

ANA MAURA ARAUJO ROCHA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CHAMAS DIFUSIVAS LIVRES  
TURBULENTAS DE GÁS NATURAL SUBMETIDAS A OSCILAÇÕES ACÚSTICAS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual  
Paulista, para a obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Mecânica na área de Transmissão e  
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava

Co-orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho  
Júnior

Guaratinguetá

2007

Rocha, Ana Maura Araujo

R672e      Estudo experimental de chamas difusivas livres turbulentas de gás natural submetidas a oscilações acústicas /Ana Maura Araujo Rocha – Guaratinguetá [s.n], 2007

195f. : il.

Bibliografia: f. 176-182

Tese(doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2007

Orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava

1. Combustão pulsante. 2. Chama turbulenta. 3. Emissão de poluentes. 4. Tomografia de chama. I. Título

CDU 662.9



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

“ESTUDO EXPERIMENTAL DE CHAMAS DIFUSIVAS LIVRES  
TURBULENTAS DE GÁS NATURAL SUBMETIDAS  
A OSCILAÇÕES ACÚSTICAS”

ANA MAURA ARAÚJO ROCHA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PEDRO TEIXEIRA LACAVAL  
Orientador / ITA-SJC

Prof. Dr. PAULO MAGALHÃES FILHO  
Unesp-Feg

Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI  
Unesp-Feg

Prof. Dr. DEMÉTRIO BASTOS NETTO  
INPE-CP

Prof. Dr. AMIR ANTÔNIO MARTINS DE OLIVEIRA JR.  
UFSC

Julho de 2007

**DADOS CURRICULARES**  
**ANA MAURA ARAUJO ROCHA**

NASCIMENTO 25.05.1972 – Silveiras / SP

FILIAÇÃO José Jair Rocha  
Maria de Lourdes Araujo Rocha

1992/1997 Curso de Graduação em Engenharia Industrial Química na Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.

2000/2002 Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, nível de Mestrado, no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

2002/2007 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Transmissão e Conversão de Energia, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

à minha mãe, meus irmãos, meu amado pai  
e ao meu querido Anton, que sempre me  
incentivaram e nunca me deixaram desistir,  
principalmente quando as “variáveis da  
vida pareciam insolúveis”.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e à minha família.

ao Dr. João Andrade de Carvalho Júnior por acreditar em meu potencial e ter me aceitado como sua orientada, obrigada pelo constante apoio profissional, bem como pessoal e pela luta para conseguir “o melhor” para seus orientados.

ao Dr. Pedro Teixeira Lacava pela orientação nos ensaios experimentais, na análise de resultados e pela paciência por estas orientações via celular nos sábados, domingos e feriados.

ao LCP/INPE por permitir a realização de todos os testes experimentais no Laboratório, por todo o apoio técnico e toda a infra-estrutura.

em especial ao chefe do LCP Dr. Demétrio Bastos Netto, este grande pesquisador e ser humano, obrigada pelo apoio científico, profissional e pessoal durante todos estes anos de pesquisa no LCP.

a todos os meus professores da UNESP e também aos pesquisadores e/ou meus ex-professores (atuais amigos) do INPE, muitíssimo obrigada a todos, por todo o apoio e amizade, os quais foram consolidados no decorrer destes sete anos de convivência.

ao pessoal do Ensaio (Ely, Chico, Aureliano Kalú, Giovany, Soró e aos amigos que se foram: Netto, Luiz Carlos e Alexandre), obrigada pelo apoio nos testes e construção de equipamentos. Ao Eng. Carlos Guedes Neto do Laboratório Prof. Feng/ITA, pela confecção e solda dos termopares de fio fino. Ao amigo e Dr. César Botura pelo apoio no sistema de aquisição de dados.

à toda a equipe do LCP, Ignês e Cida pelas constantes consultas às referências que faltavam, à Franciane, Vânia, Sr. Otávio, José Carlos, ao pessoal (amigos) do suporte de informática (Cris e Robertinho), aos doutores Osny, David, Wilson, Fernando Costa,

Marcio Mendonça, Gobbo, José Augusto enfim a todos os funcionários, bolsistas e estagiários do LCP, obrigada pela ajuda.

a todos os amigos da cúpula que tive o prazer de conviver nestes anos, obrigada por me “aturarem”. Aos meus amigos Adriana e “Japa” por estarem sempre dispostos a me ouvir nos momentos em que precisava ser ouvida.

ao meu querido Anton, por toda a força nos momentos difíceis, tanto pessoais como profissionais, obrigada do fundo do coração, você foi fundamental para a realização deste trabalho.

Este trabalho contou com apoio financeiro das seguintes entidades

- FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – através de Bolsa de Doutorado, Processo: 02/12802-0.

- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - através de Projeto CTPETRO n<sup>o</sup>: 501882/2003.

"O destino não é uma questão de sorte,  
é uma questão de escolha; não é algo a se  
esperar, é algo a se conquistar"

William Jennings Bryan

ROCHA, A. M. A. **Estudo Experimental de Chamas Difusivas Livres Turbulentas de Gás Natural Submetidas a Oscilações Acústicas**. 2007. 196 f. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

## **RESUMO**

O processo de queima que se utiliza um campo acústico (combustão pulsante) para obter oscilação acústica, apresenta algumas vantagens já estabelecidas na literatura, tendo-se por referência o processo de queima convencional, podendo ser o campo acústico induzido por atuadores externos ou não. Exemplos destas vantagens incluem a minimização da emissão de poluentes e dos custos de investimento/operação, incluindo a redução de consumo de combustíveis e a maximização das taxas de transferência convectiva de calor. Entretanto, para sua aplicação prática, torna-se necessário o estudo dos fenômenos que envolvem o processo de combustão, ainda não devidamente equacionados. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é realizar uma criteriosa investigação experimental sobre como os diversos parâmetros que controlam ou descrevem a situação de queima em uma chama difusiva livre turbulenta de gás natural se comportam com a presença de um campo acústico. Para tal foi adaptada uma instalação (queimador de Delft), disponível no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, com um sistema de atuação acústica. Tal sistema operacional possui chama turbulenta difusiva de gás natural, tipo jato, tendo sido escolhido, devido à sua geometria de chama ser mais simples e por apresentar na literatura um banco de dados já disponível, no que se refere aos processos físicos e químicos que ali se desenvolvem na situação sem atuação acústica, o que possibilita uma melhor compreensão da influência acústica sobre tais processos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Combustão pulsante, chama turbulenta difusiva, queimador de Delft, redução na emissão de poluentes, gás natural, tomografia de chama.

ROCHA, A. M. A. **Experimental Research of Natural Gas Diffusion Turbulent Flames submitted to Acoustics Oscillations.** 2007. 196 f. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

### **ABSTRACT**

A burning process using an acoustic field to obtain pulse combustion presents potential advantages over the conventional combustion process. The acoustic field can be introduced by external actuators or not. Examples of these advantages include minimization of pollutants emission rates as well as of investment and operation cost reductions and maximization of convective heat transfer rates. However, for practical applications of pulse combustion it is necessary to further study the phenomena involved in this process, which are still not properly known yet. The main objective of this work is to conduct a thorough experimental investigation on the parameters that control and describe combustion in a free turbulent diffusion flame of natural gas under an acoustic field. An existing Delft burner was adapted for the study. This system was chosen because, besides its simplicity, there is also an extensive data set in the literature, describing the physical and chemical processes that occur under conventional combustion operation, allowing a better understanding of the influence of the acoustic field.

