

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2001



1110000480



***“Queimadores Pulsantes
Para Baixas Emissões
de Poluentes”***

DANIEL SILVA FERREIRA

163



QUEIMADORES PULSANTES PARA BAIXAS EMISSÕES DE
POLUENTES

DANIEL SILVA FERREIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá da
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica (Área de
concentração: "Transmissão e Conversão
de Energia")

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.

Co-orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava

Guaratinguetá
2001

480

480

24/4/02

R\$ 20,00

D

Ferreira, Daniel Silva
F383q Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes /
Daniel Silva Ferreira. Guaratinguetá: [s.n] , 2001
165f.: il.

Bibliografia: f.157 - 159
Inclui apêndice
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001.
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.
Co-orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Laçava.

1. Combustão Pulsante. I. Título

CDU 621.43.05



**“QUEIMADORES PULSANTES PARA BAIXAS EMISSÕES
DE POLUENTES”**

DANIEL SILVA FERREIRA

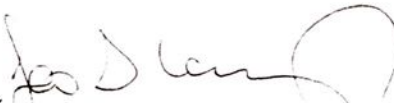
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Unesp-Feg


Prof. Dr. AMILCAR PORTO PIMENTA
ITA

Dezembro de 2001

DADOS CURRICULARES

DANIEL SILVA FERREIRA

NASCIMENTO 17.09.1974 – SÃO PAULO / SP

FILIAÇÃO Antonio José Ferreira Neto
Maria Antonia da Silva Ferreira

1994/1998 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Campus de Guaratinguetá

1999/2001 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível
de Mestrado na Faculdade de Engenharia (UNESP),
(Área de concentração: “Transmissão e Conversão de
Energia”), Campus de Guaratinguetá – SP



Aos meus pais, *Antonio e Maria Antonia*, que sempre
conduziram e apoiaram meus passos.



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha família e meus amigos,

aos meus orientadores, *Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr. e Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava* que jamais deixaram de me auxiliar e incentivar, sem eles o estudo aqui apresentado seria impossível;

a toda a equipe do LCP que, direta ou indiretamente, me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho, em especial os colegas César, Cristiane e ao Dr. Marco Aurélio pela amizade, incentivo e conversas técnicas sobre o trabalho;

ao Dr. Ivan Almeida Pinto, pelo atendimento prestado em um momento tão delicado, a toda equipe do Frei Galvão e da Unicamp;

em especial ao Dr. Marcelo Godoy Ferreira, que me auxiliou em momentos que meus conhecimentos não eram suficientes para resolução de problemas vitais para a realização deste trabalho, por todo seu empenho e dedicação.

A parte experimental do presente trabalho foi realizada no **INPE / LCP – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Laboratório Associado de Combustão e Propulsão**, através do convênio existente entre o Instituto e a UNESP/FEG.

Este trabalho também contou com apoio da **FAPESP – Fundação de amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo**, através do projeto nº 99/01300-9.



"O que prevemos raramente ocorre; o
que menos esperamos geralmente acontece".

Benjamin Disraeli

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de símbolos

Resumo

Abstract

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Combustão Pulsante	21
1.2 Mecanismos de Formação de Poluentes.....	23
1.2.1 Formação de NO _x	23
1.2.2 Formação de CO	27
1.2.3 Formação de Hidrocarbonetos não Queimados UHC	29
1.3 Formação de Poluentes em Processos Pulsados.....	29
1.3.1 Chamas Pré-misturadas.....	29
1.3.2 Chamas Difusivas	30
1.3.3 Formação de NO _x	31
1.4 Objetivo do Trabalho.....	32
2 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL	34
2.1 Ensaios Experimentais Realizados.....	34
2.2 Setores da Montagem Experimental.....	34
2.3 Câmara de Combustão.....	35
2.4 Queimador	36
2.5 Instrumentação Associada.....	39
2.5.1 Medidas de Vazão	39
2.5.2 Medidas de Temperatura.....	41
2.5.3 Sistema de Atuação Acústica e Medidas de Frequência e Amplitude.....	43
2.5.4 Análise de Gases	43
2.5.5 Sistema de Aquisição de Dados	45
2.6 Análise Tomográfica de Chama	45
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51

3.1 Observações Gerais	51
3.2 Resultados para 16,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 1	54
3.3 Resultados para 24,0% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 2	64
3.4 Resultados para 50,0% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 3	74
3.5 Resultados para 60,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 4	84
3.6 Resultados para 15,6% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 5	96
3.7 Resultados para 25,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 6	107
3.8 Resultados para 49,8% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 7	118
3.9 Resultados para 60,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 8	130
3.10 Resultados para 50,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,10$, Teste 9	143
4 CONCLUSÕES	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
APÊNDICE	160

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Comportamento das emissões de CO, NOx e UHC com a razão de equivalência (Lefebvre, 1983).	28
FIGURA 2.1 Os combustores utilizados.	35
FIGURA 2.2 Desenho esquemático do combustor	36
FIGURA 2.3 O queimador com o alto falante em sua base	37
FIGURA 2.4 Detalhes internos do queimador	38
FIGURA 2.5 Componentes da câmara de desacoplamento	38
FIGURA 2.6 Conjunto com queimador, câmara de desacoplamento e alto falante.	39
FIGURA 2.7 Desenho esquemático do conjunto queimador	39
FIGURA 2.8 Diagrama esquemático das linhas de alimentação do combustível e ar de combustão	40
FIGURA 2.9 Diagrama esquemático da linha de água de refrigeração	41
FIGURA 2.10 Esquema do sistema de tratamento das amostras de gases	42
FIGURA 2.11 Fotografia da linha de amostragem de gases, com analisadores ao fundo	42
FIGURA 2.12 Esquema do módulo gerador de sinais e amplificador	44
FIGURA 2.13 Tela do sistema de aquisição de dados	46
FIGURA 2.14 – Reconstituição axissimétrica da chama	47
FIGURA 2.15 – Reconstrução tomográfica	47
FIGURA 2.16 – Ilustração da técnica de reconstrução tomográfica	48
FIGURA 2.17 – Exemplo de reconstrução de imagem utilizando o algoritmo de Souza	49
FIGURA 2.18 – Montagem utilizada nos teste relativos a tomografia de chama	50
FIGURA 3.01 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 1)	55
FIGURA 3.02 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 1)	55
FIGURA 3.03 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 1)	56

FIGURA 3.04 Variação da concentração de NOx na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 1)	56
FIGURA 3.05 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 1).....	57
FIGURA 3.06 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 1)	57
FIGURA 3.07 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 1).....	58
FIGURA 3.08 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 1).....	58
FIGURA 3.09 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 1).....	59
FIGURA 3.10 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 1).....	59
FIGURA 3.11 Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz, e 10, 20 e 30 mbar	64
FIGURA 3.12 Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz e 10 mbar, 500 Hz e 20 mbar, e 1000 Hz e 30 mbar	65
FIGURA 3.13 Variação da concentração de O2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 2)	65
FIGURA 3.14 Variação da concentração de CO2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 2)	66
FIGURA 3.15 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 2)	66
FIGURA 3.16 Variação da concentração de NOx na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 2)	67
FIGURA 3.17 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 2).....	67
FIGURA 3.18 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 2).....	68

FIGURA 3.19 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 2).....	68
FIGURA 3.20 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 2).....	69
FIGURA 3.21 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 2).....	69
FIGURA 3.22 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 2).....	70
FIGURA 3.23 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 3)	74
FIGURA 3.24 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 3)	75
FIGURA 3.25 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 3)	75
FIGURA 3.26 Variação da concentração de NO _x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 3)	76
FIGURA 3.27 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 3).....	76
FIGURA 3.28 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 3).....	77
FIGURA 3.29 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 3).....	77
FIGURA 3.30 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 3).....	78
FIGURA 3.31 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 3).....	78
FIGURA 3.32 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 3).....	79
FIGURA 3.33 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 4)	85

FIGURA 3.34 Variação da concentração de CO2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 4) 86

FIGURA 3.35 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 4) 86

FIGURA 3.36 Variação da concentração de NOx na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 4) 87

FIGURA 3.37 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 4)..... 87

FIGURA 3.38 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 4)..... 88

FIGURA 3.39 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 4)..... 88

FIGURA 3.40 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 4)..... 89

FIGURA 3.41 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 4)..... 89

FIGURA 3.42 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 4)..... 90

FIGURA 3.43 Variação da concentração de O2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 5) 97

FIGURA 3.44 Variação da concentração de CO2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 5) 98

FIGURA 3.45 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 5) 98

FIGURA 3.46 Variação da concentração de NOx na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 5) 99

FIGURA 3.47 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 5)..... 99

FIGURA 3.48 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 5)..... 100

FIGURA 3.49 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 5).....	100
FIGURA 3.50 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 5).....	101
FIGURA 3.51 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 5).....	101
FIGURA 3.52 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 5).....	102
FIGURA 3.53 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 6)	108
FIGURA 3.54 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 6)	109
FIGURA 3.55 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 6)	109
FIGURA 3.56 Variação da concentração de NO _x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 6)	110
FIGURA 3.57 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 6).....	110
FIGURA 3.58 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 6).....	111
FIGURA 3.59 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 6).....	111
FIGURA 3.60 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 6).....	112
FIGURA 3.61 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 6).....	112
FIGURA 3.62 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 6).....	113
FIGURA 3.63 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 7)	119

FIGURA 3.64 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 7)	120
FIGURA 3.65 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 7)	120
FIGURA 3.66 Variação da concentração de NO _x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 7)	121
FIGURA 3.67 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 7).....	121
FIGURA 3.68 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 7).....	122
FIGURA 3.69 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 7).....	122
FIGURA 3.70 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 7).....	123
FIGURA 3.71 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 7).....	123
FIGURA 3.72 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 7).....	124
FIGURA 3.73 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 8)	131
FIGURA 3.74 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 8)	132
FIGURA 3.75 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 8)	132
FIGURA 3.76 Variação da concentração de NO _x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 8)	133
FIGURA 3.77 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 8).....	133
FIGURA 3.78 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 8).....	134

FIGURA 3.79 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 8).....	134
FIGURA 3.80 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 8).....	135
FIGURA 3.81 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 8).....	135
FIGURA 3.82 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 8).....	136
FIGURA 3.83 Variação da concentração de O ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 9)	144
FIGURA 3.84 Variação da concentração de CO ₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 9)	145
FIGURA 3.85 Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 9)	145
FIGURA 3.86 Variação da concentração de NO _x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante (Teste 9)	146
FIGURA 3.87 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 9).....	146
FIGURA 3.88 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 9).....	147
FIGURA 3.89 Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 9).....	147
FIGURA 3.90 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar (Teste 9).....	148
FIGURA 3.91 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar (Teste 9).....	148
FIGURA 3.92 Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar (Teste 9).....	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Quadro resumo dos trabalhos com tubos de Rijke..... 23

TABELA 3.1 Parâmetros dos testes realizados na primeira etapa 52

TABELA 3.2 Parâmetros dos testes realizados na segunda etapa 53

TABELA 3.3 Imagens relativas às condições do Teste 1 60

TABELA 3.4 Imagens relativas às condições do Teste 2 71

TABELA 3.5 Imagens relativas às condições do Teste 3 81

TABELA 3.6 Imagens relativas às condições do Teste 4 91

TABELA 3.7 Imagens relativas às condições do Teste 5 103

TABELA 3.8 Imagens relativas às condições do Teste 6 114

TABELA 3.9 Imagens relativas às condições do Teste 7 125

TABELA 3.10 Imagens relativas às condições do Teste 8 137

TABELA 3.11 Imagens relativas às condições do Teste 9 150

LISTA DE SIMBOLOS

ϕ	Razão de equivalência	$[1]$
Re	Número de Reynolds	$[1]$
T	temperatura	$^{\circ}C$
t	tempo	s

FERREIRA, D. S. *Queimadores Pulsantes para Baixas Emissões de Poluentes.* Guaratinguetá, 2001. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO: *A combustão pulsante ganhou interesse nas pesquisas atuais devido às indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como: economia de combustível, formação reduzida de poluentes e escória, aumentos da taxa de transferência de calor convectiva e investimento reduzido quando comparado com técnicas convencionais. No entanto, os sistemas de combustão pulsados onde o próprio processo de combustão induz a oscilação acústica, em geral, são operacionalmente instáveis e pouco atrativos para aplicações industriais. Desta forma, o futuro das chamas pulsadas parece estar em processos onde a oscilação é induzida por meios externos, como por exemplo por meio de um alto-falante. O presente trabalho apresenta a influência da amplitude e frequência na emissão de poluentes e na transferência de calor em uma chama de GLP que varia de totalmente pré-misturada até totalmente difusiva. Também foi comparado a forma geométrica da chama para todas as condições. A mistura é excitada acusticamente antes da saída do queimador, através de um alto-falante estrategicamente posicionado, e a visualização da chama é feita por uma câmera CCD. A imagem obtida passa por um processo de reconstrução tomográfica algébrica.*

PALAVRAS-CHAVE: Combustão Pulsante, Tomografia de chama, Poluentes



FERREIRA, D. S. *Pulse Combustion Burner for Low Emission of Pollutants.* Guaratinguetá, 2001. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT: *The pulse combustion process has rained interest in current research due to indications that it can offer several advantages in energy generation, such as: economy of fuel, reduced formation of pollutants and scum, increased convective heat transfer rates and reduced investment when compared to conventional techniques. However, the pulse combustion systems where the combustion process itself induces the acoustic oscillation are, in general, operationally unstable and not very attractive for industrial applications. In this way, the future of the pulse combustion flames seems to rely on processes where the oscillation is induced by external means, as, for example, with the use of a speaker. The present work presents the effects of amplitude and frequency in the shape of a LPG premixed flame. The mixture was acoustically excited before the end section of the burner, by a strategically positioned speaker. Flame visualization was achieved by means of a CCD camera. The obtained image was treated by algebric tomographic reconstruction.*

KEYWORDS: Pulse Combustion, Flame Tomography, Pollutants



1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Combustão Pulsante

A combustão pulsante ganhou interesse nas pesquisas atuais devido às indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como: economia de combustível, formação reduzida de poluentes e escória, aumento nas taxas de transferência de calor convectiva e investimento de capital reduzido com técnicas convencionais.

Entende-se como combustão pulsante o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo.

Em 1777, Byron Higgins (citado por Wood, 1966; Tyndall, 1970; Zinn, 1986) relatou o primeiro exemplo de combustão pulsante, a chama musical ou cantante, que nada mais é do que uma chama ancorada em queimador de hidrogênio instalado dentro de um tubo, gerando um som de considerável amplitude devido à excitação do modo acústico fundamental ou de um de seus harmônicos. Sua ocorrência depende das características do queimador, da chama e do tubo.

Apesar deste fenômeno já ser conhecido desde o século 18, as primeiras tentativas conhecidas para proveito do processo de combustão pulsante só ocorreram no século 20 (Stodola e Loewenstein, 1927; Foa, 1960), influenciadas pelo desenvolvimento prévio do motor de combustão interna. As primeiras aplicações foram na área de propulsão do motor aspirado e geração de potência por turbinas a gás.

Com o avanço das pesquisas sobre o aperfeiçoamento da combustão pulsante surgiram evidências de suas vantagens através de alguns trabalhos, como o de Hanby (1968), que, utilizando um modelo quase estacionário, demonstrou que a presença de oscilações aumenta os coeficientes convectivos de transferência de calor e promove elevada eficiência térmica. Pode-se concluir, então, que a combustão pulsante proporciona a construção de dispositivos de tamanho reduzido, pois, para a transmissão de uma mesma

quantidade de energia térmica os dispositivos pulsados necessitam de superfícies menores do que os não pulsados.

Além do aumento nas taxas de transferência de calor, outra característica típica desta tecnologia é a baixa emissão de poluentes. As oscilações incrementam o processo de mistura entre o combustível e o oxidante, resultando em uma maior eficiência do processo de combustão com pouca perda de combustível e baixas emissões de CO, fuligem e hidrocarbonetos não queimados (Martins, 1998).

Alguns combustores podem ser especialmente construídos de tal forma que o próprio processo de combustão é o responsável pelo surgimento das oscilações acústicas, como é o caso dos combustores tipo tubo de Rijke (Carvalho, 1983). Já para projetos convencionais de câmaras de combustão são necessários atuadores externos para induzir as oscilações, como por exemplo, o uso de alto-falantes estrategicamente posicionados. Os atuadores externos também podem ser acoplados em câmaras onde a própria chama induz as oscilações, com intuito de amplificar ou atenuar o sinal, visto que esse tipo de câmara não permite grandes variações de amplitude e frequência.

As pesquisas relacionadas com combustão pulsante ganharam destaque nas últimas décadas em função do potencial de permitir maior aproveitamento de energia associado à possibilidade de menores taxas de emissão de poluentes. No Brasil, diversos trabalhos foram realizados em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke, no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista. A Tabela 1.1 resume as características dos ensaios realizados nos combustores tipo tubo de Rijke do INPE.



Tabela 1.1 – Quadro resumo dos trabalhos com tubos de Rijke no INPE.

<u>Autores</u>	<u>Combustível</u>	<u>Parâmetros medidos</u>
Carvalho et al., 1989	madeira	pressão acústica, frequência
Ferreira, 1989	carvão vegetal	pressão acústica, frequência
Couto, 1989	álcool etílico	pressão acústica, frequência
Torres, 1990	casca de dendê	eficiência de combustão
Momma, 1993	GLP	pressão acústica, frequência
Lacava, 1995	álcool etílico	pressão acústica, frequência, diâmetro médio de sprays
Ferreira, 1997	GLP	pressão acústica, frequência, concentrações de CO, CO ₂ e O ₂
Martins, 1998	GLP	pressão acústica, frequência, concentrações de CO, CO ₂ , O ₂ e NO _x

1.2 - Mecanismos de Formação de Poluentes

As baixas emissões em processos de combustão ganharam interesse nos dias atuais em função da conscientização e legislações rigorosas quanto à agressão ao meio ambiente. Desta forma, a combustão pulsante surge como possível alternativa para redução da emissão de alguns poluentes gasosos e particulados. Nos itens desta seção são discutidos os mecanismos de formação de alguns poluentes importantes no desenvolvimento do presente projeto e como a combustão pulsante pode favorecer a redução em suas emissões.

1.2.1 - Formação de NO_x

O NO_x emitido durante o processo de combustão depende da composição do combustível, do modo de operação e do projeto dos queimadores e da câmara de combustão. Cada um destes parâmetros são significativos em relação ao nível final de NO_x emitido. A formação deste poluente é atribuída a três mecanismos distintos (Jones, 1993; Puri, 1993; Wood, 1994).



- a) NO_x térmico, formado a partir da oxidação do N_2 do ar atmosférico, sendo seu esquema reacional conhecido como mecanismo de Zeldovich;
- b) NO_x do combustível, formado a partir da quebra das ligações do nitrogênio presente no combustível, ocorrendo mais facilmente do que a quebra das ligações do N_2 presente no ar;
- c) NO_x “prompt”, formado a partir das reações de O e OH, presentes em concentrações acima do previsto pelo equilíbrio químico do mecanismo de Zeldovich.

Como citado anteriormente, a formação do NO_x térmico depende da oxidação do N_2 presente no ar. O mecanismo de formação é conhecido como mecanismo de Zeldovich (1946) e envolve as reações:



Em sistemas ricos há uma terceira reação importante:



A taxa total de formação de NO térmico pode ser estimada pela equação (Westenberg, 1971):

$$\frac{d\text{NO}}{dt} = 6.10^{10} T^{-1/2} \cdot \exp(-69090/T) \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot [\text{N}_2] , \quad (1.4)$$

onde t é o tempo, T é a temperatura, e os colchetes indicam concentração do componente identificado. Esta equação mostra a importância da temperatura na formação de NO_x .

O segundo mecanismo de formação do NO_x , nomeado NO_x do combustível, ocorre devido a presença de nitrogênio no combustível, sendo, é claro, uma função da sua origem. Chega a representar cerca de 30% de todo NO_x formado. O NO_x é formado pela oxidação

dos radicais contendo nitrogênio, que são liberados durante o craqueamento das moléculas de combustível. As reações de oxidação representativas são:



Contudo, produtos liberados pelas moléculas de combustível podem reduzir o NO formado para N_2 , de acordo com as reações:



Miller e Bowman (1989) apresentaram as equações para o cálculo das taxas de produção e consumo de NO:

$$\text{Produção: } \frac{d\text{NO}}{dt} = K_f [\text{N}_{\text{comb}}] \cdot [\text{O}_2] \cdot \exp(-E_f / RT), \quad (1.15)$$

$$\text{Consumo: } \frac{d\text{NO}}{dt} = -K_c [\text{N}_{\text{comb}}] \cdot [\text{NO}] \cdot \exp(-E_c / RT) . \quad (1.16)$$

onde K_f e K_c são as constantes de reação e E_f e E_c são as energias de ativação das reações de formação e consumo, respectivamente.

Com o estudo da combustão em sistemas ricos, atualmente comprova-se a existência de um terceiro mecanismo de formação de NO_x , chamado de NO_x “prompt”. Tal mecanismo ocorre rapidamente e em etapas que se finalizam ainda na zona de chama. Isto

implica que a produção de NO_x em uma mistura onde isso ocorre será maior para um dado tempo de residência. Takagi et al. (1974) fizeram medidas em chamas difusivas turbulentas de H_2/ar e propano/ar em planos radiais e axiais, verificando que para esta segunda mistura a formação de NO na região correspondente à frente de chama, possui valor considerável. Os resultados experimentais foram comparados com o cálculo da emissão de NO utilizando o mecanismo de Zeldovich (equação (1.4)), assumindo equilíbrio para concentração do oxigênio atômico. Os resultados mostraram que a taxa de formação do NO medida é maior que a calculada, principalmente para chamas com temperatura relativamente baixa. Tal fato comprovou a existência de um outro mecanismo reacional além do de Zeldovich, para formação de NO a partir do N_2 do ar.

Fenimore (1971) também observou que o mecanismo de Zeldovich, com a hipótese de equilíbrio para o oxigênio atômico, não consegue prever a taxa de formação do NO na região vizinha à chama. Nesta região as reações são rápidas e ocorrem em um ambiente onde os hidrocarbonetos não foram completamente consumidos, por isso tais reações somente ocorrem em chamas de hidrocarbonetos. Este fato foi comprovado comparando chamas de hidrocarboneto/ar com CO/ar e H_2/ar . As principais reações do mecanismo “prompt” são:



As reações envolvendo CH_2 e N_2 , em geral, contribuem não significativamente quando comparadas com a reação (1.17), principal reação do mecanismo (Glarborg et al., 1986; Miller e Bowman, 1989). A reação (1.20) também pode ser desconsiderada quando comparada com a reação (1.17), em temperaturas relativamente baixas. No entanto, devido fato de ser altamente endotérmica, a reação (1.20) pode ser importante sobre o nível total de “prompt” NO formado em temperaturas relativamente altas, e não deve ser desprezada nesta situação. O HCN formado pelas reações (1.17) e (1.18) é subsequentemente convertido em N através da sequência de passos:



O NO é formado pela reação do N produzido nas reações (1.17) e (1.19) com o OH, através da reação (1.22):



1.2.2 - Formação de CO

A formação de monóxido de carbono é extremamente dependente da relação local entre as concentrações de combustível e oxidante e das condições que afetam sua reação subsequente. Investigações em diversos tipos de equipamentos, como em turbinas a gás, motores diesel, caldeiras, fornos, etc, mostram a dependência da formação de CO com a configuração individual do equipamento. Portanto, é necessário prever queimadores que propiciem um excelente grau de mistura entre o combustível e o oxidante. Basicamente três fatores afetam a não conversão de CO em CO₂:

- a) combustão rica em combustível ou tempo de residência insuficiente para oxidação do CO formado na região primária da chama;
- b) inadequada mistura de combustível e oxidante, o que produz algumas regiões onde há falta de oxidante para oxidação do CO em CO₂;
- c) queda de temperatura dos gases na região de pós-chama próxima às paredes da câmara de combustão.

Os menores índices de emissão de CO, em geral, são encontrados para razões de equivalência (ϕ) entre 0,7 e 0,9 (Lefebvre, 1983) em diversos tipos de equipamentos. Para baixos valores de ϕ , os níveis de CO são altos em função da lenta taxa de oxidação, em razões de equivalência muito altas os níveis de CO também são elevados, mas devido a eles atingirem os valores de equilíbrio.



Devida a uma relativa resistência do CO à oxidação, na prática, o tempo de residência e a temperatura acabam sendo fundamentais para combustão completa. Em temperaturas elevadas a principal reação para remoção do CO é a reação:



No entanto, para temperaturas mais baixas a reação (1.24) torna-se a principal fonte de remoção de CO:



É importante notar que em certas condições de operação, onde se procura reduzir a emissão de CO através do controle da razão de equivalência, pode-se, por outro lado, aumentar a emissão de NO_x , visto que a formação do NO térmico também depende da relação entre a temperatura e a razão de equivalência. Desta forma, o combate às emissões de CO e NO_x não deve ser feito de maneira separada. A Figura 1.1 apresenta o comportamento das emissões de CO, NO_x e UHC (hidrocarbonetos não queimados, “unburned hydrocarbons” na língua inglesa) com a razão de equivalência.

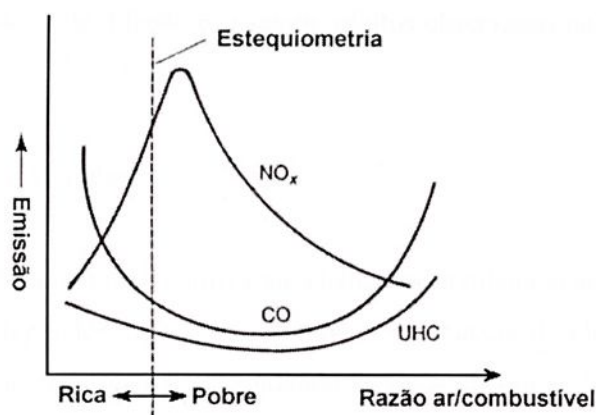


Figura 1.1 – Comportamento das emissões de CO, NO_x e UHC com a razão de equivalência (Lefebvre, 1983).

1.2.3 - Formação de Hidrocarbonetos não Queimados – UHC

Os UHC são hidrocarbonetos produtos da degradação térmica do combustível em espécies de menor peso molecular, como por exemplo metano e acetileno. Normalmente estão associados à inadequada mistura entre o combustível e o oxidante ou a efeitos de queda de temperatura na chama. As emissões de UHC e CO tendem a seguir a mesma tendência; desta forma, os cuidados requeridos para diminuir a emissão de CO também são aplicáveis para emissão de UHC.

1.3 – Formação de Poluentes em Processos Pulsados

Conforme, já discutido anteriormente, a combustão pulsante surge como uma alternativa para melhorar o aproveitamento energético e o controle da emissão de poluentes. A presença de oscilações acústicas no processo de combustão acaba sendo responsável por melhorar a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, devido a criar intensas zonas de turbulência na região de chama. Conforme citado nos itens anteriores, a emissão de CO e UHC está extremamente relacionada com a taxa de mistura local entre o combustível e o oxidante. Desta forma, a expectativa é de uma menor emissão ambos poluentes.

Nesta seção, primeiramente serão discutidos aspectos da excitação acústica em chamas pré-misturadas e de difusão e, a seguir, efeitos observados na formação de NO_x em processos pulsados.

1.3.1 - Chamas Pré-misturadas

Bechtold e Matalon (1999) utilizaram chamas com misturas perto da estequiometria e verificaram uma dependência não linear entre a velocidade de chama com a razão de estiramento ou extensão da chama, dependendo da razão de equivalência da mistura e de dois números de Lewis, o do oxidante e o do combustível. Para uma chama estirada, a razão pela qual determinado reagente alcança a zona de reação é fortemente afetado pela difusividade térmica. Eles demonstraram que é possível que um reagente inicialmente em excesso venha a ser totalmente consumido na reação. Isto pode levar a importantes implicações nas características de extinção de chama.



Os estudos de Goey et al. (1997) mostram que mudanças na espessura da chama e na densidade ao longo da mesma podem contribuir para a razão de estiramento. Foram utilizadas expressões para se determinar a variação local de temperatura na chama e a razão de queima. Acredita-se que o método proposto neste trabalho seja uma valiosa ferramenta para quantificar a contribuição de diferentes efeitos no comportamento local da chama, tal como a estabilização de chamas em queimadores.

1.3.2 - Chamas Difusivas

Ishino et al. (1997) trabalharam com dois tipos de chamas difusivas: uma chama difusiva plana e estabilizada por um corpo rombudo. Utilizaram um método computacional e excitação acústica para analisar não somente os efeitos da excitação acústica na estrutura da chama mas também para caracterizar o processo de formação de vórtices e vórtices na chama.

Dally et al. (1998) utilizaram chamas difusivas turbulentas estabilizadas com um corpo rombudo axissimétrico. Foram realizadas medidas de temperatura e espécies químicas, como OH e NO, variando a posição tanto no raio quanto no eixo. O método usado baseou-se em laser. Foi verificado que podem existir na zona de recirculação até três camadas de mistura. Com o aumento da corrente de fluxo, a mistura média no exterior do vórtice perde a força e o perfil estequiométrico desloca-se para mais perto do jato de combustível.

Bakrozis et al. (1999) estudaram qual a influência do número de Reynolds e da razão de velocidades do combustível e do ar na estrutura de uma chama difusiva turbulenta estabilizada por um corpo rombudo esbelto. O pico de temperatura e os níveis de turbulência foram localizados adiante do ponto de estagnação, fora da face do queimador. Também tem-se que o comprimento linear da chama e as estruturas de vórtice duplo dependem da razão de velocidades do combustível e do ar.

1.3.3 - Formação de NO_x

Pope et al. (1998) estudaram o controle da emissão de NO_x em chamas confinadas por oscilação. Foram utilizadas diferentes combinações entre combustíveis, estabilizadores, formas de injeção, configurações que resultaram em significativas diminuições nas taxas de NO_x . Verificou-se que entre as frequências de oscilação de 100 e 300 Hz a taxa de emissão de poluente não se alterou. Foi utilizada uma mistura de metano em ar com estabilização por um disco.

Meunier et al. (1998) utilizaram tanto modelos matemáticos quanto experimentais para descrever a formação e destruição de NO em chamas difusivas turbulentas de propano. Foram utilizadas três chamas, sendo duas delas com o mesmo número de Froude e duas delas como o mesmo número de Reynolds. As principais conclusões são que o mecanismo de Fenimore é o dominante na formação de NO e que nas reações entre NO e radicais de hidrocarbonetos e entre o NO para HCN via as reações NO do combustível representam um importante papel na redução global de NO.

Dupont e Williams (1998) colocaram que para razões de equivalência por volta de 1,9 há uma dupla estrutura na chama, fenômeno este que reflete nos campos de concentração de OH e na temperatura. A razão de produção de NO é máxima em regiões de baixa temperatura e de baixa concentração de OH, localizadas no interior de chamas pré-misturadas. O mecanismo principal de formação de NO considerado é o de Fenimore. Resultados da modelagem investigada indica que as altas razões de tensão (estiramento) e de equivalência são desejáveis em chamas experimentais; entretanto, isto pode significar a emissão de outros poluentes, como CO, UHC e NO_2 , devido à alta razão de extinção, e fuligem, devido à quantidade de combustível em excesso.

No controle da emissão de NO_x , a combustão pulsante destaca-se principalmente em operações com chamas pré-misturadas pobres em combustível (Glarborg, 1993). Nesta condição, o caráter de bem-misturado da chama proporciona uma distribuição de temperatura homogênea ao longo desta, não permitindo picos de temperatura que levariam a uma maior formação de NO_x . Delabroy et al. (1996) observaram significativas reduções na emissão de NO_x na combustão pulsante de combustíveis líquidos em condições pobres.



Tal resultado foi atribuído ao fato de, além da distribuição de temperatura ser homogênea, a chama é encurtada devido a presença das oscilações, fazendo com que o tempo de permanência dos gases na chama diminua, o que favorece a redução da formação de NO_x .

O que ocorre quando oscilações acústicas estão presentes em um processo de combustão é que as condições locais da razão de equivalência ao longo da chama acabam se aproximando da razão de equivalência teórica, ou seja, a diminuição ou aumento da emissão de um determinado poluente será devido à intensificação da condição teórica da razão de equivalência ao longo da chama. Por exemplo, para o caso da combustão em que o combustível e o oxidante são injetados na condição estequiométrica ($\phi = 1$) em uma câmara de combustão, a presença de oscilações acústicas irá aumentar a emissão de NO , pois, devido a presença das oscilações, a temperatura será elevada e a distribuição de temperatura na chama será mais uniforme. Por outro lado, para uma condição de combustão pobre em combustível com a presença de oscilações, a uniformidade da temperatura na chama não permitirá regiões de temperaturas elevadas devido as razões de equivalência locais próximas a estequiometria. Assim, para condições pobres a presença de oscilações acústicas é conveniente.

1.4 – Objetivo do Trabalho

Os sistemas de combustão pulsados onde o próprio processo de combustão induz a oscilação acústica, em geral, são operacionalmente instáveis e permitem reduzidas variações de amplitude e frequência, o que os tornam pouco atrativos para aplicações industriais. Desta forma, o futuro das chamas pulsadas parece estar em processos onde a oscilação é induzida por meios externos, como por exemplo por meio de um alto-falante.

Na presente dissertação de mestrado investigam-se experimentalmente as variações na emissão de poluentes, na geometria da chama e na transferência de calor em função da frequência e da amplitude de oscilação, em chamas de gás liquefeito de petróleo (GLP) parcialmente pré misturadas. A atuação acústica foi realizada por meio de um alto-falante posicionado no queimador, permitindo atuar no fluxo de combustível ou de pré-mistura.



Os objetivos do trabalho foram os seguintes:

1. Projetar e construir combustores encamisados, um com janelas de observação. Tal arranjo foi montado nas dependências do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista.
2. Caracterizar as faixas de amplitude e frequência onde ocorrem a estabilização da chama.
3. Avaliar possíveis ganhos na transferência de calor de acordo com a amplitude e frequência de oscilação.
4. Utilizar sistema de tomografia de chama para estudar a geometria da chama e a região de presença de alguns radicais químicos de acordo com a variação da amplitude e da frequência.
5. Realizar estudos das emissões de poluentes para diferentes condições de trabalho.



2 – DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

2.1 – Ensaios Experimentais Realizados

Foram realizados ensaios com diversas razões ar/combustível, sendo que o ar de combustão podia ser injetado juntamente com o combustível ou separadamente. Para cada caso foi variada a frequência e a amplitude do sinal do alto-falante. O procedimento de cada teste é descrito a seguir.

O sinal elétrico senoidal que alimenta o alto-falante foi obtido a partir do gerador de funções, onde era atribuída a frequência desejada. Em sequência, a amplitude do sinal era ajustada no amplificador, antes de chegar no alto-falante. Na câmara do queimador estava posicionado um transdutor de pressão que era responsável pela conversão do sinal de pressão acústica em sinal elétrico. O sinal de tensão do transdutor passava por um amplificador de carga e era lido em um osciloscópio. Paralelamente, estes dados eram enviados para o sistema de aquisição de dados.

Além dos sinais de pressão, também eram lidos no sistema de aquisição de dados as frequências, as temperaturas e as concentrações do analisadores.

2.2 – Setores da Montagem Experimental

A montagem experimental se divide em dois setores. O primeiro setor é o galpão onde estão instalados os combustores do presente trabalho, o microcomputador, a câmera e as lentes para a realização das imagens da chama e a instrumentação de operação. Entende-se como instrumentação de operação os equipamentos que são posicionados próximos à câmara de combustão para que o operador consiga controlar o processo com segurança. Desta forma, foi construído um painel com rotâmetros e manômetros e um segundo painel para colocação dos medidores para controle das temperaturas ao longo da câmara. Neste setor ainda se encontram um osciloscópio, um gerador de funções e um amplificador. O segundo setor é a sala de instrumentação (instrumentação interna). Nesta sala estão alojados equipamentos mais refinados usados para instrumentação: sistema de aquisição de dados National Instruments, sistema de tratamento dos gases recolhidos na câmara e analisadores de gases (O_2 , CO, CO_2 e NO/ NO_x).

2.3 – Câmara de Combustão

Dois combustores de paredes frias, mostrados na fotografia da Figura 2.1 e detalhado na Figura 2.2, foram construídos para o presente trabalho. O diâmetro interno é de 25 cm, o comprimento total é de 1 m e ambos foram construídos em aço inox 314. Um dos combustores possui janelas de observação com visores de borossilicato, para utilização de sistema de tomografia de chama. O resfriamento das paredes é realizado através de camisa d'água. Uma câmara de desacoplamento superior, intercambiável entre os combustores, permite, sem mudar as características acústicas da câmara de combustão, a coleta de gases para análise sem a infiltração de ar externo. Testes preliminares indicaram a necessidade desta câmara de desacoplamento para manter a condição de tubo aberto na saída sem permitir a entrada de ar externo. Desenhos relativos aos combustores são apresentados no Apêndice.



Figura 2.1 – Os combustores utilizados.

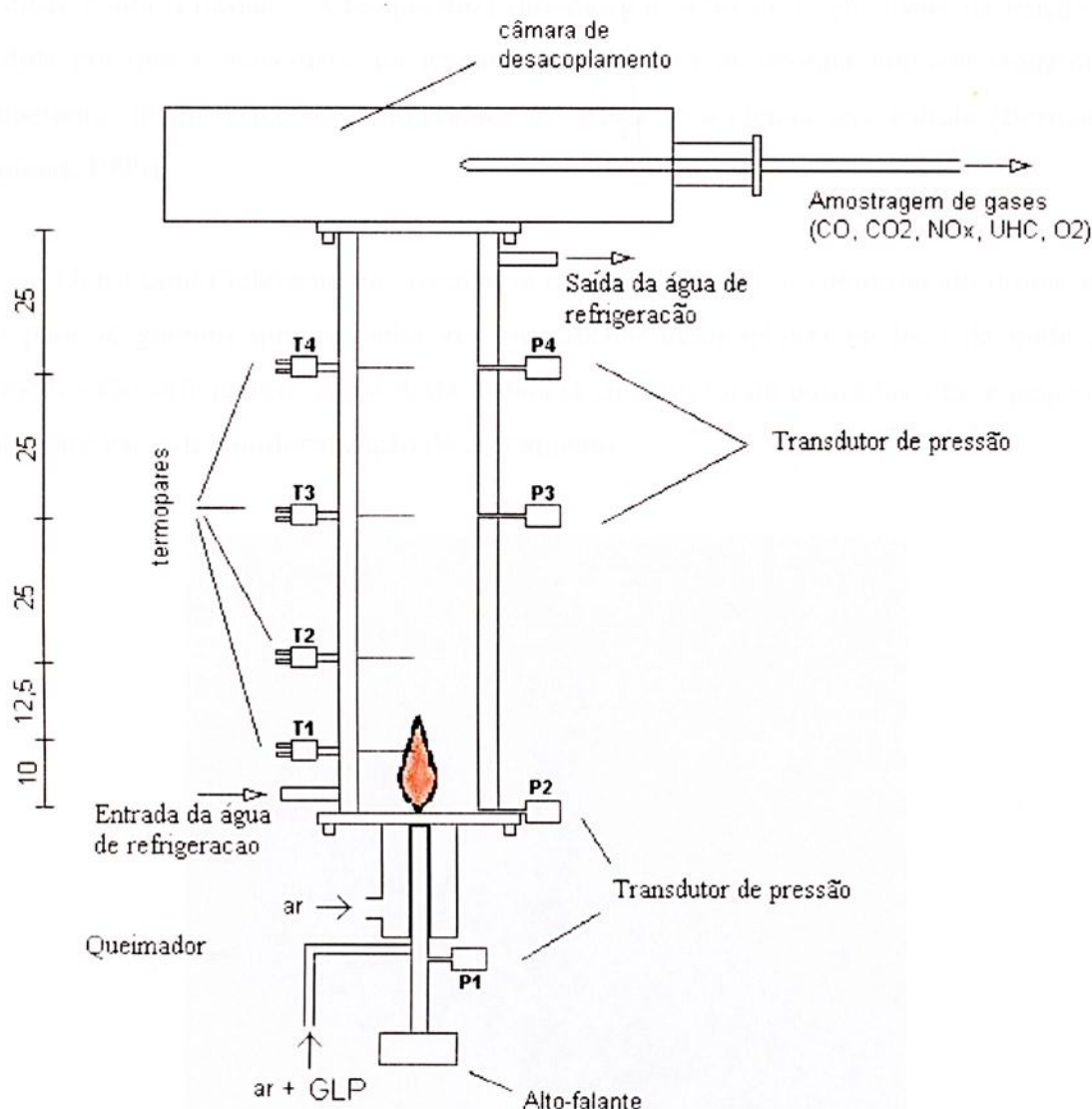


Figura 2.2 – Desenho esquemático do combustor.

2.4 – Queimador

O queimador foi projetado para funcionar com chamas parcialmente difusivas ou parcialmente pré misturadas. No caso de chamas pré misturadas em particular, devido às baixas vazões de trabalho, é importante garantir que não ocorrerá “flash back” da mistura, tanto por motivos de segurança quanto por motivos operacionais.

Um método de se evitar este fenômeno é projetar o sistema com o conceito de distância de apagamento (“quenching distance”). Se a chama é propagada, a energia liberada devido às reações químicas deve manter a temperatura da zona de reação alta o bastante para sustentar a rápida reação. Se a transferência de calor para as superfícies

vizinhas é alta o bastante, a temperatura diminuirá e reduzirá a velocidade da reação. À medida em que a velocidade da reação reduz, a taxa de energia liberada reduzirá, a temperatura ficará abaixo da temperatura de ignição e a chama será extinta (Borman e Ragland, 1998).

Outro ponto relevante na engenharia do queimador foi o comprimento do mesmo, isto para se garantir que se tenha um escoamento desenvolvido no bico de saída (20 diâmetros são suficientes). Além desta distância também foram utilizadas telas e pequenos tubos para garantir a uniformização do escoamento.



