} - \frac{m_{H_2O, Conv}}{m_{H_2O, Comb}} = 0$$

$$(A.26) \quad F_N + \frac{X_{N_2} \cdot m_{N_2, AR}}{m_{N_2, Comb}} - \frac{m_{N_2, Y}}{m_{N_2, Comb}} = 0$$

As equações A.13, A.21, A.25, A.30, A.35, A.38, A.41 e A.42 fazem um total de 8 equações. Analisando as variáveis temos então a serem calculadas:  $m_{C,nC}$ ;  $m_{H_2O,com}$ ;  $m_g$ ;  $Y_{N_2}$ ;  $Y_{AR}$ ;  $f_{CZ}$ . Em princípio tem-se mais equações que variáveis. Porém, as equações A.41 e A.32 serão usadas como comprováveis das demais. Outra relação de importância capital para o desenvolvimento da metodologia é a razão ar/combustível.

A razão ar/combustível estequiométrica ou teórica, é definida quando o ar (oxigênio) reage completamente com o combustível, ou

$$Y_{CO_2} + Y_{CO} + Y_{O_2} + Y_{AR} + Y_{N_2} = 1 \quad (A.42)$$

$$f_{CZ} - \frac{m_{CZ}}{m_{Comb}} = 0 \quad (A.41)$$

$$f_{H_2O} + \frac{X_{H_2O} \cdot MM_{H_2O} \cdot m_{AR}}{m_{H_2O,u}} - \frac{MM_{AR} \cdot m_{Comb}}{m_{H_2O,u}} = 0 \quad (A.38)$$

$$X_{AR} \cdot PA_{AR} \cdot m_{AR} - \frac{MM_{AR} \cdot m_{Comb}}{Y_{AR} \cdot PA_{AR} \cdot m_g} = 0 \quad (A.35)$$

$$f_H - \frac{MM_{H_2O} \cdot m_{H_2O,Conv}}{MM_{H_2O} \cdot m_{Comb}} = 0 \quad (A.30)$$

seja, não há excesso de ar ( $O_2$ ) nem formação de monóxido de

carbono (CO). Portanto a relação é:

$$(A.43) \quad \left. \frac{\dot{m}_{AR}}{\dot{m}_{Comb}} \right|_{EST.} = \frac{X_{O_2}}{MM_{AR}} \left( \frac{F_C}{PA_C} + \frac{2MM_{H_2}}{F_H} - \frac{MM_{O_2}}{F_O} \right)$$

No entanto, devido a formação do monóxido de carbono e a presença do oxigênio nos gases de exaustão por excesso de ar, faz-se necessário o cálculo da relação ar/combustível real, ou seja, a taxa ocorrida durante a experiência:

$$\left. \frac{\dot{m}_{AR}}{\dot{m}_{Comb}} \right|_{Real} = MM_{AR} \left[ \frac{F_N}{MM_{N_2}} + (1+J) \frac{F_H}{2MM_{H_2}} - \frac{MM_{O_2}}{F_O} - \frac{F_N}{MM_{N_2}} \right] \left[ X_{O_2} + X_{CO_2} - J(1-X_{H_2O}) \right]^{-1}$$

$$J = \frac{Y_{CO} + 2(Y_{CO} + Y_{CO_2})}{2 - Y_{CO}}$$

(A.44)

Se a equação A.43 for dividida pela equação A.44, tem-se um coeficiente que indicará se a combustão tem excesso ou não de oxigênio nos gases de exaustão. Portanto:

$$\alpha_{BS} = \left\{ \frac{F_H}{2MM_{H_2}} - \frac{MM_{O_2}}{F_O} - \left( Y_{CO_2} + Y_{O_2} \right) \left( \frac{F_H}{2MM_{H_2}} - \frac{MM_{O_2}}{F_O} \right) - \frac{F_N}{MM_{N_2}} \right\} \cdot \left\{ \left( X_{O_2} + X_{CO_2} - Y_{CO_2} - Y_{O_2} \right) \left( \frac{F_C}{PA_C} + \frac{2MM_{H_2}}{F_N} - \frac{MM_{O_2}}{F_O} \right) \right\}$$

(A.45)

O valor da vazão de ar é calculado a partir dos dados retirados da placa de orifício.

A vazão dos gases de exaustão é um parâmetro a ser calculado a partir do balanço de massa do combustor, ou seja, tendo como entrada o combustível e o ar primário de combustão.

Partindo da equação A.42 tem-se:

$$Y_{O_2} + Y_{CO_2} + Y_{CO} + Y_{AR} + Y_{N_2} = 1 \quad (A.42)$$

As frações molares dos gases de exaustão  $Y_{O_2}$ ,  $Y_{CO_2}$ ,  $Y_{CO}$  são mensuradas nos analisadores contínuos. Portanto, são necessárias as frações molares do nitrogênio e argônio definidas pelas equações A.25 e A.35. Substituindo na equação A.42 tem-se a vazão dos gases de exaustão:

$$Y_{O_2} + Y_{CO_2} + Y_{CO} + \frac{F_{N_2} \cdot \dot{m}_{Comb}}{X_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{MM} \cdot \dot{m}_{Comb}} - \frac{X_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{MM} \cdot \dot{m}_{Comb}}{X_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{MM} \cdot \dot{m}_{Comb}} +$$

$$+ \frac{X_{AR} \cdot \dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{PA} \cdot \dot{m}_{Comb}}{X_{AR} \cdot \dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{MM} \cdot \dot{m}_{Comb}} = 1 \quad (A.46)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{MM} \cdot \left[ \dot{m}_{Comb} \cdot \frac{F_{N_2}}{X_{N_2}} + \left( \frac{\dot{m}_{AR} \cdot \dot{m}_{MM}}{X_{N_2}} + \frac{\dot{m}_{AR}}{X_{AR}} \right) \cdot \dot{m}_{AR} \right] \cdot \left( Y_{O_2} + Y_{CO_2} + Y_{CO} \right) \quad (A.47)$$