**KEYWORDS:** Pulsating combustion, diffusion Turbulent Flame, Delft burner, decrease in pollutants emissions, natural gas, flame tomography.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Comparação de medidas da concentração de OH ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ) na chama III. .....	17
FIGURA 2 – Efeito da correção da interferência sobre a concentração média de OH a $x = 150\text{mm}$ na chama III .....	17
FIGURA 3 – Comparação de medidas de temperatura a $x = 200\text{ mm}$ (esquerda) e a (esquerda) e a $100\text{ mm}$ (direita) na chama III.....	18
FIGURA 4 – <i>Esquerda</i> : Resultados dos sinais de interferência, mostrados através da dispersão dos pontos a $615\text{ nm}$ ( $S_{F615}$ ) versus fração de mistura em $x=50\text{mm}$ na chama III.A linha vertical mostra a posição da fração estequiométrica da mistura $\xi =,071$ .....	19
FIGURA 5 – Reservas provadas de petróleo, segundo regiões geográficas, 2005 (bilhões b).....	22
FIGURA 6 – Reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas, 2005 (trilhões $\text{m}^3$ ).....	22
FIGURA 7 – Distribuição percentual das reservas mundiais de gás natural.. .....	23
FIGURA 8 – Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas, 2005.. .....	23
FIGURA 9 – Mecanismo de Fenimore . .....	31
FIGURA 10 – Emissão de poluentes em função da razão de equivalência. ....	32
FIGURA 11 – Esquema da saída do Queimador de Delft (à esquerda) e da estrutura experimental, composta pela garganta e câmara que circundam o queimador. ....	34
FIGURA 12 – Queimador de Delft original do LCP /INPE, (a) saída do queimador; (b) montagem experimental e (c) fotografia da montagem.....	34
FIGURA 13 – Instalação Experimental do Queimador alterada para inclusão de sistema acústico: (a) esquema, (b) fotografia e (c) detalhe da saída do queimador, com a chama piloto acesa. ....	36

FIGURA 14 – Esquema do Sistema de Atuação Acústica.....	39
FIGURA 15 – Sistema de Posicionamento (a) visão frontal, (b) visão lateral. ....	40
FIGURA 16 – Esquema da Sonda dos Gases (dimensões em mm).....	42
FIGURA 17 – Sistema de posicionamento acoplado com a Sonda de Gases.....	43
FIGURA 18 – Esquema Geral da Instalação Experimental .....	44
FIGURA 19 – (a) Esquema do Termopar Tipo R no interior do Tubo Cerâmico (b) e Esquema da Sonda do Termopar de Fio Fino. ....	46
FIGURA 20 – (a) Sonda fixada no suporte, (b) Detalhe da extremidade onde são fixados os fios de 38 $\mu$ m. ....	47
FIGURA 21 – Amostragem da tela do sistema de aquisição de dados.....	48
FIGURA 22 – Esquema do sistema de aquisição de imagens: 1) Chama a ser estudada; 2) Filtro Ótico; 3) Câmera CCD; 4) Computador. ....	49
FIGURA 23 – Esquema do Processo de Quimiluminescência e suas respectivas linhas de emissão. ....	50
FIGURA 24 – Formação da imagem no sistema óptico e os principais parâmetros de uma lente .....	54
FIGURA 25 –Esquema do Tomógrafo inicialmente projetado para este trabalho. ....	57
FIGURA 26 – Esquema do segundo Tomógrafo .....	58
FIGURA 27 – Segundo tomógrafo acoplado com a CCD (a) Arranjo Experimental, (b) detalhe deste próximo ao queimador.....	59
FIGURA 28 - Esquema representando raios de luz sendo transformados em sinais elétricos por uma câmera CCD ( <i>Charge Coupled Device</i> ), (Silva, 1999).	61
FIGURA 29 – Conjunto responsável pela aquisição de imagens para tomografia. ....	62
FIGURA 30 – Freqüências x Amplitudes de Pressão para o tubo, sem vazão de ar e sem queima e temperatura ambiente de 26 °C.....	78
FIGURA 31 – Freqüências x Amplitudes de Pressão na Condição I, com escoamento de ar primário, sem queima e temperatura ambiente de 24 °C. ....	79
FIGURA 32 – Freqüências x Amplitudes de Pressão na Condição II, com escoamento de ar primário, sem queima e temperatura ambiente de 24 °C. ....	79

FIGURA 33 – Comparação das Frequências x Amplitudes de Pressão para os testes realizados. ....	80
FIGURA 34 – Variação da amplitude de pressão com relação à frequência dos harmônicos no tubo, para as Condições I e II com e sem a Chama Piloto. ....	85
FIGURA 35 – Variação da tensão aplicada ao alto-falante, com relação à frequência dos harmônicos no tubo, para as Condições I e II com e sem a Chama Piloto. ....	86
FIGURA 36 – Comprimento da chama com a atuação acústica em 96 Hz e diferentes amplitudes de pressão para a Condição II. ....	92
FIGURA 37 – Comparação do comprimento da chama para as Condições I e II, para diferentes frequências e diferentes amplitudes de pressão. ....	93
FIGURA 38 – Concentração dos gases para a situação com e sem a utilização do Ar secundário. ....	96
FIGURA 39 – Concentração de CO a 97 Hz e 5,5 mbar. ....	98
FIGURA 40 – Concentração de CO a 97 Hz e 10 mbar. ....	99
FIGURA 41 – Concentração de CO a 97 Hz e 15 mbar. ....	100
FIGURA 42 – Concentração de CO a 181 Hz e 21 mbar. ....	101
FIGURA 43 – Concentração de CO a 282 Hz e 23 mbar. ....	101
FIGURA 44 – Concentração de NO <sub>x</sub> a 97 Hz e 15 mbar. ....	102
FIGURA 45 – Concentração de NO <sub>x</sub> a 181 Hz e 21 mbar. ....	103
FIGURA 46 – Concentração de NO <sub>x</sub> a 282 Hz e 23 mbar. ....	103
FIGURA 47 – Concentração de O <sub>2</sub> a 97 HZ e 15 mbar. ....	105
FIGURA 48 – Concentração de O <sub>2</sub> em 181 HZ – 21 mbar. ....	105
FIGURA 49 – Concentração de O <sub>2</sub> em 282 Hz – 23 mbar. ....	106
FIGURA 50 – Concentração de CO <sub>2</sub> a 97 Hz – 15 mbar. ....	107
FIGURA 51 – Concentração de CO <sub>2</sub> em 181 Hz - 21mbar. ....	107
FIGURA 52 – Concentração de CO <sub>2</sub> em 282 Hz – 23 mbar. ....	108

FIGURA 53 - Chama na Condição I (a) sem atuação acústica e (b) com atuação acústica. .....	109
FIGURA 54 – Comprimento da chama com a atuação acústica em 181 Hz e diferentes amplitudes de pressão para a Condição I. ....	111
FIGURA 55 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 11 mbar na Condição II. ....	112
FIGURA 56 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 21 mbar na Condição II. ....	113
FIGURA 57 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 31 mbar na Condição II. ....	113
FIGURA 58 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 181 Hz e 25 mbar na Condição II. ....	114
FIGURA 59 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 283 Hz e 38 mbar na Condição II. ....	115
FIGURA 60 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO <sub>x</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II. ....	116
FIGURA 61 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de O <sub>2</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II. ....	116
FIGURA 62 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO <sub>2</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II. ....	117
FIGURA 63 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO <sub>2</sub> na Condição I em 181 Hz e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3%O <sub>2</sub> . .	120
FIGURA 64 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO na Condição I em 181 Hz e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3%O <sub>2</sub> . .	121
FIGURA 65 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO <sub>x</sub> na Condição I em 181 HZ e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3%O <sub>2</sub> . .	122
FIGURA 66 – Esquema do queimador, destacando o eixo central (medidas em mm).	123

FIGURA 67 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO <sub>2</sub> , corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de O <sub>2</sub> para (a) Condição I (b) Condição II.....	124
FIGURA 68 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO, corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de O <sub>2</sub> para (a) Condição I (b) Condição II.....	125
FIGURA 69 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO <sub>x</sub> , corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de O <sub>2</sub> para (a) Condição I (b) Condição II.....	127
FIGURA 70 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de O <sub>2</sub> para: (a) Condição I (b) Condição II.....	128
FIGURA 71 – Distribuição radial da Temperatura na Condição I, corrigidos os valores da amplitude de pressão em 181 HZ e (a) 8,5 mbar (b) 16 mbar e (c) 21 mbar .....	131
FIGURA 72 – Distribuição radial da Temperatura na Condição II para 181 Hz e: (a) 8,5 mbar (b) 17 mbar e (c) 25 mbar.....	133
FIGURA 73 – Intensidade da Fuligem sem atuação acústica.....	136
FIGURA 74 – Intensidade da Fuligem a 97 Hz – 15 mbar.....	136
FIGURA 75 – Intensidade da Fuligem a 181 Hz – 21 mbar.....	137
FIGURA 76 – Intensidade da Fuligem a 282 Hz – 23 mbar.....	137
FIGURA 77 – Intensidade do Radical C <sub>2</sub> sem atuação acústica .....	139
FIGURA 78 – Intensidade do Radical C <sub>2</sub> a 97 Hz – 15 mbar .....	139
FIGURA 79 – Intensidade do Radical C <sub>2</sub> a 181 Hz – 21 mbar .....	140
FIGURA 80 – Intensidade do Radical C <sub>2</sub> a 282 Hz – 23 mbar .....	140
FIGURA 81 – Intensidade do Radical CH sem atuação.....	141
FIGURA 82 – Intensidade do Radical CH a 97 Hz – 15 mbar.....	142
FIGURA 83 – Intensidade do Radical CH a 181 Hz – 21 mbar.....	142
FIGURA 84 – Intensidade do Radical CH a 282 Hz – 23 mbar.....	143