Figura 2.3 – O queimador com o alto falante em sua base.

A Figura 2.3 mostra o queimador com o alto falante em sua base e a Figura 2.4 mostra seus detalhes internos. Desenhos relativos ao projeto do queimador são mostrados no Apêndice. Somente o escoamento do canal interno do queimador sofre influência da atuação do alto falante, ou seja, somente a massa de combustível e de ar de pré mistura recebem o efeito da atuação direta. A área de saída do queimador pode ser variada alterando-se axialmente a posição do disco ancorador localizado no topo do mesmo, permitindo que o queimador atue em diferentes faixas de vazão.

O queimador possui uma câmara de desacoplamento, que tem por objetivo conduzir o ar difusivo até o combustor. Esta câmara também terá a função de uniformizar o escoamento de ar difusivo. Isto será realizado com a utilização de um tubo de seção reta com comprimento superior a 20 diâmetros, por uma tela e um obstáculo. Inicialmente previu-se o uso de uma entrada de ar tangencial; entretanto, a mesma poderia criar um swirl dentro da câmara o que seria indesejável. Assim, optou-se pela utilização de quatro entradas radiais. A Figura 2.5 mostra a câmara de desacoplamento antes de ser fechada. Desenhos com as dimensões desta câmara encontram-se no Apêndice.



Figura 2.4 – Detalhes internos do queimador.



Figura 2.5 – Componentes da câmara de desacoplamento.

A seguir tem-se a Figura 2.6 mostrando todo o conjunto do queimador (câmara de desacoplamento, queimador e alto falante). Na Figura 2.7 é mostrado um desenho esquemático do conjunto do queimador. O Apêndice também mostra o desenho do mesmo conjunto em corte.



Figura 2.6 – Conjunto com queimador, câmara de desacoplamento e alto falante.

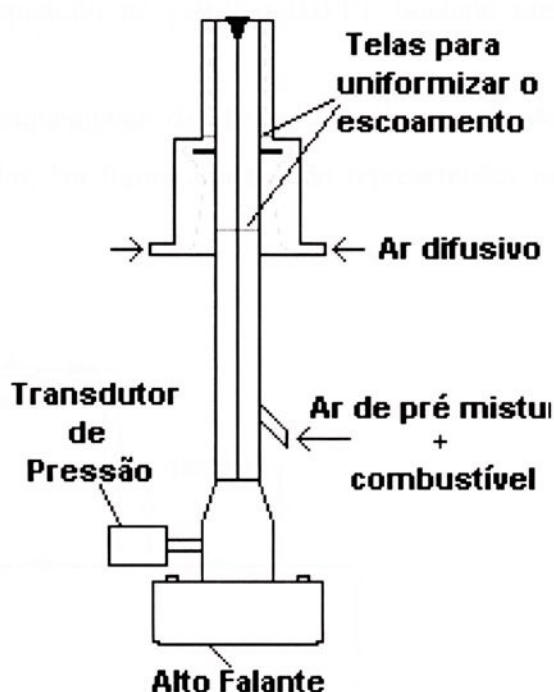


Figura 2.7 – Desenho esquemático do conjunto queimador.

2.5 – Instrumentação Associada.

Este item diz respeito aos equipamentos utilizados para obtenção dos resultados experimentais do presente trabalho. Ele está dividido em 5 subitens.

2.5.1 – Medidas de Vazão.

Para medir a vazão de ar, tanto difusivo quanto pré misturado, e de combustível foram usados sistemas de placa de orifício. Este sistema de medição é mais preciso que os rotâmetros e se adaptam melhor as diferentes condições de temperatura e pressão do fluido.

O tipo de tomada de pressão utilizado foi o “corner taps” (tomadas em cantos), por ter a vantagem de poder ser aplicado em condições mais desfavoráveis que nos outros tipos, principalmente pela existência de tabelas de correção para a rugosidade do tubo.

O ar de combustão foi fornecido por dois compressores axiais instalado no prédio de ensaios do LCP/INPE. Inicialmente, previu-se a utilização de dois compressores radiais IBRAM, modelo CR-8, ligados em paralelo, o que não foi possível pela baixa pressão obtida. O combustível utilizado foi o gás liquefeito de petróleo (GLP), injetado nos combustores a partir das garrafas pressurizadas.

A Figura 2.8 apresenta um diagrama esquemático das linhas de alimentação do combustível e ar de combustão até o queimador. Na figura ainda estão representadas as válvulas associadas a cada linha.

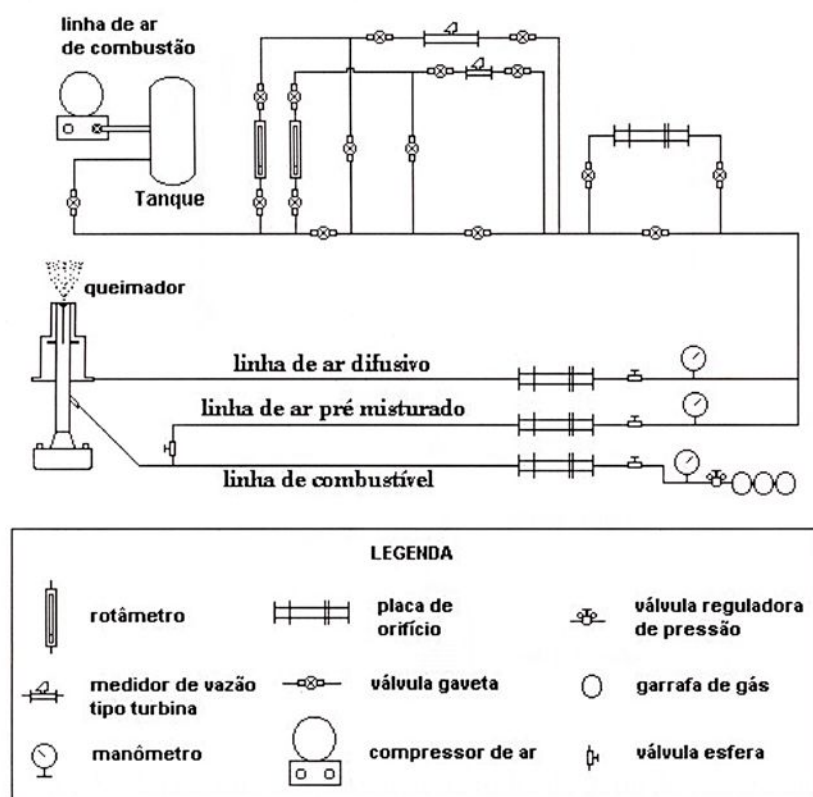


Figura 2.8 - Diagrama esquemático das linhas de alimentação do combustível e ar de combustão.

A Figura 2.9 mostra a linha de água para refrigeração de cada combustor e da sonda de gases. Para as medidas de vazão da água da camisa de refrigeração dos combustores e da sonda, utilizou-se rotâmetros.

A linha de amostragem para análise dos gases de combustão, mostrada na Figura 2.10, foi montada quase que totalmente em tubos de aço inox de $\frac{1}{4}$ ", sendo somente a extremidade perto dos combustores feita de tubo de PVC, para que se pudesse ter mobilidade da sonda entre as duas câmaras de combustão. Também fez-se necessária a colocação de um termopar na saída da sonda, para verificar se a amostra foi resfriada suficientemente para as reações não se desenvolverem na linha. A Figura 2.11 mostra uma fotografia desta linha de amostragem, com os analisadores de gás ao fundo.

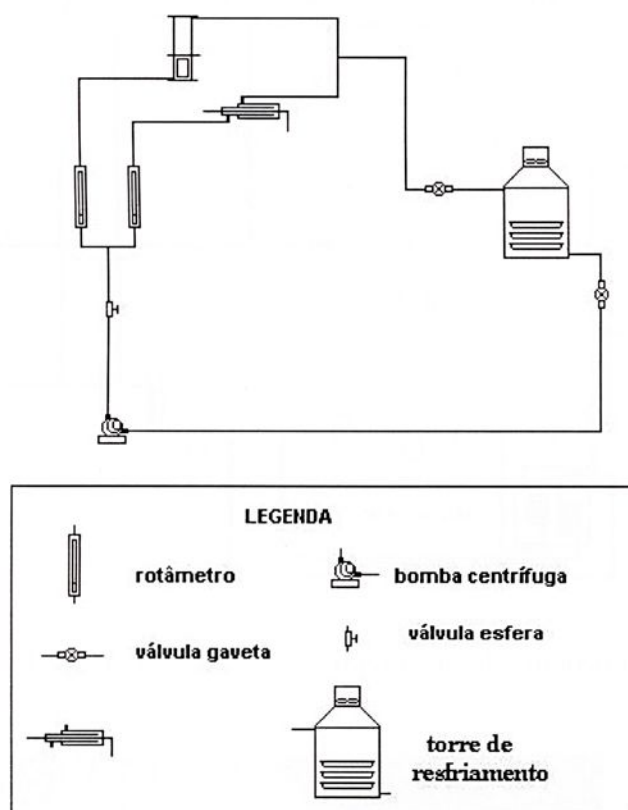


Figura 2.9 - Diagrama esquemático da linha de água de refrigeração.

2.5.2 – Medidas de Temperatura

Em quatro pontos ao longo da câmara de combustão foram instalados termopares chromel-alumel tipo “K”, com bitola e 5mm, 20cm de comprimento, isolamento mineral, junta isolada e bainha metálica, suportando a temperatura máxima de 1200 °C. Além destes

pontos também eram medidas as temperaturas das linhas de ar e combustível nos sistemas de placa de orifício, valores estes necessários para se obter as medidas de vazão, e as temperaturas, de entrada e saída, da água da camisa de refrigeração da câmara de combustão. As posições de medida de temperatura no combustor são, a partir da base do mesmo, 10, 25, 50 e 75 cm, sempre no centro.

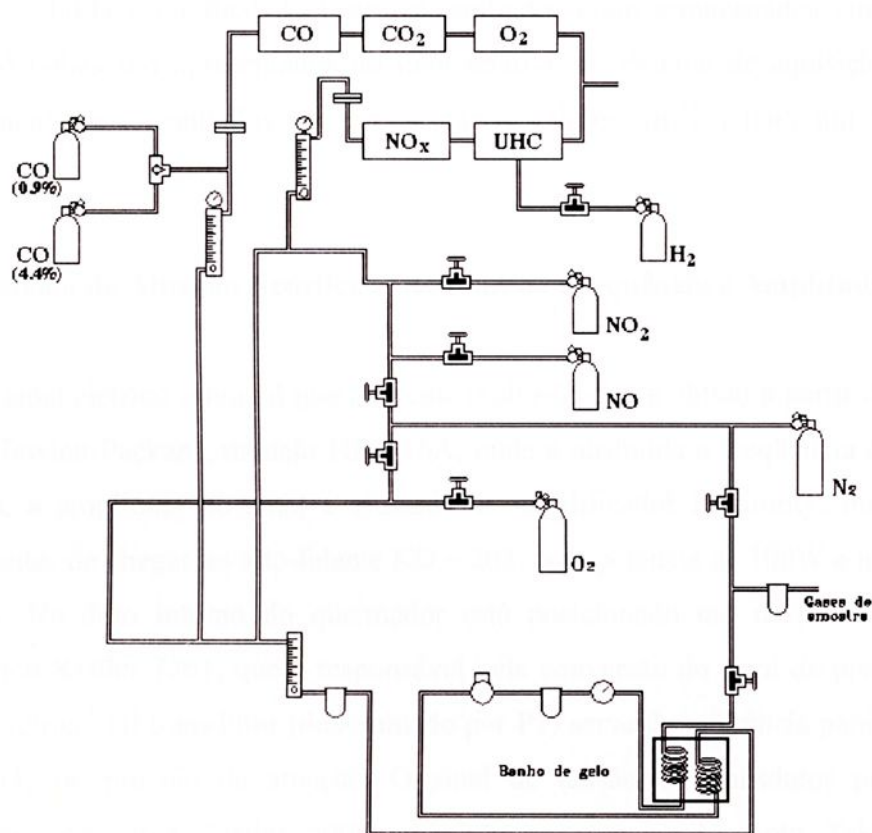


Figura 2.10 - Esquema do sistema de tratamento das amostras de gases.



Figura 2.11 – Fotografia da linha de amostragem de gases, com analisadores ao fundo.

Os sinais dos termopares foram lidos em indicadores digitais de temperatura instalados em um painel de controle junto aos combustores e no sistema de aquisição de dados, na instrumentação. Os indicadores apresentam os valores de temperatura em tempo mais próximo possível do real (depende da inércia do termopar), o que é necessário para controlar a operação da câmara. Já o sistema de aquisição de dados fazia uma varredura a cada 2 segundos, ou seja, a cada intervalo de 2 segundos a distribuição de temperatura na câmara era obtida e no final do teste os resultados eram armazenados em um arquivo (maiores detalhes são apresentados no item relativo ao sistema de aquisição de dados). Posteriormente nos resultados são apresentados valores médios para um total de 100 pontos.

2.5.3 – Sistema de Atuação Acústica e Medidas de Frequência e Amplitude

O sinal elétrico senoidal que alimenta o alto-falante é obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, onde é atribuída a frequência desejada. Em sequência, a amplitude do sinal é ajustada no amplificador Proximity, modelo 750AP (480W), antes de chegar no alto-falante KD – 202, com potência de 100W e impedância de 16 Ohms. Na duto interno do queimador está posicionado um transdutor de pressão piezoelétrico Kistler 7261, que é responsável pela conversão do sinal de pressão acústica em sinal elétrico, tal transdutor (denominado por P1) serve de referência para a frequência e amplitude de pressão de atuação. O sinal de tensão do transdutor passa por um amplificador de carga Kistler 5006 e é lido em um osciloscópio Tektronix 7633. Paralelamente, estes dados são enviados para o sistema de aquisição de dados. Este esquema é mostrado na Figura 2.12. Mais três transdutores de pressão são posicionados ao longo do combustor, ficando a 0, 50 e 75 cm a jusante do queimador, denominados por P2, P3 e P4, respectivamente.

2.5.4 – Análise de Gases

A composição dos gases de saída é de especial interesse para avaliar as alterações no processo de combustão durante a variação das frequências e amplitudes de atuação. Nos experimentos foram realizadas análises contínuas de O_2 , CO_2 , CO e NO_x . Os erros destes equipamentos são de 0,23%, 1%, 0,02% e 5ppm, respectivamente.

Os gases de exaustão foram coletados por uma sonda posicionada na saída do combustor, dentro da câmara de desacoplamento. Os gases eram resfriados ainda na sondas trocando calor em contra corrente com a água fria que escoava através de uma jaqueta externa também construída em aço inoxidável. Os gases deixavam a sonda com a temperatura por volta de 60 °C.

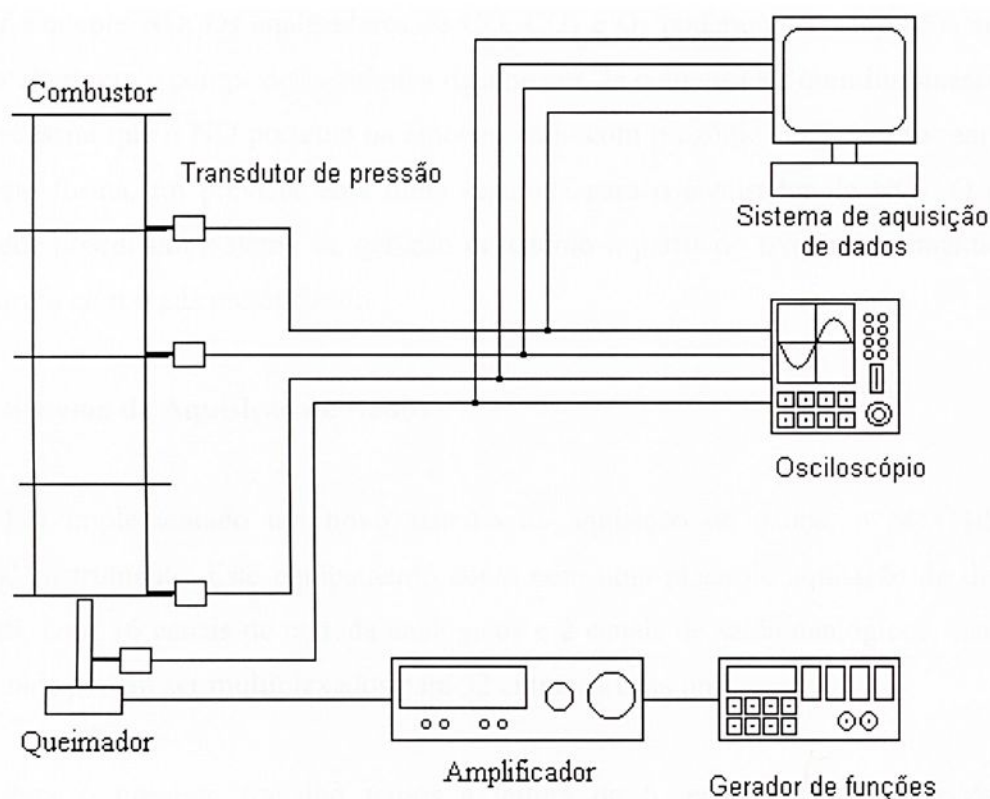


Figura 2.12 - Esquema do módulo gerador de sinais e amplificador

A sucção dos gases foi feita por uma bomba de vácuo do tipo diafragma, sendo a linha de condução do gases também de aço inoxidável com $\frac{1}{4}$ de polegada. Os gases eram resfriados por meio de duas serpentinas imersas em banho de água gelada a 3 °C. Os condensados e particulados maiores que 25 μ m ficavam retidos em três filtros montados em série. Dois deles estavam situados na região de sucção, antes e depois do primeiro resfriamento; o último filtro encontrava-se na região de pressão positiva da linha, na sequência do segundo circuito de refrigeração. Em seguida o escoamento de gases era dividido em três destinos diferentes: 2 l/min eram desviados para o analisador de NO_x, 1 l/min era desviado para os demais analisadores e o restante do escoamento era descarregado para atmosfera. Os escoamentos que se encaminhavam para os analisadores eram forçados através de filtros de membrana Millipore de fibra de vidro, que retinham os

particulados mais finos. Finalmente os escoamentos eram conduzidos aos analisadores onde as medidas eram feitas em base seca.

Para a análise de CO e CO₂ foram utilizados analisadores tipo infravermelho, para O₂ o tipo termomagnético e para o NO_x o tipo quimiluminescente, que também permite analisar somente NO. Os analisadores de CO, CO₂ e O₂ puderam ser acoplados em série por não alterarem a composição química da amostra. Já o analisador quimiluminescente de NO_x necessita que o NO presente na amostra reaja com o ozônio (O₃) para formar NO₂ e O₂. Desta forma, foi prevista uma linha separada para o analisador de NO_x. O próprio analisador possui um sistema de geração de ozônio a partir do oxigênio alimentado por uma garrafa com o gás pressurizado.

2.5.5 – Sistema de Aquisição de Dados

Foi implementado um novo sistema de aquisição de dados, o SCXI1000, da National Instruments. Este equipamento conta com uma placa de aquisição de dados de 1,25 MS, com 16 canais de entrada analógicos e 2 canais de saída analógicos, sendo que estes canais podem ser multiplexados para 32 entradas(cada um).

Para o presente trabalho temos a leitura de 6 temperaturas, 8 pressões e 4 analisadores, como mostrado na figura 2.13. Este arquivo faz 30 leituras por minuto sendo que a cada leitura de temperatura é uma média de 20 pontos, cada leitura de pressão é uma média de 100 pontos e as leituras dos analisadores são uma média de 50 pontos.

Entre as mudanças de condição de atuação não eram considerados os dados, sendo esperado até que o sistema entrasse em regime estacionário, isto porque havia uma inércia na leitura devido a distância entre os combustores e os analisadores.

2.6 – Análise Tomográfica de Chama

O objetivo desses ensaios foi visualizar na chama as regiões de intensa reação química, além da presença dos radicais C₂ e CH e de fuligem. As imagens foram obtidas por meio de uma câmera CCD Marshall V-1070-EIA, com resolução espectral de 400nm a 1100nm, com controle do tempo de exposição entre 1/10000 e 1/60 segundos. O sensor



ótico da câmera possui 811 pixels na horizontal e 510 na vertical, com sensibilidade mínima de 0,03 Lux. A área do sensor possui 7,95mm (horizontal) x 508mm (vertical). Acoplado à câmera foi utilizada uma lente Fujinon CF50B, f/1.4, com foco e abertura controlável, sendo a esta adicionados filtros de interferência nos comprimentos de onda 515,40, 431,09 e 802,00 nm, correspondentes aos comprimentos de onda da emissão quimiluminescente dos radicais C_2 , CH e fuligem, respectivamente. A transmitância para o filtro de C_2 é 0,66 e para os de CH e fuligem é 0,55.

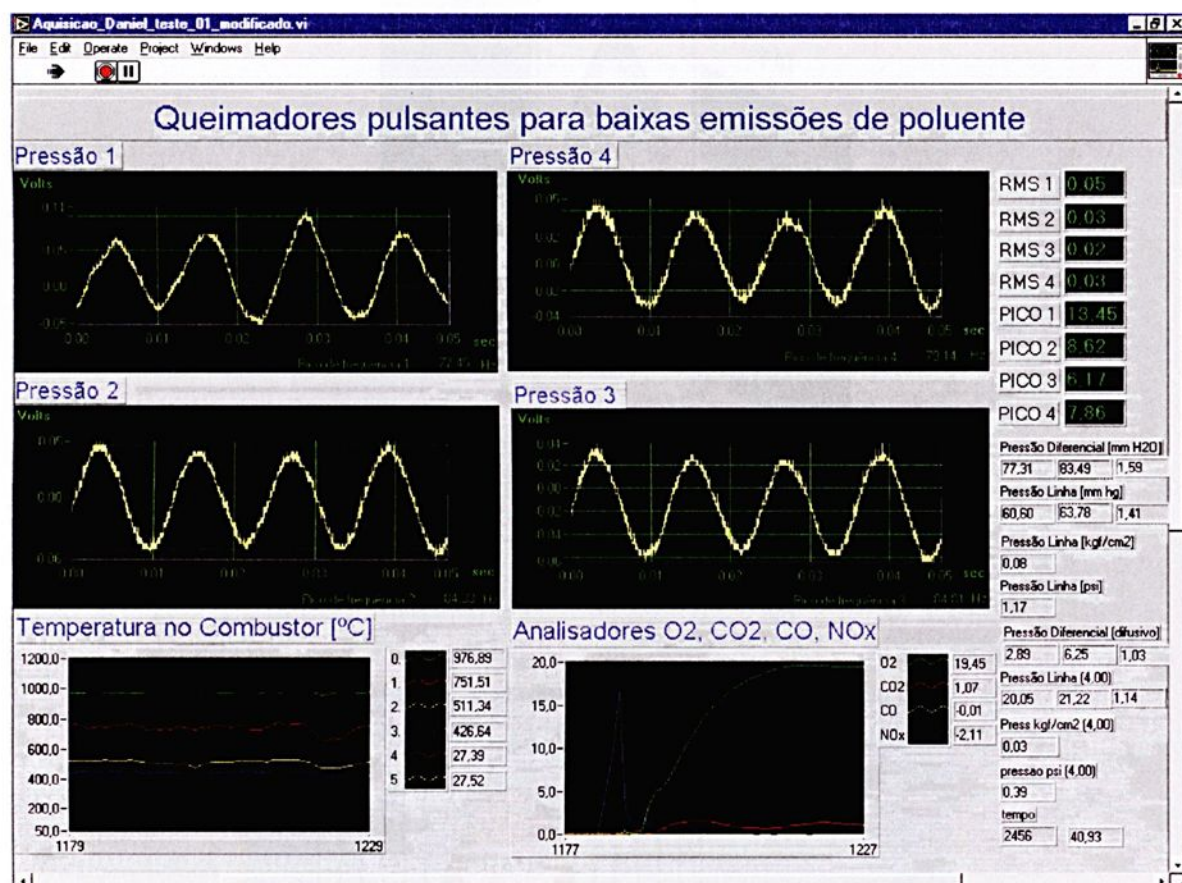


Figura 2.13 – Tela do sistema de aquisição de dados.

Uma placa de aquisição de imagens Matrox Meteor/RGB com capacidade de taxa de aquisição de até 42Mb/s, digitalizava as imagens adquiridas pela câmera. A partir destas era gerada uma imagem média de 100 imagens instantâneas e após era feita a reconstrução tomográfica. A reconstrução tomográfica obtém um perfil que quando integrado em uma revolução de 2π radianos gera a imagem integrada (imagem média obtida pela câmara). A Figura 2.14 apresenta um esquema deste procedimento.

A descrição do procedimento para tomografia de chama seguiu a mesma feita por Lacava (2000). Para reconstrução das imagens utilizou-se o algoritmo de Souza (1998), desenvolvido em ambiente MATLAB. Tal modelo é aplicável a objetos axissimétricos e considera que cada pixel da câmera CCD integra a radiação emitida pela chama a partir de um caminho ótico conhecido, conforme o esquema da Figura 2.15.

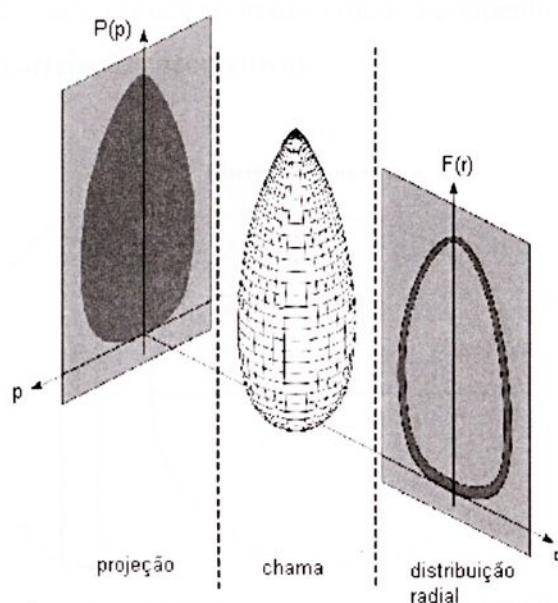


Figura 2.14 – Reconstituição axissimétrica da chama.

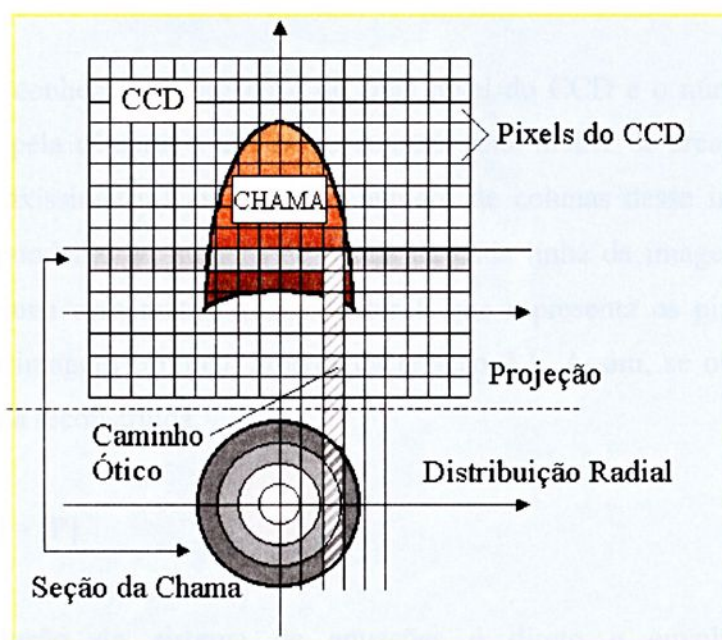


Figura 2.15 – Reconstrução tomográfica.

A Figura 2.16 ilustra a técnica de reconstrução tomográfica, p_i representa os pixels de uma linha da imagem integrada obtida pela câmara e r_i os pixels da imagem reconstruída para essa linha. O princípio básico utilizado pelo modelo considera que em cada raio a radiação emitida é constante e igual. Assim, a intensidade luminosa no perfil central pode ser conhecida da periferia para o interior. A reconstrução do pixel da periferia r_1 é dada pela divisão do pixel p_1 pelo dobro da área a_{11} . Conhecendo r_1 e a_{21} e a_{22} calcula-se r_2 : $r_2 = (p_2 - a_{21}.r_1)/a_{22}$, e assim consecutivamente. Os valores das áreas a_{ij} são obtidos através de correlações geométricas.

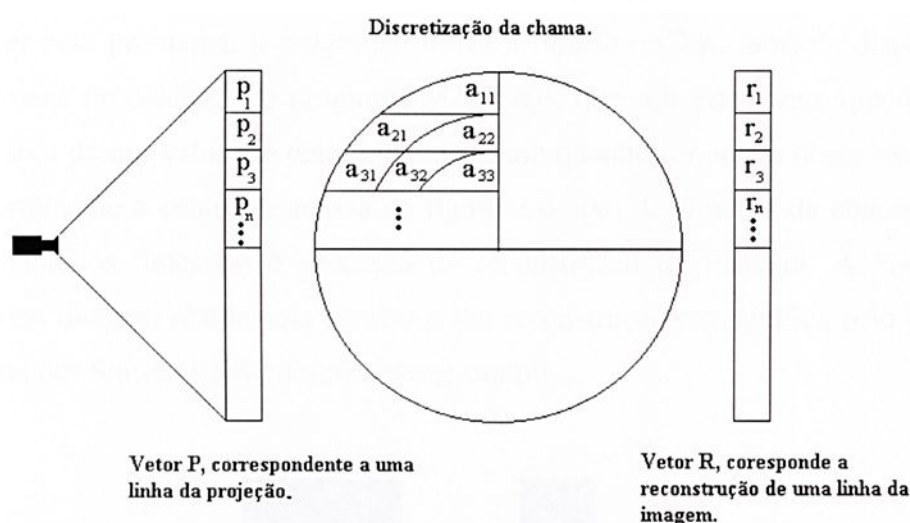


Figura 2.16 – Ilustração da técnica de reconstrução tomográfica.

Como é conhecida a dimensão de cada pixel do CCD e o número de colunas da imagem obtida pela câmara, o algoritmo constrói uma matriz de áreas A com dimensão $n \times n$ (devido à axissimetria), onde n é o número de colunas dessa imagem obtida pela câmara (correspondente ao número de pixels de cada linha da imagem). Em seguida, o algoritmo relaciona essa matriz com o vetor P que representa os pixels da linha a ser reconstruída da imagem original, através da relação 2.1. Assim, se obtém o vetor r que representa a linha reconstruída.

$$2.[A].[r] = [P] \quad (2.1)$$

A resolução do sistema de equações é direto e envolve pouco esforço computacional, pois a matriz A é triangular inferior.

Como a chama é considerada axissimétrica, é necessário se conhecer uma das metades da imagem reconstruída. Desta forma, o programa apresenta apenas a metade esquerda, a partir do eixo de simetria da chama. Normalmente, este eixo de simetria da chama não corresponde ao eixo de centro da imagem, em função do posicionamento da câmera em relação à chama. O eixo de simetria da chama passaria pelo centro de “massa” da mesma, sendo a massa representada pela intensidade dos pixels. Apesar do fundo da imagem ser aparentemente negro, a intensidade luminosa (quantificada em escala de cinza) dos pixels de regiões onde não há a presença da chama nem sempre apresentam o valor zero, alterando o cálculo do centro de massa da figura que representaria a chama integrada. Para resolver esse problema, o programa utiliza a função `im2bw`, também disponível na “Toolbox Image Processing” do programa MATLAB, que converte a zero qualquer valor de pixel abaixo de um valor pré determinado e a um quando for acima desse valor. Desta forma, determina-se o centro de massa da figura e o eixo de simetria da chama. Após o tratamentos citados, inicia-se o processo de reconstrução da imagem. A Figura 2.17 apresenta uma imagem obtida pela câmera e sua reconstrução tomográfica pelo programa desenvolvido por Souza (1998), descrito nesse capítulo.

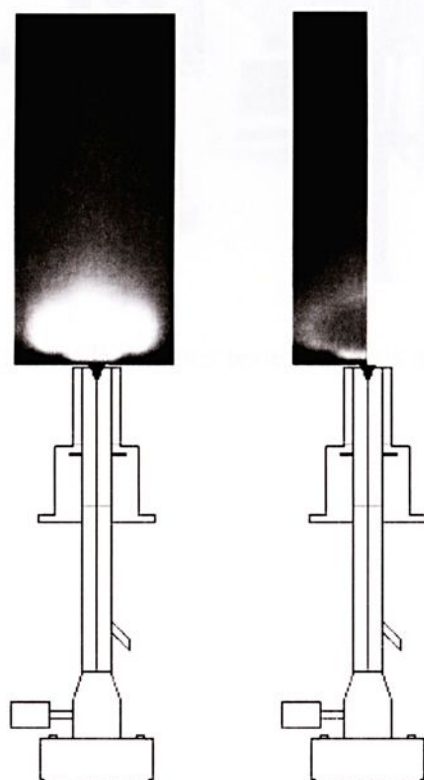


Figura 2.17 – Exemplo de reconstrução de imagem utilizando o algoritmo de Souza

Para evitar a interferência de fontes luminosas externas, que poderiam distorcer os resultados obtidos, foi construído um duto que interligava o visor da câmara de combustão à câmera CCD, como é mostrado na Figura 2.18. Este duto é de madeira e fora pintado de preto fosco para não refletir a luz proveniente da chama.

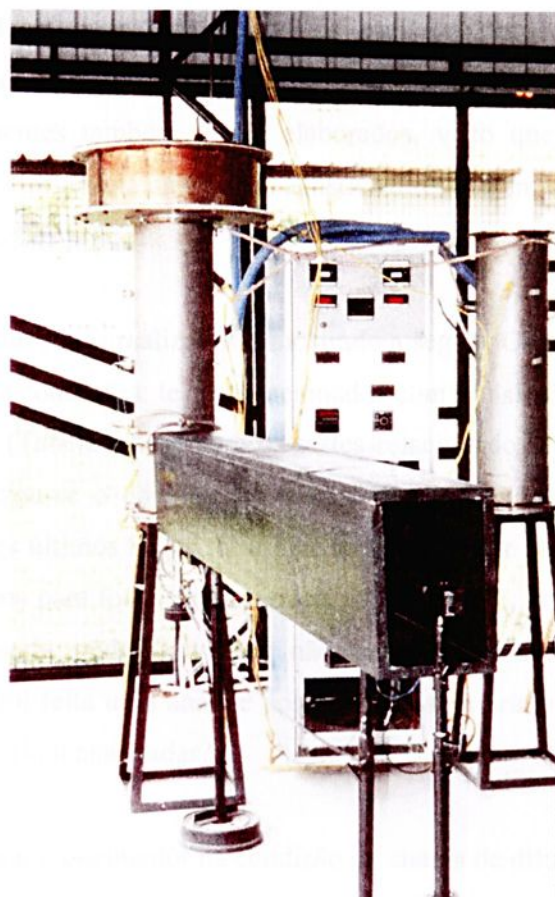


Figura 2.18 – Montagem utilizada nos teste relativos a tomografia de chama.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Observações Gerais

Este capítulo tem como objetivo descrever e comentar os resultados alcançados nos testes realizados. Tais resultados são apresentados na forma de gráficos ou tabelas. As escalas dos gráficos foram padronizadas de modo a facilitarem a sua comparação, assim como as tabelas. Mesmo para os casos onde os resultados positivos não foram alcançados, em termos de aumento da taxa de transferência de calor ou emissão de poluentes, alguns comentários pertinentes também foram elaborados, visto que um dos objetivos deste trabalho é mostrar a influência da atuação acústica direta na emissão de poluentes, visando futuras implementações práticas.

O conjunto de testes realizados é mostrado a seguir. Os testes foram realizados em duplicata, para duas condições: testes relacionados com transferência de calor e análise de gases de exaustão (Tabela 3.1) e para os testes relacionados com tomografia de chama (Tabela 3.2). Utilizou-se o combustor encamisado para os testes referentes à primeira condição. Para estes últimos testes foi utilizado o combustor com janela e neste caso não foram feitas imagens para todas as frequências da Tabela 3.1, isto porque a quantidade de imagens geradas seria muito grande e não traria um número igual de informações relevantes. Assim foi feita uma análise dos resultados da primeira etapa e determinou-se quais frequências seriam analisadas.

Não se operou o queimador na condição de chama de difusão pura, pois a chama se desprendia quando excitada acusticamente em parte das frequências de atuação, o que não permitia a comparação com os demais casos. Este problema também ocorreu para algumas razões de pré mistura, porém em um número menor de frequências de atuação.

Para os resultados referentes à transferência de calor para as paredes não obteve-se resultados significativos, a diferença de temperatura da camisa para uma vazão constante variou muito pouco. Provavelmente isto ocorreu devido a dimensão interna do combustor (muito grande) e a necessidade de se trabalhar com uma vazão de água alta o suficiente para que a mesma não entrasse em ebulição.



Tabela 3.1 – Parâmetros dos testes realizados na primeira etapa.

ϕ	Ar	Variações de frequência e amplitude
0.90	15% Pré – 85% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
	25% Pré – 75% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
	50% Pré – 50% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
	60% Pré – 40% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
1.00	15% Pré – 85% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 [Hz]
	25% Pré – 75% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
	50% Pré – 50% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
	60% Pré – 40% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]
1.10	50% Pré – 50% Dif.	Amplitude – 10 – 20 – 30 [mbar]
		Frequência – 0 – 75 – 150 – 225 – 350 – 500 – 625 – 750 – 900 – 1000 – 1150 – 1300 [Hz]

Nota: Para estes testes, as vazões de combustível e ar, bem como os respectivos números de Reynolds, são iguais aos da Tabela 3.2. Há pequenas variações que estão dentro dos erros dos equipamentos de medição de vazão, pressão e temperatura.



Tabela 3.2 – Parâmetros dos testes realizados na segunda etapa.

Teste	ϕ	m f [g/s]	m ar pre [g/s]	M ar dif [g/s]	% ar pre	% ar dif	Re ar pre	Re ar dif
1	0.9	0.161	0.444	2.292	16.2	83.8	2937	16402
2	0.9	0.166	0.643	2.040	24.0	76.0	4254	14599
3	0.9	0.163	1.303	1.331	49.5	50.5	8620	9525
4	0.9	0.159	1.610	1.063	60.2	39.8	10651	7607
5	1.0	0.162	0.377	2.039	15.6	84.4	2494	14592
6	1.0	0.161	0.591	1.757	25.2	74.8	3910	12574
7	1.0	0.160	1.212	1.223	49.8	50.2	8018	8752
8	1.0	0.162	1.503	0.994	60.2	39.8	9943	7113
9	1.1	0.160	1.120	1.110	50.2	49.8	7409	7943

3.2 – Resultados para 16,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 1

Os resultados de concentrações de gases, temperatura e amplitude de pressão no combustor são apresentados para esta condição de teste nas Figuras 3.1 a 3.10.

Com relação às concentrações de O_2 e CO_2 , houve uma pequena melhora na taxa de mistura entre o combustível e o oxidante com o aumento da frequência e da amplitude de atuação até 900 Hz, ocorrendo uma diminuição a partir deste valor, conforme mostram as Figuras 3.1 e 3.2. Para a frequência de 500 Hz, e amplitudes de atuação de 10 e 20 mbar, há uma diminuição significativa para a concentração de CO, conforme mostra a Figura 3.3, o que indica um máximo na taxa de mistura. Isto foi acompanhado de um discreto aumento na curva de CO_2 e redução na curva de O_2 (diferença de escala). Para a amplitude de atuação de 30 mbar, a Figura 3.3 mostra um mínimo da concentração de CO ocorreu em 225 Hz. Porém, para 30 mbar, não se conseguiu estabilização da chama em 500 Hz. Aparentemente o ponto de 500 Hz corresponde ao mínimo de geração de CO para os três casos de atuação, conforme será mostrado adiante na discussão das imagens.

A emissão de NO_x mantém-se praticamente constante como mostra a Figura 3.4. Apenas para a frequência de 225 Hz ocorre uma pequena diminuição ocasionada pela diminuição da temperatura nesta condição.

Os gráficos das temperaturas em função da frequência de excitação no queimador são mostrados nas Figuras 3.5 a 3.7. Os comportamentos das curvas são semelhantes para os três casos de amplitude de pressão acústica (10, 20 e 30 mbar).

Os gráficos das amplitudes de pressão no combustor como função da frequência, para as amplitudes de atuação no queimador de 10, 20 e 30 mbar, são apresentados nas Figuras 3.8 a 3.10. Verifica-se que as amplitudes no combustor foram sempre muito pequenas, o que permite concluir que para nenhum dos três casos houve acoplamento entre as frequências de atuação do alto falante com uma das frequências naturais do combustor. Nesta série, a vazão mássica que estava sofrendo atuação direta do alto falante (combustível mais ar de pré mistura) foi a menor de todo o intervalo investigado neste trabalho.



A Tabela 3.3 contém imagens relativas às frequências de 225, 500 e 1000 Hz para as três amplitudes de atuação, além das imagens relativas à condição sem atuação. Estas imagens foram obtidas no combustor com visor.