Portanto, pode-se calcular a vazão de carbono não queimado durante a experiência. Do balanço de massa, temos a equação A.13.

$$F_c + \frac{P_{A,C} \cdot X_{CO_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{AR}} - \frac{\dot{m}_{C,NC}}{m_{Comb}} - \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO}}{MM} - \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{MM} = 0 \quad (A.13)$$

$$\frac{\dot{m}_{g, Comb}}{g} = \frac{F_{O_2} + \frac{(X_{O_2} + X_{CO}) \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{O_2}} - \frac{F_{N_2} \cdot \dot{m}_{H_2O}}{MM_{H_2O}} - \frac{2MM_{H_2O} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{H_2O}}}{MM_{O_2} \cdot Y_{O_2} + MM_{CO} \cdot Y_{CO} + MM_{CO_2} \cdot Y_{CO_2}}$$

daí,

$$- \frac{Y_{CO_2} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{CO_2}} - \frac{2MM_{H_2O} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{H_2O}} = 0 \quad (A.48)$$

$$F_{O_2} + \frac{(X_{O_2} + X_{CO}) \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{O_2}} - \frac{Y_{O_2} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{O_2}} - \frac{Y_{CO} \cdot \dot{m}_{Comb}}{MM_{CO}} +$$

Substituindo a equação A.28 na A.20 temos:



Logo,

$$(A.49) \quad \frac{\dot{m}_{C,NC}^{comb}}{f_c} = \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO} \cdot Y_{CO}}{MM_{CO} \cdot g} - \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot Y_{CO_2}}{MM_{CO_2} \cdot g} + \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot X_{CO_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{AR} \cdot g} + \left[ Y_{CO} + Y_{CO_2} \right]$$

$$(A.50) \quad \frac{\dot{m}_{C,NC}^{comb}}{f_c} = \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO} \cdot Y_{CO}}{MM_{CO} \cdot g} - \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot Y_{CO_2}}{MM_{CO_2} \cdot g} + \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot X_{CO_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{AR} \cdot g} + \frac{P_{A,C} \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot X_{CO_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{AR} \cdot g}$$

Dai pode-se calcular a vazão mássica de cada gás (base seca).

Para o oxigênio tem-se:

$$(A.51) \quad \dot{m}_{O_2,BS} = \frac{MM_{O_2} \cdot Y_{O_2} \cdot \dot{m}_{g,BS}}{MM_{g,BS}}$$

Para o dióxido de carbono tem-se:

$$(A.52) \quad \dot{m}_{CO_2} = \frac{MM_{CO_2} \cdot Y_{CO_2} \cdot \dot{m}_{g,BS}}{MM_{g,BS}}$$

Para o monóxido de carbono tem-se:

$$(A.53) \quad \dot{m}_{CO} = \frac{MM_{CO} \cdot Y_{CO}}{MM_{g,BS}}$$

Para o argônio tem-se:

$$(A.54) \quad \dot{m}_{AR} = \frac{P_{A,AR} \cdot X_{AR} \cdot \dot{m}_{g,BS}}{MM_{AR}}$$

Para o nitrogênio tem-se:

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{MM_{N_2} \cdot X_{N_2} \cdot \dot{m}_{AR}}{MM_{AR}} + F_N \cdot \dot{m}_{Comb, BS}$$

(A.55)

Para o vapor de água tem-se:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{MM_{H_2O} \cdot X_{H_2O} \cdot \dot{m}_{AR, BS}}{MM_{AR, BS}} + \frac{F_{H_2O} \cdot \dot{m}_{Comb, BS}}{MM_{H_2O}} \left( 1 - F_{H_2O} \right)$$

$$+ \frac{MM_{H_2O} \cdot F_{H_2O} \cdot \dot{m}_{Comb, BS}}{MM_{H_2O}}$$

(A.56)

Na Bahia, a implantação da cultura se deu ocasionalmente, com a chegada dos escravos africanos. Durante décadas a reprodução vegetativa foi realizada ocasionalmente por animais, urubus e o próprio homem. No entanto, estes dendezais nativos apresentam baixa produção por hectare. Com a introdução da variedade Tenera, mais recentemente tem-se buscado o aumento da produtividade, dando novo impulso à cultura. Para o plantio racional e realizado

notadamente no Pará e Amapá. adaptou na Bahia e mais recentemente na região Amazônica, como os principais países produtores. No Brasil, o dendê se novos dendezais e tendo a Malásia, Indonésia, Nigéria e Colômbia A variedade Tenera é a que vem sendo usada para formação de minerais, com pH 4,5 a 6,0, ligeiramente ondulados ou planos.