FIGURA 85 – Chama não atuada e com atuação a 97 Hz para várias amplitudes de pressão. ....	144
FIGURA 86 – Chama com atuação a 181 Hz para várias amplitudes de pressão. ....	144
FIGURA 87 – Chama com atuação a 282 Hz para várias amplitudes de pressão. ....	144
FIGURA 88 – Localização na chama das alturas axiais de 50, 150 e 250mm. ....	147
FIGURA 89 – Variação das Intensidades máximas das imagens projetadas com o aumento na amplitude de pressão.....	157
FIGURA 90 – Referência gradativa para interpretação das intensidades mínimas e máximas da reconstrução tomográfica. ....	161
FIGURA 91 - Aplicação Back-Projection sobre o perfil de intensidades da chama, em diversos ângulos.....	161
FIGURA 92 - Resultado da reconstrução tomográfica da seção transversal da chama, através da aplicação da convolução nas imagens da Figura 91.....	162

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Características de algumas chamas estudadas no queimador de Delft.	13
TABELA 2 – Medidas e estimativas escalares de diferentes chamas no queimador de Delft.....	15
TABELA 3 – Condições de entrada para as chamas III e IV de Delft.....	16
TABELA 4 – Composição média do G.N. comercial da Califórnia e da Holanda.....	16
TABELA 5 – Propriedades químicas e físicas do gás natural (Bacia de Campos/RJ).	25
TABELA 6 – Especificações técnicas para o gás natural no Brasil.....	26
TABELA 7 – Banda de emissão quimiluminescente de alguns radicais .....	51
TABELA 8 – Radicais analisados neste trabalho e comprimentos de onda dos filtros interferométricos respectivos a tais radicais.....	52
TABELA 9 – Condições de alimentação a serem utilizadas no trabalho. ....	67
TABELA 10 – Condições de entrada dos gases de alimentação. ....	68
TABELA 11 – Vazão mássica dos gases de alimentação da chama principal e chama piloto.....	70
TABELA 12 – Frequências correspondentes aos cinco primeiros harmônicos do queimador de Delft, em função da temperatura. ....	72
TABELA 13 - Comparação dos valores calculados e experimentais das frequências dos harmônicos em função da temperatura.....	81
TABELA 14 – Condições Acústicas oriundas de testes para verificar o ponto “lift” da chama.....	82
TABELA 15 – Condições Acústicas de Ensaio a serem seguidas para a Condição I e II. ....	84
TABELA 16 – Valores corrigidos para Condições Acústicas de Trabalho para Condição I e II.....	88
TABELA 17 – Sequência Acústica de Testes para os Ensaios, com valores corrigidos, a serem seguidas para a Condição I e II. ....	89
TABELA 18 – Altura da Chama e composição dos Gases para a Condição I e II em sua extremidade superior. ....	91

TABELA 19 – Relação das posições para varredura da chama.....	95
TABELA 20 – Comprimento de onda das espécies analisadas neste trabalho.....	146
TABELA 21 – Imagem projetada do radical C <sub>2</sub> sem atuação acústica para condição I em 50 mm (a), 150 e 250mm (b).....	148
TABELA 22 - Imagem projetada do radical C <sub>2</sub> com atuação de 8,5 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).....	149
TABELA 23 - Imagem projetada do radical C <sub>2</sub> com atuação de 16 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).....	150
TABELA 24 - Imagem projetada do radical C <sub>2</sub> com atuação de 21 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).....	151
TABELA 25 - Imagem projetada do radical CH no ângulo de projeção de 0° sem atuação acústica e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).....	152
TABELA 26 - Imagem projetada da fuligem no ângulo de projeção de 0° sem atuação acústica e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).....	153
TABELA 27 – Intensidades máximas para a condição sem atuação acústica e para 181Hz. ....	155
TABELA 28 - Imagem projetada do radical C <sub>2</sub> , no ângulo de projeção de 0° sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm. ....	158
TABELA 29 - Imagem projetada do radical CH no ângulo de projeção de 0° sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm. ....	159
TABELA 30 - Imagem projetada da Fuligem no ângulo de projeção de 0° sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm. ....	160

TABELA 31 - Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	162
TABELA 32 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	163
TABELA 33 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	163
TABELA 34 – Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	163
TABELA 35 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 HZ na Condição I.....	164
TABELA 36 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 HZ na Condição I.....	164
TABELA 37 – Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	164
TABELA 38 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I.....	165
TABELA 39 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na condição I. ....	165

TABELA 40 – Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	167
TABELA 41 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	167
TABELA 42 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	167
TABELA 43 – Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	168
TABELA 44 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 HZ na Condição II. ....	168
TABELA 45 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	168
TABELA 46 – Reconstrução Tomográfica do Radical C <sub>2</sub> em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	169
TABELA 47 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	169
TABELA 48 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II. ....	169

## LISTA DE SÍMBOLOS

AL	abertura efetiva da lente	
$AP_{lida}$	amplitude de Pressão lida no amplificador de carga	$V_{rms}$
$AP_{real}$	amplitude de Pressão corrigida	$V_{rms}$
$C_n$	número de Sutherland	
$De$	Diâmetro equivalente	$m$
f	distância focal	
F	ponto focal entre a lente e o objeto	
F''	ponto focal entre a lente e a imagem	
$\bar{h}^o_{RP}$	entalpia padrão de combustão	$kJ/gmol$
$L_\theta$	tamanho da micro-escala	
$L_f$	comprimento visível da chama	$m$
$L_k$	representa a escala de Kolmogorov	
$L_U$	escala do comprimento integral	$mm$
$m_t$	vazão mássica do fluido	$kg/s$
$M$	massa molar	$kg/kg-mol$
$M_{comb}$	massa molecular do combustível	$kg/gmol$
$M_n$	massa molecular do gás	
$n$	índice de refração do meio	
$n_n$	número de moles do gás	$\% \text{ volumétrica}$
PCI	poder calorífico inferior	$kcal/m^3$
$PCI_{CP}$	poder calorífico inferior da chama piloto	$kJ/kg_{comb}$

PCS	Poder calorífico superior	$kcal/m^3$
Pr	número de Prandtl	
$P_{\text{prin}}$ e $P_{\text{prin}}''$	pontos principais da lente	
$P'$	pressão acústica (pressão média)	
P1	distância do objeto ao ponto principal $P_{\text{prin}}$	
P2	distância da imagem ao ponto principal $P_{\text{prin}}''$	
$\bar{p}$	média de qualquer propriedade do escoamento	
$p(t)$	valor instantâneo de uma propriedade qualquer	
$p'(t)$	flutuação correspondente à diferença entre o valor instantâneo da propriedade $p(t)$ e seu valor médio $\bar{p}$	
Q	taxa de energia instantânea adicionada	
r	posição radial	$mm$
Re	número de Reynolds	
$Re_{\text{BO}}$	número de Reynolds do jato de combustível no blowoff	
$Re_t$	número de Reynolds turbulento	
t	tempo	$s$
T	temperatura	$K$
$\bar{T}$	temperatura média	$K$
$T_{c_n}$	temperatura crítica do gás	$K$
$T_{\text{adiabática}}$	Temperatura adiabática de chama	$K$
V	velocidade de saída média	$m/s$
$v'$	representa as flutuações de velocidade	$m/s$