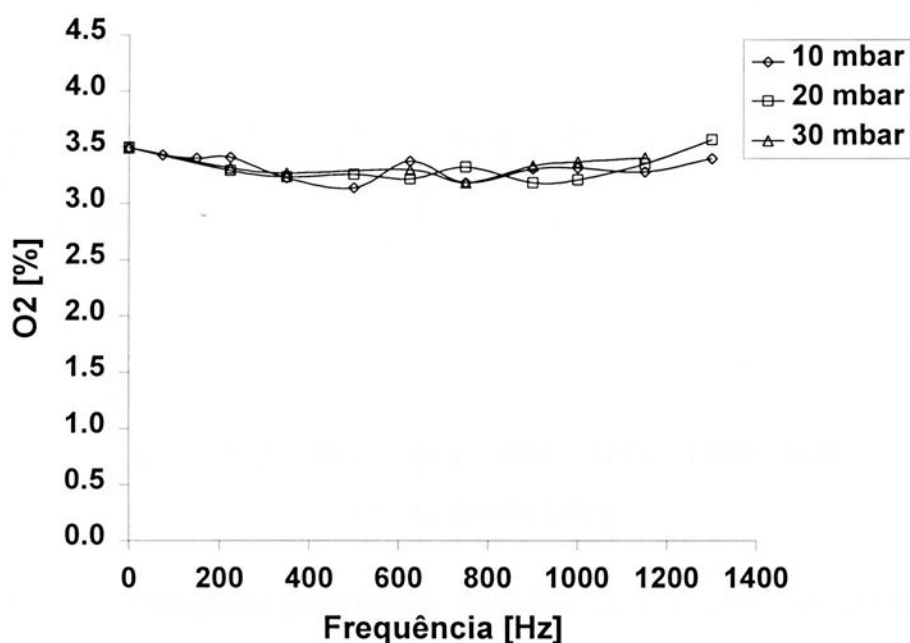


Figura 3.1 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

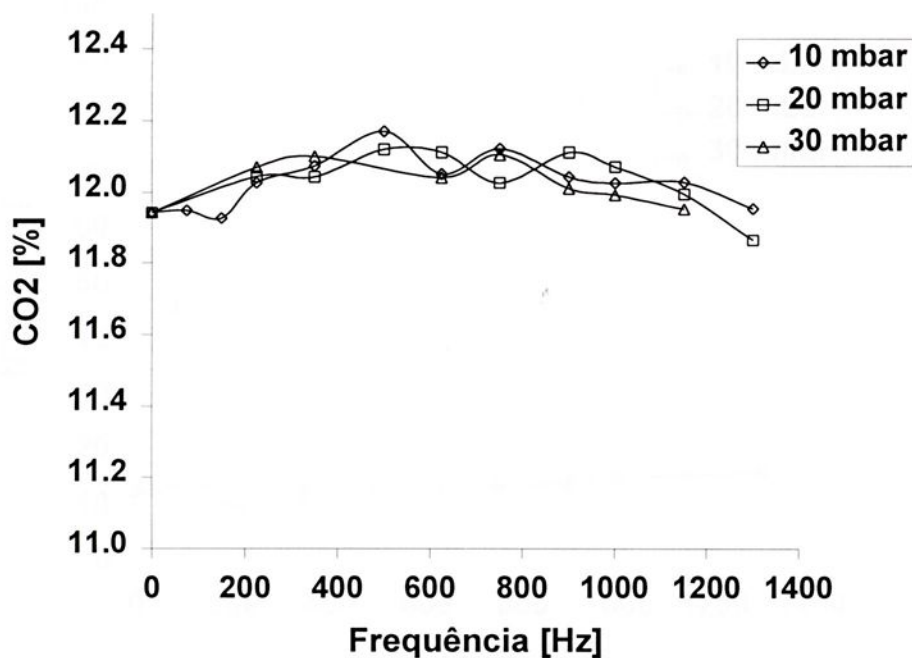


Figura 3.2 – Variação da concentração de CO_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

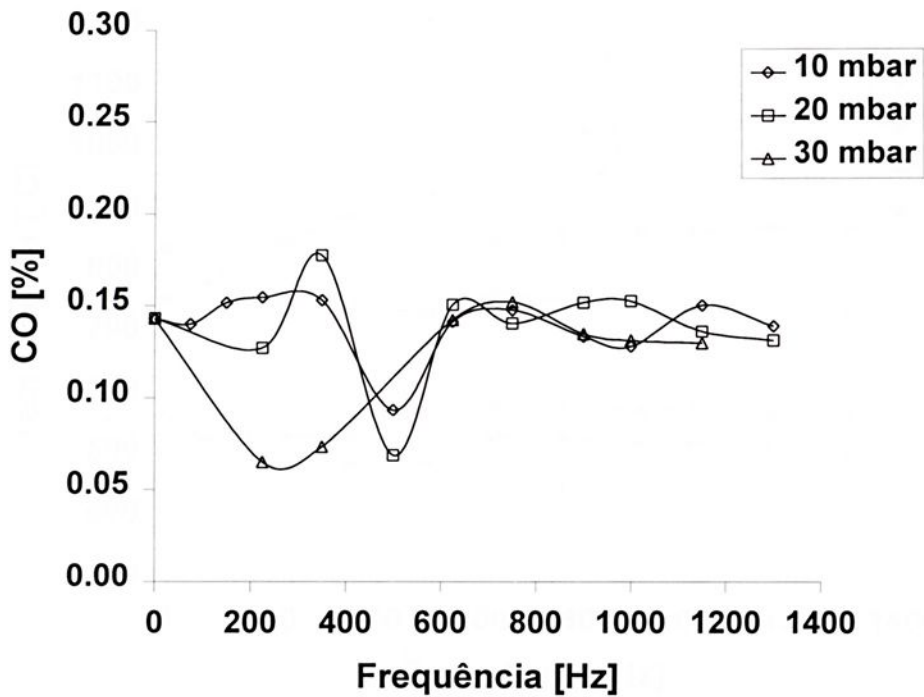


Figura 3.3 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

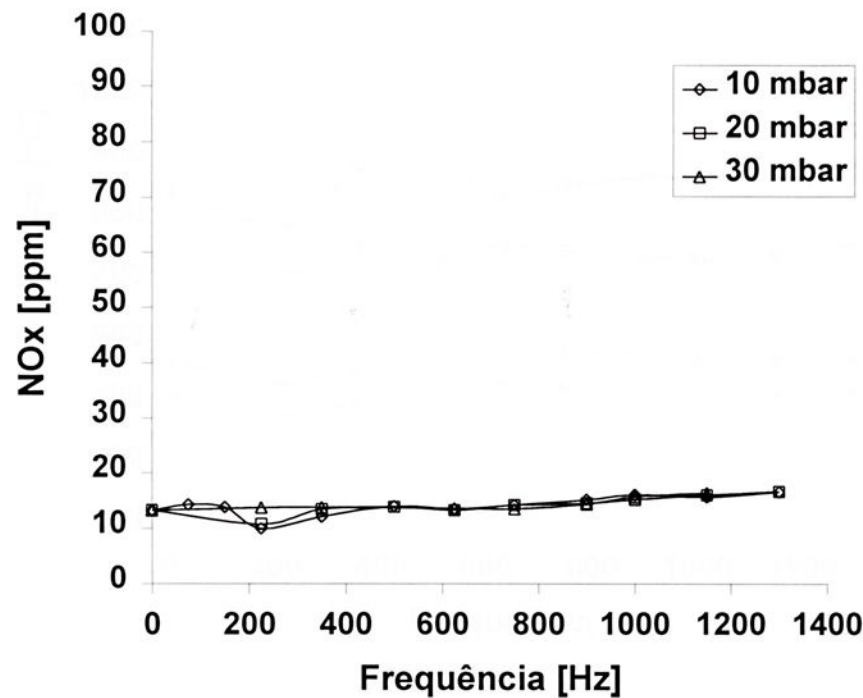


Figura 3.4 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

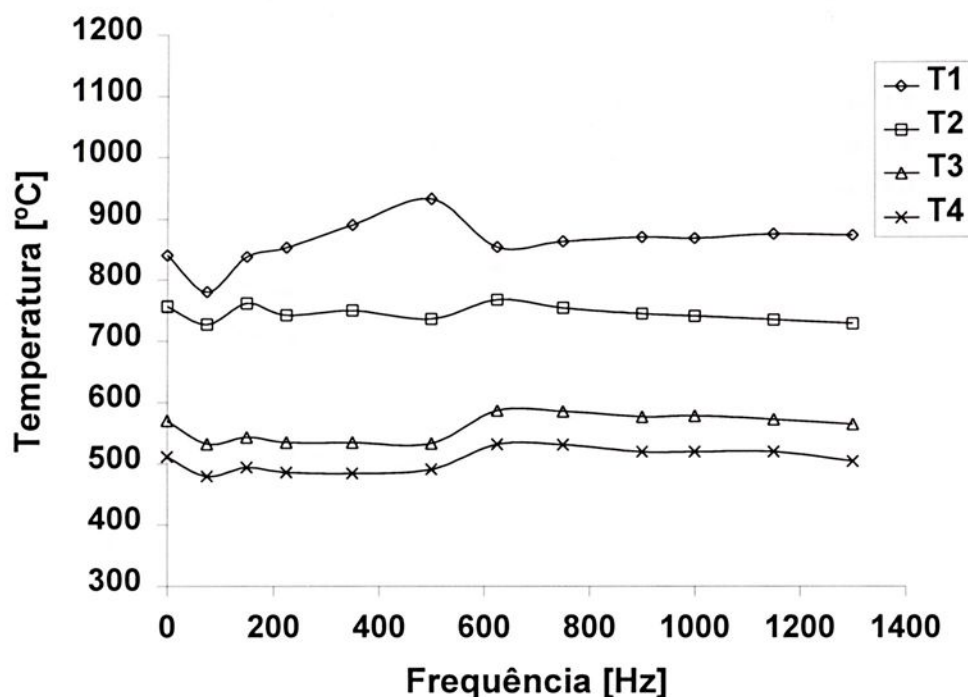


Figura 3.5 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

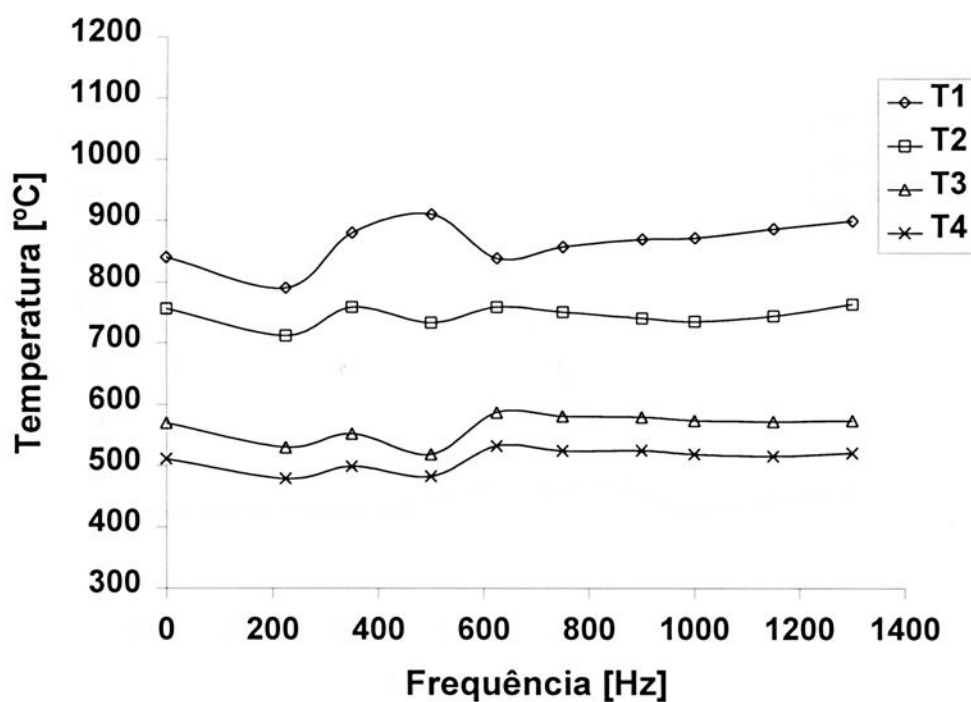


Figura 3.6 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

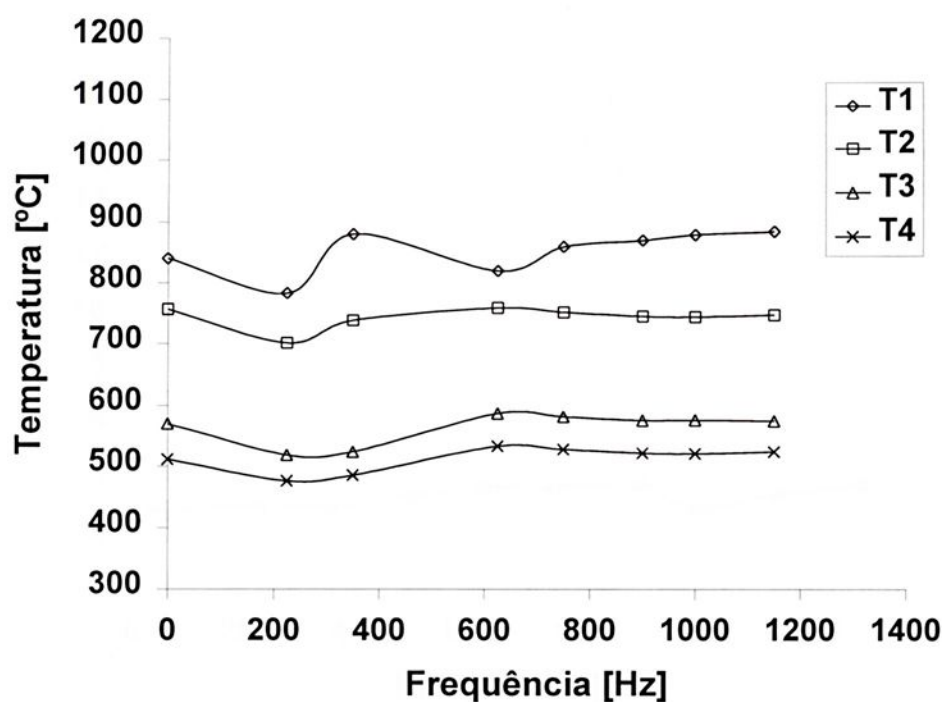


Figura 3.7 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

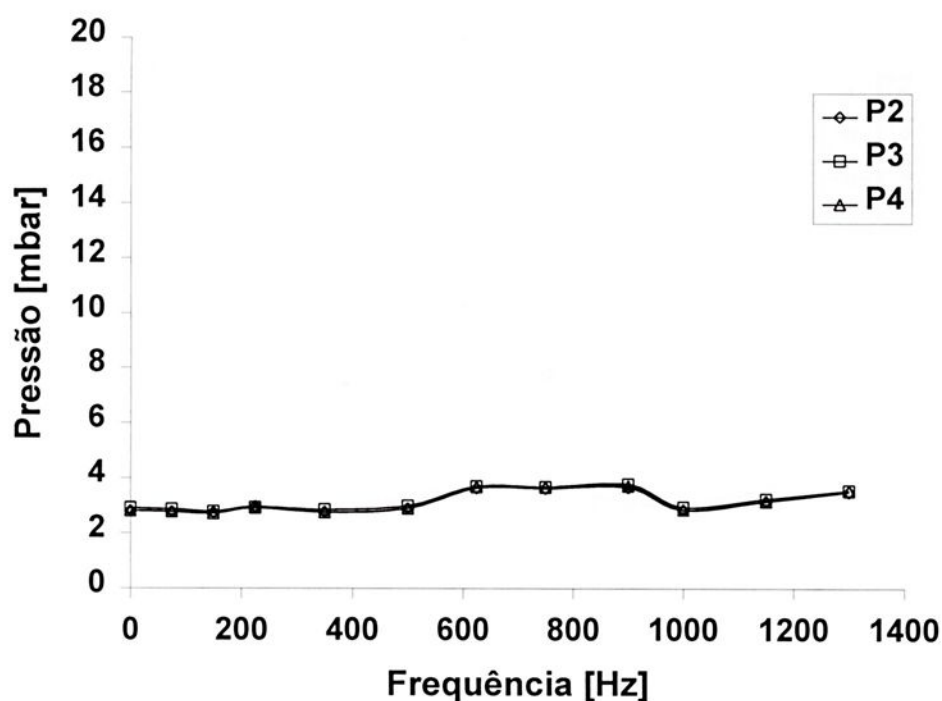


Figura 3.8 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

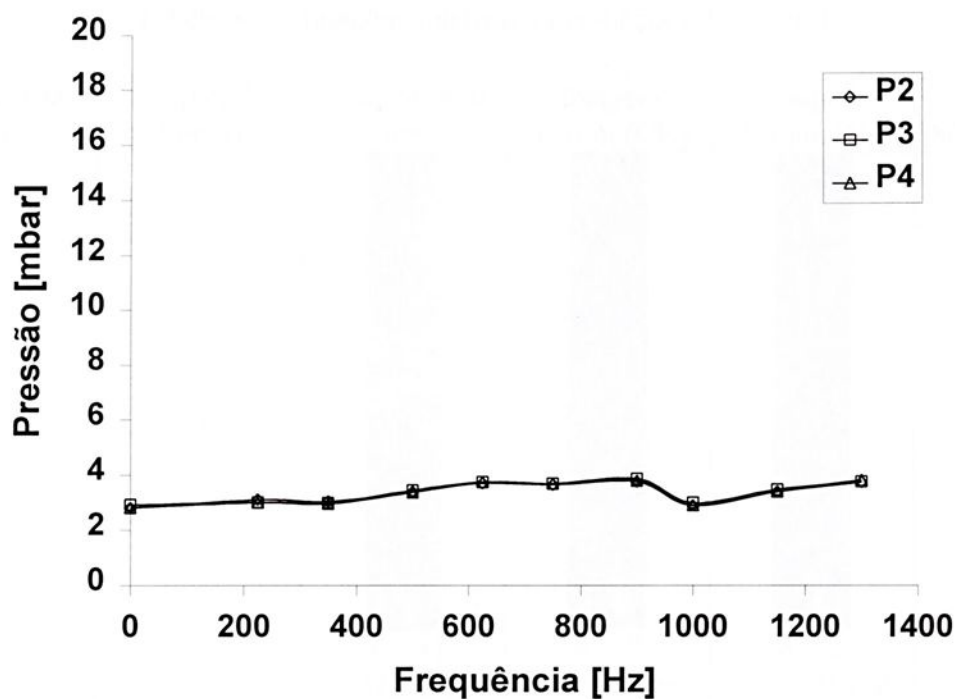


Figura 3.9 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

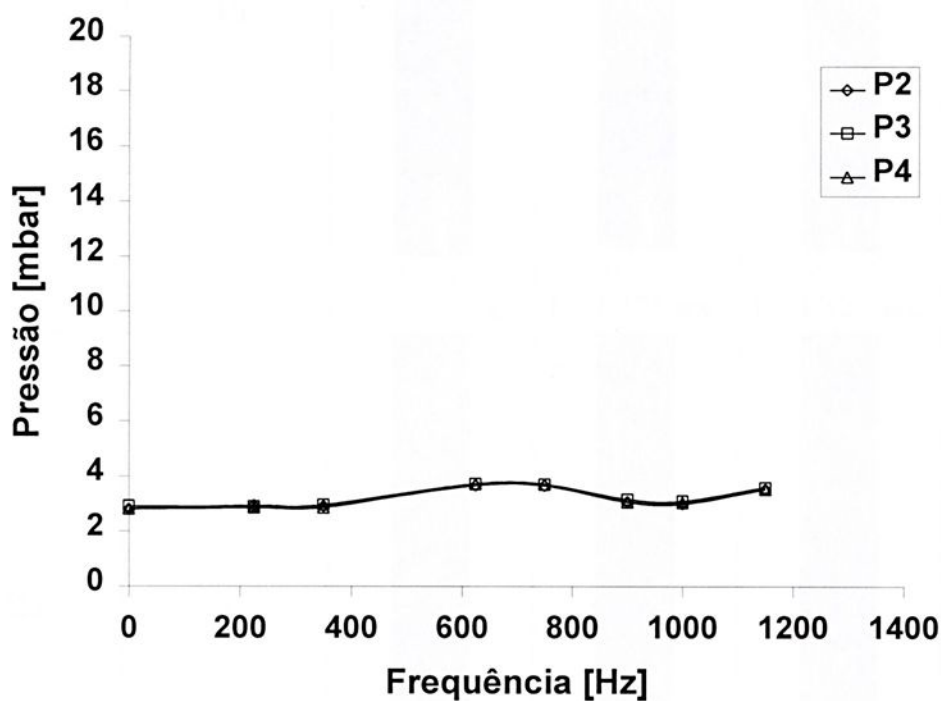


Figura 3.10 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

Tabela 3.3 – Imagens relativas às condições do Teste 1.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	10	 A = 11 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	20	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.3 – Imagens relativas às condições do Teste 1 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
225	30	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	10	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	 A = 2 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.3 – Imagens relativas às condições do Teste 1 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	10	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	20	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.3 – Imagens relativas às condições do Teste 1 (continuação).

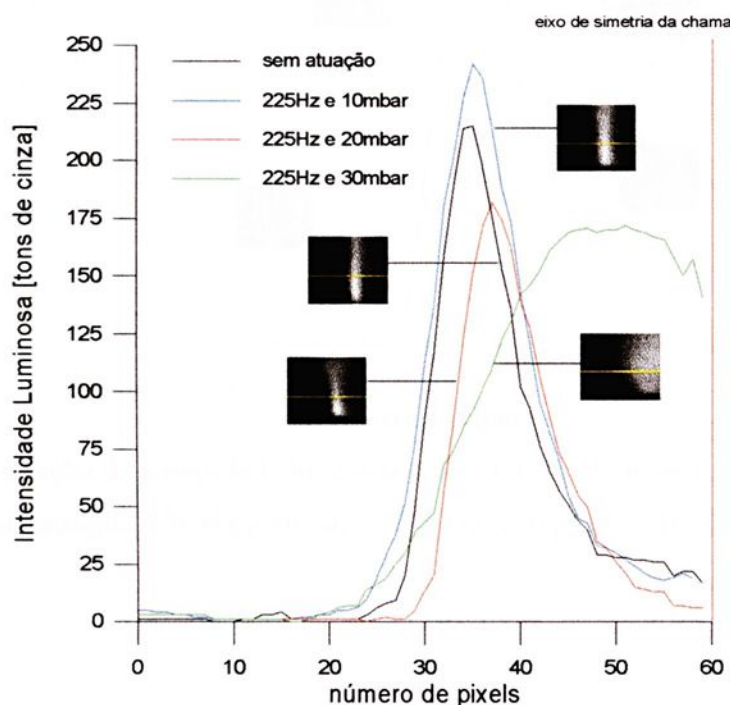
Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 8 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	 A = 1.4 t = 1/125 sec.	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Sem atuação acústica, nota-se que para esta chama, predominantemente difusiva, existem duas regiões distintas de intensa emissão quimiluminescente. Nas proximidades do queimador a chama se estabelece em um estreito canal entre os jatos de pré-mistura e ar externo que emergem do queimador. Através das imagens com os filtros nos comprimentos de onda 431, 516 e 802 nm, pode-se dizer que nessa região primária praticamente não há presença de fuligem e as emissões nos comprimentos 431 e 516 nm ocorrem por causa dos radicais CH e C₂, respectivamente. Na região secundária, onde a emissão quimiluminescente destes radicais é bem menos intensa, nota-se uma forte emissão no comprimento de onda característico da presença de fuligem.

Comparando as imagens para o comprimento de onda 802 nm, verifica-se que tanto o aumento da frequência como da amplitude foram favoráveis à redução da fuligem na região secundária da chama, onde, em alguns casos, a concentração foi baixa tal que a emissão quimiluminescente não foi suficiente para ser detectada pelo sistema ótico.

Ainda analisando as imagens, nota-se que, além da região secundária, a presença do campo acústico também afeta a região primária. Aparentemente, para o presente caso, tanto o aumento da amplitude como o da frequência, fazem com que a chama, que se estabelecia originalmente em um estreito canal entre jatos, disperse-se para região interna, em direção ao eixo de simetria. Isto pode ser melhor observado analisando a emissão

quimiluminescente em uma linha horizontal localizada na imagem a 20 pixels do queimador (cerca de 20mm de distância). A Figura 3.11 compara esse comportamento para a frequência de 225Hz variando a amplitude e a Figura 3.12 para amplitude 20mbar variando a frequência.



Figuradsferreira

3.11 – Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz, e 10, 20 e 30 mbar.

3.3 – Resultados para 24% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 2

Os resultados de concentrações de gases, temperatura e amplitude de pressão no combustor são apresentados para esta condição de teste nas Figuras 3.13 a 3.22.

Observando as Figuras 3.13 e 3.14 não podemos afirmar que houve uma melhora na taxa de mistura, pois as concentrações de O_2 e CO_2 mantiveram-se praticamente constantes.

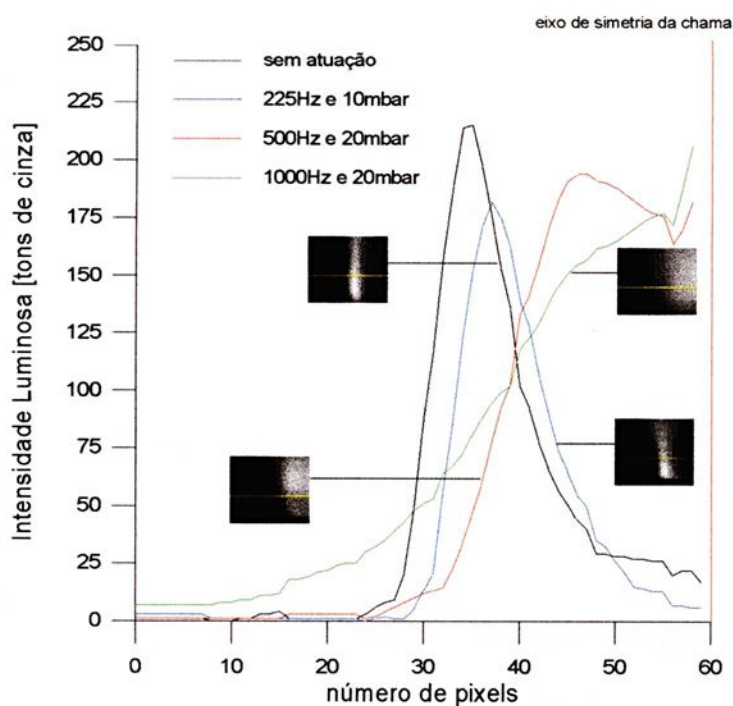


Figura 3.12 - Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz e 10 mbar, 500 Hz e 20 mbar, e 1000 Hz e 30 mbar.

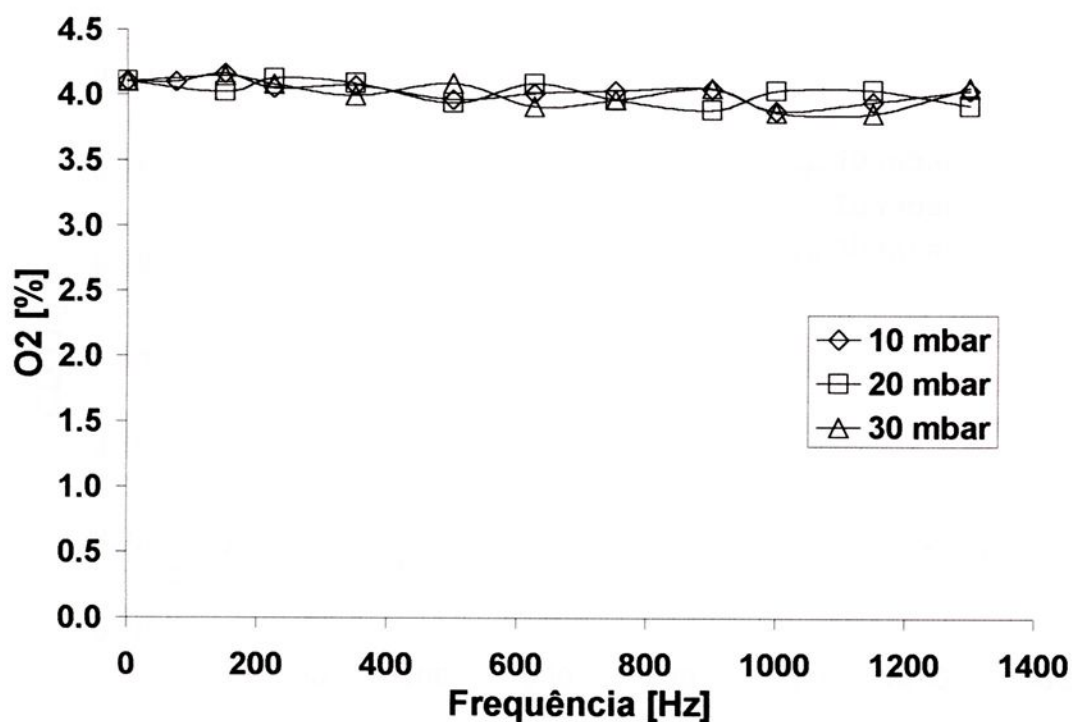


Figura 3.13 - Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

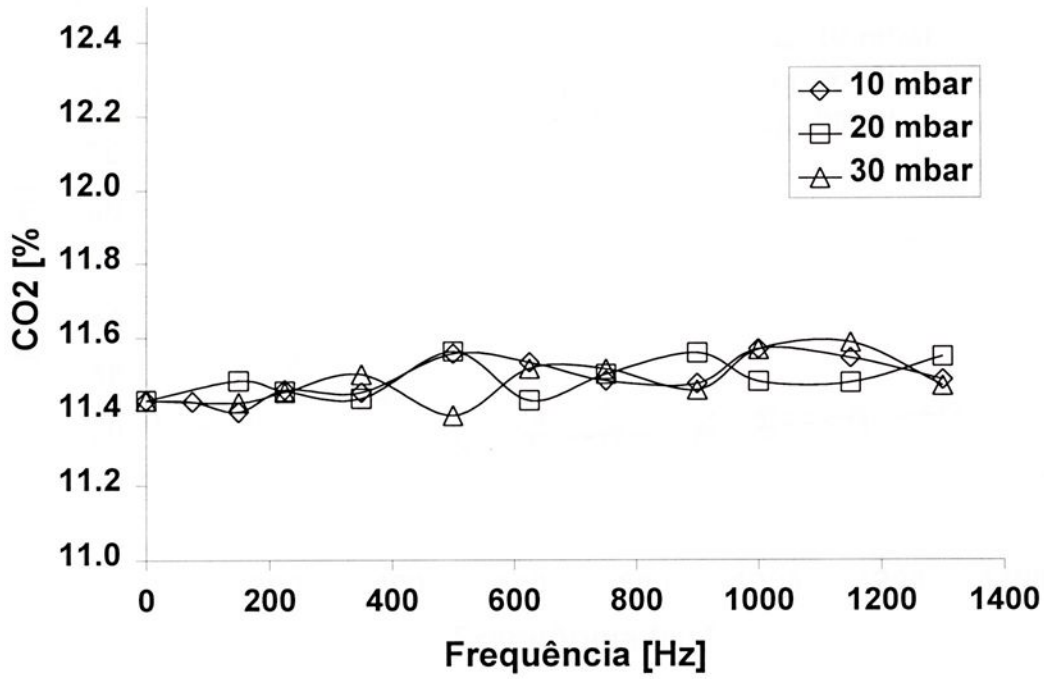


Figura 3.14 – Variação da concentração de CO₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