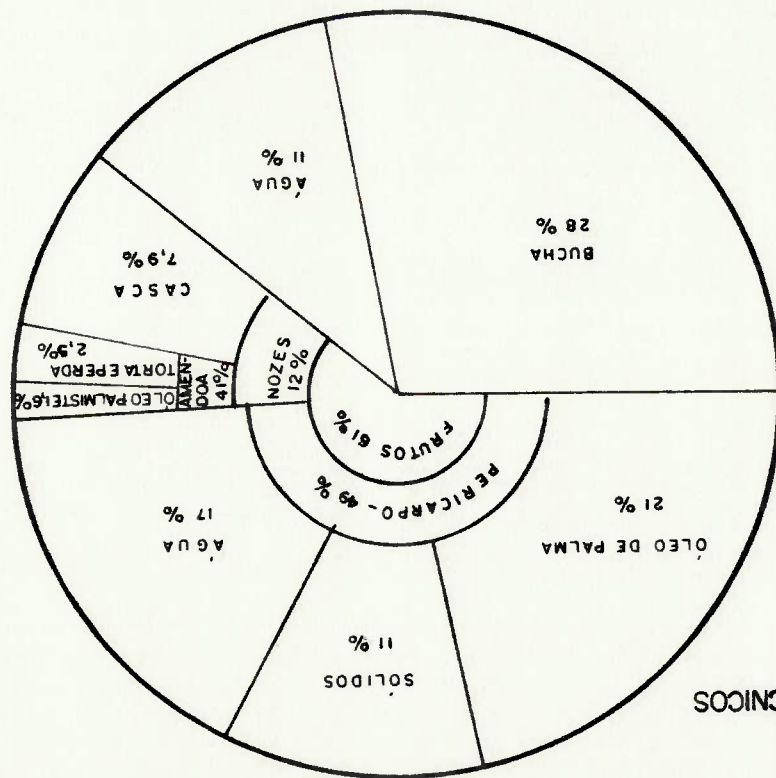
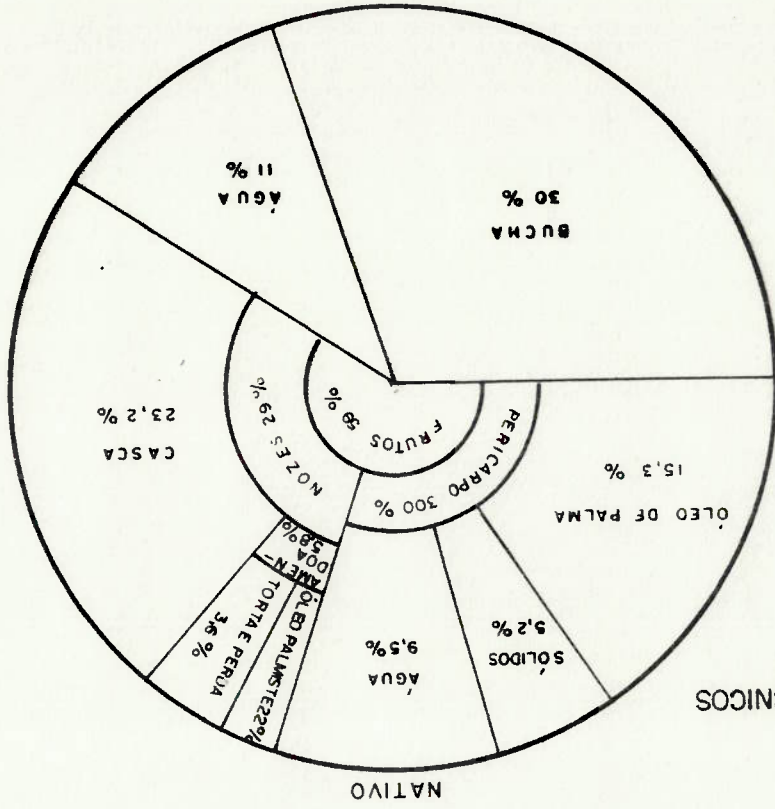
desenvolve melhor nos solos profundos e ricos em húmus e elementos de estagem. O dendê cresce em diversos tipos de solos, mas se acima de 2.000 mm por ano, bem distribuídas e sem grande período insolação bem distribuída, acima de 1.500 horas anuais e chuvas mensal entre 25 °C e 32 °C e mínima nunca inferior a 15 °C, o clima ideal para a produção do dendê é o de temperatura média

palmeira híbrida, resultante do cruzamento das outras duas [27]. variedades: Dura, Psifera e Tenera. A variedade Tenera é uma melaccoca e Elaeis guineensis, sendo que esta última reúne três e que agrupa três espécies: Elaeis madagascariensis, Elaeis Dendê é o nome vulgar da palmeira que pertence ao gênero "Elaeis" ao clima tropical úmido do litoral baiano.

o Brasil pelos escravos, no século XVII, que se adaptou muito bem O dendezeiro é uma palmeira originária da África, trazida para