$\bar{v}_{BO}$	velocidade de blowoff	<i>m/s</i>
$\bar{v}_P$	velocidade do gás reagente da chama piloto	<i>m/s</i>
$\bar{v}_J$	velocidade principal	<i>m/s</i>
$x/D_j$	posição radial e axial na chama	
$[O_2]$	concentração de $O_2$	<i>moles/cm<sup>3</sup></i>
$[N_2]$	concentração de $N_2$	<i>moles/cm<sup>3</sup></i>
$[NO]$	concentração de NO	<i>moles/cm<sup>3</sup></i>
$\beta$	$\frac{n^\circ \text{ de átomos de Oxigênio na reação estequiométrica}}{n^\circ \text{ de átomos de Oxigênio na reação real}}$	
$\Delta H$	tamanho do objeto	
$\Delta H''$	tamanho da imagem	
$\Delta t$	intervalo de tempo	
$\oint$	denota a integração sobre um ciclo de oscilação	
$\xi$	fração de mistura	
$\xi_{\text{estequiométrica}}$	fração de mistura na estequiometria	
$\xi_P$	fração de mistura da chama piloto	
$\xi_S$	fração de mistura estequiométrica do combustível principal	
$\bar{\xi}$	fração de mistura média	
$\xi'$	flutuações na fração de mistura	
$\Sigma \xi \cong \sqrt{2} \frac{\xi'}{Re_t^{1/4}}$		
$\phi_G$	razão de equivalência global	
$\mu$	viscosidade do fluido	<i>kg/m.s</i>

$\mu_o$	viscosidade absoluta a 0 °C	$\times 10^{-6} p$
$\mu_n$	= viscosidade absoluta do gás à temperatura t	
$\sigma$	diâmetro efetivo de colisão entre duas moléculas	$\text{Å}$
$\Omega_\mu$	integral de colisão para a viscosidade	
$\chi \cong \frac{2v\bar{\xi}^{-2}}{L_u}$	representa a taxa de dissipação escalar	$s^{-1}$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CARS	Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy
CFC's	clorofluorcarbonetos
GN	Gás Natural
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IREAT	Infra-Red Emission/Absorption Tomography
<i>LIF</i>	Laser-Induced Fluorescence
LIF	Limite de inflamabilidade inferior
LSF	Limite inflamabilidade superior
PDF	Probability density function
TU Delft	Universidade Técnica de Delft
UHC	Unburned Hydrocarbons
VOC	Volatile Organic Compounds

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### CAPÍTULO 1

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1) CHAMAS DIFUSIVAS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2) COMBUSTÃO PULSANTE.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3) QUEIMADOR DE DELFT.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4) RESULTADOS OBTIDOS NO QUEIMADOR DE DELFT SEM ATUAÇÃO ACÚSTICA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5) GÁS NATURAL.....</b>	<b>20</b>
<b>1.6) POLUENTES GASOSOS ATMOSFÉRICOS.....</b>	<b>26</b>

### CAPÍTULO 2

<b>ESTRUTURA EXPERIMENTAL DO TRABALHO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1) MONTAGEM EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2) DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E ESPECIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.1) Sistema de atuação acústico.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.2) Sistema de posicionamento e monitoramento da chama.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.3) Análise de gases.....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.3.1) Sonda para captação de gases.....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.3.2) Instrumentação para análise dos gases.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2.4) Sistema de medição de temperatura .....</b>	<b>45</b>

<b>2.2.5) Sistema de aquisição de dados .....</b>	<b>47</b>
<b>2.2.6) Tomografia de chama .....</b>	<b>48</b>
<b>2.2.6.1) Quimiluminescência.....</b>	<b>49</b>
<b>2.2.6.2) Análise teórica do sistema óptico .....</b>	<b>52</b>
<b>2.2.6.3) Tomógrafo .....</b>	<b>56</b>
<b>2.2.6.4) Equipamentos constituintes do sistema de análise tomográfica.....</b>	<b>59</b>
<b>2.2.6.5) Algoritmo usado na análise tomográfica .....</b>	<b>63</b>

### **CAPÍTULO 3**

<b>DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1) CÁLCULOS INICIAIS.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.1) Vazões dos Gases de Alimentação.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.1.1) Velocidade do ar secundário e vazão do ar primário .....</b>	<b>67</b>
<b>3.1.1.2) Vazões dos gases da chama piloto (CP).....</b>	<b>68</b>
<b>3.1.2) Cálculo dos Harmônicos no Queimador de Delft.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.3) Cálculo do número de Reynolds para o ar primário e o gás natural nas condições de entrada.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.3.1) Cálculo do número de Reynolds para o ar primário.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.3.2) Cálculo do número de Reynolds para o gás natural.....</b>	<b>75</b>
<b>3.2) DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO.....</b>	<b>77</b>
<b>3.2.1) Verificação experimental dos harmônicos do queimador.....</b>	<b>77</b>
<b>3.2.2) Ponto de “lift” da chama - Definição das condições acústicas de trabalho.....</b>	<b>81</b>
<b>3.2.3) Influência da chama piloto sobre a estabilidade da chama principal.....</b>	<b>84</b>
<b>3.3) CORREÇÕES DAS MEDIDAS NO SISTEMA DE ATUAÇÃO ACÚSTICO.....</b>	<b>87</b>

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGIA, RESULTADOS E COMENTÁRIOS DOS ENSAIOS**

<b>EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>90</b>
<b>4.1) COMPRIMENTO DA CHAMA E POSIÇÕES AXIAIS E RADIAIS PARA VARREDURA DA CHAMA.....</b>	<b>90</b>
<b>4.1.1) Comprimento da chama.....</b>	<b>90</b>
<b>4.1.2) Posições axiais para varredura da chama.....</b>	<b>94</b>
<b>4.2) INTERFERÊNCIAS DO AR SECUNDÁRIO NA CHAMA PRINCIPAL.....</b>	<b>95</b>
<b>4.3) RESULTADOS DA ANÁLISE DOS GASES .....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.1) Análise dos gases na condição I.....</b>	<b>98</b>
<b>4.3.2) Análise dos gases na condição II.....</b>	<b>112</b>
<b>4.3.3) Correções na concentração dos gases para as condições I e II.....</b>	<b>118</b>
<b>4.3.4) Comparação da concentração dos gases para as condições I e II, corrigidos os valores para 3% O<sub>2</sub>.....</b>	<b>123</b>
<b>4.4) CAMPO DE TEMPERATURA PARA AS CONDIÇÕES I E II.....</b>	<b>129</b>
<b>4.5) RESULTADOS DA ANÁLISE TOMOGRÁFICA DE CHAMA.....</b>	<b>134</b>
<b>4.5.1) Intensidades luminosas da chama.....</b>	<b>135</b>
<b>4.5.2) Reconstrução tomográfica da chama.....</b>	<b>145</b>
<b>4.5.2.1) Imagens médias obtidas da chama em escala de cinza.....</b>	<b>145</b>
<b>4.5.2.2) Utilização do algoritmo para reconstrução da chama.....</b>	<b>161</b>

## **CAPÍTULO 5**

<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>171</b>
------------------------	------------

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>176</b>
-------------------------	------------

<b>ANEXO I.....</b>	<b>183</b>
---------------------	------------

**I.1) CÁLCULO DAS VAZÕES DOS GASES DA CHAMA PILOTO.....183**

**ANEXO II.....187**

**II.1). CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O AR PRIMÁRIO E O GÁS  
NATURAL NAS CONDIÇÕES DE ENTRADA.....187**

**II.1.1) Cálculo do número de Reynolds para o ar primário.....187**

**II.1.2) Cálculo do número de Reynolds para o gás natural .....189**

**ANEXO III.....193**

**III.1) MEDIDAS DE FREQUÊNCIA E PRESSÃO ACÚSTICA.....193**

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho utiliza chamas difusivas turbulentas de gás natural atuadas acusticamente em um queimador conhecido como “Queimador de Delft”.

As chamas difusivas turbulentas são empregadas na maioria dos sistemas práticos de combustão, principalmente por propiciar o controle das chamas. Um exemplo a ser destacado são os sistemas de “*flare*” de plataformas marítimas, onde tais chamas têm de resistir a ventos laterais de até 60 km/h, têm de ser capazes de queimar elevadas vazões de gás e também de emitir o mínimo de energia por radiação para a própria plataforma, sendo desejável ainda, que haja baixa emissão de poluentes, como o CO e o NO<sub>x</sub>.