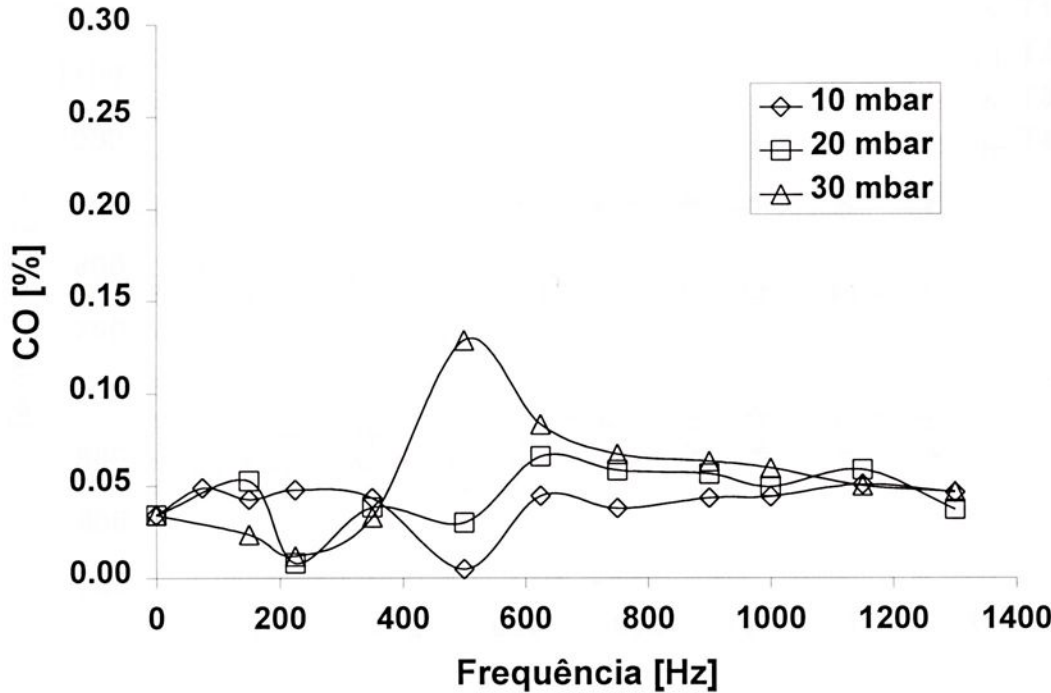


Figura 3.15 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

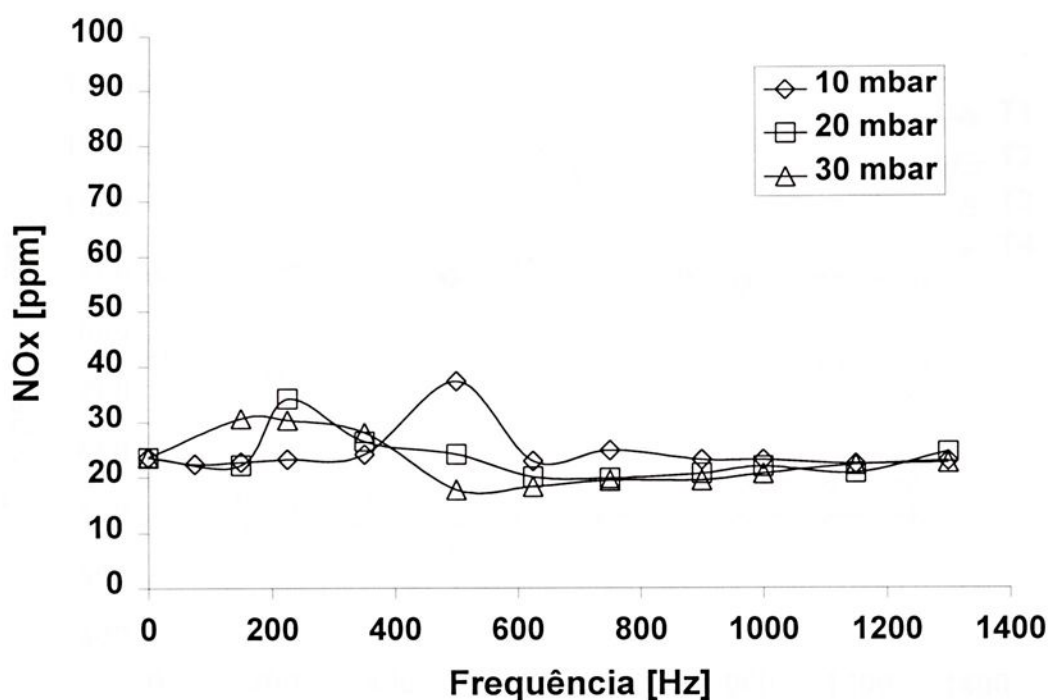


Figura 3.16 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

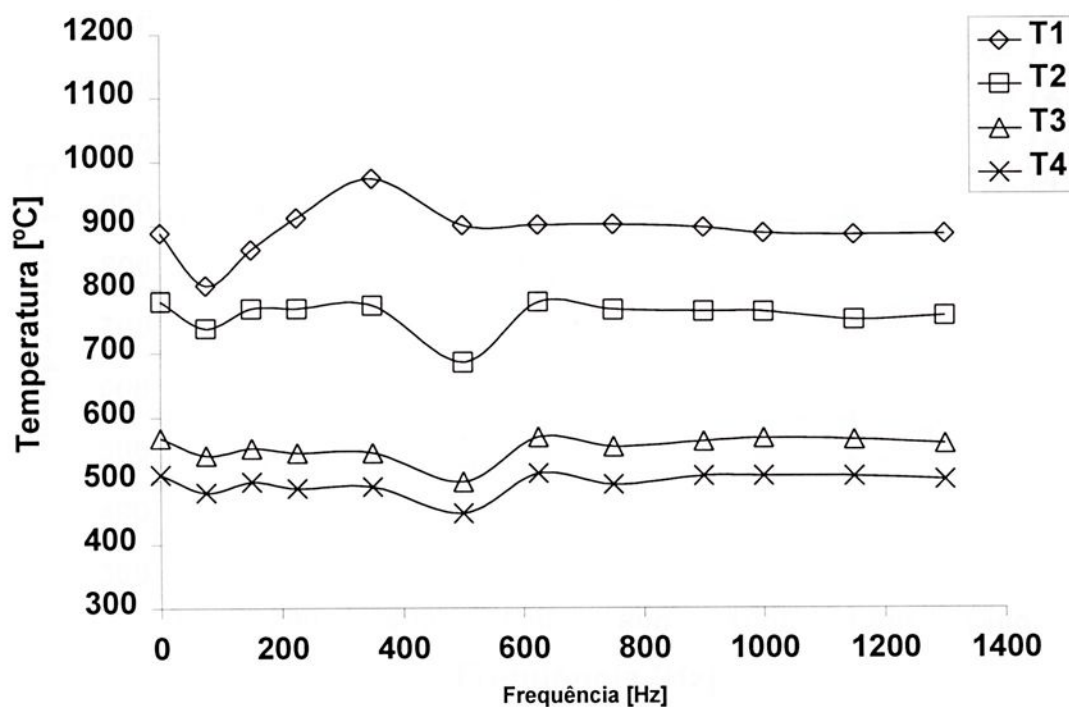


Figura 3.17 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

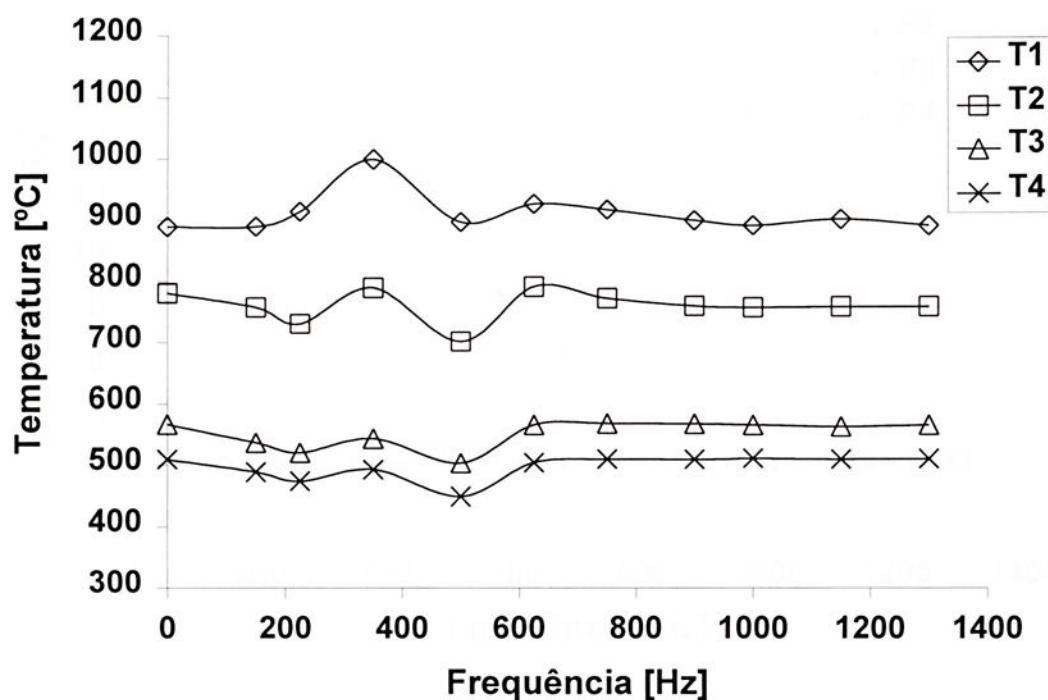


Figura 3.18 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

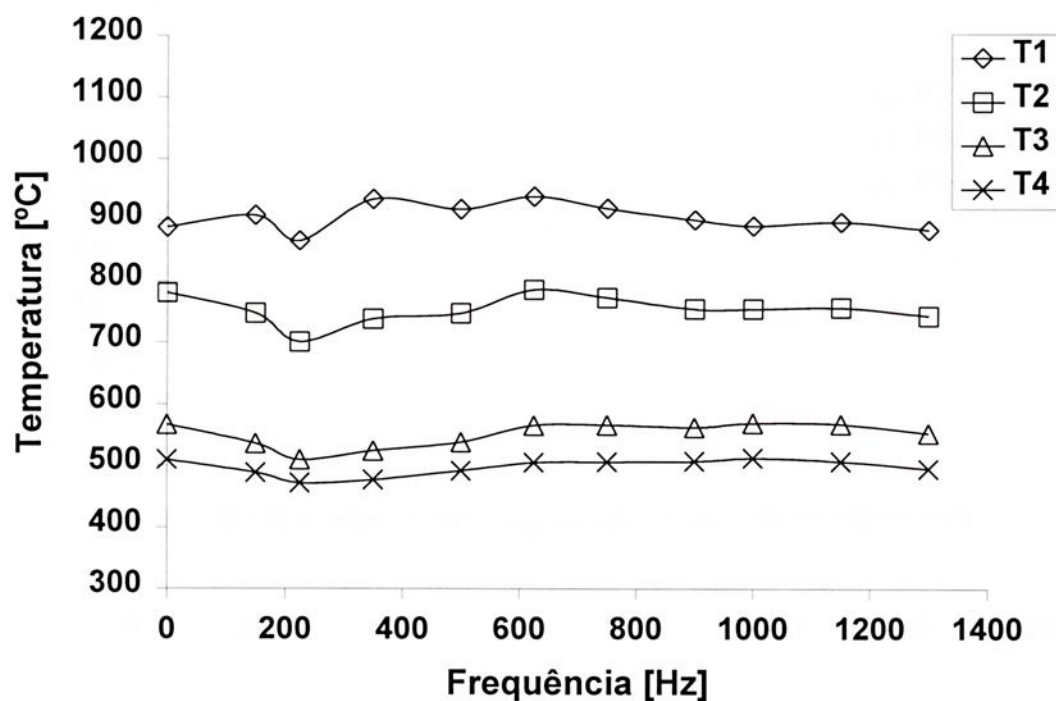


Figura 3.19 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

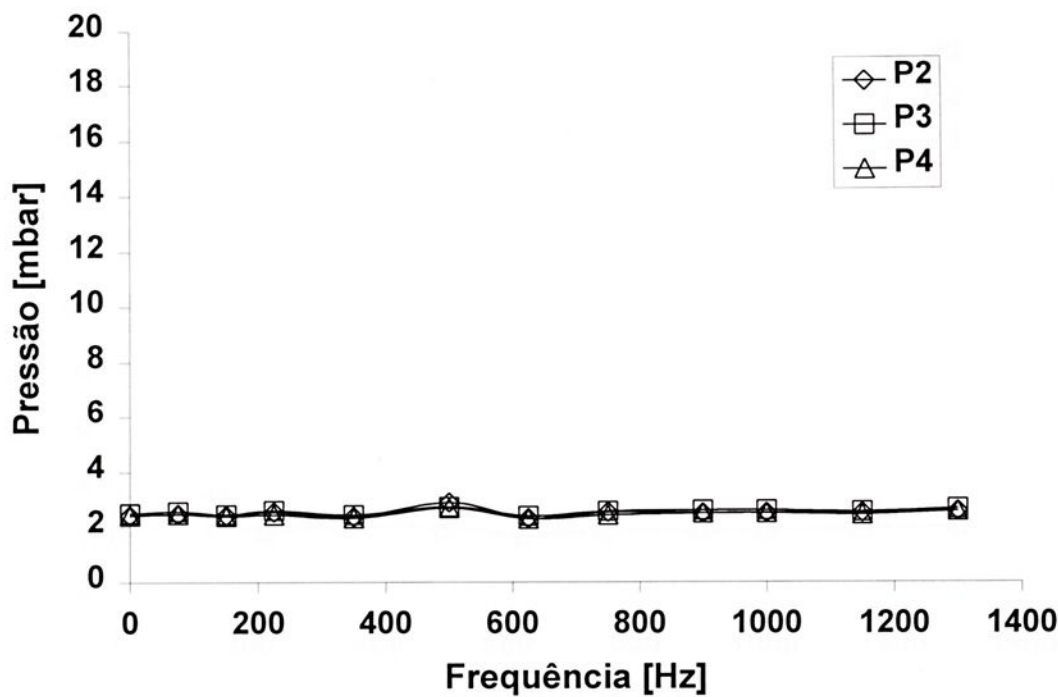


Figura 3.20 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

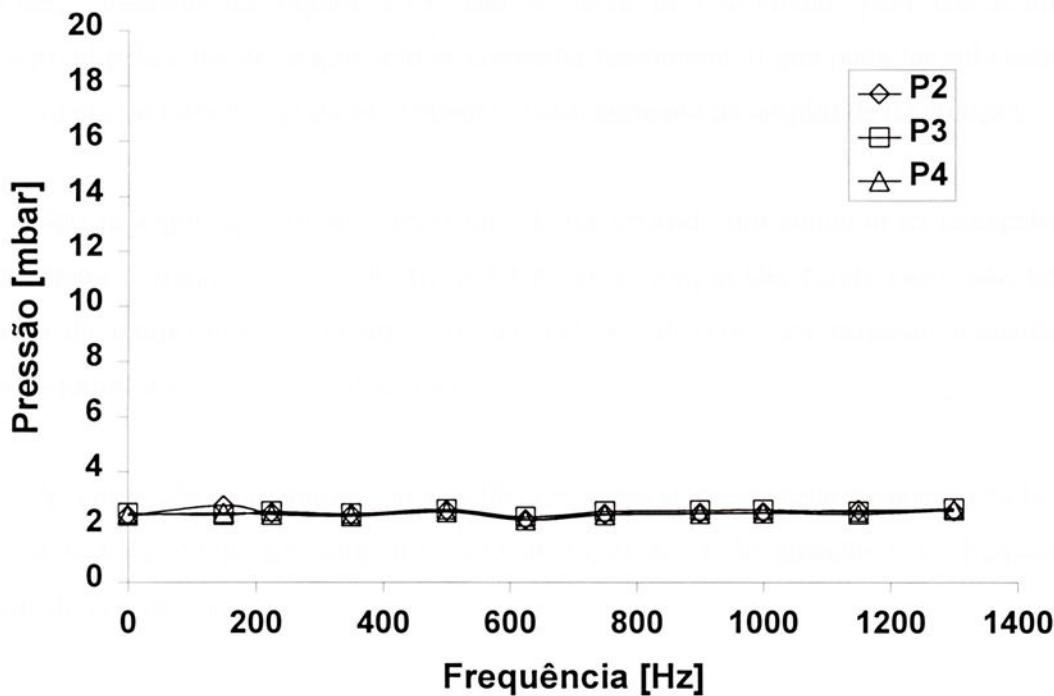


Figura 3.21 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

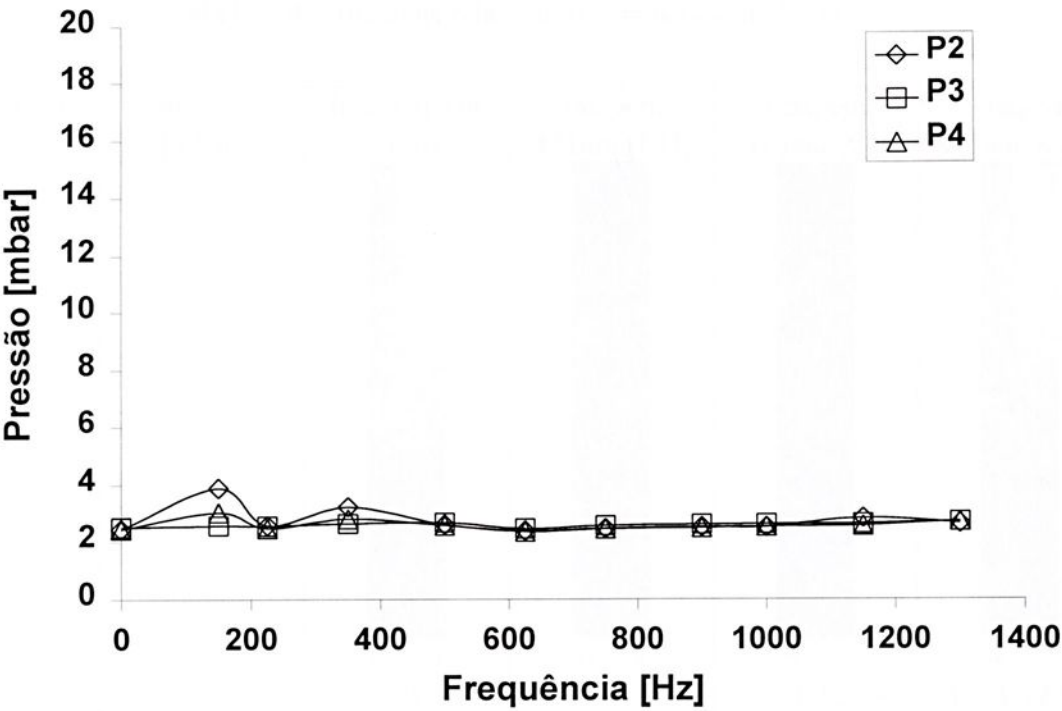


Figura 3.22 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

Já a concentração de CO tem um pico para a frequência de 500 Hz e amplitude de 30 mbar, mostrado na Figura 3.15. Isto se deve provavelmente pela passagem do combustível pela zona de reação sem se converter totalmente, o que pode ter sido causado pelo aumento da turbulência do escoamento com o aumento da amplitude de atuação.

Não há explicação direta para o fato de ter ocorrido um aumento na concentração de NO_x para a frequência de 500 Hz e 10 mbar de amplitude. Neste caso, não ocorre aumento da temperatura na chama; apenas pode-se observar um pequeno aumento da emissão quimiluminescente (Tabela 3.4).

As curvas de temperatura são semelhantes entre si. Neste teste, também não houve, para condição alguma, acoplamento entre as frequências de atuação e as frequências naturais do combustor.

A Tabela 3.4 apresenta as imagens obtidas para os casos sem atuação, 500 e 1000 Hz, para as três pressões de atuação.

Tabela 3.4 – Imagens relativas às condições do Teste 2.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s
500	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s
500	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.4 – Imagens relativas às condições do Teste 2 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s
1000	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s

Tabela 3.4 – Imagens relativas às condições do Teste 2 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s

Neste caso, como ocorrido no Teste 1, sem atuação acústica, nota-se que existem duas regiões distintas de intensa emissão quimiluminescente. Pode-se dizer que na região primária praticamente não há presença de fuligem e as emissões nos comprimentos 431 e 516 são de responsabilidade dos radicais CH e C₂, respectivamente. Também neste teste, na região secundária, onde a emissão quimiluminescente destes radicais é bem menos intensa, nota-se uma forte emissão no comprimento de onda característico da presença de fuligem.

Para a frequência de 500 Hz observa-se uma diminuição do comprimento da chama e um alargamento da zona de reação no sentido do eixo de simetria.

Uma observação importante é que a frequência não é diretamente proporcional à taxa de mistura, pois para as imagens na frequência de 1000 Hz são novamente reconhecidos radicais no comprimento de onda de 802 nm (fuligem), o que indica uma combustão incompleta. Isto mostra que existem frequências em que além da atuação direta feita pelo alto falante posicionado na base do queimador ocorre a atuação indireta onde o próprio processo de combustão aumenta a taxa de mistura.

3.4 – Resultados para 50 % de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 3

Para as condições do Teste 3, os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor são apresentados nas Figuras 3.23 a 3.32.

Com a atuação direta do alto falante pode-se observar uma pequena melhora na taxa de mistura dos reagentes, como mostram as Figuras 3.23 e 3.24. Para duas situações observa-se o aumento das concentrações de O_2 e CO e diminuição na concentração de CO_2 . Isto ocorre nas condições de 500 Hz e 30 mbar e 625 Hz e 10 mbar. Isto mostra uma diminuição da taxa de mistura nestas condições.

Com a queda da temperatura para as frequências de 500 e 625 Hz e amplitudes de 30 e 10 mbar, respectivamente, Figuras 3.27 e 3.29, observa-se uma diminuição na concentração de NO_x , conforme mostra a Figura 3.26. Para 500 Hz e 20mbar houve acoplamento entre a atuação acústica e o combustor, como mostra a Figura 3.31, no entanto, isso não causou modificações intensas nas concentrações de gases e temperaturas.

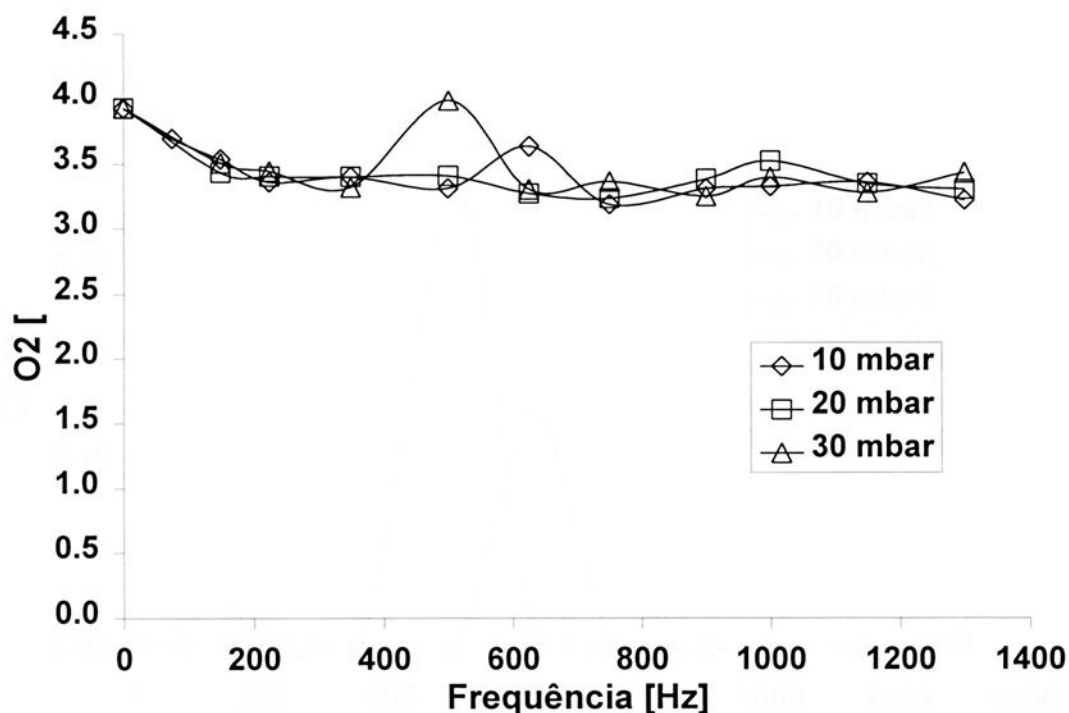


Figura 3.23 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

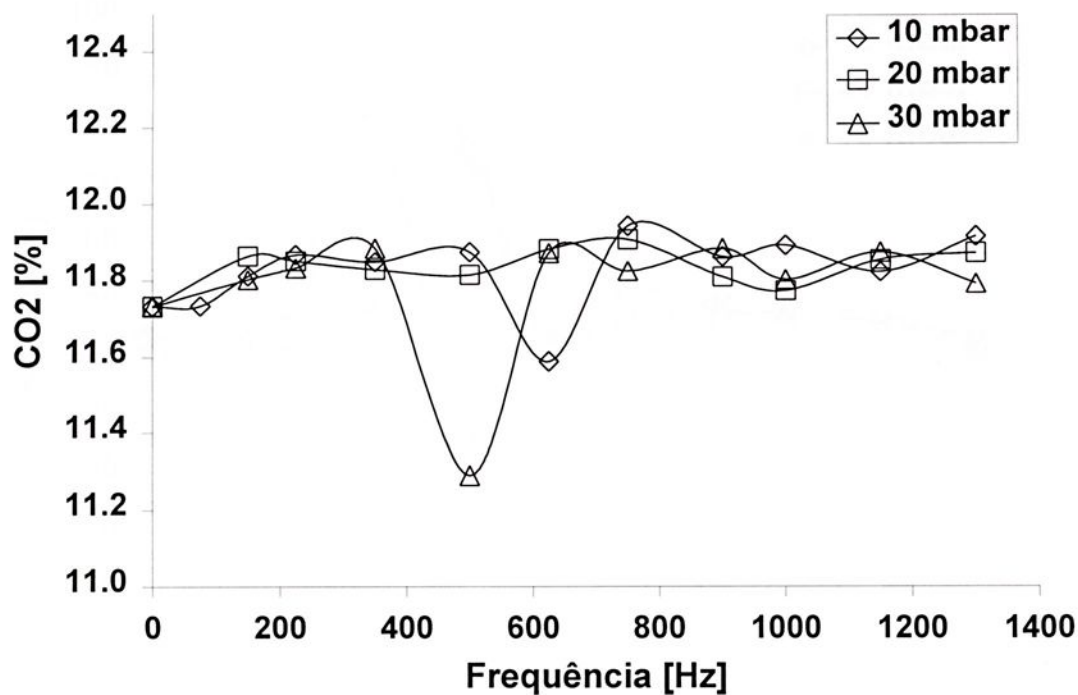


Figura 3.24 – Variação da concentração de CO_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

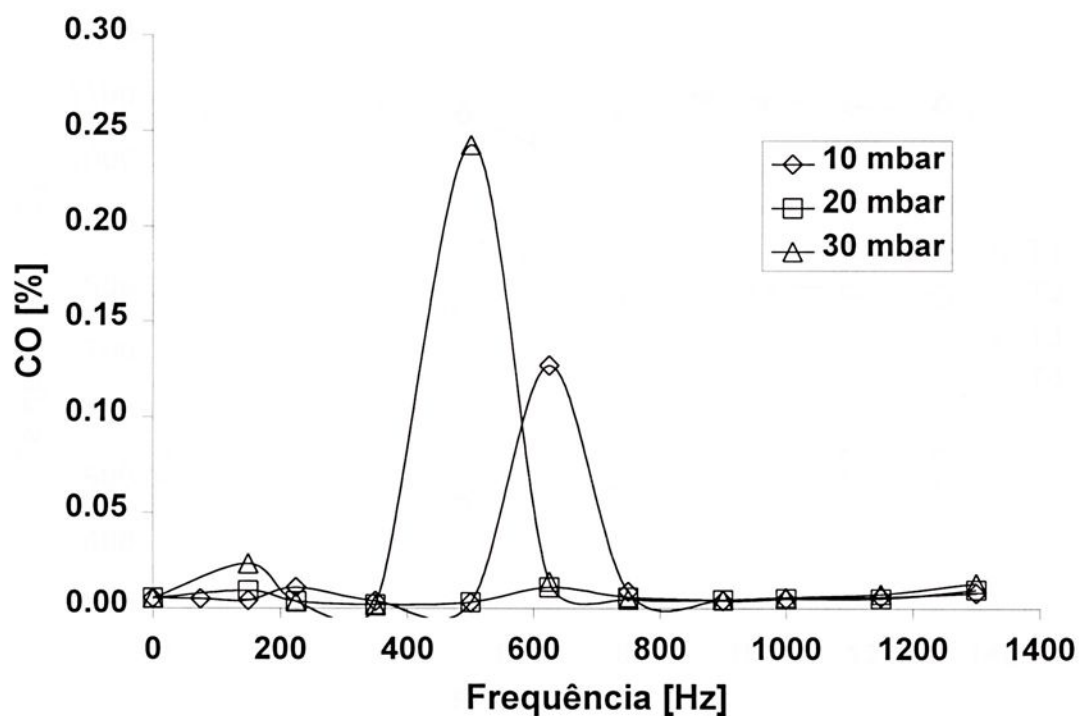


Figura 3.25 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

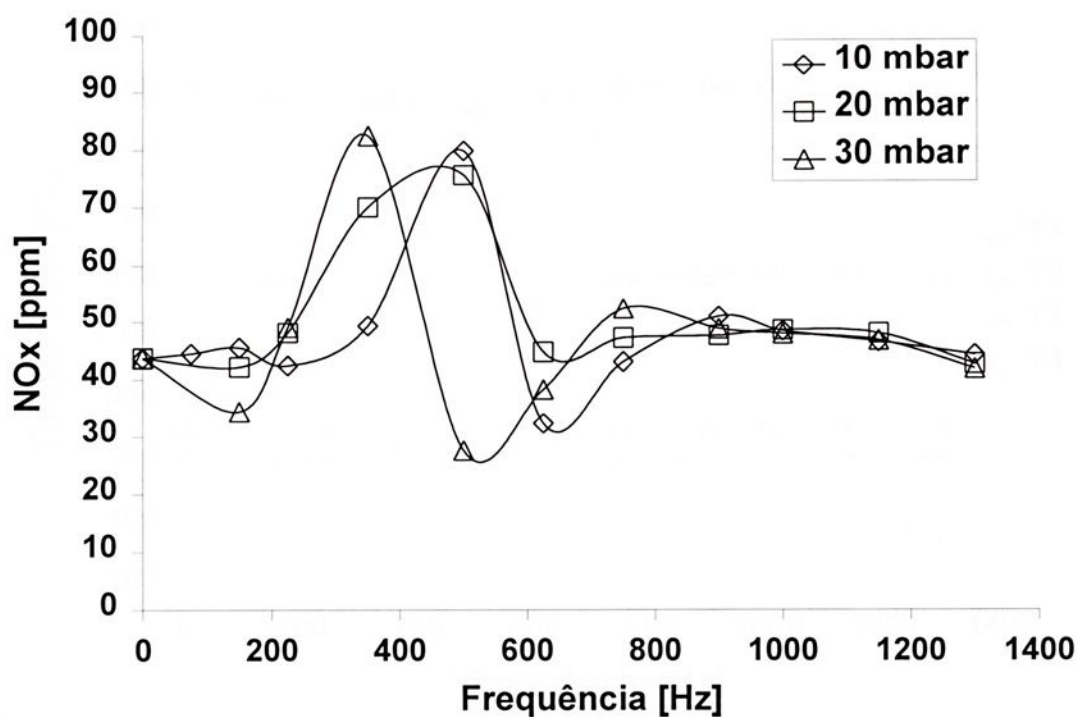


Figura 3.26 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

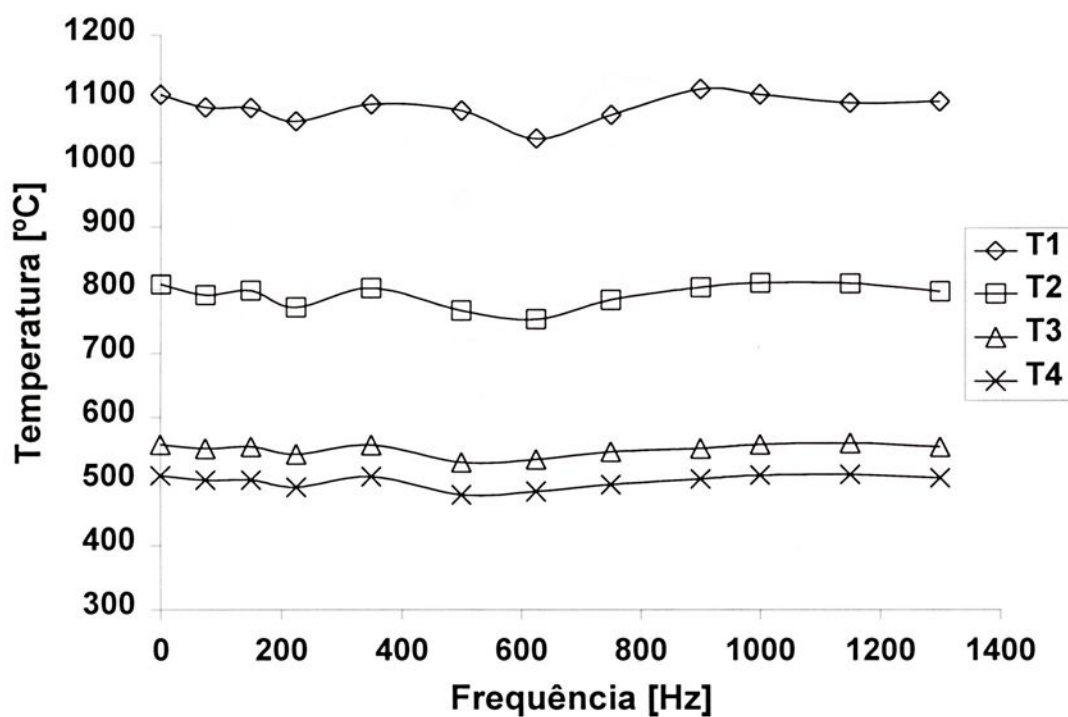


Figura 3.27 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

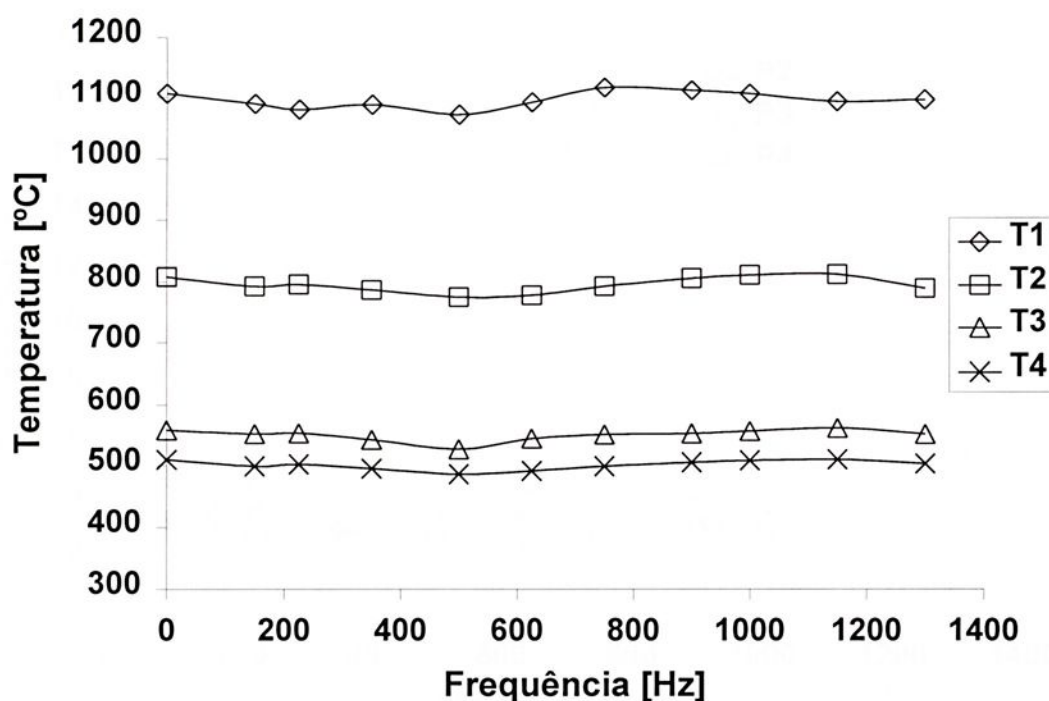


Figura 3.28 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

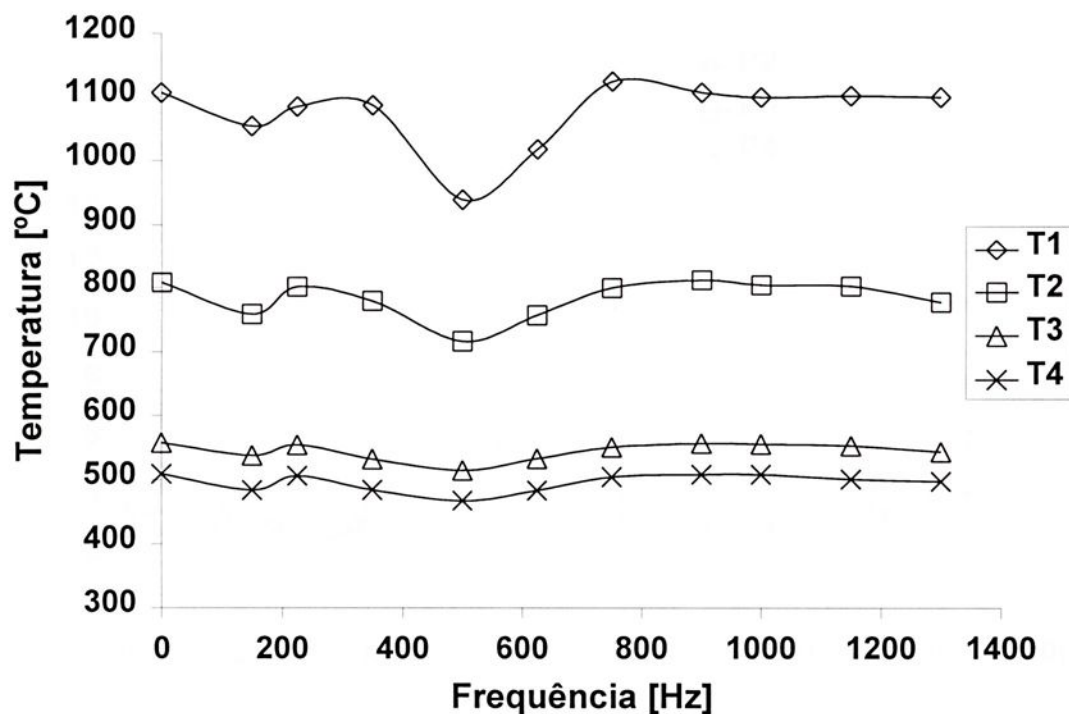


Figura 3.29 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

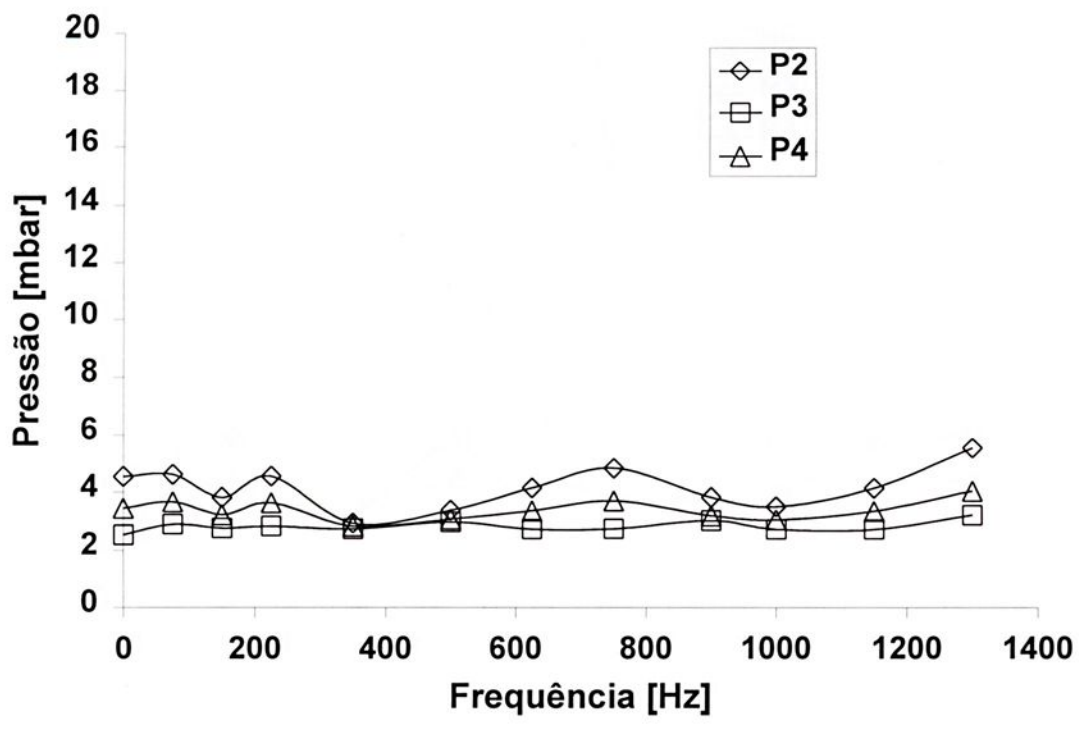


Figura 3.30 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

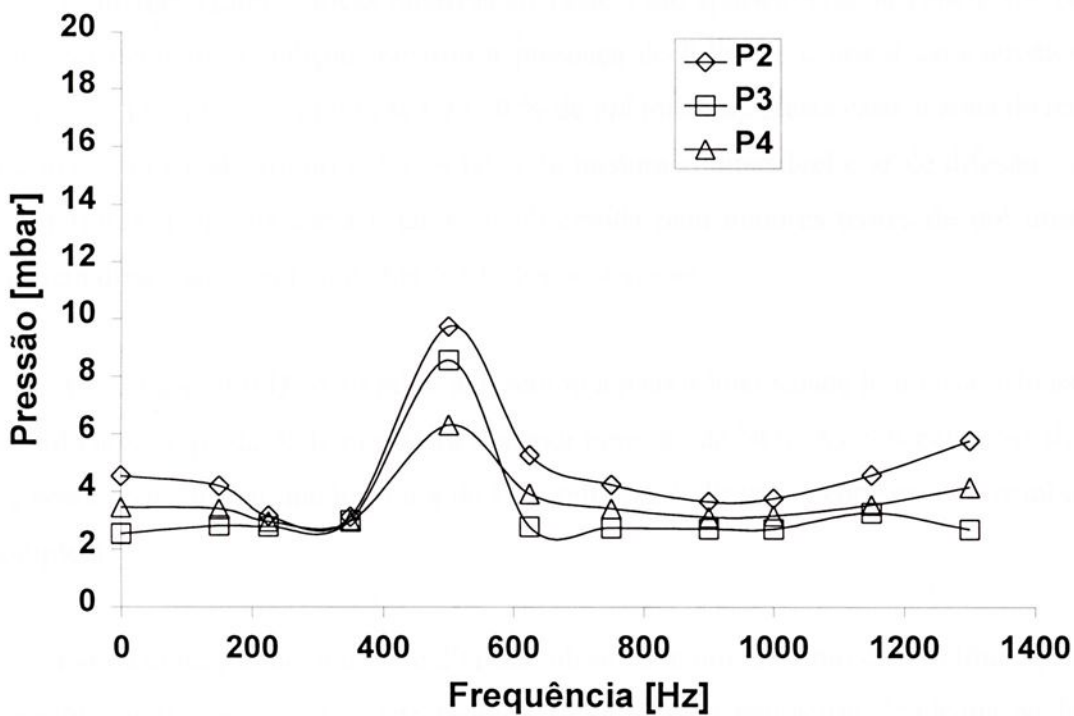


Figura 3.31 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

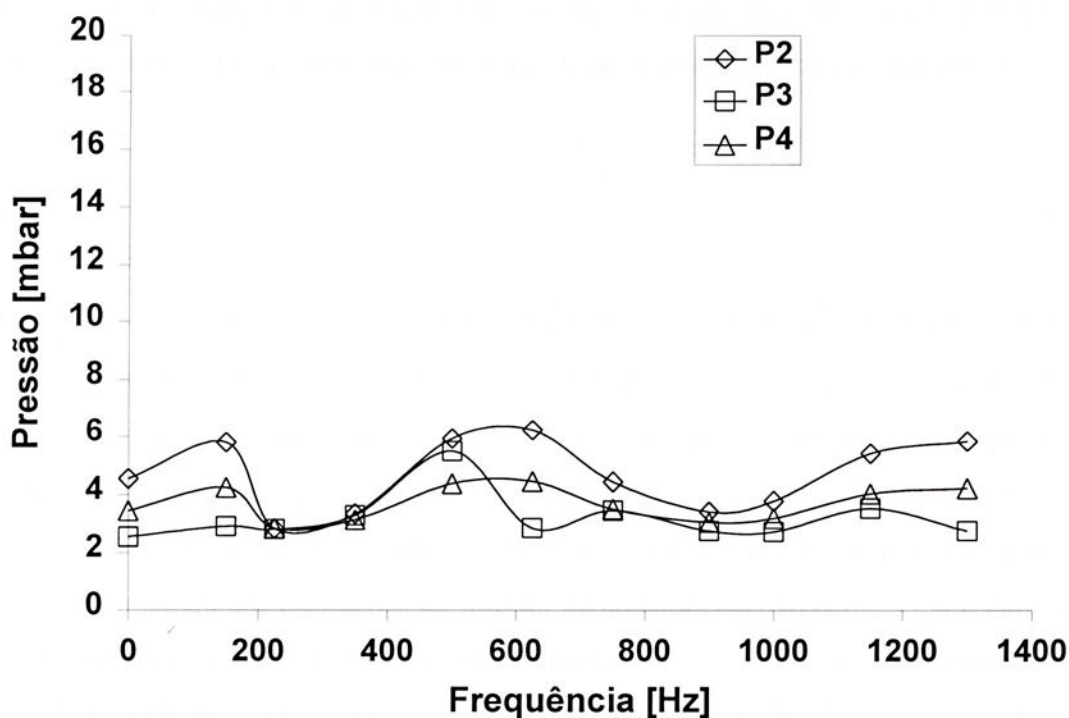


Figura 3.32 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

As imagens tomográficas relativas ao Teste 3 são apresentadas na Tabela 3.5. Nota-se que em nenhuma condição mostrou a presença de fuligem, o que é característico de chamas com pré mistura (aqui já se tem 50 % de pré mistura). Neste caso, a zona de reação não é mais um canal estreito entre os jatos de mistura combustível e ar de difusão, como nos anteriores. Esta tendência é também observada para maiores teores de pré mistura, como será observado nos resultados dos testes posteriores.

A condição 500 Hz e 30 mbar apresentou a menor intensidade luminosa. Isto esteve associado a uma queda de temperatura e menor emissão de NO_x . As concentrações de CO e O_2 neste ponto foram máximas e a de CO_2 mínima, indicando ocorrência de combustão incompleta.

Para a condição de 500 Hz e 20 mbar observa-se um aumento da amplitude pressão no combustor (Figura 3.31). Neste momento tem-se uma geometria de chama na forma elíptica bem próxima a base do queimador. A própria presença da chama, ou seja, de uma intensa liberação de energia na câmara de combustão, que não deixa de ser uma cavidade

acústica, pode induzir o surgimento de oscilações, desde que satisfaça o critério de Rayleigh (1945). De acordo com esta formulação a amplitude das oscilações crescerá quando

$$\oint Q'p' dt > 0 \quad (3.1)$$

onde Q é a taxa de calor instantânea transferida ao escoamento, p' a diferença entre a pressão instantânea e a pressão média (pressão acústica), t o tempo e $\oint$ a integração sobre o ciclo de oscilação. Esta expressão é proveniente das equações de conservação e a integral representa o acréscimo de energia da perturbação acústica por ciclo fornecida por uma fonte de calor. O formato da chama, acaba sendo um parâmetro importante para o surgimento espontâneo das oscilações no interior da câmara (Lacava et al., 1997). Para um tubo com uma extremidade fechada e outra aberta, espera-se que quanto maior for a liberação de energia na extremidade fechada, maior será a possibilidade do surgimento das oscilações. Desta forma, a estrutura da chama nesta condição onde ocorreu o acoplamento parece satisfazer o critério de Rayleigh.

Tabela 3.5 – Imagens relativas às condições do Teste 3.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.5 – Imagens relativas às condições do Teste 3 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
350	30	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

βTabela 3.5 – Imagens relativas às condições do Teste 3 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.5 – Imagens relativas às condições do Teste 3 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 4 t = 1/125 s	Imagem não disponível A = 4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

3.5 – Resultados para 60,2 % de Ar de Pré Mistura, $\phi = 0,90$, Teste 4

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor, para o Teste 4, são apresentados nas Figuras 3.33 a 3.42. Neste teste, observou-se um pequeno aumento da taxa de mistura no intervalo de frequências de 150 a 625 Hz. Em 150 Hz há um aumento na concentração de CO, para 20 e 30 mbar (Figura 3.35). Em relação às outras situações apresentadas na Figura 3.35, este aumento é considerável; no entanto, comparando com os resultados dos testes 1, 2 e 3, ele não chega a ser tão significativo. Por outro lado, concentração de NO_x apresentou valores mínimos para 150, 500, 625 e 750 Hz. Na frequência de 1300 Hz, a concentração deste poluente cresceu acentuadamente, seguindo o aumento de temperatura. Não houve, nesta frequência, aumento ou diminuição notável nas concentrações dos outros gases.

De uma forma geral, as chamas estudas nos testes 4 apresentam, na média, menores emissões de CO e maiores de NO_x. Provavelmente, isto acontece muito mais em razão do nível de pré mistura em questão do que em virtude da atuação acústica. Assim, o comportamento da chama é típico de chamas de pré misturadas, ou seja, com baixa emissão de CO e elevada emissão de NO_x. Mesmo assim, em algumas condições, a atuação

acústica alterou a estrutura do processo de combustão de tal forma que a emissão de NO_x reduziu em até 50%, sem aumentar a emissão de CO.

As Figuras 3.40 a 3.42 apresentam o comportamento da amplitude de pressão acústica no combustor em função da variação da frequência. Ocorre acoplamento entre a frequência de atuação e a frequência natural do combustor com 500 Hz e 10 e 20 mbar. Em outras condições nota-se também o aumento da amplitude de pressão do combustor, mas em razões menores em comparação com o caso sem atuação.

As imagens tomográficas para este caso foram obtidas para as situações sem atuação, 150, 350, 500, 750 e 1300 Hz, e são apresentadas na Tabela 3.6.