B.1 Dendezeiro

Figura B.1 Balanço de massa para o dendê



### B.3 Extração de óleo de dendê

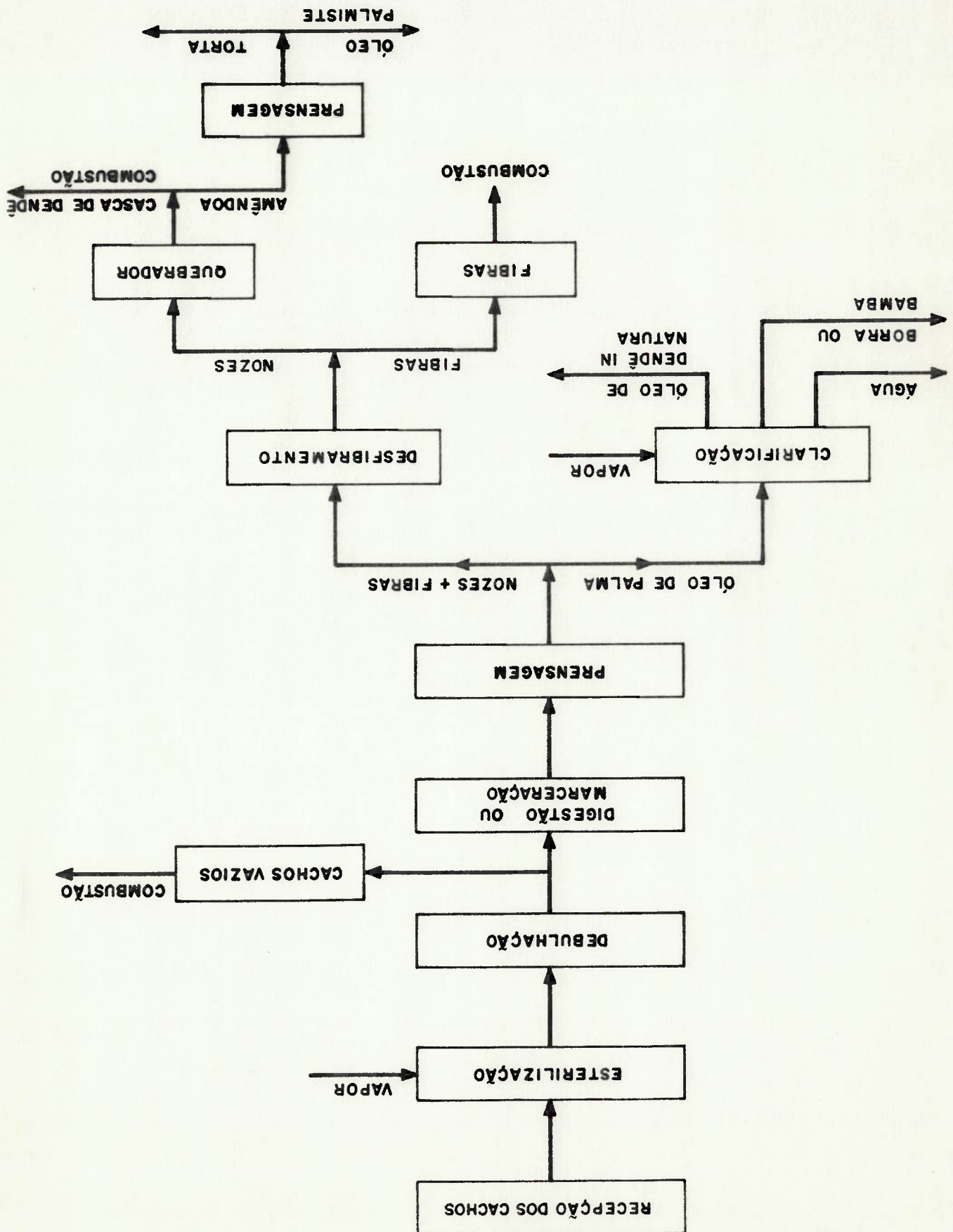
Da palmeira pode-se obter dois tipos de óleos: da polpa, extrai-se o óleo de dendê ou óleo da palma ou "Palm oil"; da amêndoa, extrai-se o óleo palmiste. Ambos são consumidos na indústria, sendo o primeiro usado, por exemplo, na produção de aço acaimado, na fabricação de margarinas, óleo comestíveis, combustíveis, sabões, cosméticos, etc e o segundo para produção de sabões, ceras, etc. Na figura B.2 apresenta-se o fluxograma de extração do óleo.

### B.2 Extração

torta, a bucha e a casca de dendê. As vantagens são acrescidas, pois, além do óleo extrai-se a hectare, só em óleo, conseguem-se 3.600 dólares por ano. O preço do óleo de dendê no mercado internacional gira em torno de 600 dólares por tonelada, o que significa que com apenas 1,0 kg/ha, o de oliva a 2.000 kg/ha e o de coco a 3.000 kg/ha. alcança a produtividade do dendê o de amêndoa chega a 1.200 de grãos que rendem 500 kg de óleo. Nenhum óleo alimentício 6.000 kg de óleo, enquanto que da soja um hectare produz 2.500 kg de balanço de massa encontra-se na figura B.1, ou seja, cerca de cachos por hectare ano [28] do qual se extrai 21 % de óleo, cujo produtividade da variedade Tenera é de 20.000 kg a 30.000 kg de Contudo, a grande safra ocorre no período de março a junho. A colheita é realizada ininterruptamente durante todo o ano. plantio, tendo um período vegetativo de mais de 30 anos [27].

dentro das técnicas agrônomicas, a planta começa a produzir a partir do 3º ou 4º ano e atinge a maturidade no 7º ano após o

Figura B.2 Fluxograma de processo



deixar lacunas, permitindo uma distribuição uniforme para uma massa, polpa e nozes, que irá encher completamente a prensa, sem agitados por meio de um eixo provido de paletas que agitam a forma cilíndrica, equipado com camisa de vapor, os frutos são aquecimento, faz com que as fibras liberem o óleo. No digestor de parte fibrosa da noz, dando início à extração do óleo que, pelo digestor ou macerador. Os frutos são dilacerados, separando a c) Digestão - Os frutos debulhados são conduzidos para o helicoidal.

são recolhidos numa outra calha e são transportados por parafuso separação dos frutos e estes dirigem-se para a parte inferior onde helicóide. A ação mecânica das paletas nos cachos provoca a carbono e eixo, onde são fixadas as paletas formando um frutos dos cachos. O debulhador consiste de uma calha em aço b) Debulhação - Esta operação tem como objetivo separar os uma hora.