Por outro lado os indícios de que a utilização da combustão pulsante promove redução da emissão de poluentes, maior transferência de calor por convecção e redução dos custos, torna este trabalho bastante atraente do ponto de vista ambiental e econômico.

Outra característica a ser notada neste trabalho, já mencionada, refere-se ao Queimador de Delft, visto que este possui banco de dados disponível com diversos resultados referentes a esta configuração sem atuação acústica, o que permite uma melhor caracterização da situação de queima sem o campo acústico.

Mediante a relevância dos temas supracitados, os subitens apresentam uma breve descrição sobre chamas difusivas turbulentas, combustão pulsante, queimador de Delft e alguns resultados obtidos no queimador de Delft sem atuação acústica.

### 1.1 CHAMAS DIFUSIVAS TURBULENTAS

Chamas difusivas podem ser definidas como aquelas onde ocorre a mistura entre o combustível e o oxidante apenas na zona de reação, ou seja, estes não entram em contato previamente. Na zona de reação os escoamentos de combustível e oxidante

encontram-se em proporção estequiométrica e a combustão ocorre de forma extremamente rápida.

Segundo Turns (1993) um escoamento é denominado turbulento, quando as instabilidades neste não são atenuadas, o campo de vorticidade é aleatório no tempo. Cada ponto no escoamento exibe flutuações randômicas (aleatórias) no tempo. Em escoamentos turbulentos com combustão têm-se também flutuações na temperatura, massa específica e concentrações das espécies formadas. Assim, o escoamento turbulento pode ser caracterizado através da definição da média de uma propriedade em um intervalo de tempo suficientemente grande e da intensidade de flutuação das grandezas envolvidas, respectivamente definidas por:

$$\bar{p} \equiv \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt, \quad . \quad (1)$$

$$p(t) = \bar{p} + p'(t), \quad (2)$$

onde:

- $\bar{p}$  é a média de qualquer propriedade do escoamento (por exemplo velocidade, temperatura, pressão, etc.)
- $\Delta t = t_2 - t_1$  é o intervalo de tempo;
- $p(t)$  é uma propriedade qualquer do escoamento, como, velocidade, temperatura, pressão, etc.;
- $p'(t)$  é a flutuação, correspondente à diferença entre o valor instantâneo da propriedade  $p(t)$  e seu valor médio  $\bar{p}$ .

Existe atualmente uma vasta gama de aplicação das chamas difusivas turbulentas, tipo jato, em diversos setores industriais, como na produção de aço, vidro, produtos químicos, nos incineradores de resíduos hospitalares e industriais, assim

como em sistemas de “*flare*” de plataformas marítimas de extração de petróleo, o que torna a compreensão e otimização da combustão turbulenta essencial e interessante. Segundo Pope (1990), a combustão turbulenta é um dos mais complicados objetos de estudo da física macroscópica moderna.

A combustão turbulenta é caracterizada por uma complexa interação entre as reações químicas e o escoamento turbulento. O escoamento turbulento introduz flutuações, alterando quantitativamente propriedades termoquímicas tais como temperatura, concentrações e taxas de reação. Essas propriedades por sua vez, afetam o escoamento através da variação da massa específica e demais propriedades de transporte da mistura.

Atualmente, o grande desafio da pesquisa em combustão turbulenta é o desenvolvimento de uma teoria quantitativa que faça a previsão da interação entre os processos físicos e químicos. Para que seja validado um modelo teórico é necessário que ele possa ser usado com segurança em aplicações práticas tais como nos projetos de queimadores. Isto é normalmente obtido através da comparação entre os modelos teóricos e os dados experimentais obtidos. Para se realizar análise experimental em combustão turbulenta é necessário que o arranjo experimental seja bem definido e controlado de modo que as condições de contorno não sejam ambíguas e possam ser impostas nas simulações. O queimador de Delft apresenta-se como instrumento que permite satisfazer tais requisitos, visto que possui condições de contorno bem definidas.

Na prática, a maioria dos combustores utiliza escoamento turbulento tendo por objetivo a obtenção de altas taxas de energia de combustão liberada por unidade de volume. A velocidade de queima é limitada pela taxa de mistura dos reagentes, isso porque as reações químicas são tipicamente mais rápidas que a taxa de mistura.

As chamas difusivas são geralmente mais luminosas que as pré-misturadas, pois a presença de fuligem, a qual ocorre com maior incidência do que em chamas difusivas, atribui-lhe uma coloração amarelada. Em contrapartida, chamas azuladas têm menor tendência à formação de fuligem, como é o caso do metano ( $\text{CH}_4$ ), principal componente do gás natural, utilizado neste trabalho.

Whol et al. (1949) realizando experimentos com chamas difusivas, onde foi estudado o efeito da taxa de escoamento de combustível e do diâmetro inicial do jato sobre a altura da chama, concluíram que para uma vazão de combustível baixa (tendo-se portanto escoamento laminar), a altura da chama independe do diâmetro do tubo do jato, dependendo apenas da sua vazão. À medida que é aumentada a vazão e se obtêm chamas turbulentas completamente desenvolvidas, a turbulência passa a influenciar na altura da chama, resultando em chamas mais curtas.

## 1.2 COMBUSTÃO PULSANTE

Zinn (1996) define combustão pulsante como o processo de queima onde pressão, temperatura ou outras variáveis de estado que caracterizam a zona de queima mudam periodicamente com o tempo, ou seja, ocorrem sob condições oscilatórias.

Segundo Tyndall (1970), Higgins em 1777 observou que som era produzido pela queima difusiva de hidrogênio em um tubo aberto na extremidade inferior, a denominada “*singing flame*”, desencadeando o início do estudo sobre combustão pulsante. A “*singing flame*” ocorre pela excitação do modo acústico fundamental do tubo, ou de um de seus harmônicos.

Segundo Rayleigh (1945), Rijke (1859) percebeu que ao colocar uma tela metálica a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de um tubo vertical, aberto em ambas as extremidades, som era produzido pela expansão do ar. Rijke acreditou que a rápida expansão do ar ao passar pela tela, seguida de uma rápida compressão pelo contato com a parede fria do combustor, era o responsável pela produção desse som, concluindo ainda que o escoamento deveria necessariamente utilizar-se da convecção natural, pois o som cessava quando o tubo era colocado na horizontal. Porém, não conseguiu explicar o porque não havia a produção de som quando a tela era colocada a  $\frac{3}{4}$  do tubo e o porque segundo Tyndall (1970), Sondhaus (1850) produziu som usando um tubo aberto em apenas uma das extremidades, sem utilizar-se da convecção natural.

Como foi descrito por Rayleigh (1945), paralelamente, Bosscha e Riess (1859), ao passar ar aquecido por uma tela refrigerada a  $\frac{3}{4}$  de um tubo aberto na extremidade inferior, obtiveram oscilações acústicas.

Segundo Zinn (1986) e Carvalho et al.(1989) é possível pela geometria de alguns combustores, obter oscilação acústica através do próprio processo de combustão, como é o caso de Rijke e de Bosscha e Riess, mas esses combustores são operacionalmente instáveis, pois as instabilidades acústicas ocorrem apenas em algumas condições específicas, restringindo sua operação. Assim, segundo Botura (1998) podem ser utilizados processos onde a oscilação acústica é obtida por meio de atuadores externos, como alto-falantes, os quais poderão amplificar ou atenuar o sinal acústico

A ocorrência da amplificação ou atenuação do sinal acústico pela adição de calor pode ser definida pelo “critério de Rayleigh”, cuja forma matemática foi desenvolvida por Putnam e Dennis (1953), estabelecendo que ocorrerá amplificação na oscilação de pressão somente quando:

$$\oint Q P' dt > 0 \quad (3)$$

onde:

- Q é a taxa de energia instantânea adicionada;
- P' é a pressão acústica (pressão média);
- t é o tempo;
- $\oint$  denota a integração sobre um ciclo de oscilação.

Esta integral também foi obtida através das equações de conservação por Chu (1956), representando o aumento da energia total após cada ciclo de oscilação para um aquecedor plano.

Em seu critério, Rayleigh (1945), diz que ocorre uma amplificação da oscilação de pressão quando energia térmica é adicionada ao processo de combustão no instante de máxima compressão, ou retirado calor no momento de máxima rarefação e o contrário denota atenuação na oscilação de pressão. Esta é uma condição necessária mas não suficiente, pois não explica o mecanismo responsável pelo surgimento das oscilações.