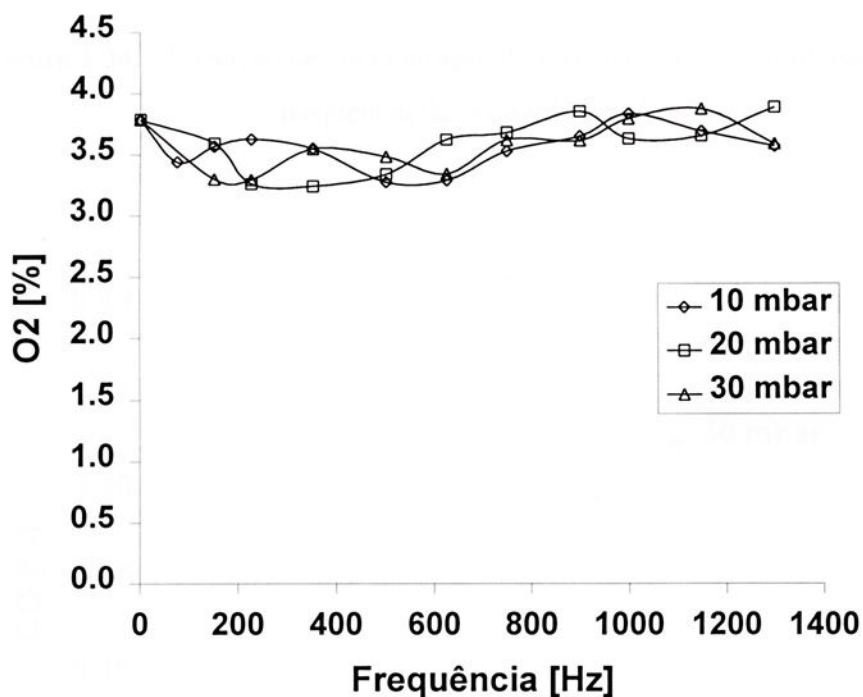


Figura 3.33 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

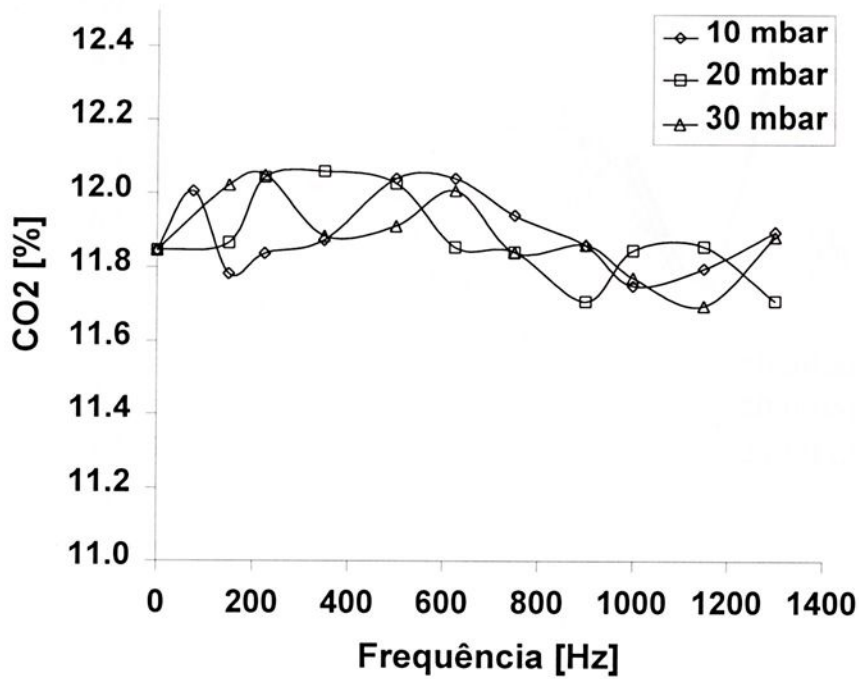


Figura 3.34 – Variação da concentração de CO₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

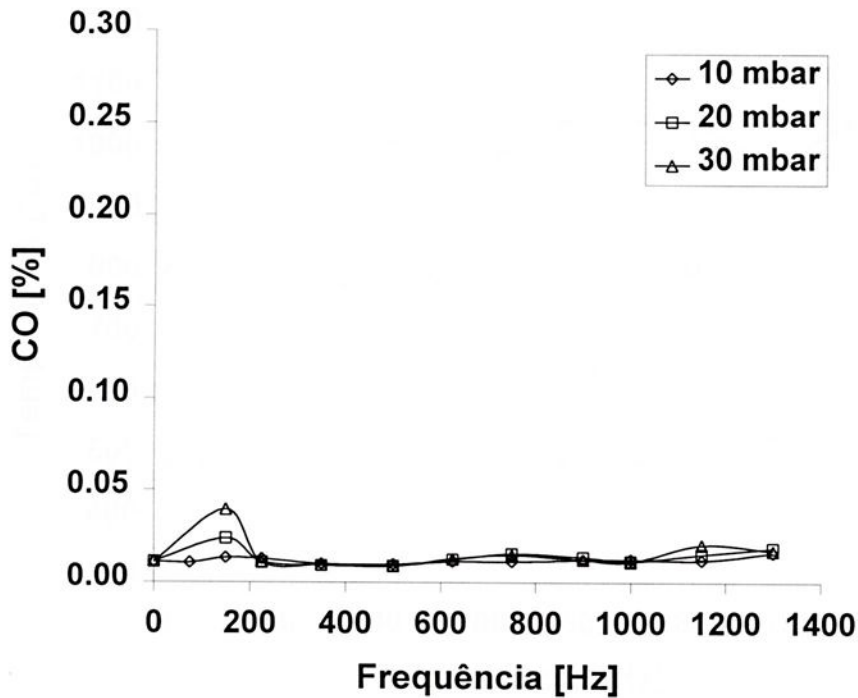


Figura 3.35 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

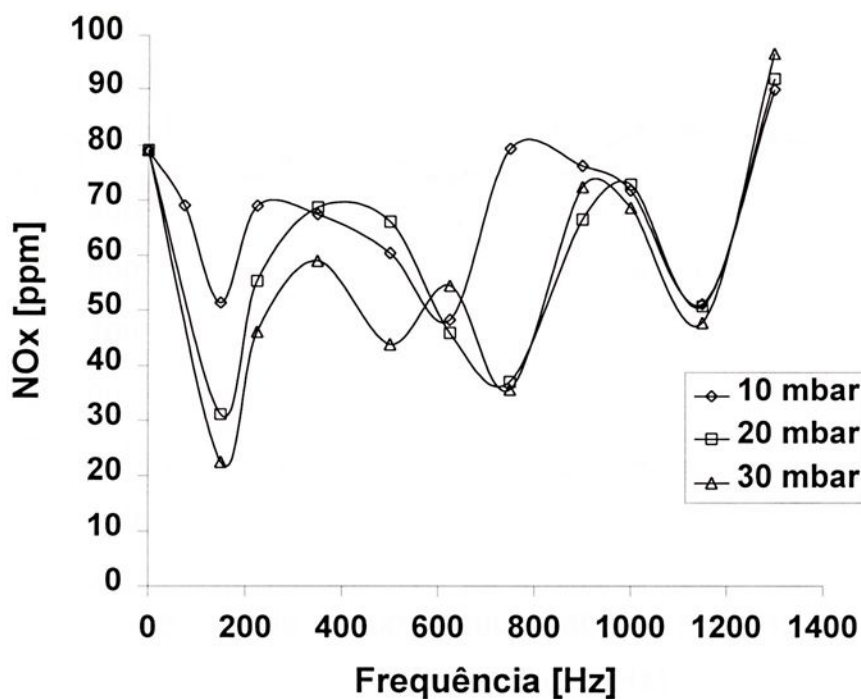


Figura 3.36 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

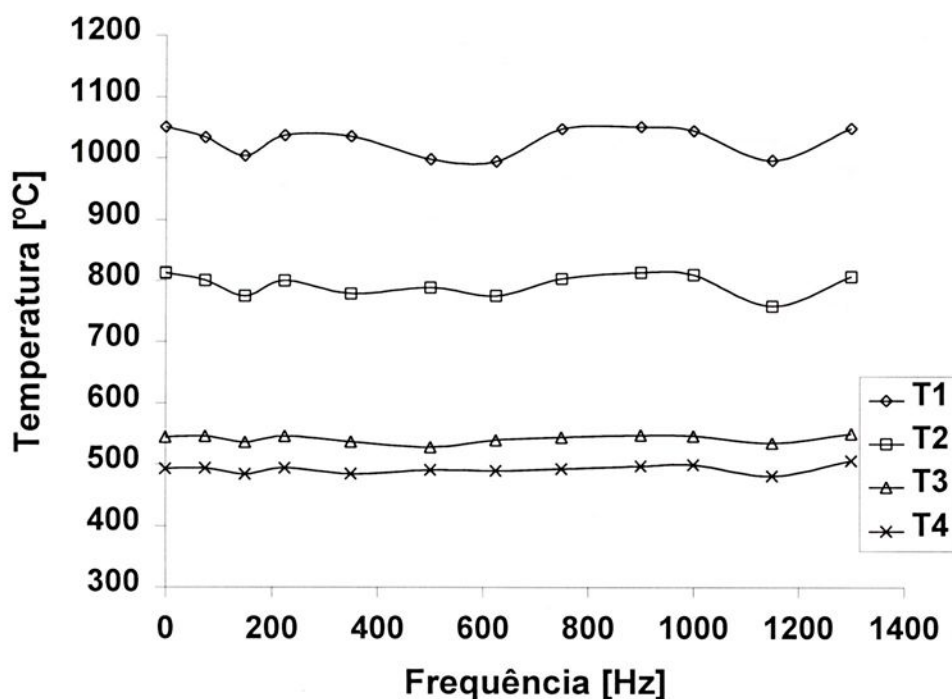


Figura 3.37 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

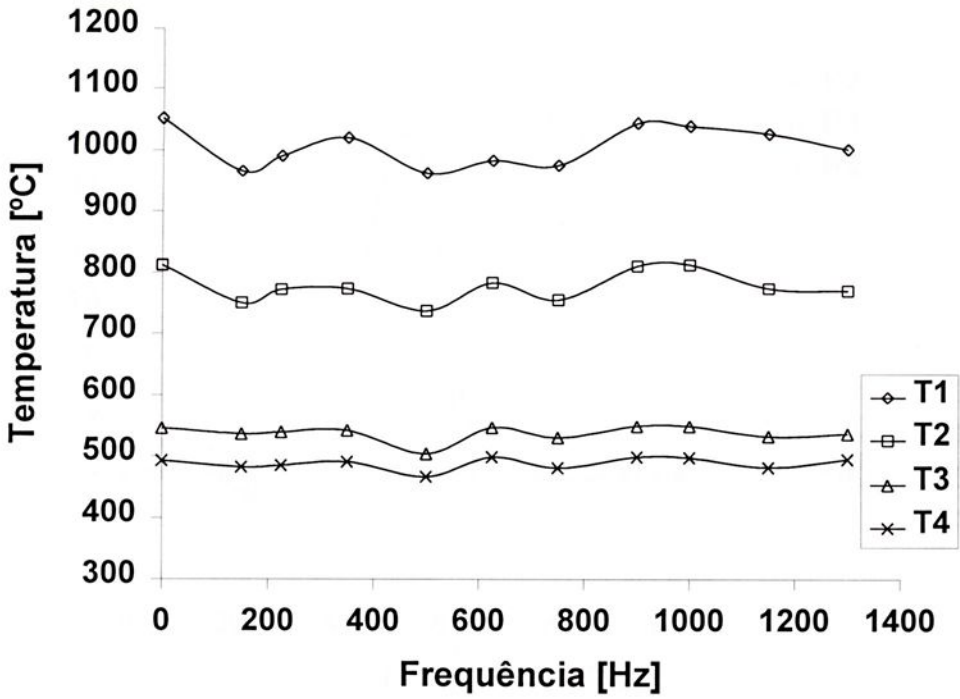


Figura 3.38 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

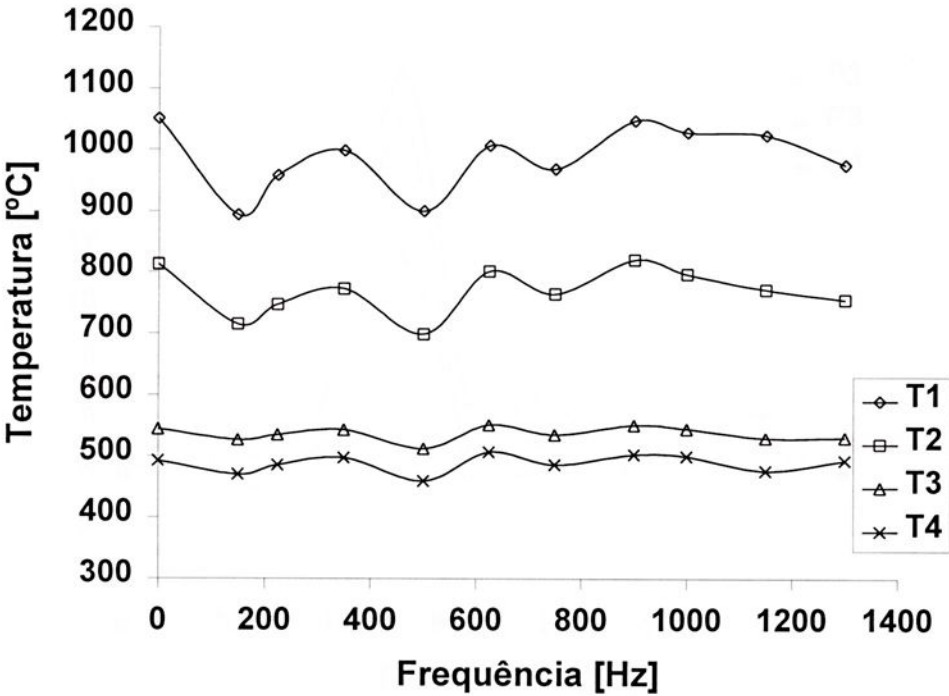


Figura 3.39 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

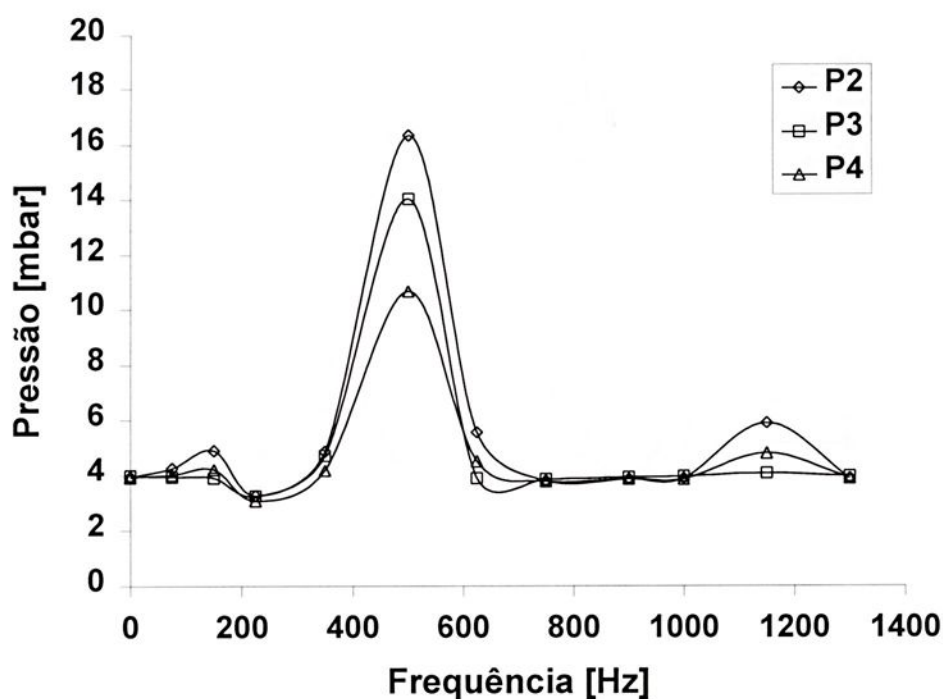


Figura 3.40 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

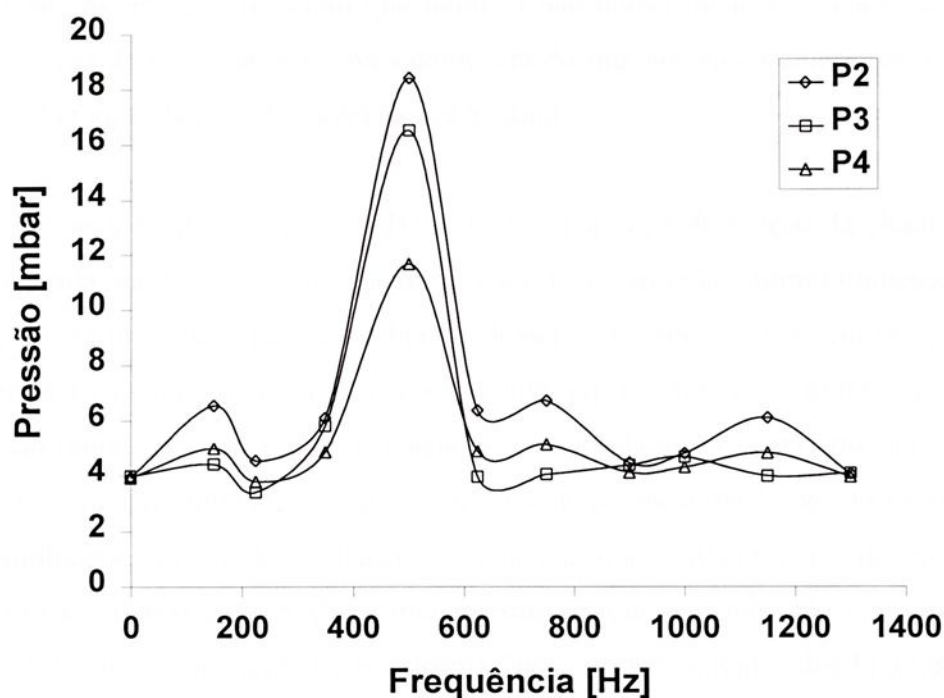


Figura 3.41 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

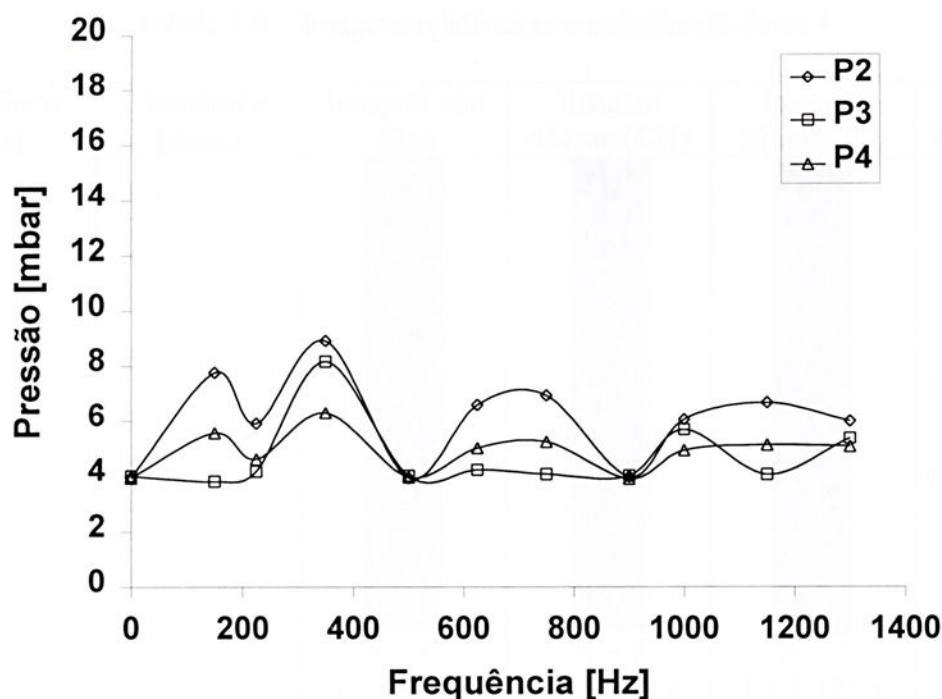


Figura 3.42 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

A imagens tomográficas relativas ao teste 4 são apresentadas na Tabela 3.6. Para este teste, as imagens mostram que também não houve intensa formação de fuligem e a zona de reação apresentou-se mais compacta do que nos casos anteriores, resultados que eram esperados, dado o alto nível de pré mistura.

Para a frequência de 500 Hz e 10 mbar a zona de reação da chama se encontra concentrada na base do queimador e com forte emissão quimiluminescente. Com o aumento da amplitude para 20 mbar, a chama se comprime mais em direção à base do queimador e a emissão quimiluminescente diminui. Por fim, com 30 mbar tem-se a menor emissão quimiluminescente. Aparentemente, para esta situação há uma dispersão da zona de reação das proximidades do queimador. Como a concentração de CO foi baixa na saída do combustor, apesar desta dispersão, supõe-se que a maior parte do combustível foi oxidado em outras regiões da chama, mesmo porque a combustão ocorre com 11% de excesso de ar. Comparando estas informações com os resultados das Figuras 3.40 a 3.42, observa-se que para 10 e 20 mbar ocorre o acoplamento, o que sugere que a geometria da chama e a intensidade de reações ou liberação de energia nessa região estejam associadas a este fenômeno.

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
150	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
150	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
150	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
350	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
750	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
750	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4 (continuação)

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
750	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.6 – Imagens relativas às condições do Teste 4 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 511nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1300	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

3.6 - Resultados para 15,6% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 5

Este conjunto de testes foi dividido em duas etapas, devido a problemas de estabilização da chama. Na primeira parte, conduzida até a frequência de 150 Hz, as vazões de GLP, ar de pré mistura e ar difusivo foram de 0,162, 0,386 e 2,028 g/s, respectivamente, com fração real de pré mistura de 16,0%. Na segunda parte, realizada para frequências a partir de 225 Hz, as vazões de GLP, ar de pré mistura e ar difusivo foram de 0,159, 0,392 e 1,990 g/s, respectivamente, correspondendo à fração real de pré mistura de 16,5%.

Neste teste a chama não estabilizou nas frequências acima de 900 Hz, para qualquer amplitude.

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor são apresentados nas Figuras 3.43 a 3.52. A introdução do campo acústico claramente incrementa a taxa de mistura entre oxidante e combustível, diminuindo emissões de CO e O₂ e aumentando a produção de CO₂, conforme mostram as Figuras 3.43 a 3.45, acentuando o comportamento anteriormente observado para o teste 1, que possui a mesma condição de pré mistura mas com $\phi = 0,9$.

Com o aumento da eficiência do processo de combustão, as temperaturas aumentaram (Figuras 3.47 a 3.49), especialmente aquela mais próxima ao queimador, em razão do encurtamento da chama com a atuação acústica, ou seja, a energia liberada nessa região aumenta. No entanto, a emissão de NO_x não aumentou significativamente, conforme mostra a Figura 3.46.

Os gráficos das temperaturas em função da frequência de excitação no queimador são mostrados nas Figuras 3.47 a 3.49. O comportamento das temperaturas medidas em relação à frequência foi o mesmo para as três amplitudes de teste.

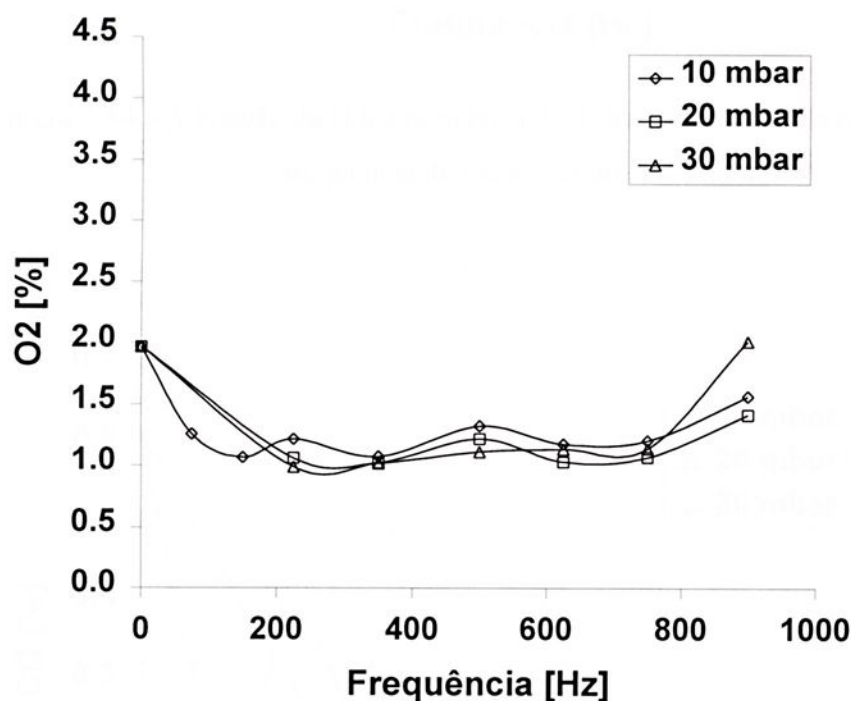


Figura 3.43 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

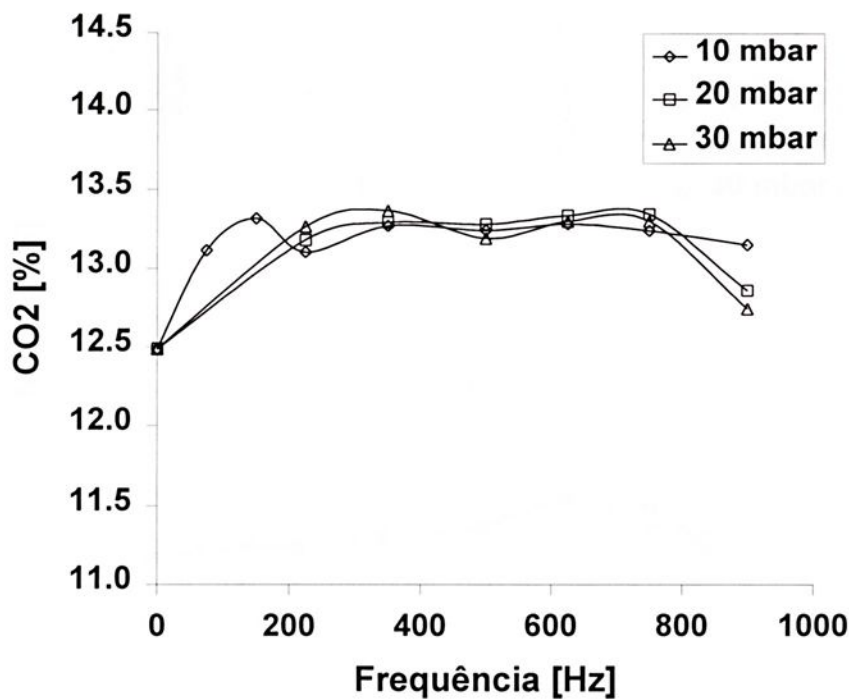


Figura 3.44 – Variação da concentração de CO_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

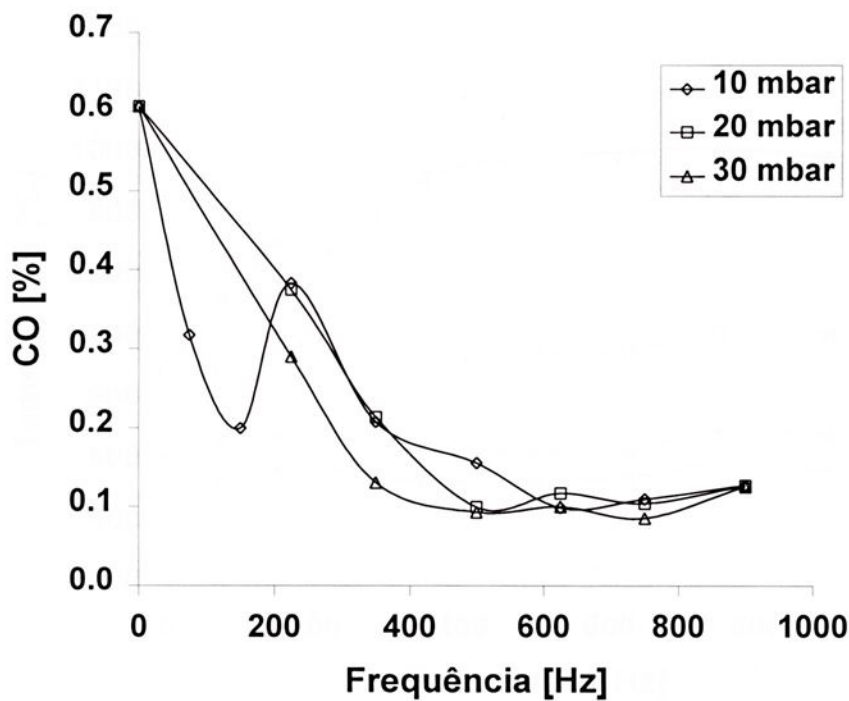


Figura 3.45 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

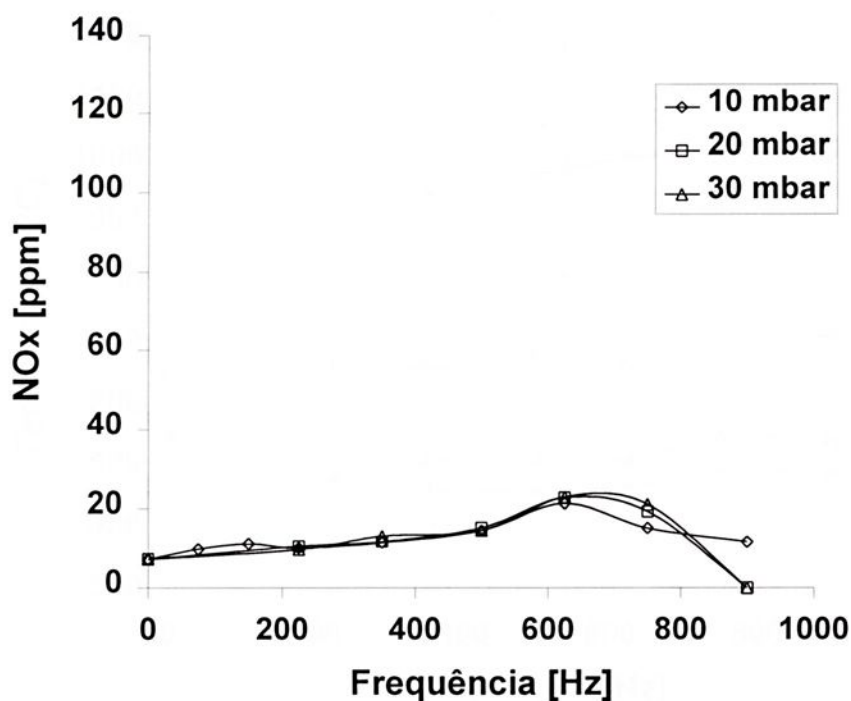


Figura 3.46 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

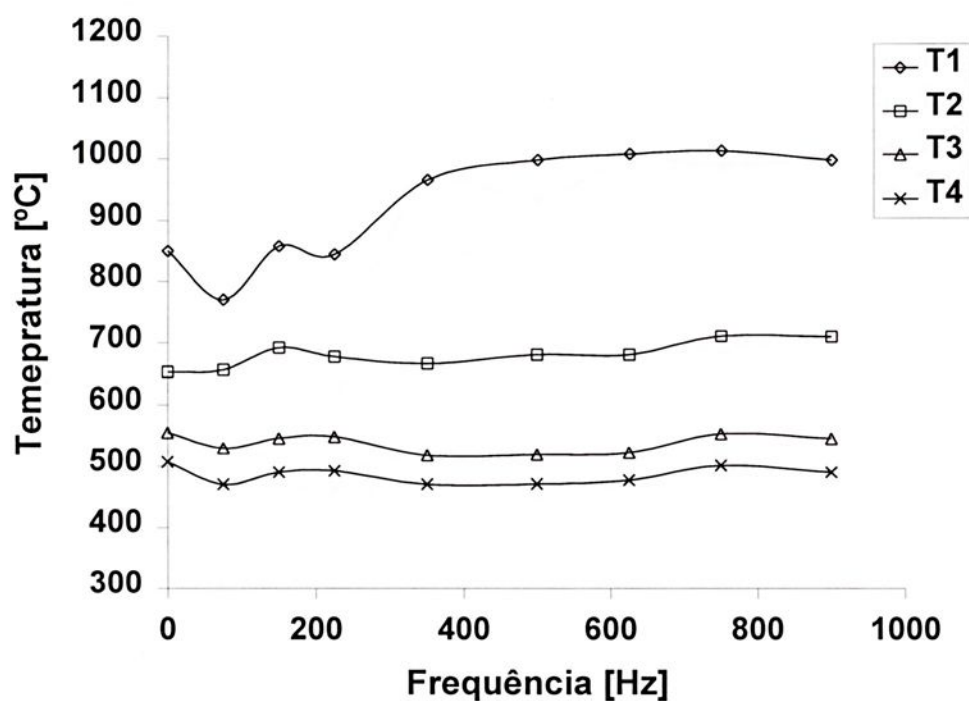


Figura 3.47 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

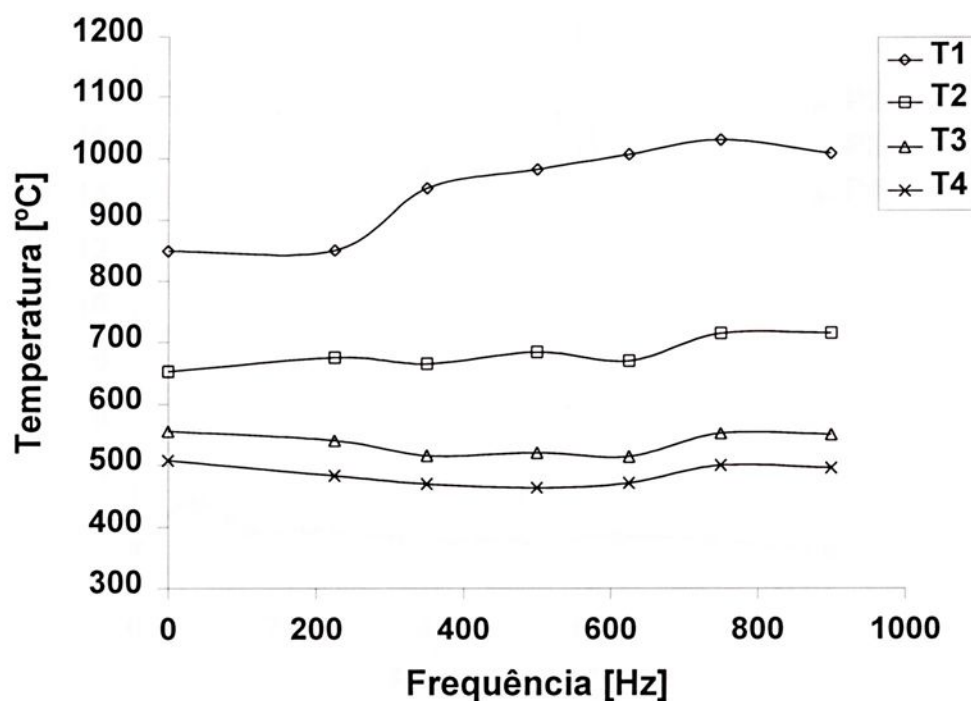


Figura 3.48 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

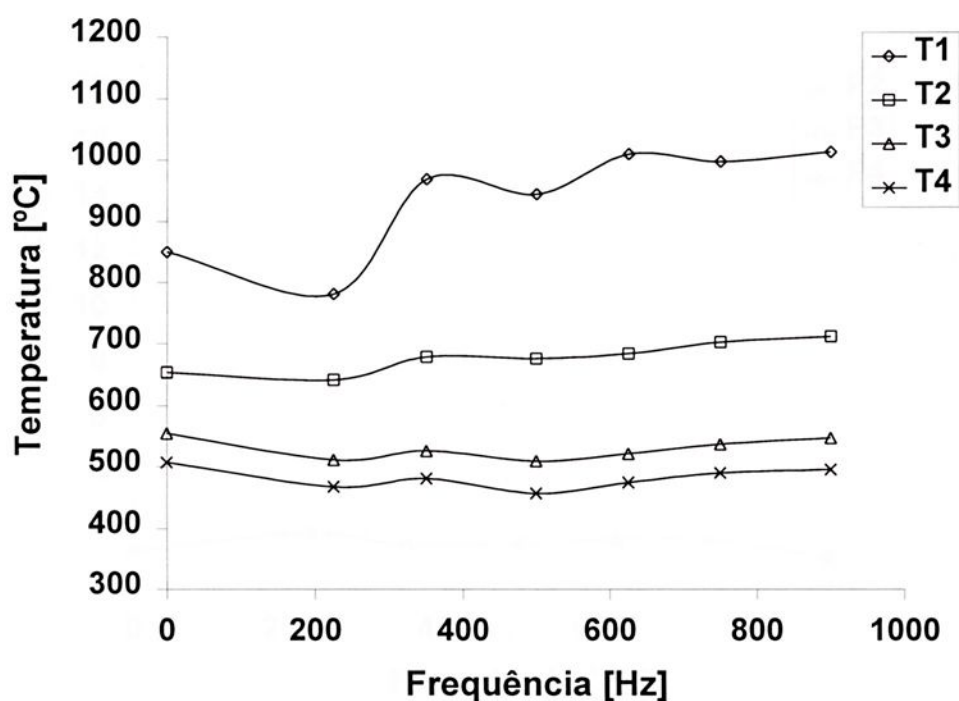


Figura 3.49 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

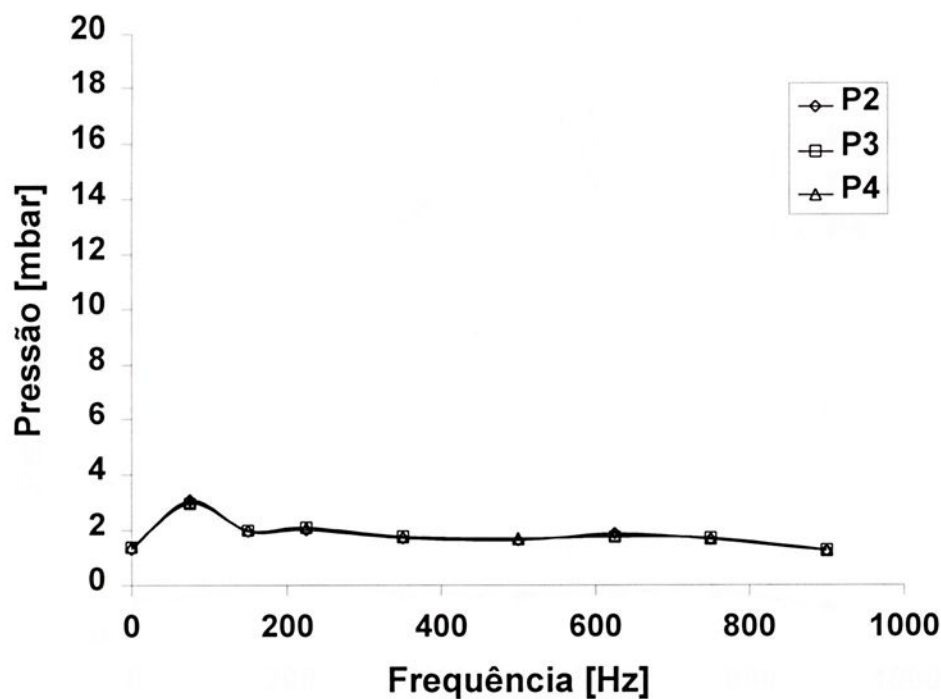


Figura 3.50 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

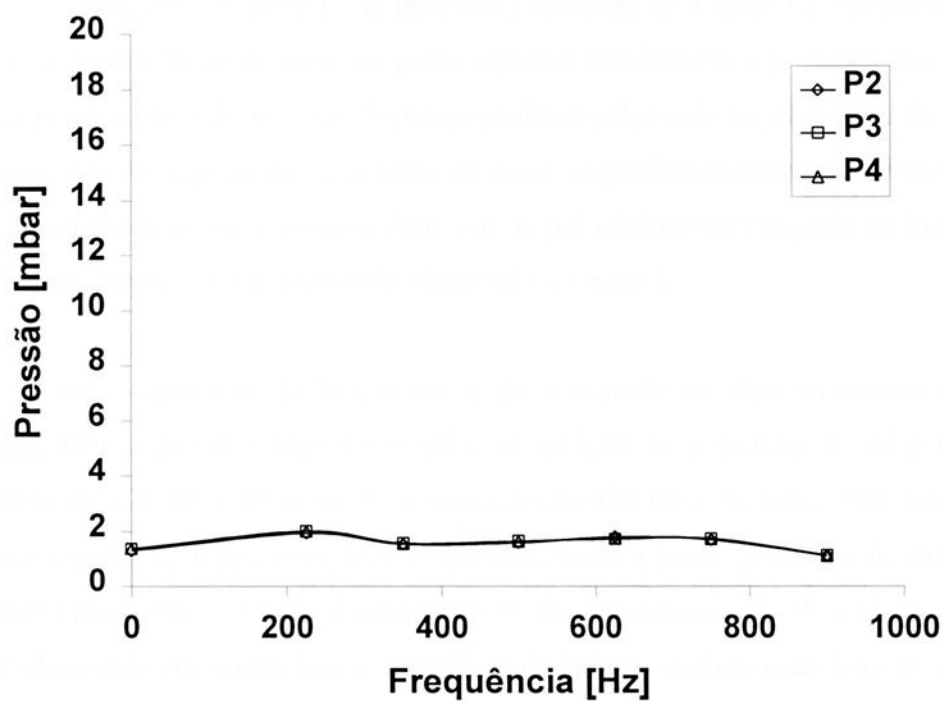


Figura 3.51 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

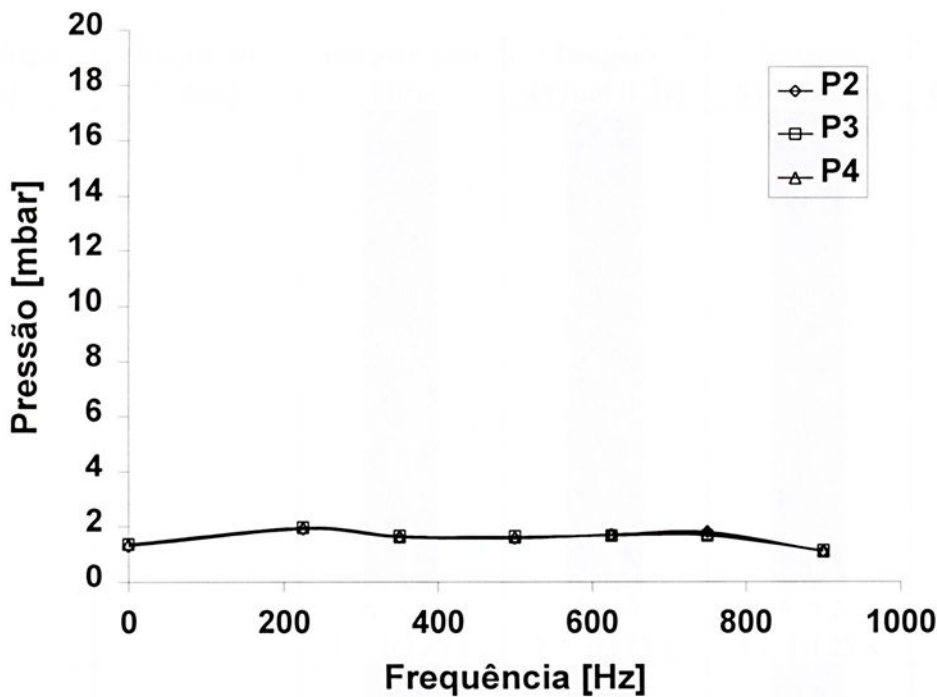


Figura 3.52 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

As imagens relativas a este teste são mostradas na Tabela 3.7. No caso sem atuação, nota-se a formação de fuligem na parte superior da chama e a presença dos radicais C_2 e CH na parte inferior da mesma. A chama se desenvolve ente os jatos de ar de pré mistura e difusivo, isso era esperado por se tratar de um caso predominantemente difusivo (85 %), ou seja, o combustível que não reage com o ar de pré mistura vai reagindo ao longo do jato de ar difusivo, mesmo comportamento observado no teste 1.