1,0 a 3,0 bar e tendo um tempo de residência de aproximadamente horizontais onde é injetado vapor com pressão que pode variar de óleo. A operação é realizada em vasos de pressão verticais ou cozidos, a fim de impedir a ação enzimática para não acidificar o transportados para a usina. Em seguida são esterilizados ou a) Esterilização - Os cachos são cortados no campo e

sumariamente as fases do processo industrial:  
lavado com água e depois separado. A seguir, são mostrados que é realizado por uma prensa, enquanto no artesanal o óleo é semelhantes, diferenciando no industrial a separação do óleo industrial. No entanto, em ambos, as operações unitárias são artesanais, onde a força motriz é exercida por animais, e o Para extrair o óleo utilizam-se os seguintes processos:

As nozes provenientes do item f anterior são transportadas por correias para o quebrador. Este consiste de um rotor centrífugo que acelera as nozes e estas saem tangencialmente, chocando-se num anteparo e quebrando-se. A separação é feita por banho salino ou

#### B.4 Extração do óleo palmiste

usadas para geração de energia térmica. se as amendoas que produzem o óleo palmiste e as cascas que serão nozes, ou cocos são transportadas para o quebrador, onde retiram- onde serão usadas como combustível para geração de vapor. As das nozes. As fibras poderão ser transportadas para a caldeira com tela que, pelo movimento de rotação, permite separar as fibras transporta para o destibrador. O destibrador consiste em um tambor transportada por um desintegrador que a desfaz, enquanto a f) Destibramento - A massa (fibra e nozes), saída da prensa é

sabão.

comercializado e os resíduos ou bamba serão usados para fazer rendimento do óleo clarificado. Nesse estágio, o óleo "puro" será que retornam mais uma vez ao processo, na tentativa de aumentar o filtragem e desidratação, para separar o óleo "puro" dos resíduos submetido aos processos físicos de decantação, aquecimento, e e) Clarificação - O óleo extraído da polpa, óleo "bruto", é

nozes são conduzidas para o quebrador.

clarificador. A parte sólida, fibras e nozes, são separadas e as orifícios laterais da cesta. O óleo é bombeado para o pressão média de 100 bar, comprime-se a massa extraído óleo pelos perfurada lateralmente. Com a ação do cilindro hidráulico de d) Prensação - A massa (polpa e nozes), é carregada na cesta

de 80 °C;

melhor extração do óleo. A massa é mantida a uma temperatura média



países desenvolvidos e EUA encontram-se na vanguarda do consumo de dende ver tabela B.2. Verifica-se que a Comunidade Europeia, Outro fator importante observado é a importação mundial de óleo Bahia.

da variedade Tenera em grandes áreas da região Amazônica e da crescimento no período de 80/87 de 17,4 %, provocado pelo plantio 0,47 % da produção mundial. No entanto, verificou-se um e a América Latina, em seguida, com 4,7 %. O Brasil detém apenas produção mundial. A África aparece em segundo lugar, com 18,02 % produziram, em 1987, 6.599.000 t, o que corresponde a 77,27 % da lugar a Indonésia. O grupo de países da Ásia e Pacífico a Malásia é o maior produtor mundial de óleo de dende e em segundo energético para o setor. Analisando o tabela B.1 constata-se que se um crescimento da produção de cascas, aumentando o potencial Notadamente, havendo aumento de produção de óleo de dendetem-

foi de 7,5%. No período 80/87 o incremento mundial na produção de óleo de dende havido uma queda na produção que, em seguida, voltou a crescer. anual superior a 500.000 toneladas, embora no ano de 1983 tenha aumentando, chegando nas décadas de 70/80 com um incremento médio Desde a década de 60 a produção mundial de óleo vegetais vem

#### B.5 Produção mundial do óleo de dende

As cascas dispõem de um grande potencial energético e serão usadas para a geração de vapor. Atualmente os combustíveis queimados nas usinas são a lenha e parte dos resíduos, sendo a casca muito pouco usada devido aos tipos de fornalhas existentes. será usada como adubo orgânico e ou ração animal.

delas extrai-se o óleo palmiste e, como subproduto, a torta que argila, mesa vibratória ou ciclone. As amendoas são prensadas e

mundial. O crescimento médio mundial no período 80/87 foi de 12,4 %, indicando fortemente que será vantagem investir na cultura do dend

O óleo de dende no período de 1983 a 1987 deteve um mercado de 8 % com relação ao consumo de óleos vegetais do mundo e que, segundo a figura B.3, ficou em torno de 65.000.000 de toneladas. De acordo com as projeções, o cenário para o período 2003 a 2007 terá um consumo mundial do óleo de dende de 22 %, valor igual ao da soja. Então a cultura estará plenamente fortalecida [23].

Na tabela B.2 são apresentados os principais pais importadores de óleo de Palma.