Os problemas ambientais (redução da espessura da camada de ozônio, chuva ácida, efeito estufa, etc.), aliados à necessidade de economia de combustível e à escassez de energia elétrica, levam ao desenvolvimento de novas tecnologias e de novas formas de obtenção de energia que minimizem a emissão de poluentes e reduzam os custos de investimento. A combustão pulsante tem se mostrado como uma possibilidade para conciliar tais fatores em dispositivos que utilizam a combustão como fonte de energia térmica.

Segundo Carvalho et al. (1987) a combustão pulsante possui algumas vantagens sobre o processo de combustão convencional, pois se obtém uma melhor mistura entre combustível e oxidante, havendo uma redução na quantidade de combustível utilizada, uma diminuição nas emissões de poluentes, aumento nas taxas de transferência de calor convectiva e conseqüentemente, uma redução nos custos de investimento.

Segundo Chao e Jeng. (1992), a excitação acústica altera substancialmente as características da chama, como por exemplo, pode melhorar a estabilidade de uma chama suspensa “*lifted flame*”.

Em seus trabalhos com chama difusiva livre Bastos (2001) conseguiu estender o limite de “*blowout*” em mais de 25% e em algumas condições específicas de trabalho, obteve uma chama azul, onde outrora era amarela, devido a uma melhor taxa de mistura entre combustível e oxidante, diminuindo as quantidades de fuligem geradas.

Lacava et al. (1999), através do processo de tomografia em chamas pulsadas, observou que, com o aumento da amplitude, as pulsações acústicas promovem uma compactação na chama, enquanto que o aumento da frequência pouco altera o comprimento da chama; entretanto, há uma dispersão da região de intensidade luminosa, as quais caracterizam as reações químicas, que passam a se desenvolver ao

longo de toda a região de recirculação, e não somente em uma estreita faixa, demonstrando a sensibilidade da estrutura da chama às oscilações.

Ferreira (2001) estudou a influência da atuação acústica sobre a linha de pré-mistura do queimador para chamas confinadas. Verificou-se que em chamas predominantemente difusivas (16 a 25% de pré-mistura), não houve muita alteração na emissão de  $\text{NO}_x$  com a atuação acústica, mas as emissões para chamas difusivas foram um pouco menores que para as pré-misturadas com ou sem atuação. Para  $\beta=0,9$  e  $\beta=1,0$  em chamas difusivas, há redução de CO.

Amplitudes elevadas desfavoreceram a mistura entre combustível e oxidante, dispersando parte do desenvolvimento das reações das proximidades do queimador, conseqüentemente tem-se uma combustão incompleta com aumento nas emissões de CO e diminuição nas de  $\text{NO}_x$ . Notou-se ainda pela análise tomográfica que em chamas parcialmente pré-misturadas (50 e 60% de pré-mistura), para  $\beta = 0,9$  e  $\beta = 1,0$ , com e sem atuação, não houve presença de fuligem; entretanto, em chamas difusivas (15 e 25% de pré-mistura), a presença da fuligem foi reduzida pela presença do campo acústico, isso devido à melhor taxa de mistura entre os reagentes.

Em chamas difusivas, segundo Glassman (1987) há sempre uma extensa variação da razão de equivalência, variando de mistura muito rica à mistura muito pobre, o que possibilita a ocorrência de combustão rica com temperaturas elevadas, favorecendo a formação de fuligem nesse tipo de chama.

### 1.3 QUEIMADOR DE DELFT

O sistema de combustão a ser utilizado neste trabalho é conhecido como queimador de Delft, "*Piloted Jet Burner*". Ele é do tipo jato com chama piloto e tem como base o queimador utilizado por Starner e Bilger (1985), tendo sido caracterizado por diversos grupos de pesquisa em combustão que utilizam esta configuração em seus estudos, como a Sydney University, a Sandia's Combustion Research Facility, em

Livermore, CA, a General Electric, em Schenectady, NY, a TUDelft e no Brasil o INPE, em Cachoeira Paulista/SP em trabalho desenvolvido por Andraus (2003).

O queimador produz um escoamento parabólico e usa chamas pré-misturadas para estabilizar o jato principal na saída do queimador (chama piloto). Nele são utilizados jatos co-correntes e possui condições de contorno simples, o que é fundamental para a redução das características complexas do escoamento, como a turbulência, a formação de poluentes, a cinética química, a radiação térmica, etc. Quando não há possibilidade da medição direta das condições de contorno iniciais, assume-se escoamento laminar para os gases da chama piloto e escoamento turbulento completamente desenvolvido para o escoamento do jato de combustível principal.

O queimador de Delft produz um jato axissimétrico turbulento centrado em um anel rodeado pelas chamas piloto. O jato de combustível é rodeado por dois escoamentos de ar (ar primário e secundário) concêntricos. Existem dois mecanismos de estabilização para a chama principal, que são respectivamente: as chamas piloto e a zona de recirculação que se estabelece entre o combustível e a saída do ar primário.

A chama principal utiliza como combustível o gás natural, queimando difusivamente com o ar primário, enquanto na chama piloto tem-se como combustível uma mistura de acetileno / hidrogênio e como oxidante o ar.

A chama piloto pode ser facilmente contabilizada; equivale a 1% da potência da chama principal e a razão C/H desta é a mesma da chama principal, não tendo notável influência sobre a composição da chama.

A simplicidade do escoamento e a existência de uma região turbulenta completamente desenvolvida onde os efeitos da cinética química são significativos, fazem deste queimador, ideal para a realização de testes e desenvolvimento de modelos computacionais.

Uma descrição detalhada do arranjo experimental é realizada no item 2.1 deste trabalho.

## 1.4 RESULTADOS OBTIDOS NO QUEIMADOR DE DELFT SEM ATUAÇÃO ACÚSTICA

Masri et al. (1996) recomendam que a geometria de um queimador para estudos de chamas turbulentas sem pré-mistura não deve apresentar condições de contorno complexas, permitindo simplificar as características do escoamento (estrutura turbulenta, cinética química, radiação térmica, formação de poluentes, entre outras), características estas inerentes ao queimador de Delft. Ao realizarem caracterizações neste queimador, levaram em consideração o efeito da turbulência sobre as reações químicas na chama, dividindo assim as chamas em duas classes:

- a) Chamas que estão longe do “*Blowoff*”, onde se admite ocorrerem reações químicas rápidas.
- b) Chamas que se aproximam da extinção (“*Blowoff*”), onde os efeitos da cinética química se tornam significativos.

As chamas do tipo (a) não estão em equilíbrio. Mesmo estando longe da extinção, a concentração do radical OH permanece em equilíbrio, até mesmo em tempos de residência relativamente longos. Os picos de temperatura e a fração mássica das espécies estáveis desviam um pouco dos valores de equilíbrio. Em chamas onde se tem como combustível o  $H_2$ , esse desvio é menos significativo do que em chamas de hidrocarbonetos, mas existem, principalmente para o OH (e possivelmente outros radicais que ainda não foram quantificados experimentalmente). A diferença entre a difusão das espécies e entre as difusividades de calor e de massa aumentam ainda mais o desvio das composições de equilíbrio calculadas para uma mistura de gases. Quanto maior a diferença de difusividade das espécies constituintes da mistura do combustível, como por exemplo, o  $H_2$  e  $CO_2$ , mais significativos serão esses efeitos.

Segundo Smith et al. (1992), os efeitos das diferenças de difusão sobre a estrutura das chamas são menos significativos em chamas turbulentas difusivas com altos números de Reynolds.

Na tentativa de se estudar a estrutura espacial de chamas difusivas turbulentas alguns resultados foram obtidos. Imagens de muitos radicais reativos como o CH, OH e  $C_2$  tem sido publicados e gradualmente as medidas vão se tornando quantitativas. Para o OH, por exemplo, os cálculos para correção da extinção da chama são aproximados para chama laminar como função da temperatura o que pode ser seguido para outras espécies de radicais.