Com o aumento da frequência e da amplitude de atuação ocorre a melhora da mistura. Isto pode ser comprovado pela diminuição da formação de fuligem a partir da condição de 225 Hz e 30 mbar até a condição de 625 Hz e 30 mbar. Este fato passa a não ocorrer a partir da frequência de 900 Hz onde volta a haver formação de fuligem como é mostrado nas figuras e também pelo aumento da concentração de O_2 na Figura 3.43. Como já foi observado em outros testes, a melhora da taxa de mistura nem sempre é proporcional ao aumento da frequência. É importante observar que em 900 Hz a estrutura da chama se assemelha à da situação sem atuação acústica, ou seja, nas proximidades do queimador ela se estabiliza em um estreito canal entre os jatos que emergem do queimador.

Tabela 3.7 – Imagens relativas às condições do Teste 5.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s
225	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.7 – Imagens relativas às condições do Teste 5 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
225	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.7 – Imagens relativas às condições do Teste 5 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
350	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
625	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
625	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.7 – Imagens relativas às condições do Teste 5 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
625	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
900	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
900	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.7 – Imagens relativas às condições do Teste 5 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
900	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

3.7 - Resultados para 25,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 6

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor, para o Teste 6, são apresentados nas Figuras 3.53 a 3.62. Para a frequência de 500 Hz a chama não se estabilizou em nenhuma das três pressões de atuação acústica.

A atuação acústica incrementa a taxa de mistura para as frequências de 150 e 225 Hz, como se pode comprovar observando as concentrações de O₂, CO₂ e CO nas Figuras 3.53 a 3.55. Na frequência de 625 Hz para qualquer amplitude de pressão de atuação, há um aumento na emissão de O₂ acompanhado de uma redução de CO₂. Como a emissão de CO não seguiu a de O₂, pode-se pensar que nesta frequência de oscilação os escoamentos dos jatos que emergem do queimador tornam-se desfavoráveis para o encontro dos reagentes; com isso, parte do combustível não é oxidado nas proximidades do queimador. Mesmo que o combustível venha a encontrar oxigênio suficiente para reagir em regiões superiores da câmara, em razão da refrigeração da mesma, não há energia suficiente para inicialização do mecanismo reacional (baixa temperatura). Observando as imagens relativas à esta condição, nota-se uma diminuição da intensidade luminosa nas

proximidades do queimador, em comparação com outros casos. Sendo assim, pode-se concluir que menos energia é liberada nessa região, ou seja, menos combustível reagiu.

A concentração de NO_x aumentou para as frequências de 150 e 225 Hz e 20 e 30 mbar, o mesmo não ocorrendo para a pressão de atuação de 10 mbar, como mostra a Figura 3.56. Nas demais frequências o nível de NO_x se mantém constante, próximo aos valores da condição sem atuação. Este aumento da concentração de NO_x está relacionado com a comportamento da temperatura conforme mostram as Figuras 3.57 a 3.59, que por sua vez está atrelado à intensidade de mistura.

Em nenhuma condição deste teste observa-se a ocorrência de acoplamento, conforme mostram as Figuras 3.60 a 3.62. Os níveis de pressão estão sempre abaixo da condição sem atuação.

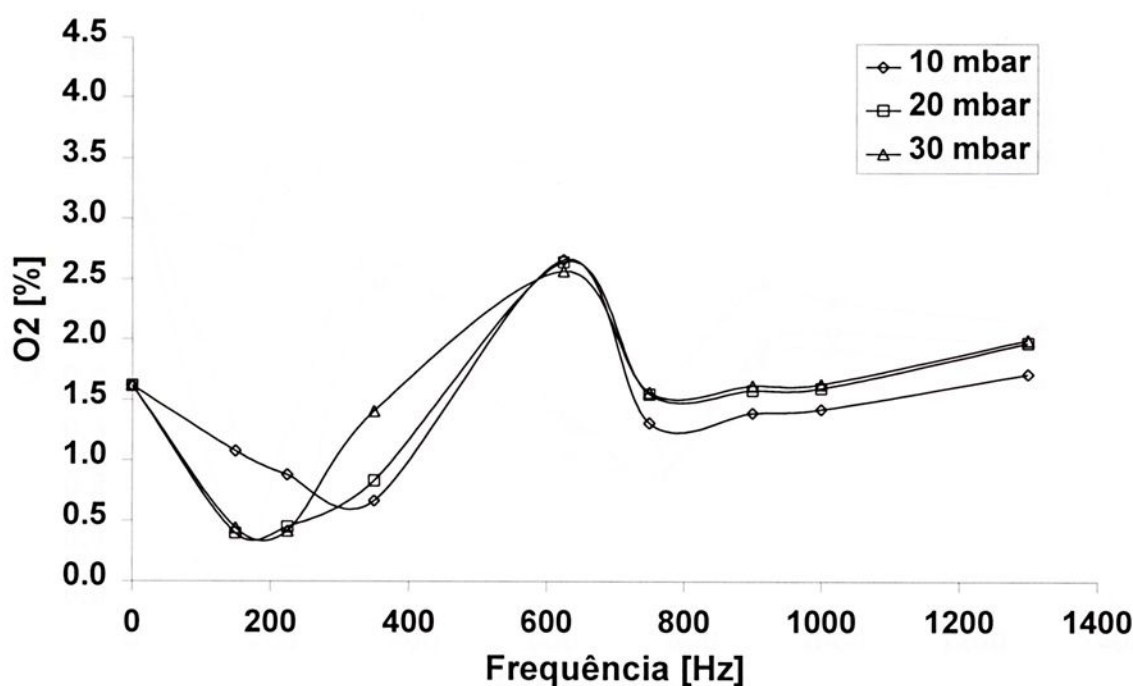


Figura 3.53 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

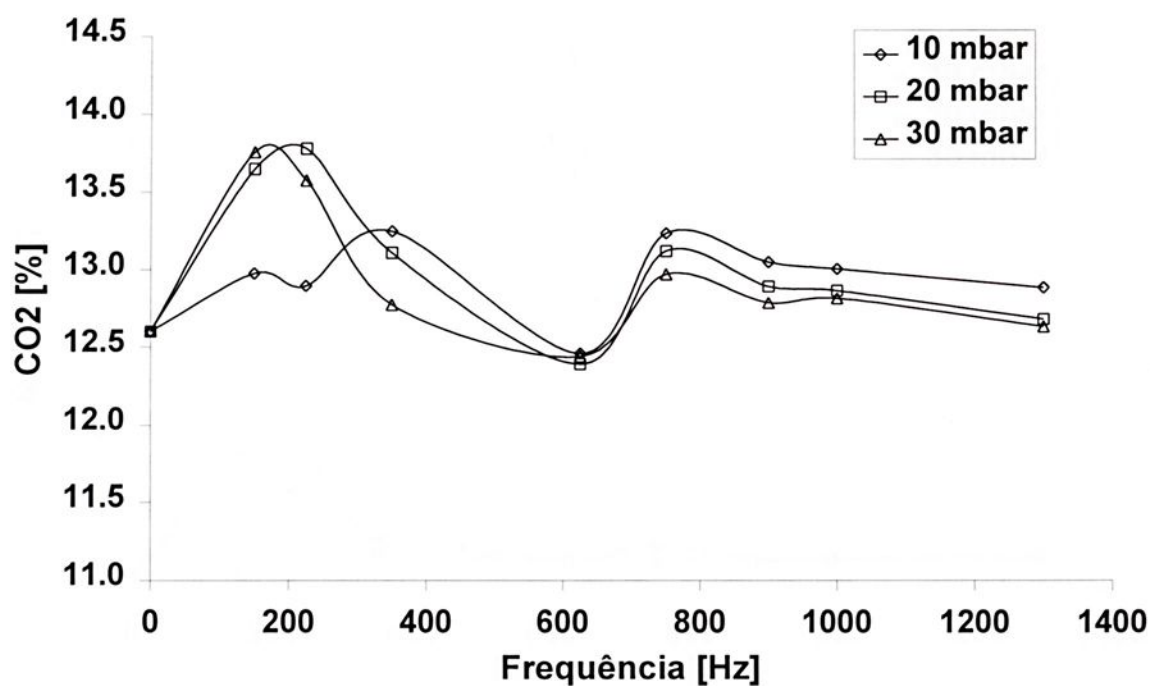


Figura 3.54 – Variação da concentração de CO_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

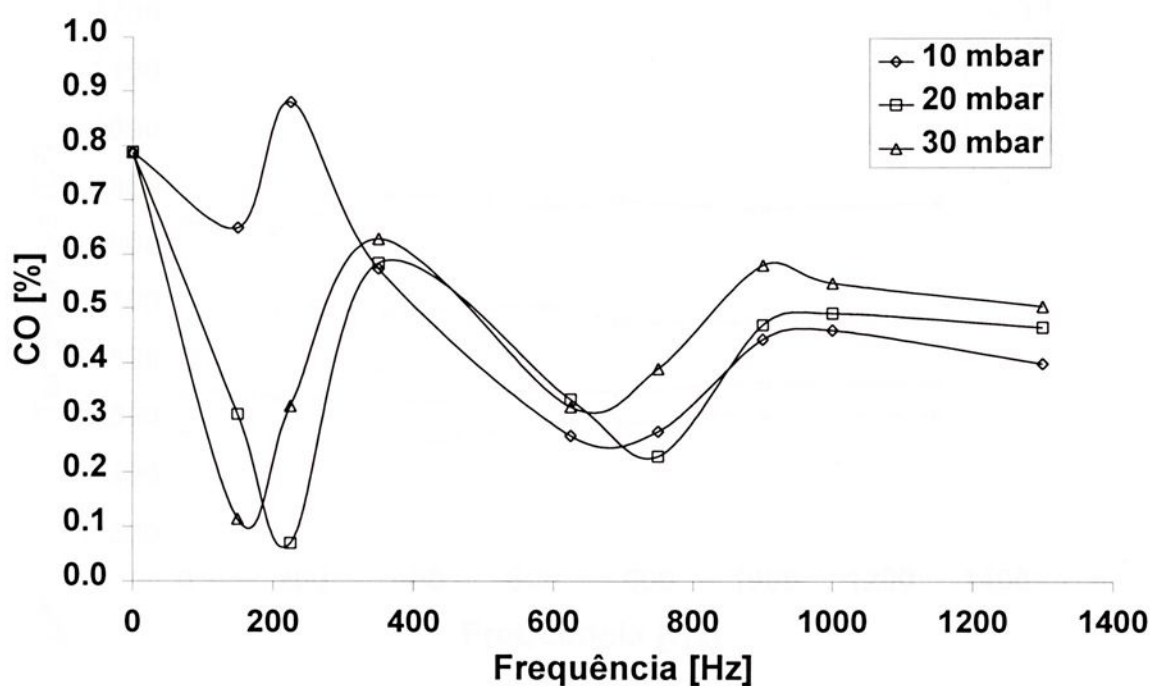


Figura 3.55 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

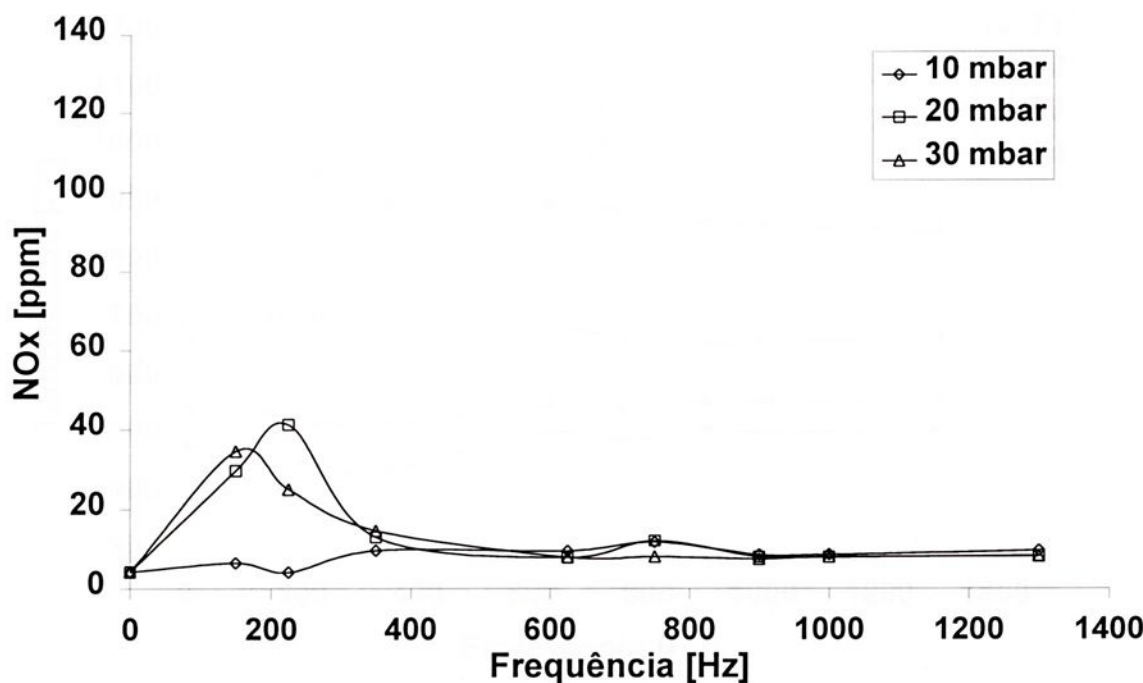


Figura 3.56 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

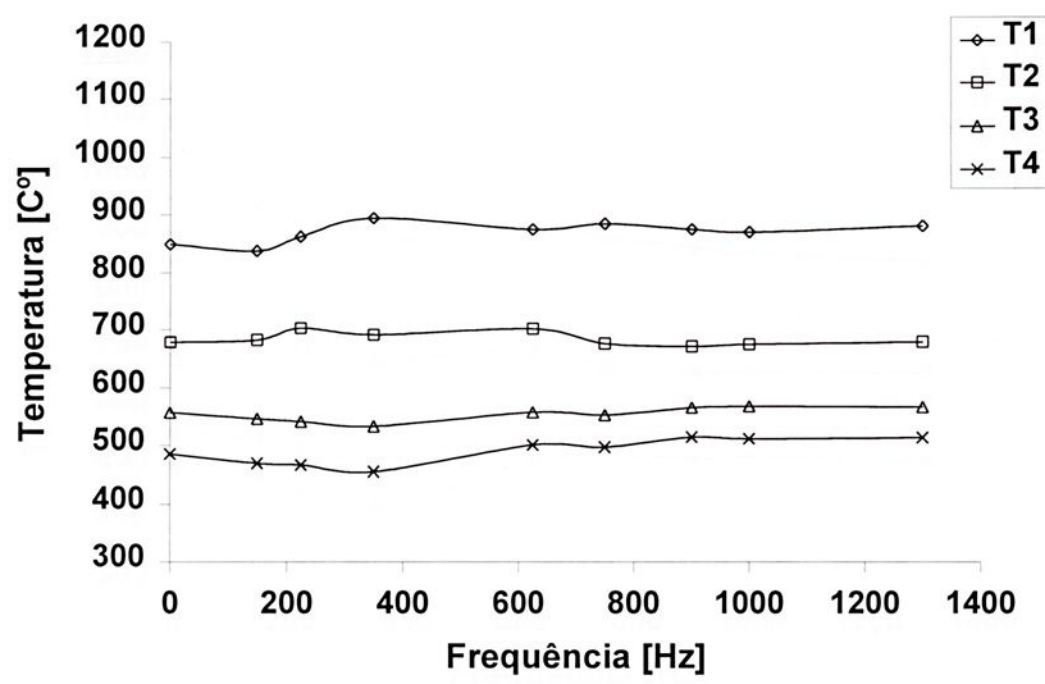


Figura 3.57 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

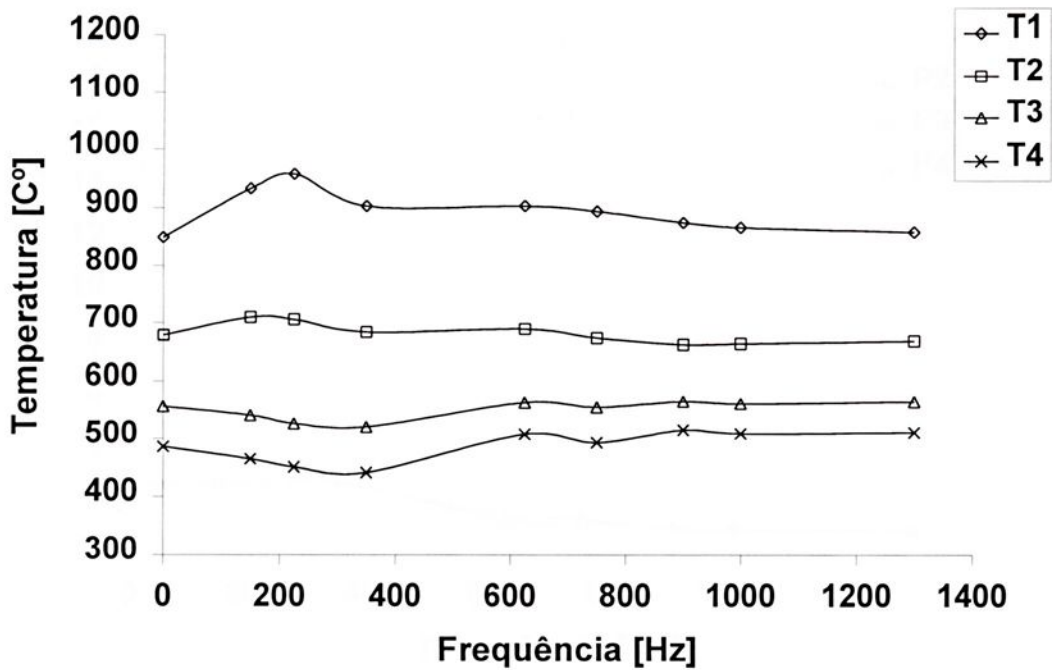


Figura 3.58 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

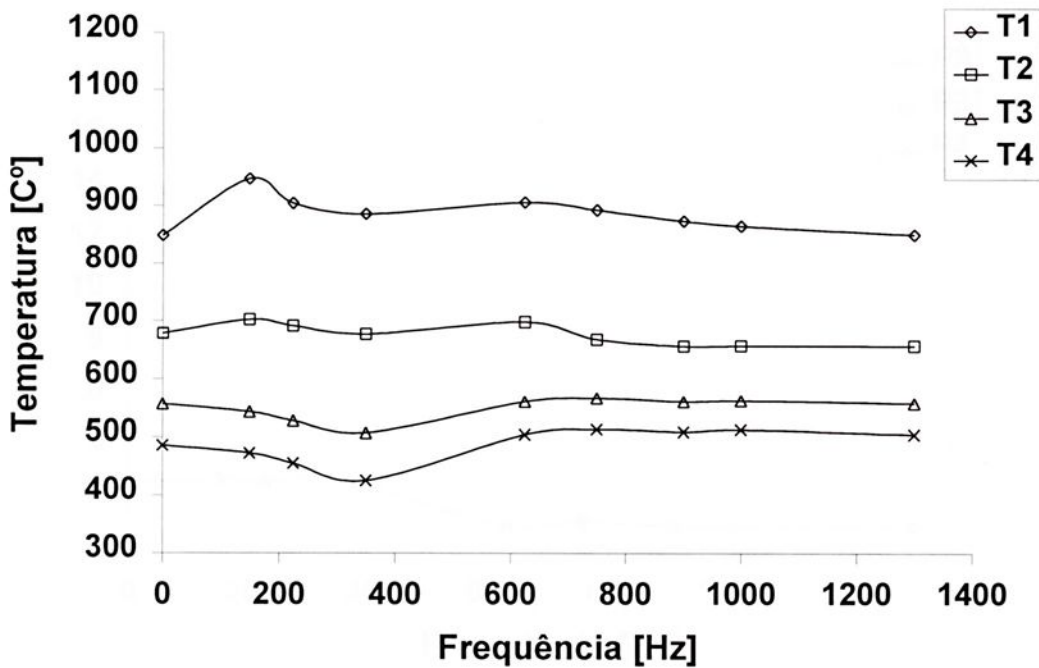


Figura 3.59 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

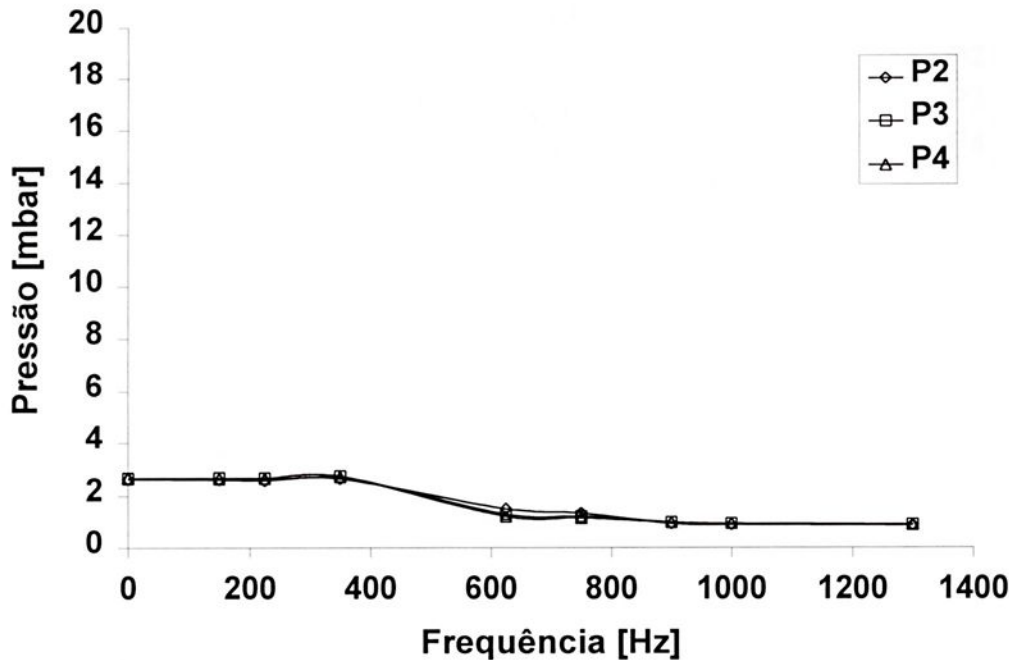


Figura 3.60 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

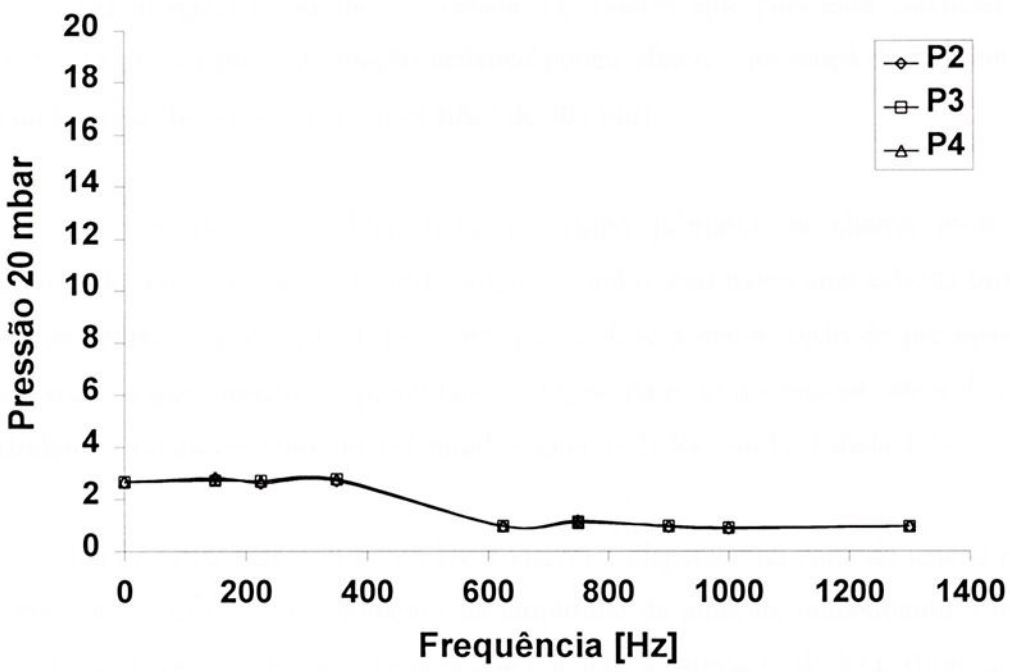


Figura 3.61 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

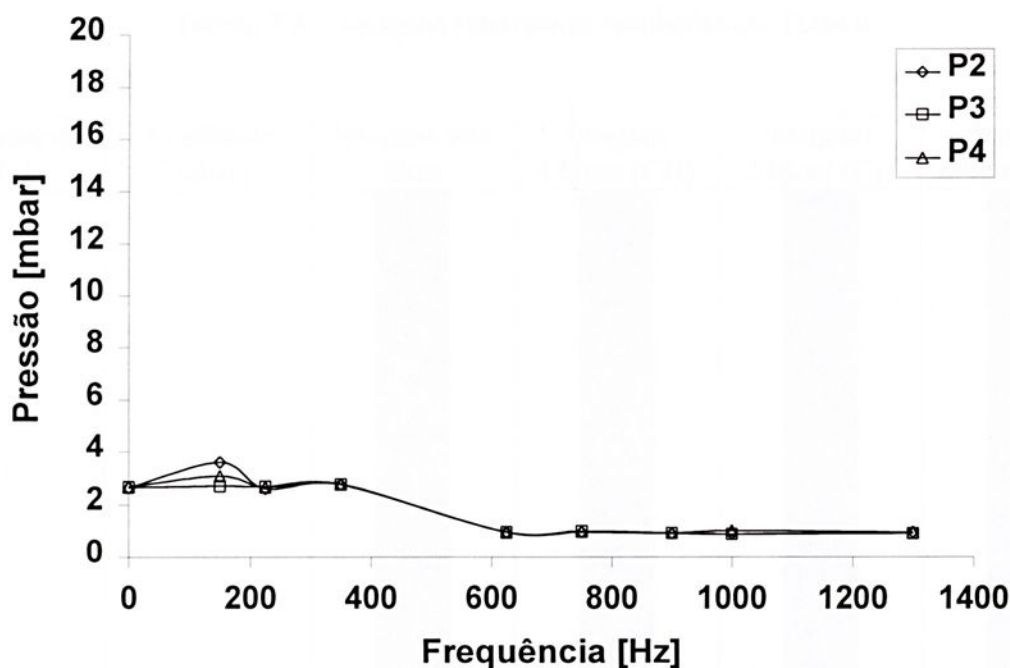


Figura 3.62 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

Nas imagens mostradas na Tabela 3.8, nota-se que para essa condição de chama (25,2% de pré mistura), a atuação acústica pouco afetou a presença de fuligem na região secundária da chama (imagens com filtro de 802 nm).

A zona de reação localizada na região primária da chama mostra-se mais concentrada, diferentemente do teste anterior, para o qual havia uma estreita faixa entre os jatos de difusão e pré mistura, fato este que se deve a maior razão de pré mistura para o teste atual, o que aumenta a quantidade de O_2 na base do queimador, além de aumentar a turbulência no escoamento pré misturado (número de Reynolds, Tabela 3.2).

Para os casos de 150 e 225 Hz é visível a dispersão na zona de reação em direção ao eixo de simetria com o aumento da amplitude de atuação, aumentando a temperatura próxima a chama e por consequência aumentando a formação de NO_x (Figuras de 3.56 a 3.59).

Tabela 3.8 – Imagens relativas às condições do Teste 6.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
150	10	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
150	20	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.8 – Imagens relativas às condições do Teste 6 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
150	30	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	10	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	20	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.8 – Imagens relativas às condições do Teste 6 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
225	30	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
625	10	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
625	20	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.8 – Imagens relativas às condições do Teste 6 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
625	30	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
1000	10	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
1000	20	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

Tabela 3.8 – Imagens relativas às condições do Teste 6 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 5.6 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s

3.8 – Resultados para 49,8% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 7

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor, para o Teste 7, são apresentados nas Figuras 3.63 a 3.72. Entre os intervalos de atuação de 150 a 350 Hz e 750 a 1150 Hz, observa-se uma diminuição da concentração de O₂ e aumento da concentração de CO₂, como mostram as Figuras 3.63 e 3.64. Isto indica uma melhora na taxa de mistura. Também observa-se um aumento das concentrações de CO e O₂ acompanhada da diminuição da concentração de CO₂ para as condições de 500 Hz e 30 mbar, 625 Hz e 10 e 20 mbar e 1300 Hz e 20 e 30 mbar. Isto se deve a diminuição da zona reação fazendo que parte dos reagentes não seja totalmente consumidos.

A concentração de NO_x apresenta máximos nas condições de 350 Hz e 30 mbar, 500 Hz e 20 mbar, 1150 Hz e 20 mbar e 1300 Hz e 10 mbar, e mínimos nas condições de 500 e 1300 Hz e 30 mbar, conforme mostra a Figura 3.66. Toda esta variação é causada pela variação da temperatura próxima a base do combustor, como é mostrado nas Figuras 3.67 a 3.69.

Nas figuras 3.70 a 3.72, pode-se observar pequenos acoplamentos nas condições de 500 Hz e 10 e 20 mbar, 1150 Hz e 10 e 30 mbar e 1300 Hz e 10 mbar. Neste caso pode-se ver nas imagens da Tabela 3.9 que ocorre um aumento na intensidade luminosa para estas condições, acompanhada do achatamento da chama.

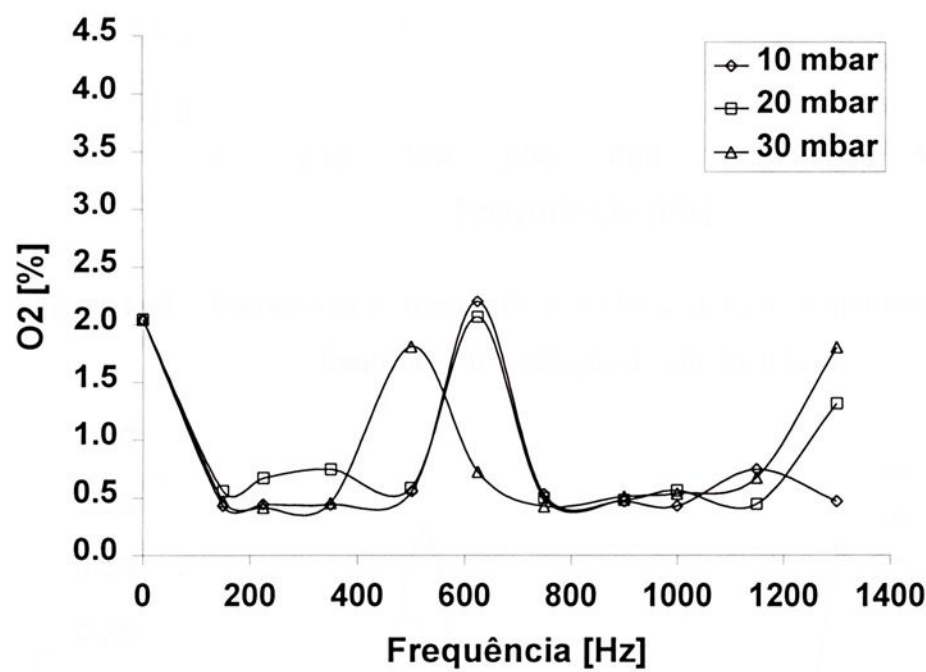


Figura 3.63 – Variação da concentração de O₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

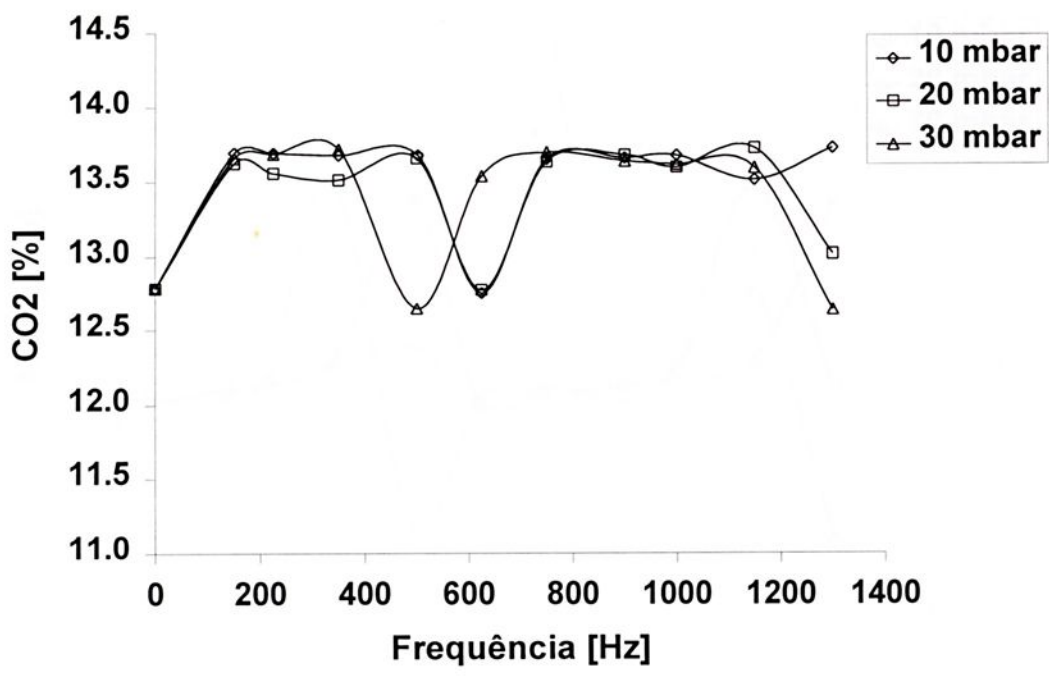


Figura 3.64 – Variação da concentração de CO_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