Tabela B.1 - Principais países produtores de óleo de dende em toneladas

x 10<sup>3</sup>

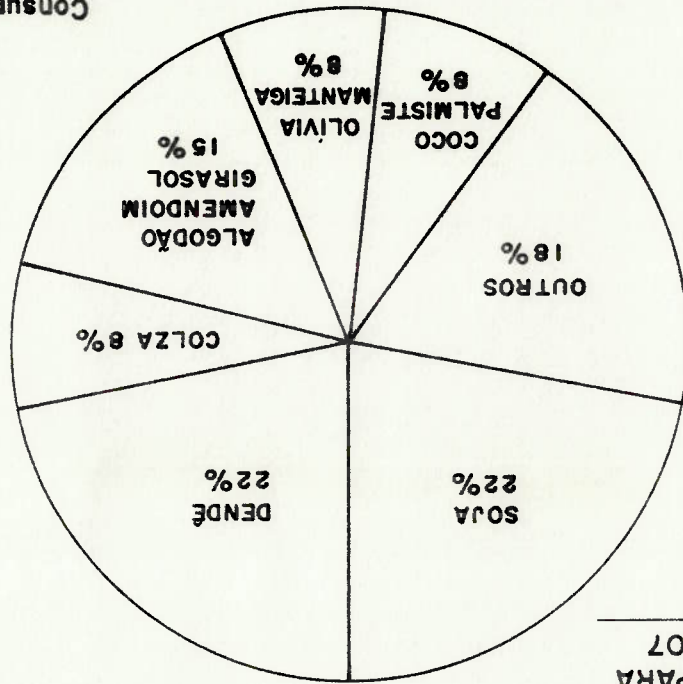
DISCRIMINAÇÃO	MEDIA 1970/72	1978/80	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	CRESCIMENTO ANUAL (1980/87)
AFRICA	1.160	1.390	1.371	1.365	1.400	1.381	1.360	1.447	1.497	1.539	1,6
Nigéria	580	665	675	675	700	730	700	730	760	780	2,0
Costa do Marfim	70	148	167	155	156	168	151	164	180	195	2,2
Zaire	220	170	168	165	155	145	153	160	160	160	- 0,6
Camargó	65	82	85	93	105	65	77	91	85	85	85
Serra Leone	45	46	47	48	48	46	37	44	44	44	- 0,3
AMERICA LATINA	90	157	172	188	208	260	298	351	371	402	12,8
Colômbia	35	60	70	80	90	102	118	126	130	140	10,4
Ecuador	10	32	37	41	43	61	75	100	115	108	16,5
Costa Rica	14	23	23	23	23	24	40	40	45	50	11,7
Brasil	5	15	13	15	17	18	23	29	31	40	17,4
Peru	-	5	6	6	6	8	10	10	10	22	20,3
ASIA E O.PACIFICO	970	3.061	3.563	3.845	4.670	4.356	5.275	5.838	6.286	6.599	9,2
Malásia	580	2.181	2.576	2.822	3.511	3.016	3.715	4.132	4.542	4.700	8,9
Indonésia	240	629	721	742	824	977	1.132	1.230	1.298	1.400	9,9
China	130	183	190	190	200	188	184	192	195	200	0,7
Nova Guiné	-	32	33	44	77	78	108	120	125	125	20,9
MUNDO	2.220	4.548	5.106	5.398	6.278	5.997	6.932	7.636	8.154	8.540	7,5

FONTE: [29,30]

figura B.3 Produção mundial e cenário de consumo

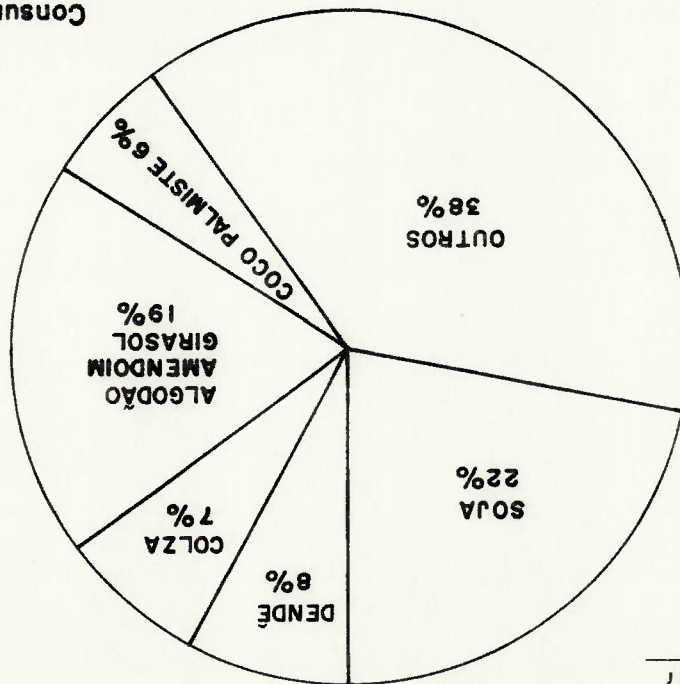
Consumo total  
104.000.000 t

Fonte : [ 22 ]



CENÁRIO PARA  
2003 - 2007

Consumo total  
65.000.000 t



1983 - 1987

De acordo com a referência [23], estima-se um consumo de vapor de 200 kg/t de dende em cachos processados. De acordo com o balanço de massa da figura D.1, 7,9 % de cascas são produzidos, ou seja, 79 kg casca/h.t. de dende em cachos e considerando que o poder calorífico da casca que é de 16.296 KJ/Kg teremos, portanto, uma disponibilidade energética teórica de 358 KW. Admitindo que a água de entrada está a 25 °C e sai vapor saturado com 2,0 bar, e que a eficiência global do sistema térmico é de 50 %, tem-se uma produção de vapor saturado de 0,069 kg/s (250 kg/h), tornando a planta auto-suficiente consumindo apenas um dos resíduos, a casca de dende

A escolha de uma unidade industrial que processe 1,0 t cachos/h de dende justifica-se porque é considerada uma micro usina que

2.6 Estimativa do consumo de vapor numa unidade Industrial (1,0 t cacho/h)

FONTE [29,30]