Masri et al. (1996) verificaram que o perfil do radical hidroxila é estreito na região a jusante da chama, mas parece tornar-se mais largo próximo à extremidade superior da chama e isto ocorre para todas as chamas, independente do tipo de combustível. Imagens bidimensionais de jatos não reativos e controlados, usando hipótese de equilíbrio químico estável, foram utilizados para produzir imagens dos escoamentos e revelaram características similares na região acima da chama.

Isto foi confirmado por Clemens e Paul (1995) através de imagens de OH obtidas em chamas difusivas turbulentas de hidrogênio. Entretanto, para as regiões mais distantes da chama há contradições nas discussões dos pesquisadores e Bilger (1976) sustenta que as zonas maiores de reação permanecem nessa região.

Imagens de  $C_2$  e CH mostram perfis estreitos, os quais ocorrem geralmente em regiões de mistura rica na chama. A largura destes perfis não parece variar muito com a distância à jusante da base da chama, como foi previsto para a estrutura de uma chama laminar. Acredita-se que o OH possui um perfil mais largo do que se acredita atualmente e tem também um tempo de vida longo, tolerando temperaturas abaixo de 800 K. Radicais como o CH e  $C_2$ , que tem tempo de vida curto, estão restritos às zonas de reação rica com altas temperaturas, em chamas de hidrocarbonetos. Imagens combinadas de CH e OH dão boas indicações do que ocorre na zona de reação, principalmente para misturas ricas.

Para chamas do tipo (b), os picos de fração mássica de CO e  $H_2$  são geralmente maiores que os das chamas laminares em equilíbrio (estáveis), cujas magnitudes dependem do tipo da mistura do combustível. Para as chamas de  $CH_4$  a porcentagem de CO é de 100% maior que os picos obtidos em queimadores com chama piloto e em

queimadores com chama estabilizada em “*bluff-body*”. A pressão local e a mistura turbulenta impedem a oxidação do CO a CO<sub>2</sub>.

Imagens simultâneas do OH e da temperatura em jatos de queimadores com chama piloto, utilizando-se combustíveis de hidrocarbonetos, realizando-se ajuste de velocidade do nível mais baixo até próximo à extinção da chama, revelam que a espessura do perfil de OH permanece quase constante com o acréscimo da taxa de mistura turbulenta. Isto ocorre também com os cálculos efetuados para as chamas laminares.

Segundo Masri et al. (1996) a extinção da chama ocorre somente na região à jusante da região de estabilização, onde a interação entre a turbulência e a química é alta.

Masri et al. (1996) obtiveram vários resultados para diferentes tipos de chama, como pode ser verificado nas Tabelas 1 e 2. Os autores estudaram chamas com fração de mistura variando de 0,055 a 0,353. O número de Reynolds para o “*blowoff*”,  $Re_{BO}$ , é baseado no diâmetro do jato de combustível principal,  $D_j$ , e a fração de mistura da chama piloto,  $\xi_p$ , é geralmente equivalente à fração de mistura estequiométrica do combustível principal, exceto onde se deixou ficar pouco rica para evitar o superaquecimento do queimador.

Na tabela 1:

- $\xi_s$  é a fração de mistura estequiométrica do combustível principal,
- $\bar{v}_{BO}$  é a velocidade de “*blowoff*”,
- $Re_{BO}$  é o número de Reynolds do jato de combustível no “*blowoff*”,
- $L_f$  é o comprimento visível da chama,
- $\xi_p$  é a fração de mistura da chama piloto
- $\bar{v}_p$  é a velocidade do gás reagente da chama piloto.

Em chamas que estão longe do “*blowoff*”, o uso de uma abordagem escalar onde se assume que a temperatura e a fração mássica das espécies maiores são função apenas da fração de mistura, sem levar em consideração a estrutura espacial nem a espessura da zona de reação, tem sido bastante útil. Isto evidencia o fato da combustão ser um fenômeno local e depender da composição estável local da mistura.

Tabela 1 - Características de algumas chamas estudadas no queimador de Delft (FONTE: Masri et al., 1996)

<b>Combustível Principal</b>									
<b>Composição volumétrica do combustível</b>						$\xi_S$	$\bar{v}_{BO}$ (m/s)	$Re_{BO}$	$L_f$ (m)
<b>Chama</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ar</b>				
PF 01	100					0,055	68	29500	1,3-1,5
PF 09	5	15	23,5	56,5		0,37	92	38900	0,45-0,55
PF 10	10	16,2		73,8		0,37	50	21000	0,44-0,55
PF 11	2		38	60		0,47			
PF 12	5		35	60		0,42			
PF 13	7		26,5	66,5		0,42			
PF 15	33,3			66,7		0,208			
PF 16	25			75		0,267			
PF 17	33,3				66,7	0,254			
PF 18	25				75	0,353			
<b>Chamas Piloto</b>									
<b>Composição Volumétrica das Chamas piloto</b>						$\xi_P$	$\bar{v}_P$ (m/s)		
<b>Chama</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>		<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ar</b>			
PF 01	4,3		13,0			87,3	0,055	3,0	
PF 09			6,2	18,5	16,6	58,7	0,37	1,0	
PF 10			6,2	18,5	16,6	58,7	0,37	1,0	
PF 11	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 12	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 13	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 15	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 16	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 17	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	
PF 18	4,3		13,0			83,7	0,055	3,0	

A Tabela 2 mostra as medidas e estimativas de medidas escalares de vários parâmetros, realizadas em algumas condições para as chamas PF 09 e PF 10 com misturas de combustíveis  $\text{CH}_4 - \text{CO} - \text{H}_2 - \text{N}_2$ .

Na tabela 2:

- $\bar{v}_J$ , representa a velocidade do jato de combustível;
- $\bar{v}_{\text{BO}}$ , representa a velocidade de blowoff;
- $x / D_J$ , representa a posição radial e axial na chama;
- $\bar{T}$ , representa a temperatura média;
- $\bar{\xi}$ , representa a fração de mistura média;
- $\xi'$ , representa as flutuações na fração de mistura;
- $v'$ , representa as flutuações de velocidade;
- $L_U$ , representa a escala do comprimento integral, sendo:

$L_U = L_k / (\text{Re}_t^{3/4})$ , onde,  $L_k$  representa a escala de Kolmogorov, definido por:

$L_k = L_\theta \cdot \text{Pr}^{3/4}$ , onde  $L_\theta$  é o tamanho da micro-escala e “Pr” é o número de Prandtl

- $\text{Re}_t$ , representa o número de Reynolds turbulento;
- $\Sigma \xi \cong \sqrt{2} \frac{\xi'}{\text{Re}_t^{1/4}}$ ;
- $\chi \cong \frac{2\nu \bar{\xi}^{-2}}{L_u}$ , representa a taxa de dissipação escalar.

Tabela 2 - Medidas e estimativas escalares de diferentes chamas no queimador de Delft. (FONTE: Masri et al., 1996)

Chama	$\bar{v}_J$ (m/s)	$\frac{\bar{v}_J}{\bar{v}_{BO}}$	$\frac{x}{D_J}$	$\frac{r}{R}$	$\bar{T}$ (K)	$\bar{\xi}$	$\xi'$	$v'$ (m/s)	$L_U$ (mm)	$Re_t$	$\Sigma \xi$	$\chi$ (s <sup>-1</sup> )
PF 09	61,4	0,67	15	1,67	1292	0,440	0,165	8,0	5,8	259	0,058	75
PF 09	73,7	0,80	15	1,67	1186	0,410	0,162					
PF 09	81,9	0,89	15	1,67	900	0,354	0,164					
PF 09	81,9	0,89	15	1,94	850	0,258	0,147					
PF 09	86,0	0,94	15	1,67	701	0,305	0,147					
PF 09	90,0	0,98	15	1,67	536	0,270	0,137	12,0	6,0	1714	0,030	76
PF 10	32,7	0,65	15	1,67	1296	0,489	0,166	4,0	5,0	111	0,072	44
PF 10	40,9	0,82	15	1,67	1081	0,441	0,184					
PF 10	45,0	0,90	15	1,67	940	0,399	0,183					
PF 10	49,1	0,98	15	1,67	808	0,373	0,184	5,7	5,4	366	0,060	72

Em outro experimento, Nooren et al. (2000), utilizando o queimador de Delft, obtiveram medidas de temperatura, concentração de espécies e dos radicais OH e NO, e a fração da mistura, utilizando-se das técnicas de medida *Raman-Rayleigh-LIF*, em chamas turbulentas difusivas, tipo jato, de gás natural.