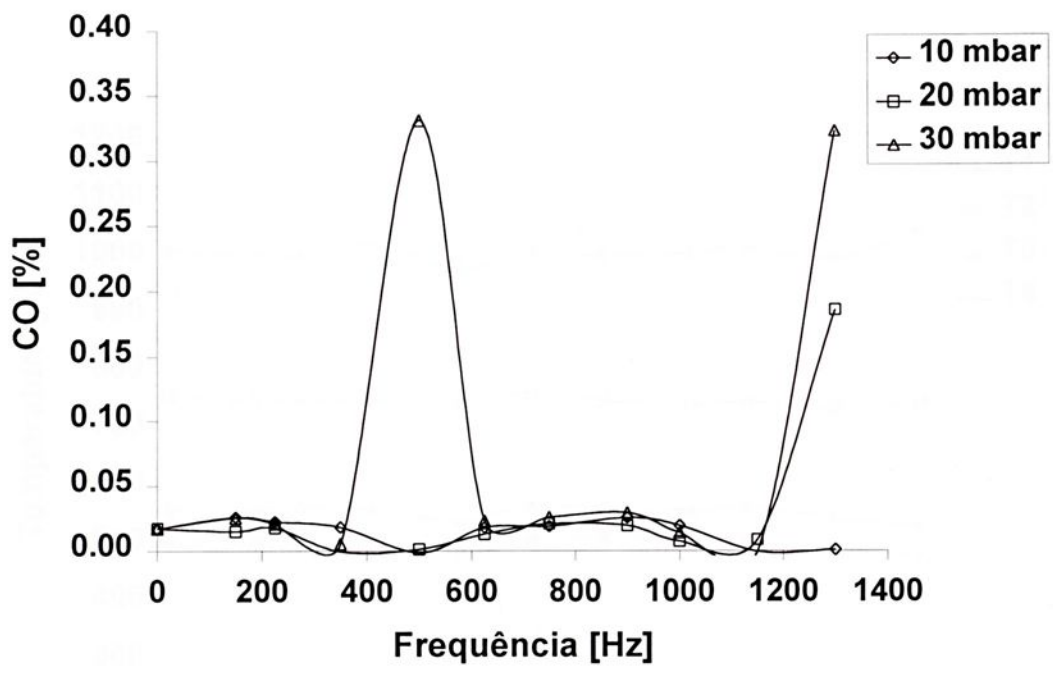


Figura 3.65 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

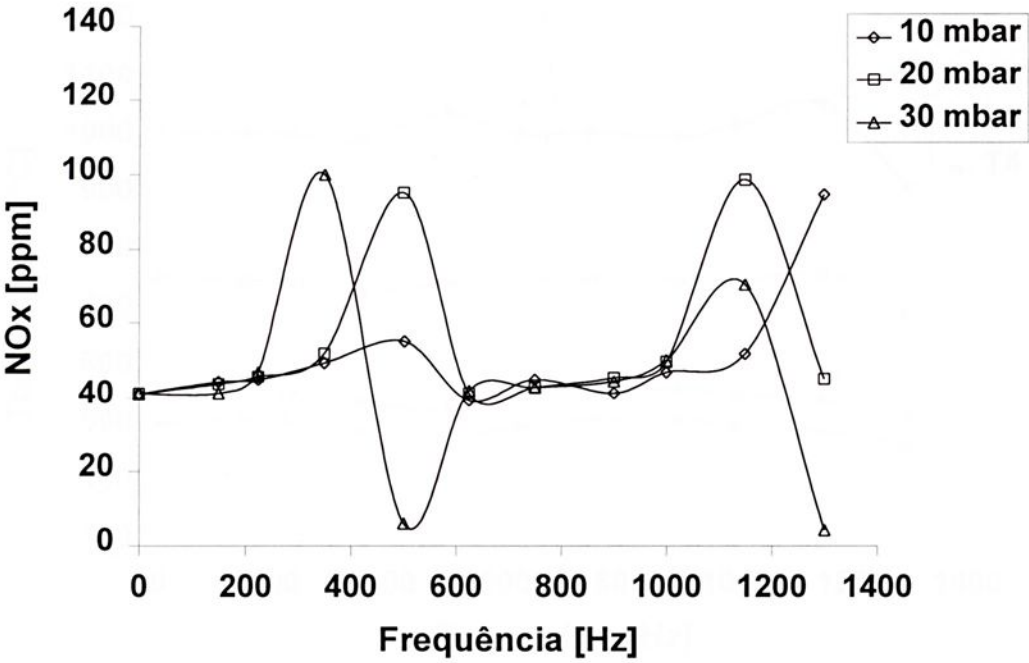


Figura 3.66 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

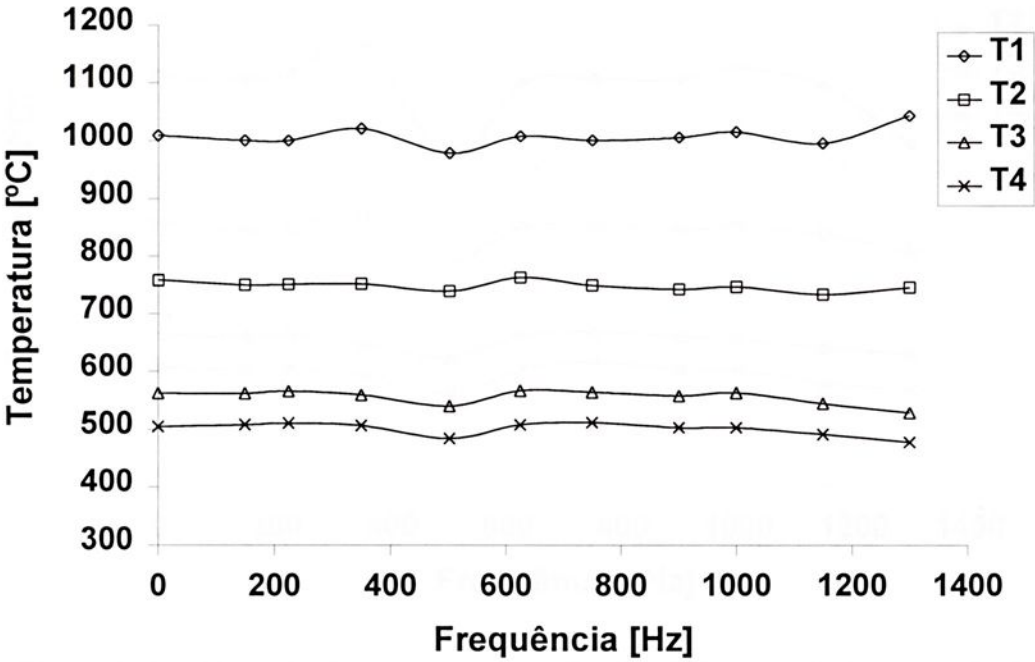


Figura 3.67 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

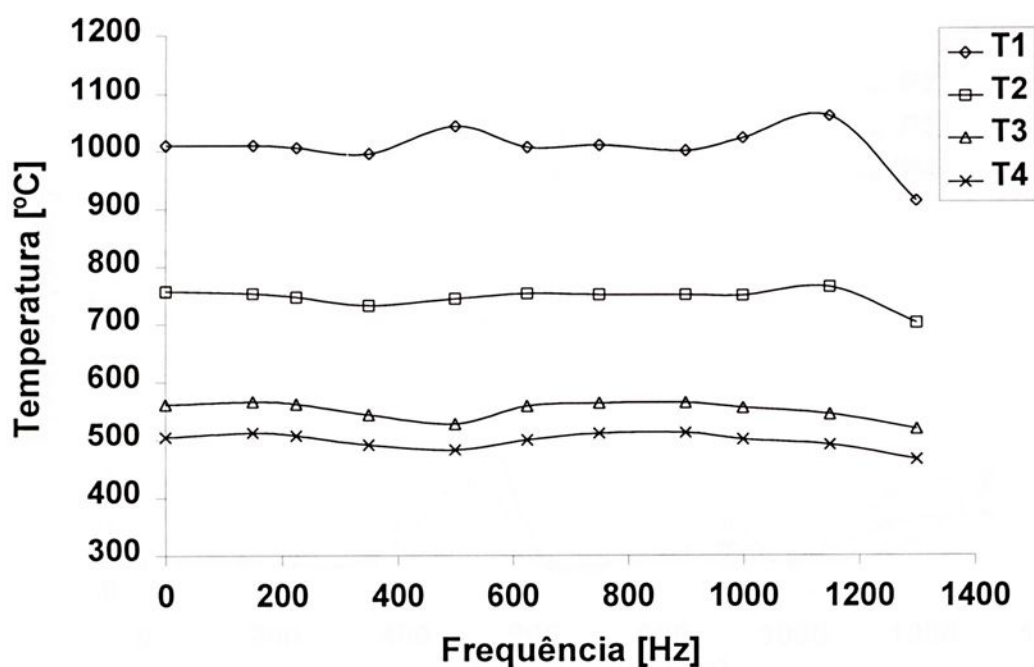


Figura 3.68 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

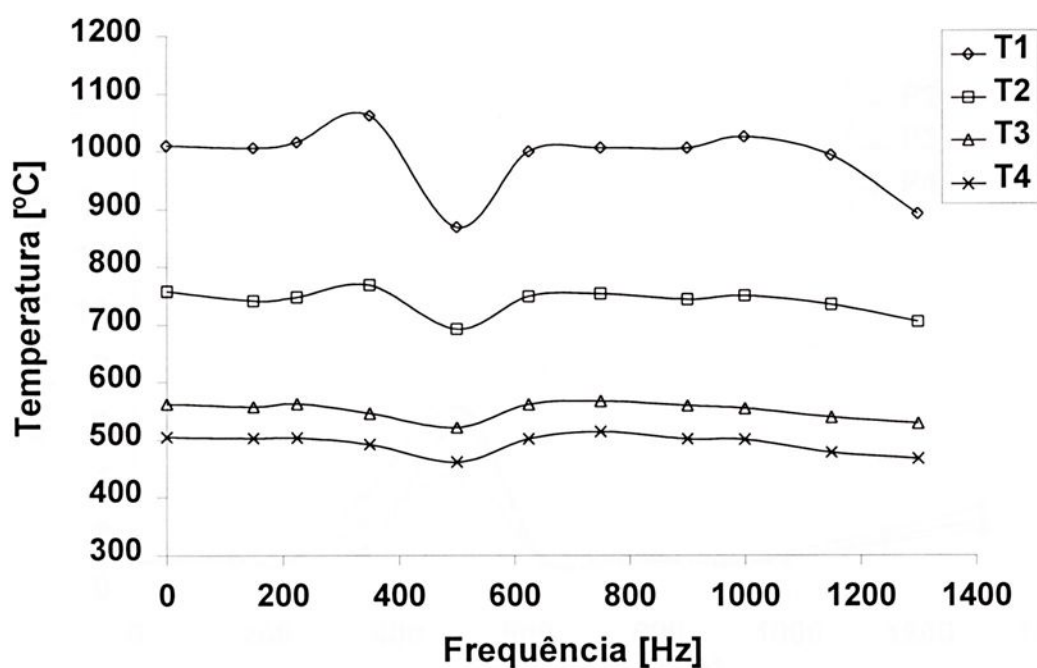


Figura 3.69 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

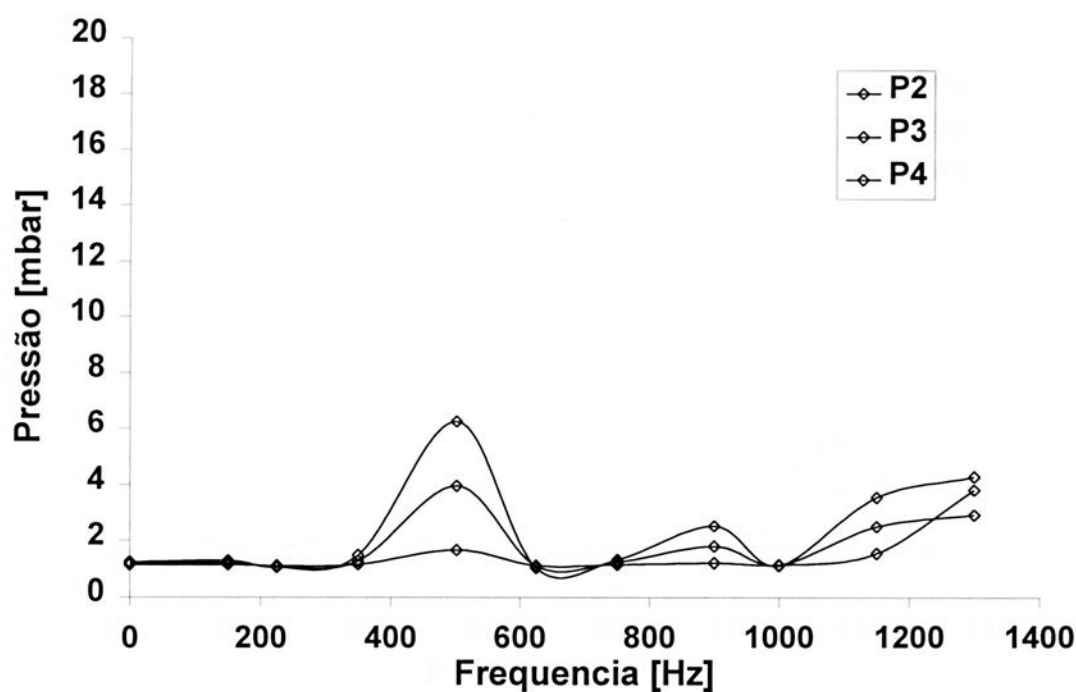


Figura 3.70 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

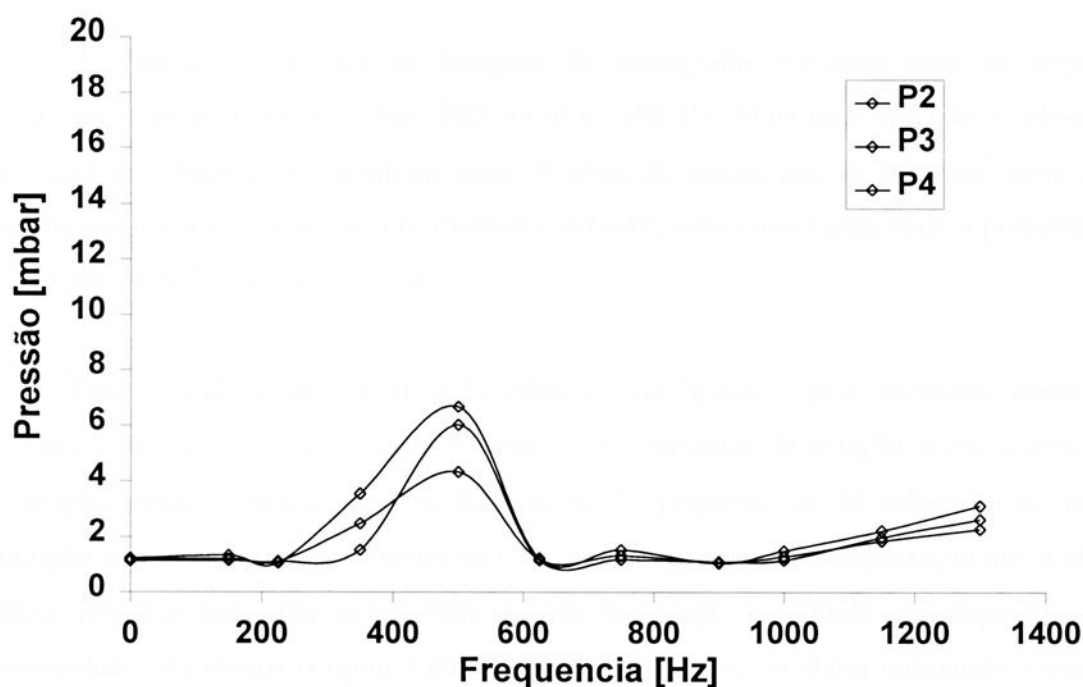


Figura 3.71 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

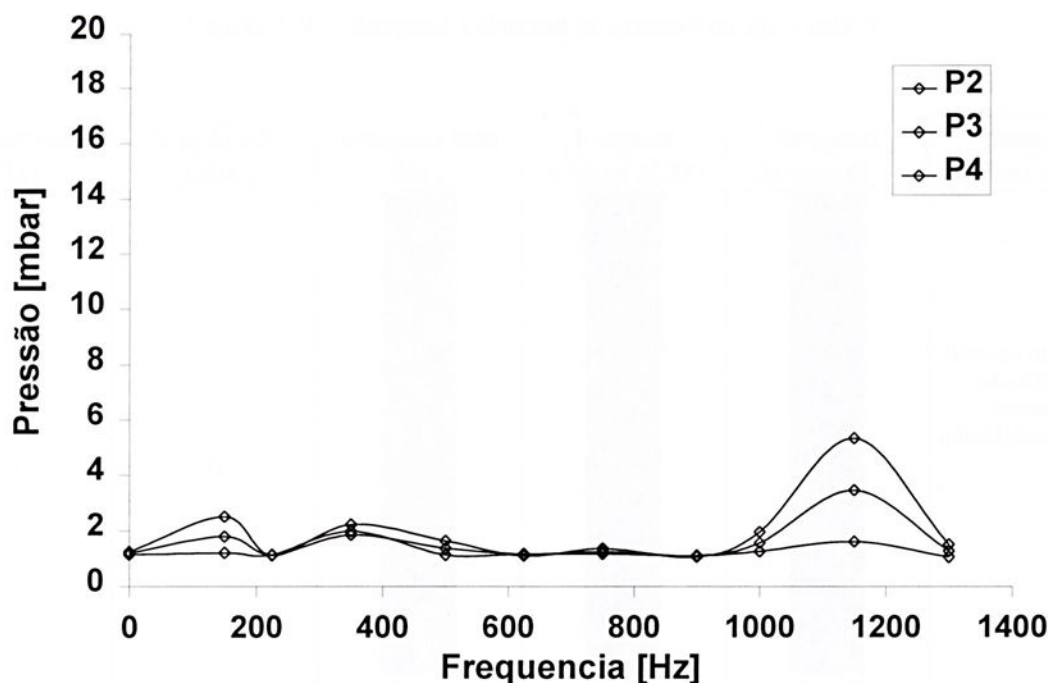


Figura 3.72 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

A Tabela 3.9 mostra as imagens da tomografia realizada para as seguintes condições: sem atuação, 350, 500, 900, 1150 e 1300 Hz. Mais uma vez não se observa a formação de fuligem para nenhum caso. A zona de reação não se restringe mais a um estreito canal entre os jatos de pré mistura e difusão, como nos casos onde a porcentagem de injeção de ar de difusão é maior.

Para a condição de 500 Hz e 10 mbar a zona de reação já se encontra condensada próxima a base do queimador, com o aumento da amplitude de atuação acústica esta zona de reação torna-se menos intensa, ficando muito pequena em 30 mbar. Nessa última condição há um expressivo aumento de CO, indicando que esta compactação que a chama sofreu resultou em uma combustão menos completa, reduzindo a temperatura nas proximidades da chama (Figura 3.69) e, conseqüentemente, também reduzindo a emissão de NO_x (Figura 3.66).

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
350	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
900	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
900	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
900	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1150	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1150	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1150	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	10	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.9 – Imagens relativas às condições do Teste 7 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1300	30	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	 A = 2 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

3.9 – Resultados para 60,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,00$, Teste 8

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor, para o Teste 8, são apresentados nas Figuras 3.73 a 3.82. Para todas as condições (frequência e amplitude) deste teste é notada uma melhora na taxa de mistura em relação ao caso sem atuação, como mostram as Figuras 3.73 e 3.74

Na frequência de 500 Hz com amplitude de pressão de 30 mbar ocorre um máximo na concentração de CO e um mínimo na concentração de NO_x, como mostram as figuras 3.75 e 3.76. Novamente, este comportamento pode estar associado ao fato da compactação da chama (Tabela 3.10) resultar em uma combustão menos completa (maior emissão de CO), como consequência, a temperatura na zona primária da chama diminui (Figura 3.79), reduzindo a emissão de NO_x. Esse resultado também foi observado no teste 7 para estas mesmas frequência e amplitude, mas com 50% de pré mistura, indicando que este comportamento é predominante em chamas mais pré misturadas.

Nas Figuras 3.80 a 3.82, relativas às amplitudes de pressões na câmara de combustão, pode-se observar o intenso acoplamento nas condições de 500 Hz e 10 e 20 mbar. Para a pressão de atuação de 30 mbar não ocorre o acoplamento. As imagens da

Tabela 3.10 mostram que a intensidade luminosa diminuiu para essa situação, indicando que a liberação de energia reduz nas proximidades do queimador, não sendo mais capaz de sustentar as oscilações no interior do combustor.

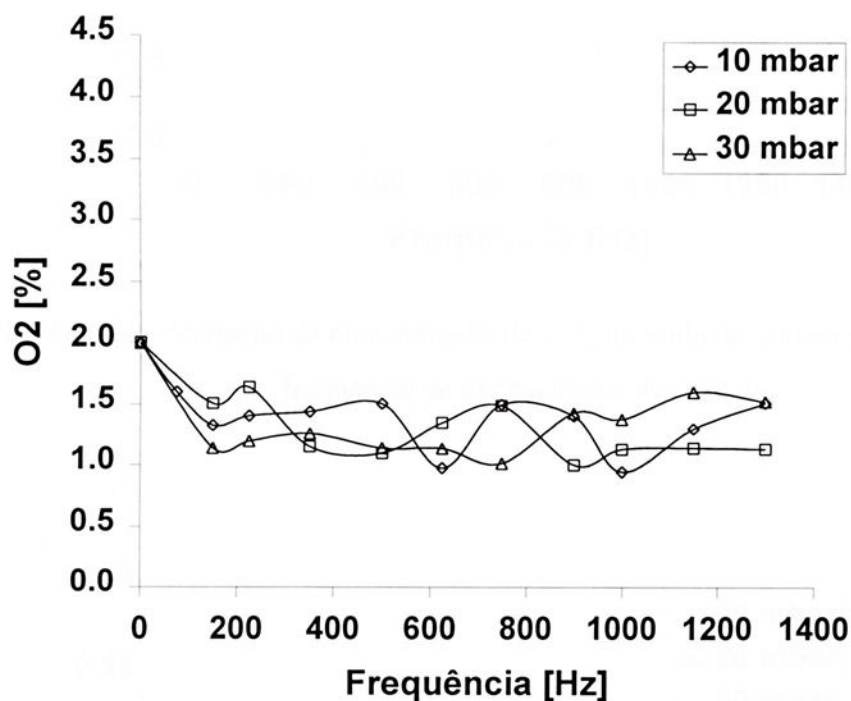


Figura 3.73 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

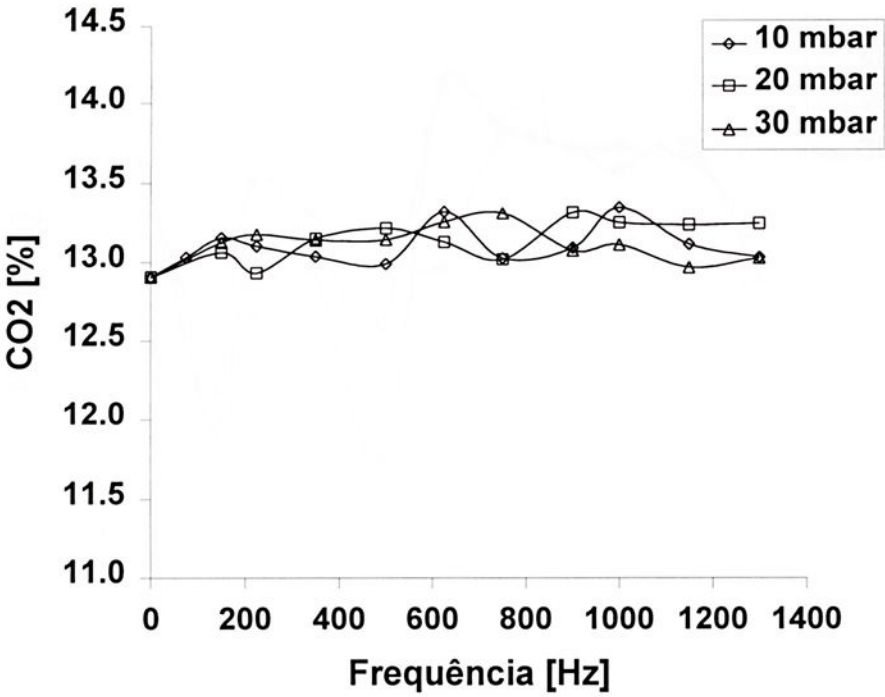


Figura 3.74 – Variação da concentração de CO₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

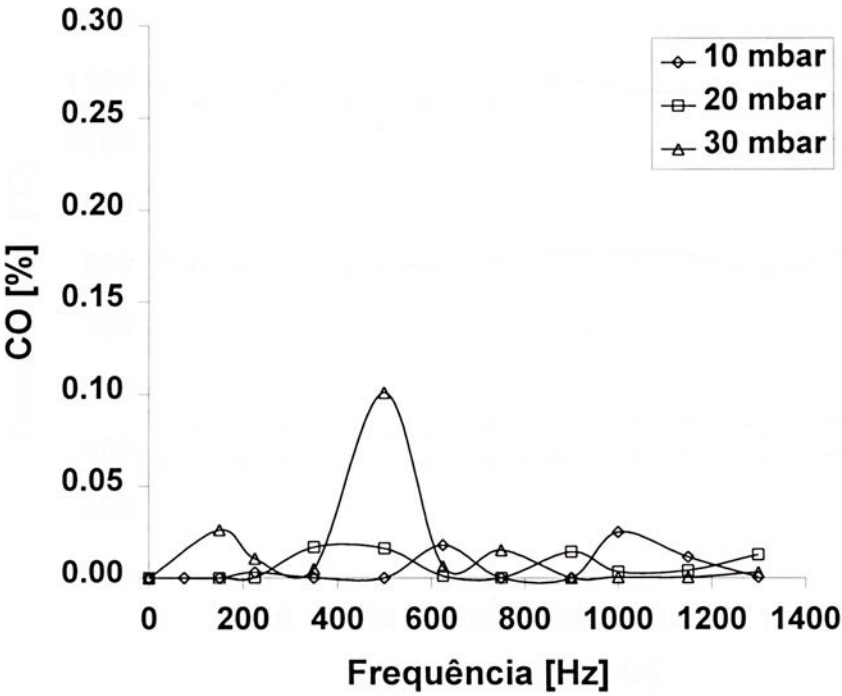


Figura 3.75 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

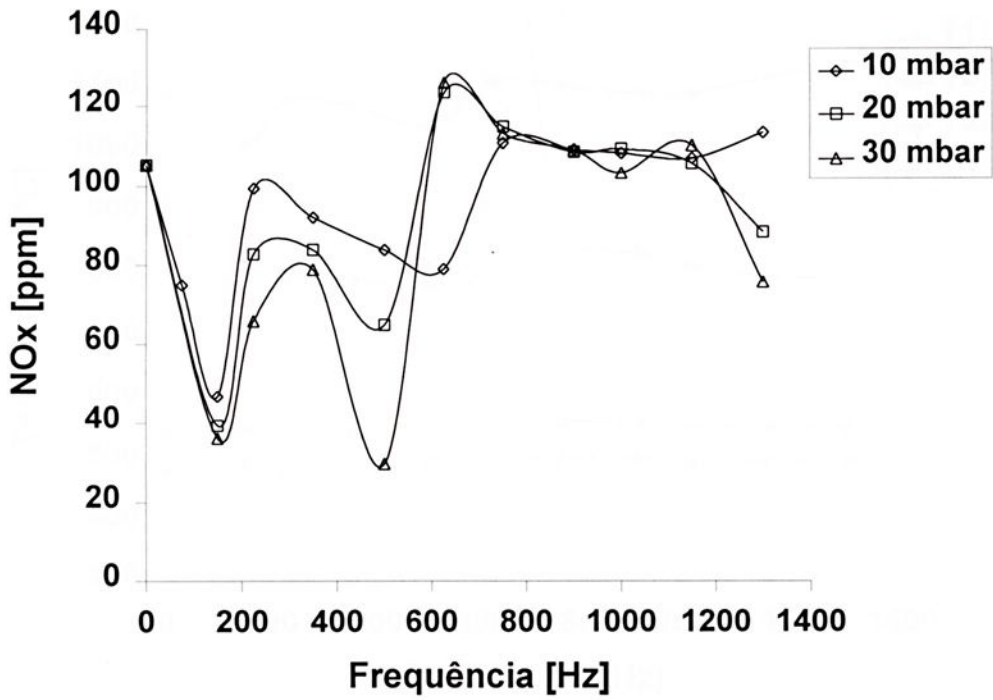


Figura 3.76 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

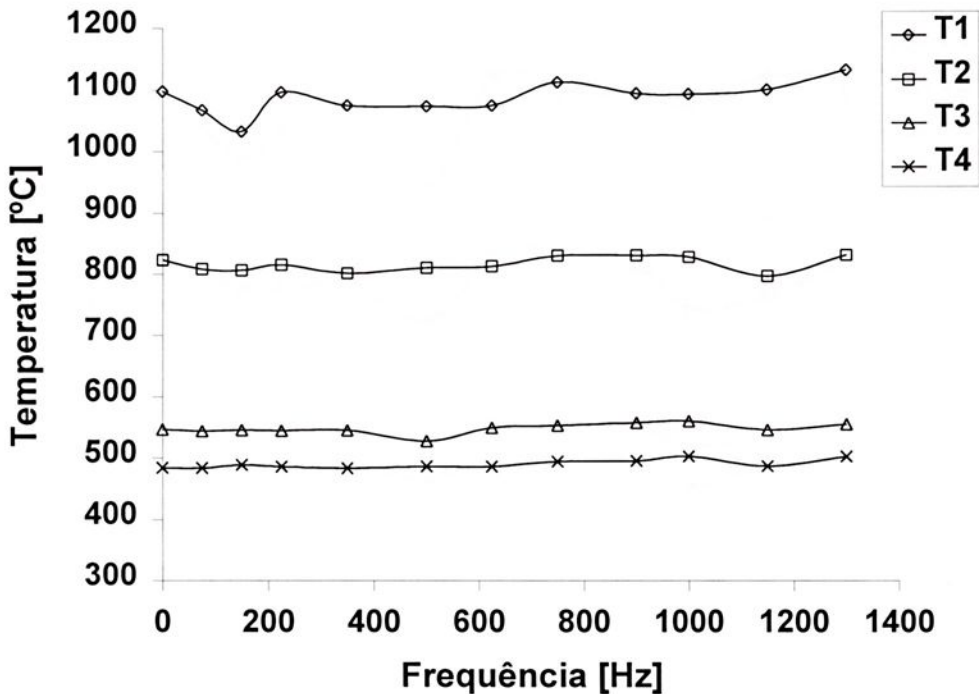


Figura 3.77 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

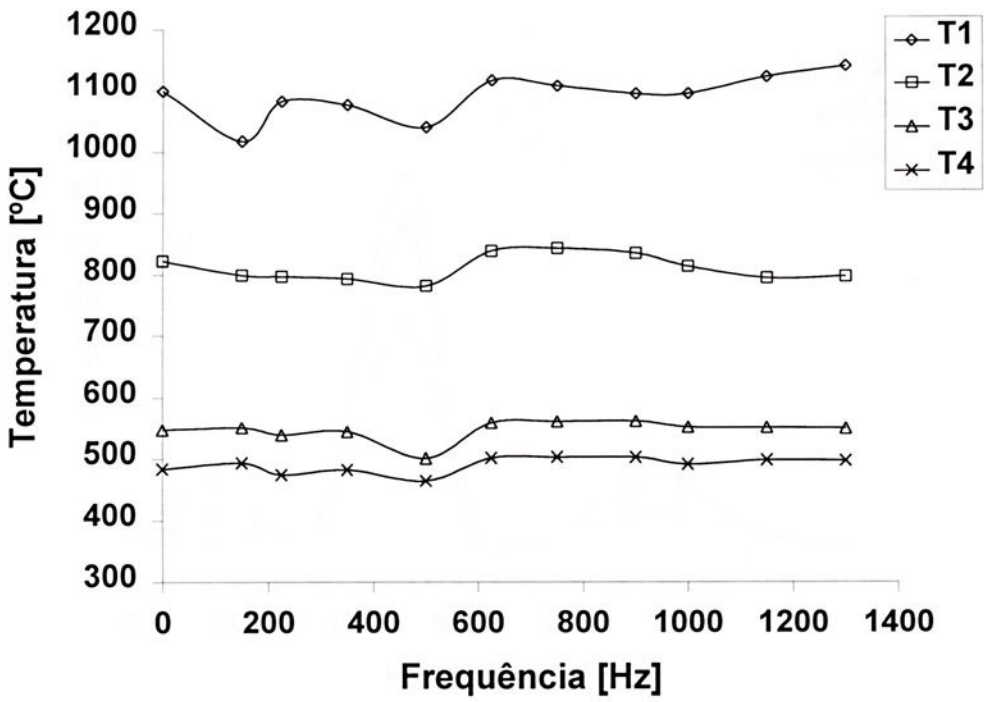


Figura 3.78 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

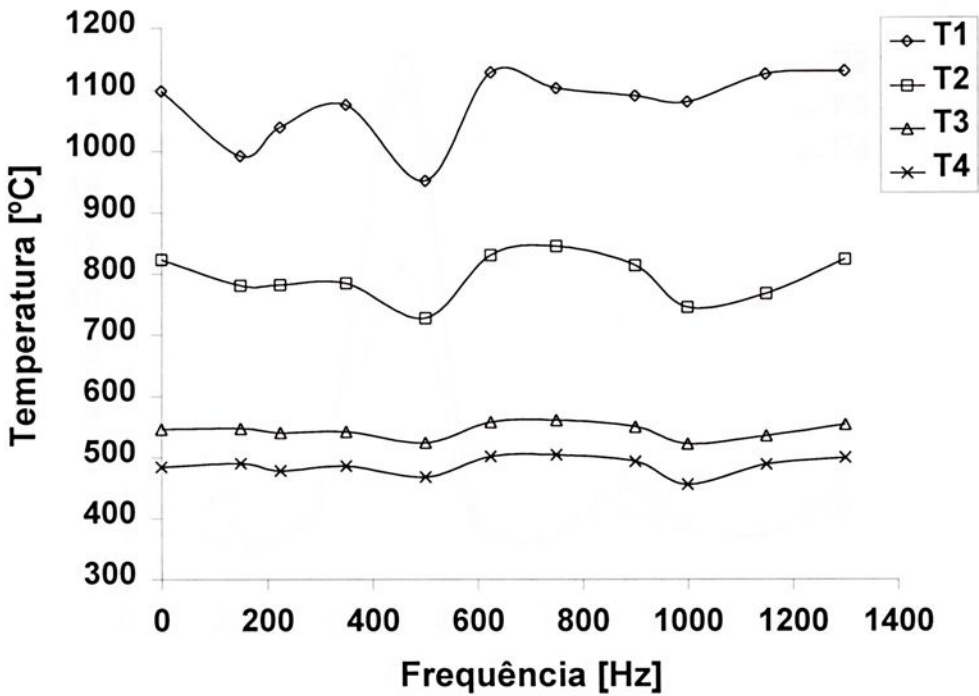


Figura 3.79 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

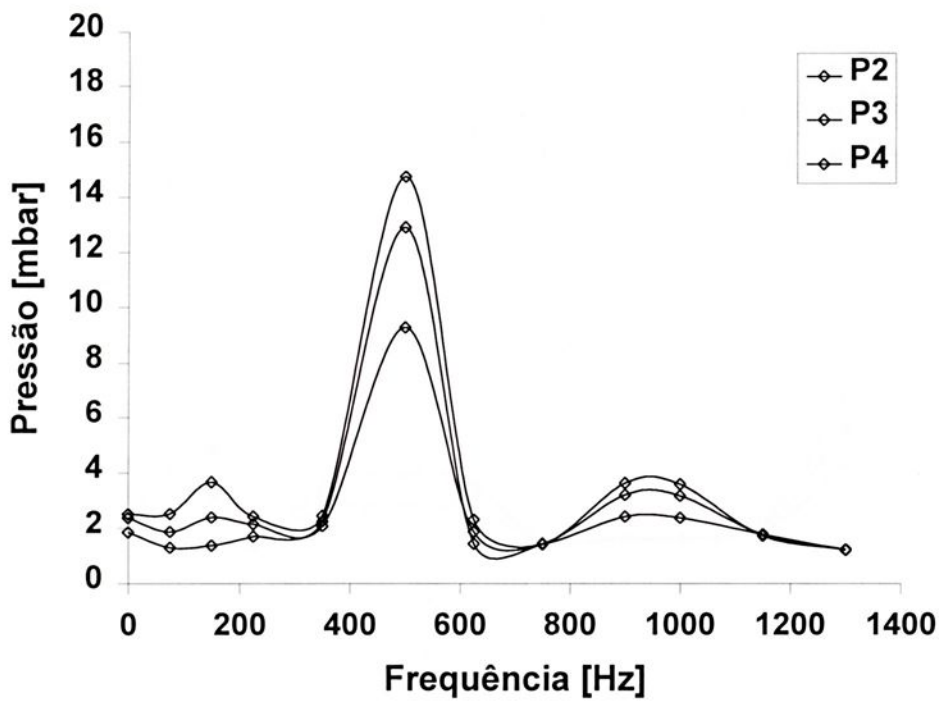


Figura 3.80 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

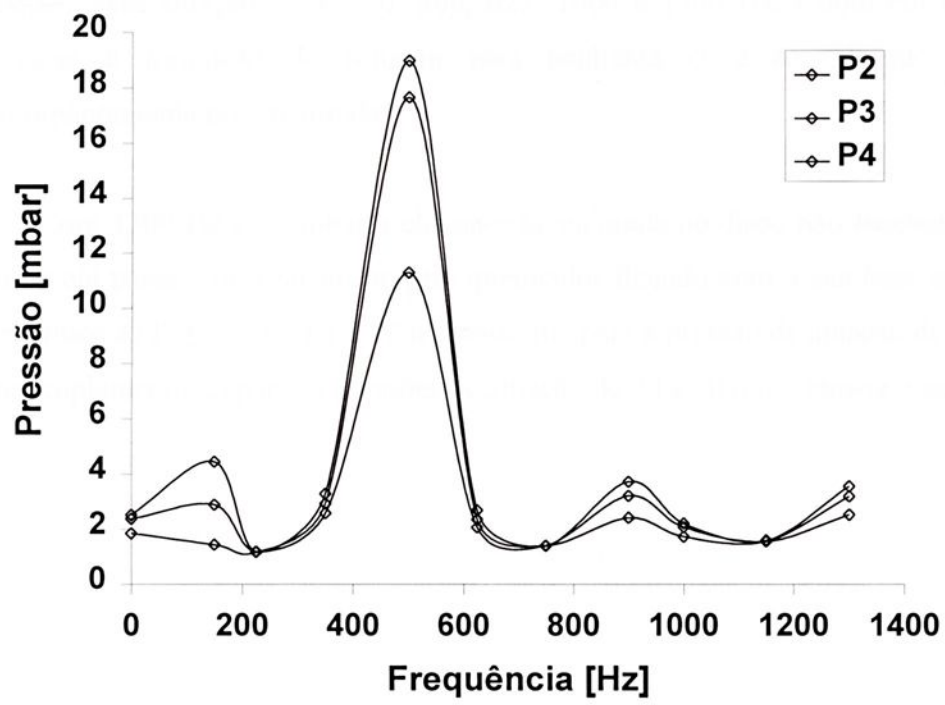


Figura 3.81 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

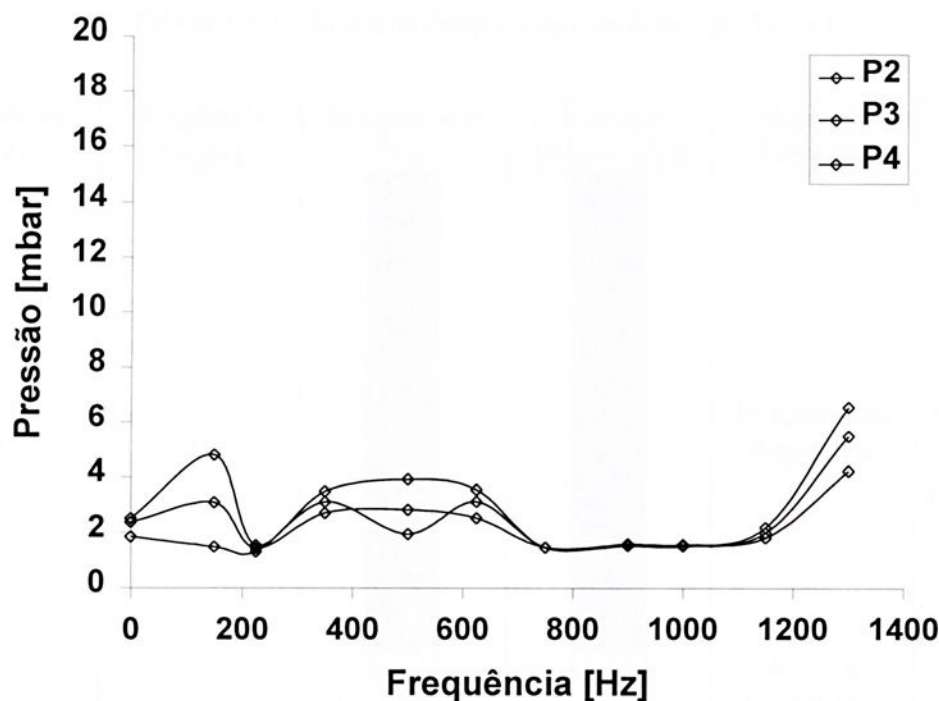


Figura 3.82 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

A Tabela 3.10 mostra as imagens das tomografias realizadas para as seguintes condições, sem atuação, 150, 350, 500, 625, 1000 e 1300 Hz. Como era esperado não observa-se a formação de fuligem para nenhuma condição, já que a chama é predominantemente pré misturada.

Com 1300 Hz e 10 mbar a chama esta ancorada no disco não fuselado, a partir de 20 mbar ela passa a ancorar no próprio queimador ficando com a sua base mais larga. Se observarmos as Figuras 3.80 a 3.82 notamos que para a pressão de atuação de 10 mbar não existe acoplamento, já para as pressões de atuação de 20 e 30 mbar tem-se o acoplamento.

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Imagem não disponível A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
150	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Imagem não disponível A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
150	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
150	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	10	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
350	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
350	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
625	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
625	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
625	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	20	 A = 16 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1300	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.10 – Imagens relativas às condições do Teste 8 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1300	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

3.10 – Resultados para 50,2% de Ar de Pré Mistura, $\phi = 1,10$, Teste 9

Os resultados de concentração de gases, temperatura e amplitude de pressão acústica no combustor, para o Teste 9, são apresentados nas Figuras 3.83 a 3.92. Baseado nas análises de O₂, CO₂ e CO (Figuras 3.83 a 3.85, respectivamente), de maneira geral, observa-se uma melhora na taxa de mistura, a não ser para a condição de 500 Hz e 30 mbar. Neste ponto, o resultado foi extremamente discrepante em relação ao demais; assim, acredita-se que algum problema com a montagem experimental possa ter ocorrido, pois não há uma explicação razoável que possa ser dada para essa brusca mudança de comportamento.

Os níveis de CO alcançados foram muito superiores ao dos testes anteriores e a presença de um campo acústico pouco contribuiu para alterar esse quadro. Tal resultado, de certa forma era esperado, pois neste teste a combustão ocorre com uma deficiência de oxidante de 9%; desta forma, mesmo que se intensifique a taxa de mistura entre os reagentes o nível de CO ainda será elevado. No entanto, o campo acústico possui um papel importante para reduzir a presença de fuligem na chama, conforme será discutido na apresentação da imagens resultantes da tomografia.

Como mostra a Figura 3.86, a concentração de NO_x aumenta com a atuação acústica em relação a condição sem atuação. Atinge-se um valor máximo na concentração para a frequência de 500 Hz e 20 mbar, cerca de 70 ppm em base seca, causado pelo aumento da temperatura em consequência da melhor mistura devido à atuação acústica. Nas Figuras 3.87 a 3.89, relativas à variação da temperatura em função da frequência de atuação, o comportamento das curvas segue o da concentração de NO_x .

Em relação as amplitudes de pressão da câmara de combustão não observa-se acoplamento para nenhuma condição, como mostram as Figuras 3.70 a 3.72, tem-se apenas uma pequena variação em relação ao valor sem atuação.

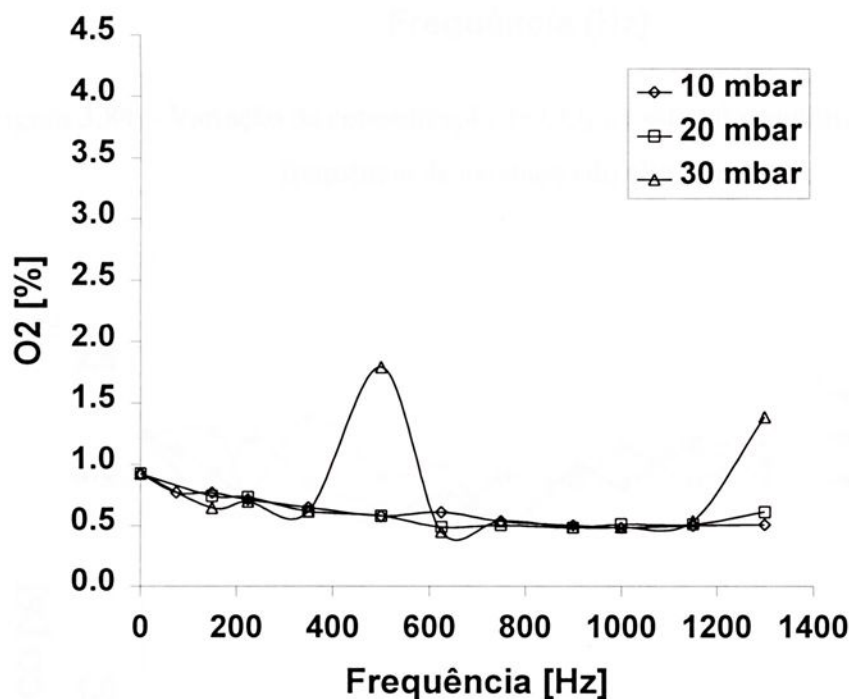


Figura 3.83 – Variação da concentração de O_2 na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

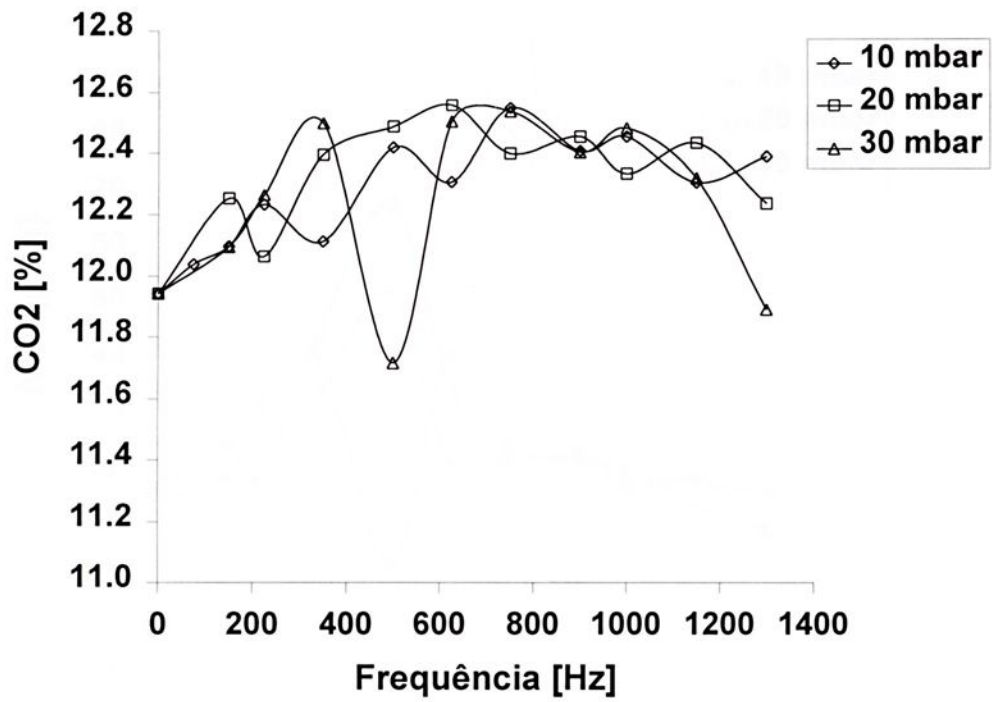


Figura 3.84 – Variação da concentração de CO₂ na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

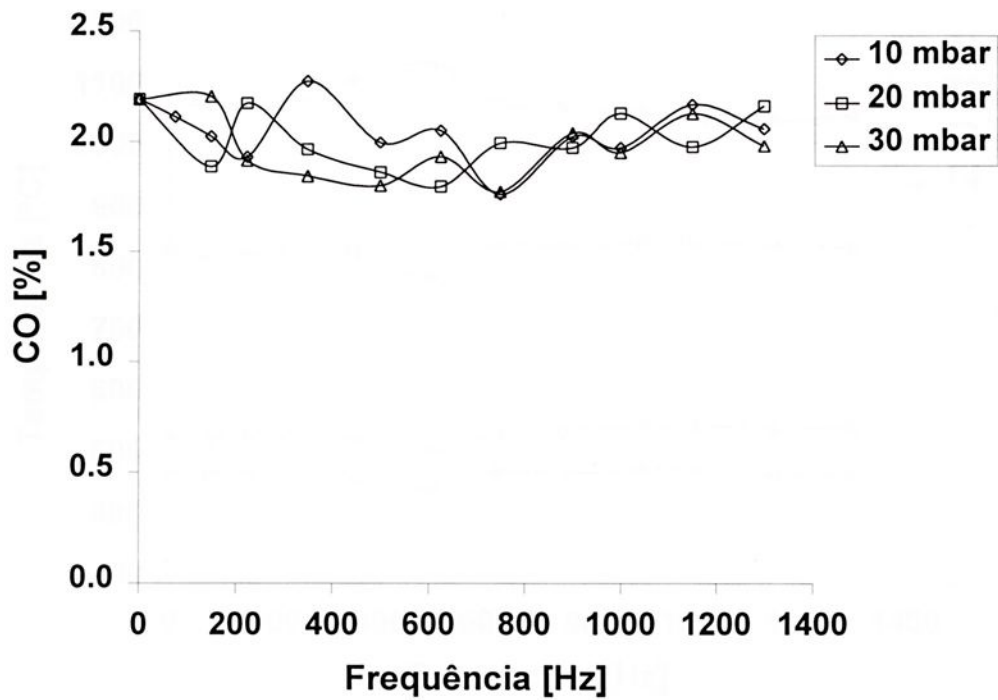


Figura 3.85 – Variação da concentração de CO na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

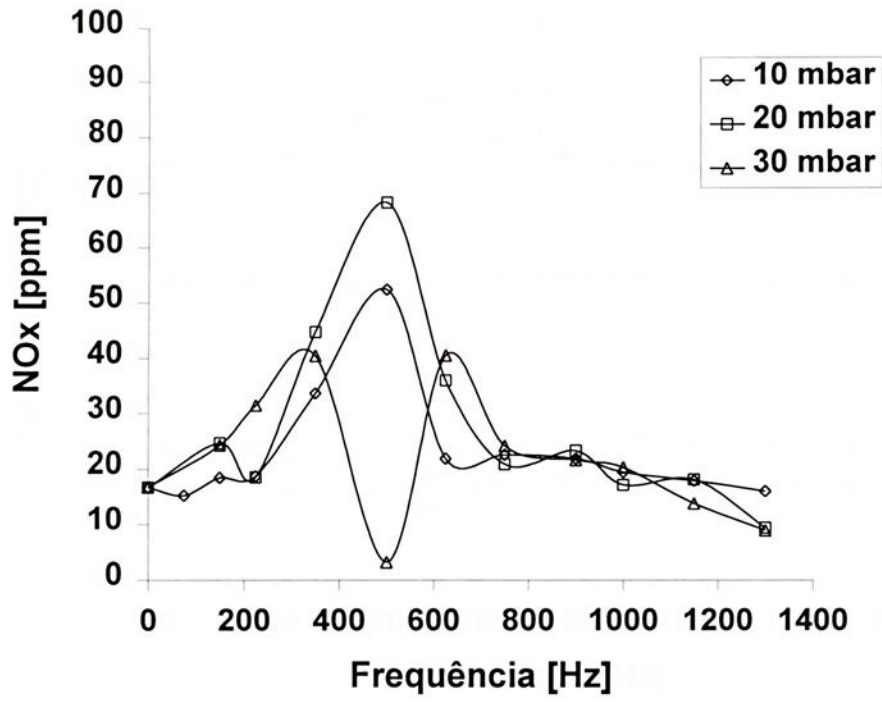


Figura 3.86 – Variação da concentração de NO_x na saída do combustor em função da frequência de excitação do alto falante.