DISCRIMINAÇÃO	1970/72	1978/80	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	CRESCIMENTO ANUAL	1980/87
PAISES EM DESENVOLV. 150	1.039	1.356	1.422	1.651	1.978	2.354	3.300				15,9
AFRICA	30	122	165	260	311	258	188		205	348	13,2
Kenya	10	56	71	98	93	72	60		82	96	5,1
Nigéria	-	26	54	105	153	138	83		73	179	22,1
AMÉRICA LATINA	5	11	16	13	9	2	2		3	-	-
Oriente	90	187	210	205	372	418	456		496	656	20,9
ASIA E O. PACIFICO	20	677	902	938	934	1.281	1.121	1.576	2.091		15,0
Índia	-	403	522	475	425	647	571		658	950	10,4
Pacífico	-	182	211	233	253	372	345		458	596	18,8
PAISES CENTRAIS DA ASIA 5	41	63	26	25	18	21			73	205	21,7
PAISES DESENVOLVIDOS 780	1.144	1.138	1.051	1.223	1.407	1.221	1.375	1.750			7,4
CIE	540	651	635	547	586	699	555		648	938	6,7
Estados Unidos	120	137	117	122	116	150	148		225	275	15,3
Japão	45	143	148	141	148	162	156		161	196	4,7
URSS/Europa Ocident. 10	94	112	134		272	329	392		250	249	14,2
MUNDO	930	2.183	2.494	2.493	2.874	3.384	3.010	3.730	5.050		12,4

x 10<sup>3</sup>

Tabela B.2 - Importações de óleo de palma etilicamente realizadas em toneladas

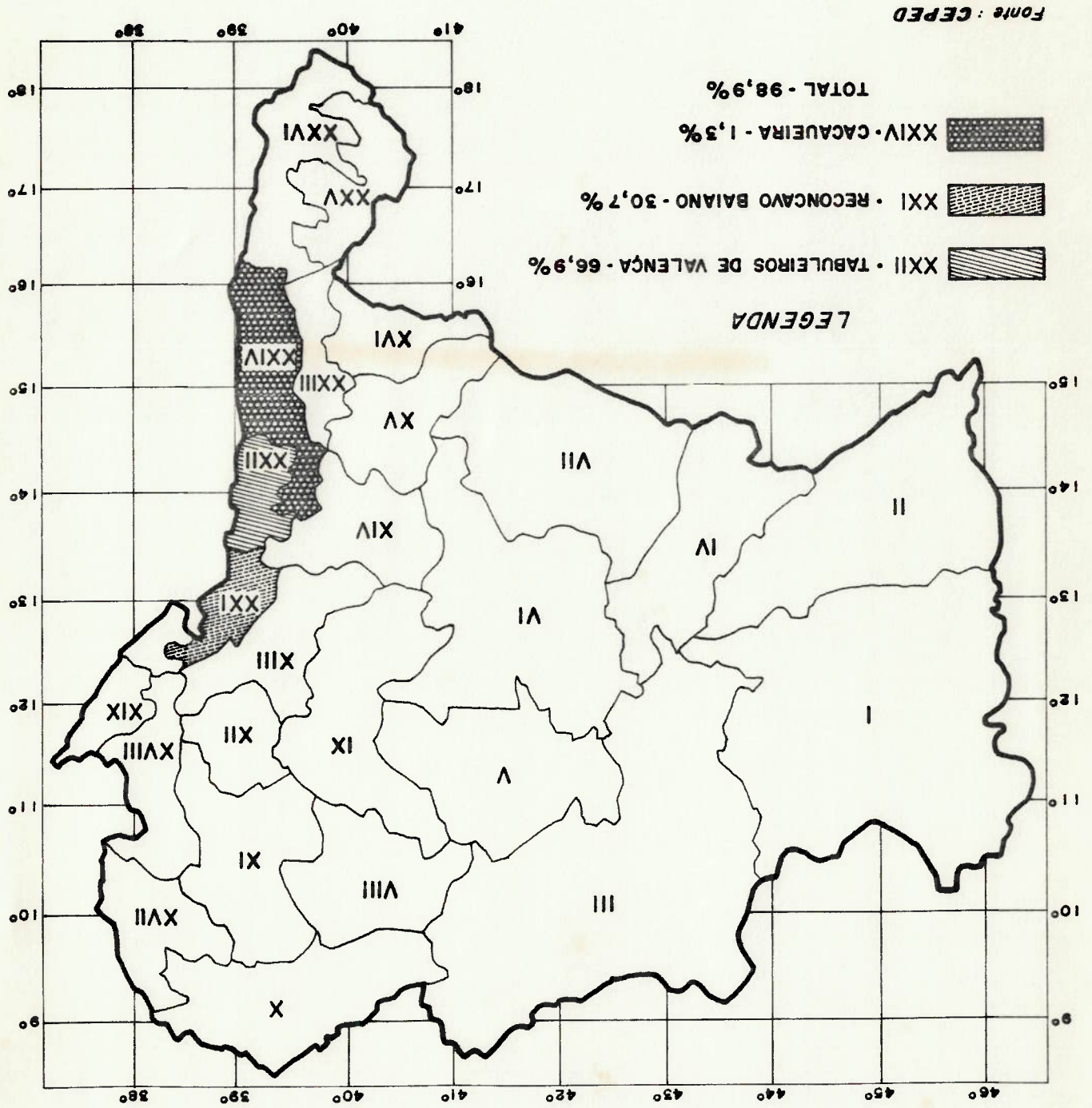
pode ser operacionalizada por uma associação de pequenos e médios produtores organizados em cooperativas. O CEPED desenvolveu, projeto e operou uma unidade com estas características e o resumo dos principais parâmetros da micro usina é mostrado a seguir:

180,0 kg/t de cacho	óleo de dende
25,6 kg/t de cacho	óleo palmiste
25,6 kg/t de cacho	torta
79,0 kg/t de cacho	casca de dende
5,0 kWh/t de cacho	consumo de energia elétrica
200,0 kg/t de cacho	consumo de vapor saturado (2,0 bar)

Um projeto que utilize as técnicas agrônomicas pode produzir de 20 a 30 t/cachos ano ha. Portanto, uma unidade operando em três turnos necessitará de cerca de 300 ha plantados com dende para atender às necessidades de matéria-prima da microusina. Ressalta-se que esta área pode ser de um único produtor, de médios produtores ou da associação de vários pequenos produtores rurais reunidos em cooperativas.

Na figura B.4 apresenta-se o mapa do Estado da Bahia, onde é mostrado o zoneamento da produção de dende por microrregião homogênea - MRH [22].

figura B.4 Zonamento do dende na Bahia



6 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) WOOD, A. "Acoustics", Blackie e Sons Limited, London, 1940.
- 2) LORD RAYLEIGH, "Theory of sound", V. I e II, Dover, 1945.
- 3) ZINN, B.T. "Pulsating combustion", Mechanical Engineering, pp. 36-41, Aug. , 1985.
- 4) THRING, N.W. "Pulsating combustion, The collected work of F.H.Reynst", ed. Pergamon Press, NewYork, 1961.
- 5) FELDMAN, K.T. Jr. "Review of the literature on Rijke thermo acoustic phenomena", J. Sound Vib.(1) 83-89, 1968.
- 6) SOMMERS, H. "Experiences with pulsating tube firing in an experimental installation", organization por Thring M.W., pp. 262-274 London, 1961.
- 7) TAYLOR, D.S. "The pulsating combustion of pulverized coal", Ph.D. Thesis, University of Sheffield, 1964.
- 8) SEVERYANIN, V.S. "Application of pulsating combustion in industrial installations", Bettie-Columbus Laboratories, pp. 71 -73, 1982.
- 9) PUTNAM, A.A. e DENNIS, W.R. "A study of burner oscillations of the organ-pipe", Trans. V.75, pp 15-28, 1953.
- 10) PUTNAM, A.A. e DENNIS, W.R. "Burner oscillations of the gauze-tone type", J. Acoustical for American, V.26, n° 05, 1954.
- 11) PUTNAM, A.A. e DENNIS, W.R. "Suppression of burner oscillations by accoustical dampers", V.77, pp. 875 -883, 1955.
- 12) SPEICH, W.R. e PUTNAM, A.A. e DENNIS, W.R. "Acoustic coupling residential furnaces with their surroundings", TRANS ASHRAE V.63, pp. 413, 1957.

- 13) HANBY,V.I. e BROWN,D.J. "A 50 lb/h pulsating combustor for pulverized coal", I. Inst. Full 11, pp, 423-425, NOV. 1968.
- 14) CARVALHO, JR. J.A. "Investigations of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1963.
- 15) WANG,M.R. "Mechanisms and performance of coal burning Rijke type pulsating combustors", Ph.D. Thesis, Georgia Institute, 1985.
16. FERREIRA,M.A."Combustão pulsante de carvão vegetal em tubo de Rijke", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá SP,1989.
- 17) CHU,B.T. "Stability of systems containing a heat source the criterion Rayleigh", NACA RM 56D27, 1955.
- 18) MALING,G.C. "Simplified analysis of the Rijke phenomena", J. Acoustic Soc. Am. 35, 1058, 1963.
- 19) JONES,H.F.R.S. "The mechanics of vibrating flames in tubes ", Proceedings Royal Soc. of London, V.353, pp.454-473, 1977.
- 20) COUTO,H.S. "Queima de combustíveis líquidos em combustores pulsantes tipo Rijke", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1989.
- 21 CIENTEC - Fundação centro tecnologia do Rio Grande do Sul, Certificado Nº 106995, 1989.
- 22) TORRES,E.A. e FROTA, F.I.A. e OLIVEIRA,H.F."Bahia-Avaliação do potencial dos resíduos vegetais para fins energéticos", CEPED/SME/FINER, Camacari, 1983.
- 23) CEPED/CEPLAC"O dende como matéria-prima industrial e fonte de energia", Relatório V.I,II e III, 1987.
- 24) TORRES,E.A."Relatório-Avaliação do motor do ciclo diesel com óleo de dende na forma in natura", UFBA, Salvador 1989.



- 25) STREHLOW, R.A. "Combustion fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1984.
- 26) FERRY, R.H. e CHILTON, C.H. "Manual de engenharia química", 5 ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- 27) BARCELOS, E. et alii "Dende - informações básicas para o seu cultivo" Embrapa, 1987.
- 28) BAHIA FUNDACÃO CPE "Potencial de Produção de oleaginosas mamona e dende", Sepiantec, 1980.
- 29) FAO MONTHLY BULLETIN OF STATISCS Rome, V. 9 n 7 e 8 1986.
- 30) FAO MONTHLY BULLETIN OF STATISCS Rome, V. 10, n 01 1987.
- 31) BARCOCK and WILCOX COMPANY, "Steam, its generation and use", 39th ed., 1978.
- 32) BRUNO, G., FEEL, B.R. e LUENGO, A.C. "Comportamento dinâmico de um combustor de leito fluidizado de 30 kW", anais do III congresso brasileiro de energia, RJ, 1984.
- 33) Catálogos da ATA Combustão Técnica S/A, Série LP