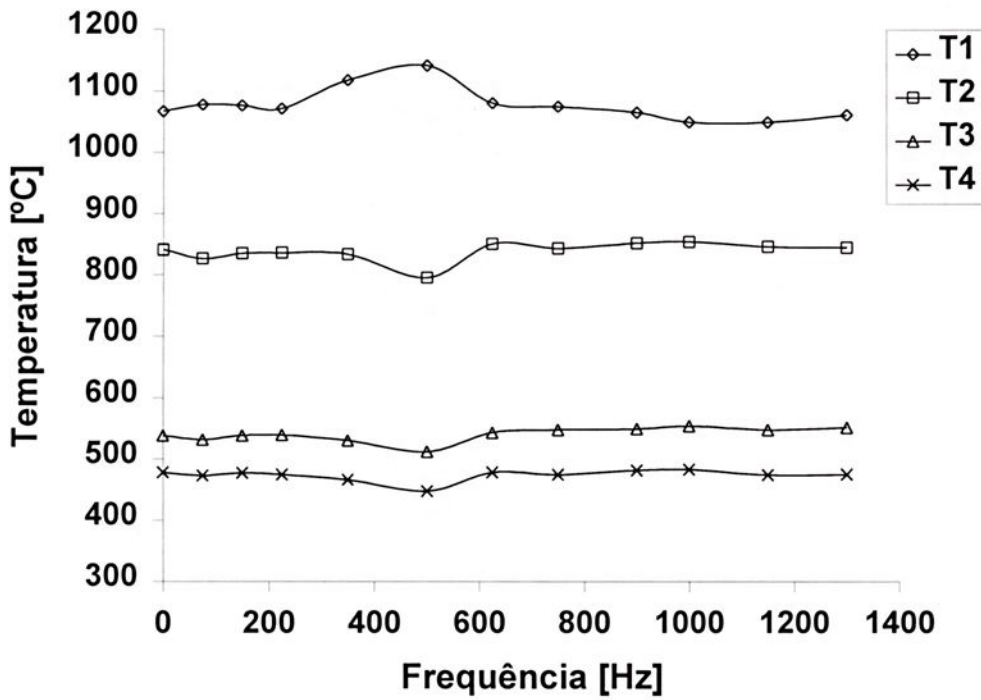


Figura 3.87 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

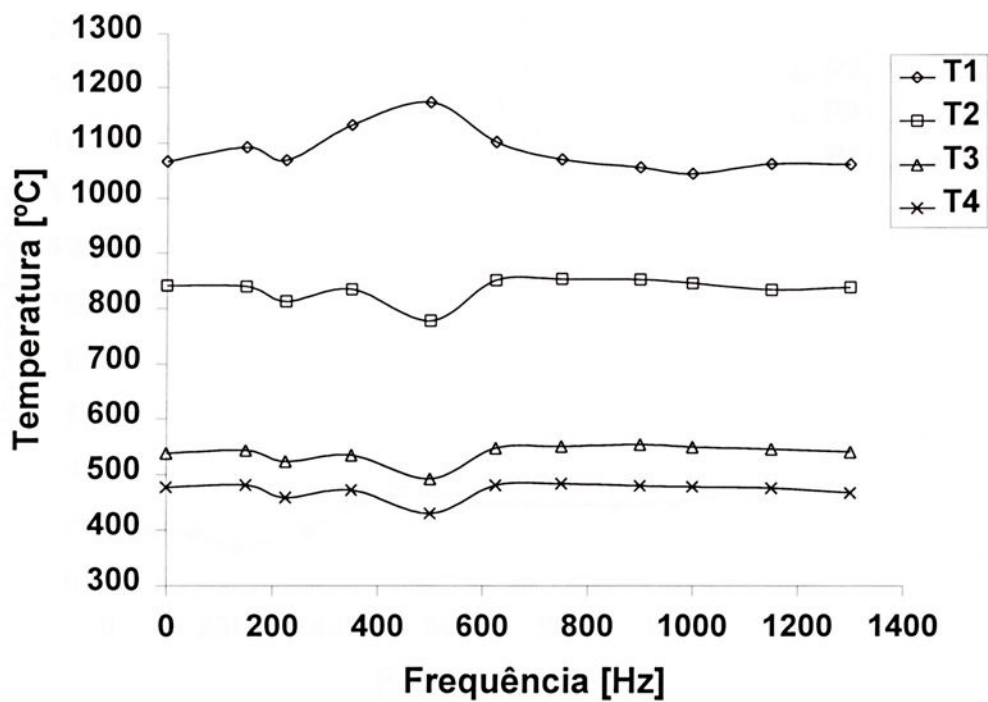


Figura 3.88 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

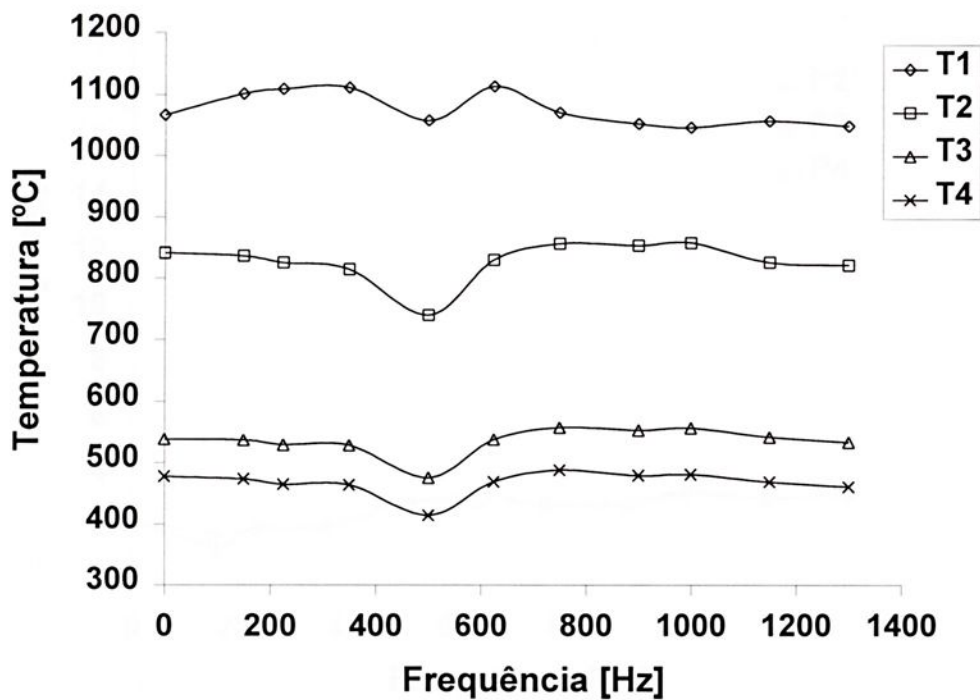


Figura 3.89 – Variação da temperatura em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

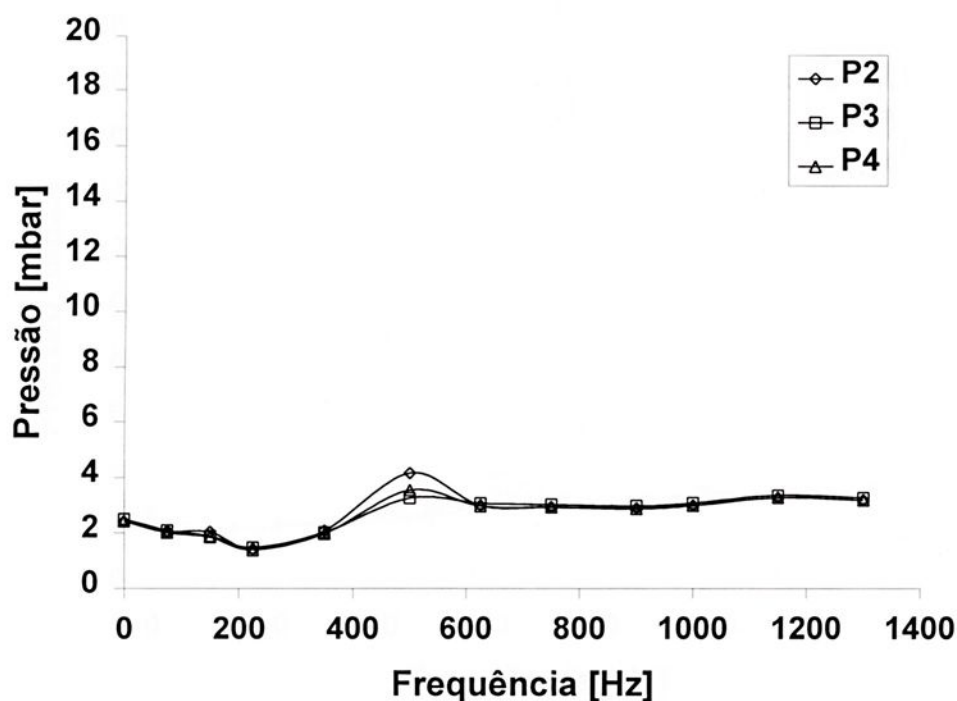


Figura 3.90 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 10 mbar.

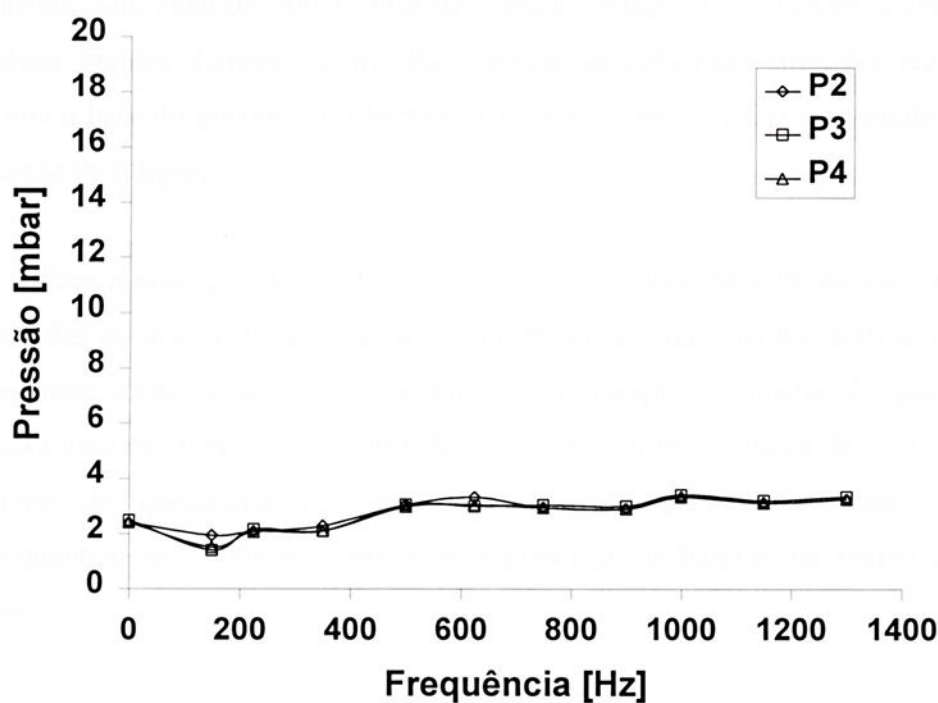


Figura 3.91 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 20 mbar.

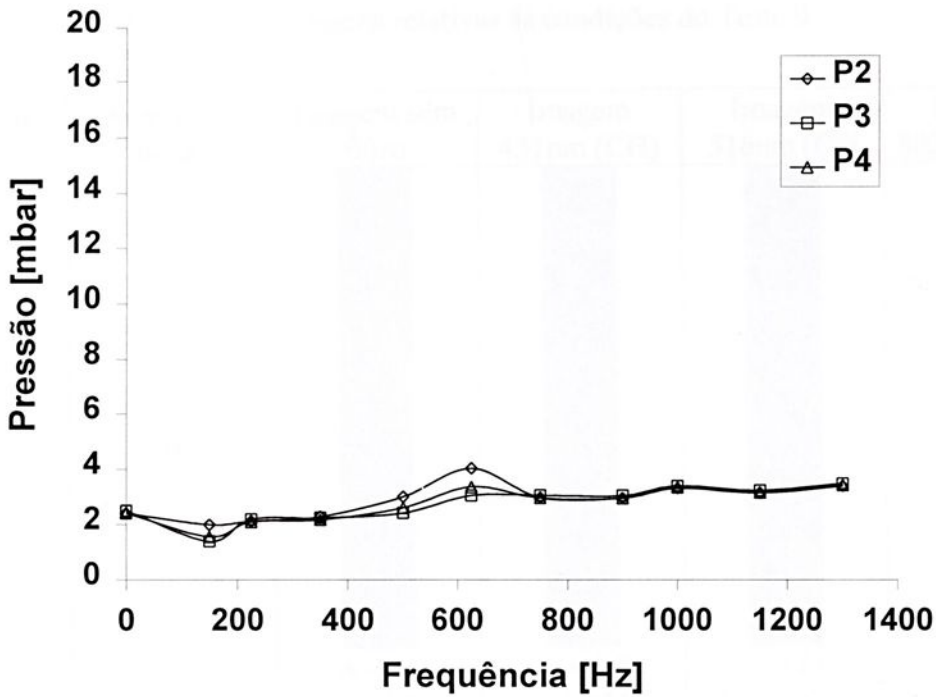


Figura 3.92 – Variação da pressão acústica em função da frequência de excitação do alto falante, para amplitude de pressão de 30 mbar.

A Tabela 3.11 mostra as imagens das tomografias realizadas para as seguintes condições: sem atuação, 500 e 1000 Hz. Para a condição sem atuação, a chama se divide em duas regiões distintas, com alta emissão quimiluminescente. Na região primária, próxima a base do queimador, observa-se a presença de C_2 e CH e na região secundária a formação de fuligem.

Para a condição de 500 Hz observa-se uma concentração da zona de reação nas imediações do queimador e a não presença de fuligem na zona secundária, indicando que ocorre uma melhora na taxa de mistura nessa situação. A análise de gases também já indicava esse resultado. Com 1000 Hz a zona de reação da chama deixa de se concentrar na base do queimador e volta a configuração próxima ao caso sem atuação, consequentemente, volta-se a observar a presença de fuligem na região secundária da chama.

Tabela 3.11 – Imagens relativas às condições do Teste 9.

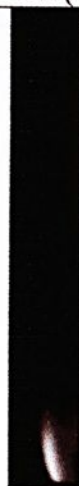
Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 516nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.0 t = 1/125 s	 A = 2.0 t = 1/125 s
500	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
500	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente

Tabela 3.11 – Imagens relativas às condições do Teste 9 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 511nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
500	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identificou emissão quimiluminescente
1000	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s
1000	20	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s

Tabela 3.11 – Imagens relativas às condições do Teste 9 (continuação).

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 431nm (CH)	Imagem 511nm (C ₂)	Imagem 802nm (fuligem)
1000	30	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 2.8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t = 1/125 s

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a influência da atuação acústica sobre a linha de pré mistura do queimador no processo de combustão para chamas confinadas.

Primeiramente, fez-se um levantamento bibliográfico a respeito de combustão pulsante, dos mecanismos de formação de poluentes em processos pulsados e não pulsados.

Neste trabalho foram realizadas as seguintes etapas: a) construção e montagem de todo aparato experimental; b) caracterização das faixas de amplitude e frequência onde ocorre a estabilização da chama; c) realização de testes para obtenção das medidas de concentração dos gases de exaustão e da transferência de calor; d) realização dos testes utilizando o sistema de tomografia de chama para estudar a geometria da chama e a região de presença de alguns radicais químicos de acordo com a variação da amplitude e da frequência.

Basicamente, partir dos resultados experimentais, notou-se que a presença do campo acústico pode melhorar a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante e muitas vezes isto acarretou em reduções na emissão de CO e na presença de fuligem. No entanto, não foi possível estabelecer um raciocínio linear sobre os efeitos do campo acústico no processo de combustão, pois cada tipo de chama (nível de pré mistura) responde de maneira particular à frequência ou amplitude imposta pelo sistema de atuação. Isto tudo está relacionado com o complexo acoplamento de efeitos aerodinâmicos sobre os escoamentos interno (sofre atuação acústica) e externo (não sofre atuação) e o surgimento de situações que satisfaça o critério de Rayleigh, causando oscilações com forte amplitude no interior da câmara.

Em chamas predominantemente difusivas (16% a 25% de pré mistura), a presença do campo acústico alterou muito pouco a emissão de NO_x . De uma forma geral, observou-se uma menor emissão desse poluente para as chamas difusivas do que para as chama pré misturadas, quer com atuação acústica ou não. Mesmo que para algumas situações de atuação a taxa de mistura entre os reagentes tenha melhorado, as chamas predominantemente difusivas apresentaram elevado comprimento de chama. Isto indica

que quantidade de energia liberada pela combustão por unidade de volume é menor na região de reação para esta situação. Se a zona de reação é dispersa e, como consequência, tem-se uma menor razão energia liberada por volume, as chamas difusivas apresentam menores regiões com pico de temperatura, o que desfavorece a formação de NO_x . Para alterar esse quadro, seria necessário que o campo acústico fosse suficiente para intensificar a taxa de mistura dos reagentes de tal forma que o tempo de difusão fosse menor que o tempo para o desenrolar das reações, ou seja a cinética do mecanismo reacional passa-se a controlar o processo, como no caso das chamas pré misturadas. No entanto, para isso talvez fosse necessário a atuação com amplitudes mais elevadas. No presente experimento não se ultrapassou o valor de 30 mbar, ou por não conseguir estabilizar a chama ou por se atingir o limite de tensão aplicada sobre alto-falante.

Outro ponto a se destacar sobre a emissão de NO_x nas chamas predominantes difusivas é o fato da região de pós chama estar em uma zona fria da câmara. Basicamente dois mecanismo reacionais competem para formação de NO, o “térmico”, característico da região de pós-chama e que exige temperatura acima de 1500°C , e o “prompt”, característico da região de chama e com exigência menor de temperatura. Através das curvas de temperatura apresentadas no Capítulo 3, nota-se que o sistema de refrigeração da câmara causa uma redução acentuada de temperatura ao longo do seu comprimento. Sendo assim, a região de pós chama localiza-se em uma zona onde a temperatura é desfavorável à formação de NO pelo mecanismo “térmico”. Mesmo com a presença do campo acústico a ordem de grandeza do comprimento das chamas difusivas foi de aproximadamente 50 cm, metade do comprimento do combustor.

Quanto à emissão CO, ainda para chamas predominantemente difusivas, notou-se que, tanto para $\phi = 0,9$ como $\phi = 1$, há redução deste poluente. Isto está relacionado com a melhor taxa de mistura entre os reagentes. Contudo, nota-se que essa redução é mais expressiva para $\phi = 1$, evidentemente que em $\phi = 0,9$ o próprio excesso de ar de 11% é responsável pela menor presença de CO nos gases de combustão e o campo acústico melhora mais timidamente esse resultado.

Para as chamas mais pré misturadas (50% e 60% de pré mistura) sem a atuação, identificou-se uma maior concentração da zona de reação nas proximidades do queimador. A presença do campo acústico de certa forma intensificou esse comportamento e,



geralmente, o aumento da amplitude compactava esta zona de reação em direção ao disco ancorador de chama. Para as amplitude mais elevada, ou seja, 30 mbar o efeito desta compactação acaba desfavorecendo a mistura entre os reagentes, dispersando parte do desenvolvimento das reações das proximidades do queimador. Assim, a combustão torna-se incompleta e, como consequência, tem-se um aumento da emissão de CO. Por outro lado, como há uma dispersão da liberação de energia, acompanhada de sua redução, já que a combustão é incompleta, ocorre a redução na emissão de NO_x .

Através dos sensores de amplitude de pressão posicionados ao longo da câmara, observou-se que o acoplamento no combustor ocorre quando o sistema de atuação propicia uma geometria de chama na forma elíptica bem próxima a base do queimador. Para que amplitudes mais altas sejam estabelecidas na câmara de combustão o critério de Rayleigh precisa ser satisfeito, pois é uma condição necessária. Tal critério estabelece que se a taxa de calor transferida periodicamente ao escoamento estiver em fase com a perturbação de pressão então a amplitude de pressão aumentará, ou seja, a energia proveniente da chama precisa ser transferida no local certo e na amplitude necessária. De acordo com esta formulação a amplitude das oscilações crescerá quando

$$\oint Q'p' dt > 0 \quad (5.1)$$

onde Q é a taxa de calor instantânea transferida ao escoamento, p' é a pressão acústica (diferença entre a pressão instantânea e a pressão média), t o tempo e a integral é sobre o ciclo de oscilação. Para um tubo com uma extremidade fechada e outra aberta, espera-se que quanto maior for a liberação de energia na extremidade fechada, maior será a possibilidade do surgimento das oscilações. Assim, analisando os resultados, nota-se que as maiores possibilidades para presença de intensa oscilação no combustor ocorrem com chamas predominantemente pré misturadas, pois é nesta situação que a maior parte da região de chama se concentra próxima a base do tubo.

A análise tomográfica mostrou que as chamas predominantemente pré misturadas (50% e 60% de pré mistura) para $\phi = 0,9$ e $\phi = 1$ não apresentaram fuligem, pelo menos não em concentração suficiente para que a emissão quimiluminescente pudesse ser detectada pelo sistema ótico. Esta situação foi observada tanto para situações com atuação como sem. Por outro lado, para as chamas predominantemente difusivas (15 e 25% de pré mistura), onde a formação de fuligem é mais intensa, observou-se que a presença do campo

acústico pode reduzir a emissão deste poluente. Tal fato é relacionado com a maior taxa de mistura entre os reagentes com as oscilações.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

1. Para esta mesma configuração do queimador seria interessante uma análise do campo de velocidades na proximidades do queimador; com isso seria possível avaliar como as linhas de corrente se comportam com a presença de um campo acústico e comparar estes resultados com os obtidos no presente trabalho; para medição da velocidade média e da sua flutuação pode-se utilizar a técnica de anemômetro de fio quente;
2. Como a temperatura é um fator de extrema importância para o mecanismos de formação de NO_x , um levantamento das modificações nos perfis axial e radial desta grandeza seria extremamente útil; para isso aconselha-se o uso de microtermopares (cerca de $30\text{ }\mu\text{m}$) que permitem inclusive obter os valores de flutuação da temperatura em razão da atuação;
3. Também sugere-se que outras configurações de queimador sejam submetidas à situação de combustão pulsada como, por exemplo, que se atue também na linha de ar difusivo, pois a atuação somente no fluxo de pré mistura, para as condições onde a massa que recebe a atuação é muito pequena, pouco se altera as condições de combustão.

Por fim, apesar do presente trabalho estar longe de ser uma discussão final sobre o assunto combustão pulsante, acredita-se que um série significativa de resultados foi obtida para a compreensão de chamas pulsantes, sendo que alguns desses resultados permitiram conclusões importantes, enquanto outros deram margem a novos questionamentos merecedores de futuras investigações. Desta forma, o objetivo desta dissertação de contribuir para o entendimento dos diversos fenômenos relacionados com a combustão pulsante foi alcançado.



REFERÊNCIAS

- BAKROZIS, A G.; PAPAILIOU, D. D.; KOUTMOS, P. A study of the turbulent structure of a two-dimensional diffusion flame formed behind a slender bluff-body. *Combustion and Flame*, v.119, n.3, p.291-306, 1999.
- BECHTOLD, J. K.; MATALON, M. Effects of stoichiometry on stretched premixed flames. *Combustion and Flame*, v.119, n.3, p.217-232, 1999.
- CARVALHO JR., J. A. *Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor*. Georgia, 1983. Thesis (Doctorado Thesis in Science) - Georgia Institute of Technology.
- CARVALHO JÚNIOR., J.A. et al. Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube. *Combustion and Flame*, v.76, n.1, p.17-27, 1989.
- COUTO, H. S. *Queima de combustíveis líquidos em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke*. Rio de Janeiro, 1989. Tese (Doutorado em Energia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DALLY, B.B. et al. Instantaneous and mean compositional structure of bluff-body stabilized nonpremixed flames. *Combustion and Flame*, v.114, n.1-2, p.119-48, 1998.
- DELABROY, O. et al. A study of NO_x reduction by acoustic excitation in a liquid fueled burner. *Combustion Science and Technology*, v.119, p.397-408, 1996.
- DUPONT, V.; WILLIAMS, A. NO_x mechanisms in Rich methane-air flames. *Combustion and Flame*, v.114, n.1-2, p.103-18, 1998.
- FENIMORE, C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In: International Symposium on Combustion, 13, 1970, Utah. *Proceedings...* Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1971. p.373-80.
- FERREIRA, M.A. *Combustão pulsante de carvão vegetal em tubo de Rijke*. Guaratinguetá, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- FERREIRA, M. A. *Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke*. Guaratinguetá, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- FOA, J. V. *Elements of flight propulsion*. New York: John Wiley, 1960.
- GLARBORG, P.; MILLER, J.A.; KEE, R.J. Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors. *Combustion and Flame*, v.65, p.177-202, 1986.

GLARBORG, P. NO_x chemistry in pulse combustion. In: WORKSHOP IN PULSATING COMBUSTION AND ITS APPLICATIONS, 1993. *Proceedings...* Sweden: Lund Institute of Technology.

GOEY, L. P. H.; MALLENS, R. M. M.; BOONKKAMP, J. H. M. An evaluation of different contributions to flame stretch for stationary premixed flames. *Combustion and Flame*, v.110, n.1-2, p.54-66, 1997.

HANBY, V. I. Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor. s.l. ASME, 1968. (ASME 68-WA/FU-1).

ISHINO, Y.; OHIWA, N.; YAMAGUCHI, S. Acoustic excitation of dual flames with coherent structure behind a rear-facing semicircular cylinder. *Combustion Science and Technology*, v.130, n.1-6, p.97-113, 1997.

JONES, J.C. **Combustion science: principles and practice**. Canada: Millennium Books, 1993.

LACAVA, P. T. *Influências de parâmetros de atomização na geração de instabilidades acústicas na combustão de sprays em tubos de Rijke*. São José dos Campos, 1995. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Combustão) – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

LACAVA, P. T. *Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos*. São José dos Campos, 2000. Tese (Doutorado em Energia) – Divisão de Engenharia Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

LEFEBVRE, A.H. *Gas turbine combustion*. Philadelphia, PA: Taylor and Francis, 1983.

MARTINS, C. A. *Emissões de NO_x em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso*. São José dos Campos, 1998. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Combustão) – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

MEUNIER, P.; COSTA, M.; CARVALHO, M.G. The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames. *Fuel*, v.77, n.15, p.1705-14, 1998.

MILLER, J. A.; BOWMAN, C. T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, v.15, n.4, p.287-338, 1989.

MOMMA, L. J. *Estudo da frequência e amplitude de pressão acústica em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke*. São José dos Campos, 1993. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Combustão) – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

POPE, C.; SIVASEGARAM, S.; WHITELAW, J.H. Control of NO_x emissions in confined flames by oscillations. *Combustion and Flame*, v.113, n.1-2, p.13-26, 1998.

PURI, I.K., ed. *Environmental implications of combustion processes*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.

RAYLEIGH, L. *The theory of sound*. New York: Dover, 1945. v.2.

SOUZA, N. *Processamento de Imagem Tomográfico*. Lisboa, Portugal, 1998. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 1998.

STODOLA, A.; LOEWENSTEIN, L.C. *Steam and gas turbines*. New York: McGraw-Hill, 1927.

TAKAGI, T. et al. A study on nitric oxide formation in turbulent diffusion flames. In: International Symposium on Combustion, 15, 1974, Tokyo. *Proceedings...* Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1974. p.1051-9.

TORRES, E.A. *Combustão pulsativa de casca de dendê*. São Paulo, 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TYNDALL, J. Sound. *Physical Sciences*, v.30, n.2, p.231-57, 1970.

WESTENBERG, A. A. Kinetics of NO and CO in lean, premixed hydrocarbon-air flames. *Combustion Science and Technology*, v.4, n.2, p.59-64, 1971.

WOOD, A. *Acoustics*. New York: Dover, 1966.

WOOD, S.C. Select the right NO_x control technology. *Chemical Engineering Progress*, v.90, n.1, p.32-8, 1994.

ZELDOVICH, J. The oxidation of nitrogen in combustion and explosion. *Acta Physicochimica*, 1946.

ZINN, B.T. Pulsating combustion. In: WEINBERG, F. J. (Ed.). *Advanced combustion methods*. London: Academic Press, 1986. p. 113-81.

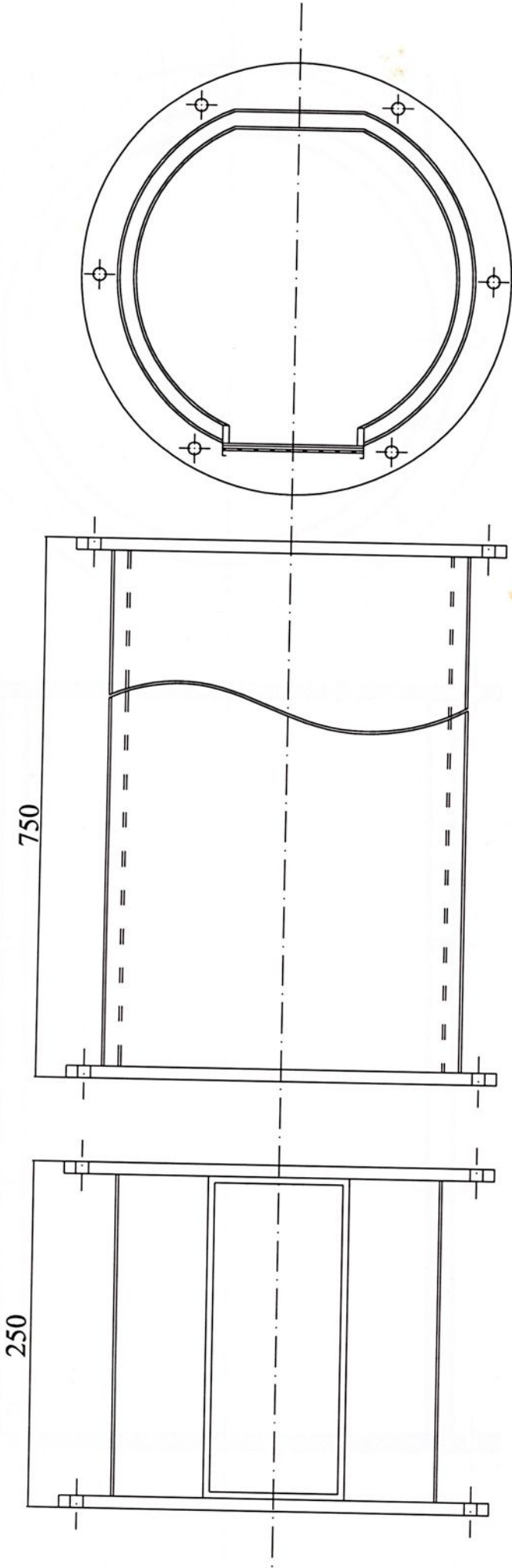


APÊNDICE

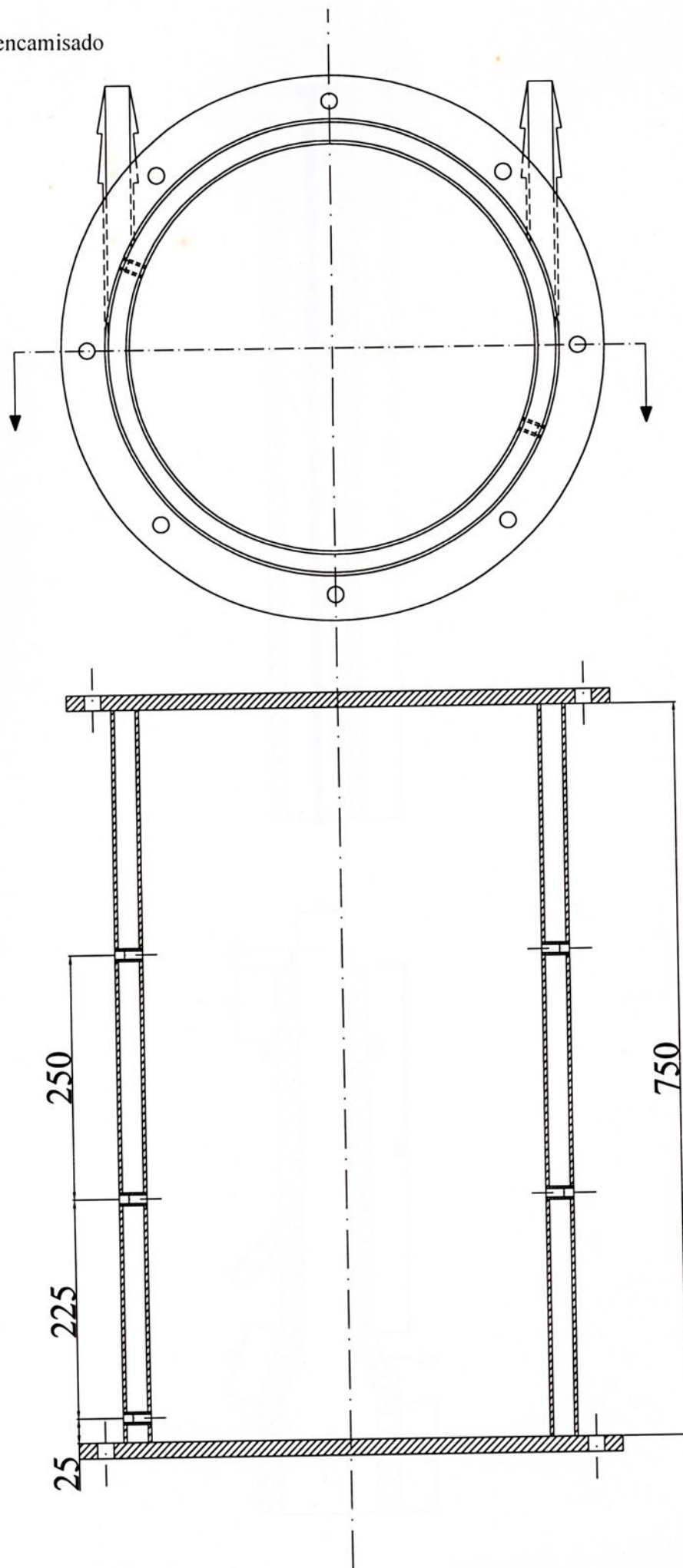
Nesta seção são apresentados os desenhos dos combustores e do conjunto do queimador.



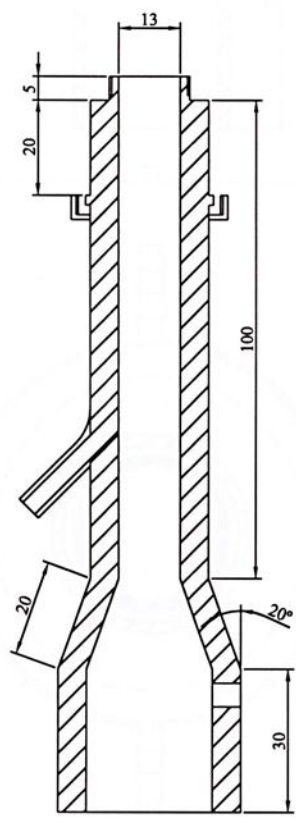
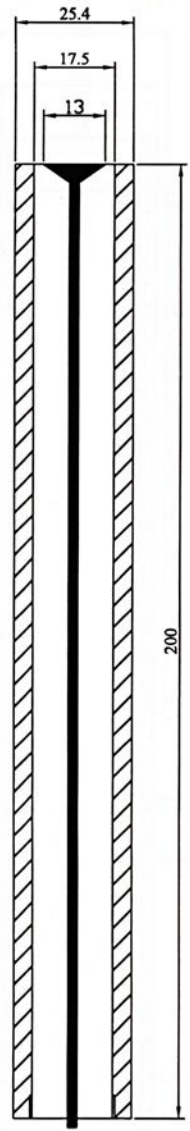
Combustor com visor



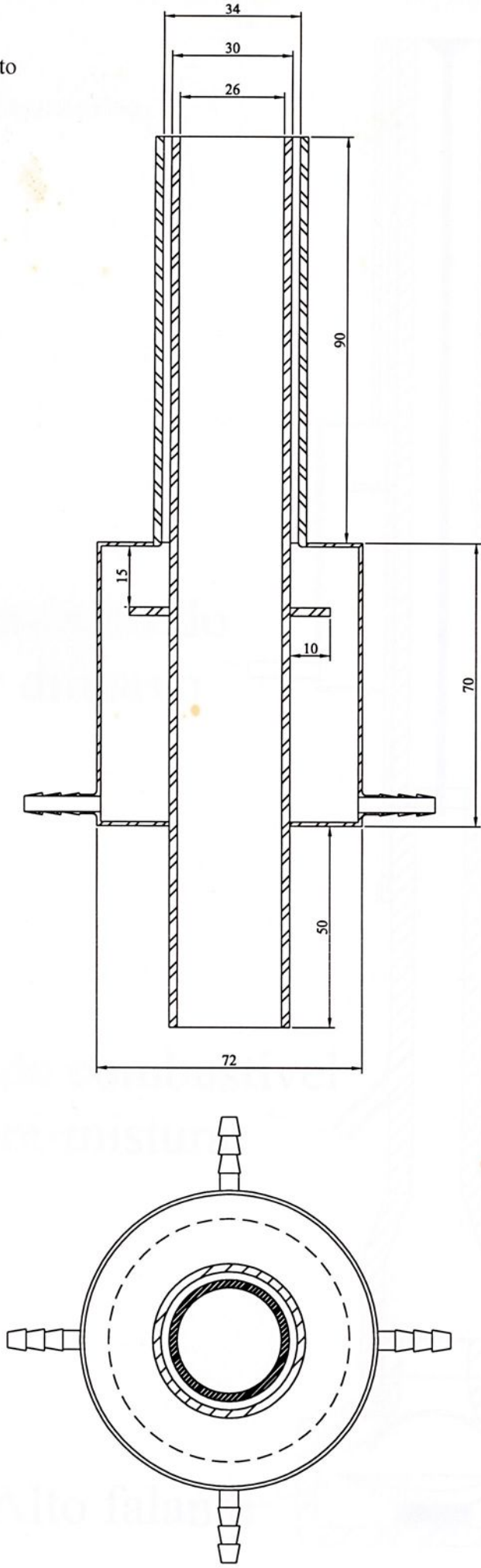
Combustor todo encamisado



Queimador
Elevação em corte



Câmara de desacoplamento
Elevação em corte



Conjunto

Queimador e Câmara de Desacoplamento