Em seus trabalhos Nooren et al. (2000) analisou dois tipos de chamas, diferenciadas entre si pelas condições de entrada, denominadas respectivamente, chama III e chama IV de Delft, vistas na Tabela 3. A vazão do ar secundário foi mantida constante em 0,3 m/s, para ambos tipos de chama. Nessa tabela,  $V$  é a velocidade de saída média,  $T$  é a temperatura e  $Re$  é o número de Reynolds.

O gás natural comercial utilizado naquele trabalho, proveniente da Califórnia, local onde foram realizados os experimentos, foi diluído com nitrogênio, para assemelhar-se à composição do gás natural holandês, utilizado na chama de Delft, como pode ser visto na Tabela 4, onde  $\xi_{\text{estequiométrica}}$  é a fração de mistura na estequiometria. A chama piloto foi alimentada com acetileno / hidrogênio / ar, pré-

misturados, com  $\beta$  de 1,4. A taxa C/H foi a mesma do gás natural e o calor liberado das chama piloto foi em torno de 1% da potência térmica total da chama III e IV.

Tabela 3 - Condições de entrada para as chamas III e IV de Delft (FONTE: Nooren, 2000)

		<b>Chama III</b>	<b>Chama IV</b>
Jato de Combustível (G.N.)	$V_{\text{combustível}}$ (m/s)	21,9	21,9
	$T_{\text{combustível}}$ (K)	295	295
	$Re_{\text{combustível}}$	9700	9700
Jato de Ar Primário	$V_{\text{ar primário}}$ (m/s)	4,4	8,0
	$T_{\text{ar primário}}$ (K)	295	295
	$Re_{\text{ar primário}}$	8800	16000
	Comprimento da chama (m)	0,85	0,70

Tabela 4 - Composição média do G.N. comercial da Califórnia e da Holanda (FONTE: Nooren, 2000)

	<b>G.N. da Califórnia</b>	<b>G.N. da Califórnia (diluído com N<sub>2</sub>)</b>	<b>G. N. da Holanda</b>
CH <sub>4</sub>	94,7	81,7	81,3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,5	3,0	2,9
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	0,1	0,1	0,6
N <sub>2</sub>	1,0	14,6	14,3
CO <sub>2</sub>	0,7	0,6	0,9
$T_{\text{adiabática}}$ (K)	2247	2216	2216
$\xi_{\text{estequiométrica}}$	0,057	0,071	0,071

Alguns resultados do trabalho de Nooren et al. (2000) são apresentados a seguir nas Figuras 1, 2, 3 e 4. A Figura 1 apresenta o perfil da concentração de OH, enquanto a Figura 2 mostra o efeito da correção da interferência dos efeitos da fluorescência dos hidrocarbonetos pesados. A Figura 3 apresenta uma comparação de medidas de temperatura obtidas com várias técnicas. Nesta última figura, os símbolos representam:

temperatura média obtida por CARS (Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy); temperatura média obtida por Reynolds-averaged Raman-Rayleigh; temperatura média obtida por Favre-averaged Raman Rayleigh. Esses mesmos símbolos vazados representam o desvio padrão da temperatura.

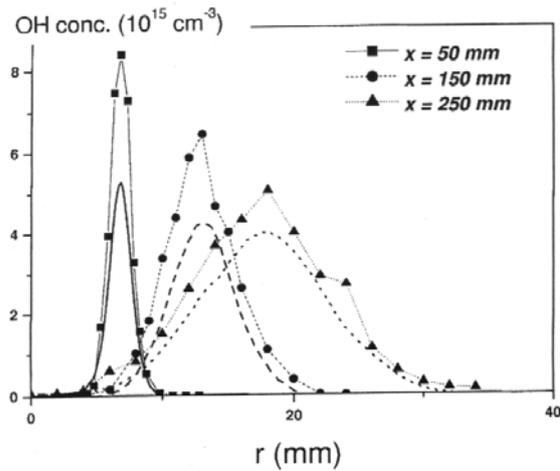


Figura 1 - Comparação de medidas da concentração de OH ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ) na Chama III Os dados *Raman-Rayleigh-LIF* são apresentados com linhas tracejadas, as linhas cheias são os perfis apresentados por Peeters et al. (1994). (FONTE: Nooren et al., 2000).

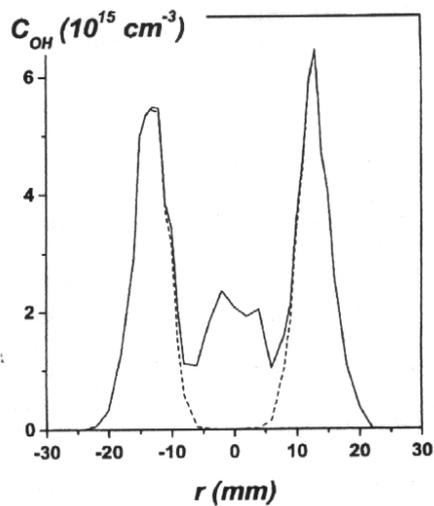


Figura 2 – Efeito da correção da interferência da fluorescência sobre a concentração média de OH a  $x = 150\text{mm}$  na chama III (FONTE: Nooren et al., 2000).

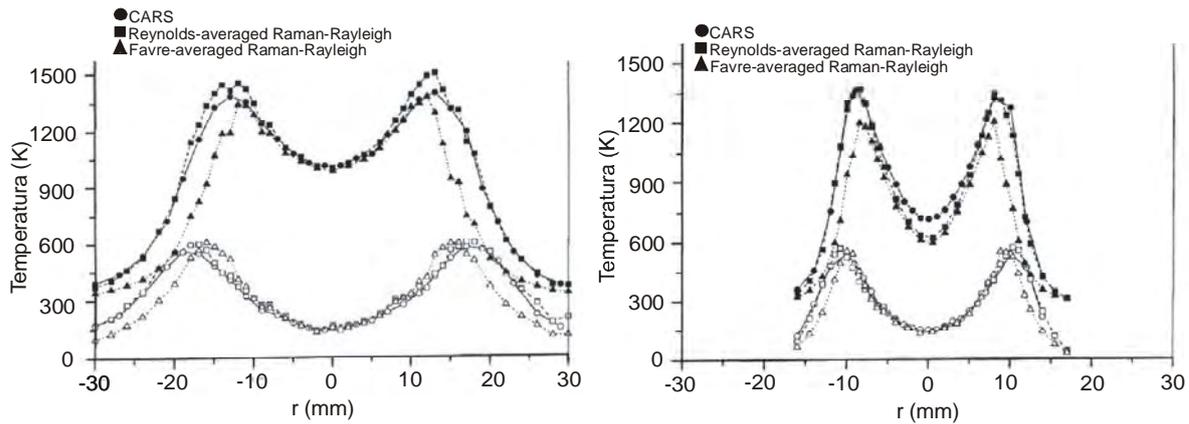


Figura 3 – Comparação de medidas de temperatura a  $x = 200$  mm (esquerda) e a  $100$  mm (direita) na chama III, onde a linha cheia representa a temperatura média e a tracejada o desvio padrão da temperatura (FONTE: Nooren et al., 2000).

O uso da técnica de Raman em chamas de gás natural mostra-se interessante devido aos altos níveis de interferência da fluorescência, os quais foram identificados e excluídos, sendo corrigidos através de correlações empíricas entre os sinais de Raman e os sinais com interferência, sendo este procedimento adequado à maioria das espécies. Entretanto, nos sinais de Raman para o CO não foi possível remover a interferência, pois não foi encontrada nenhuma aproximação empírica. Isto também influenciou os sinais de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> na chama III. A concentração destas espécies é determinada usando aproximações alternativas. Devido às interferências fluorescentes, o método *Raman-Rayleigh-LIF* tem certas limitações, como por exemplo, a ausência de medidas de CO e O<sub>2</sub> na chama III. Os perfis de temperatura média e flutuações de temperatura são os mesmos, quando comparado ao método CARS, realizado na chama III. Quanto à concentração de OH, os resultados obtidos são semelhantes aos dados existentes unidimensionais de *LIF*.

A Figura 4 mostra os sinais de interferência com relação a fração de mistura ( $\xi$ ) e a posição radial ( $r$ ).

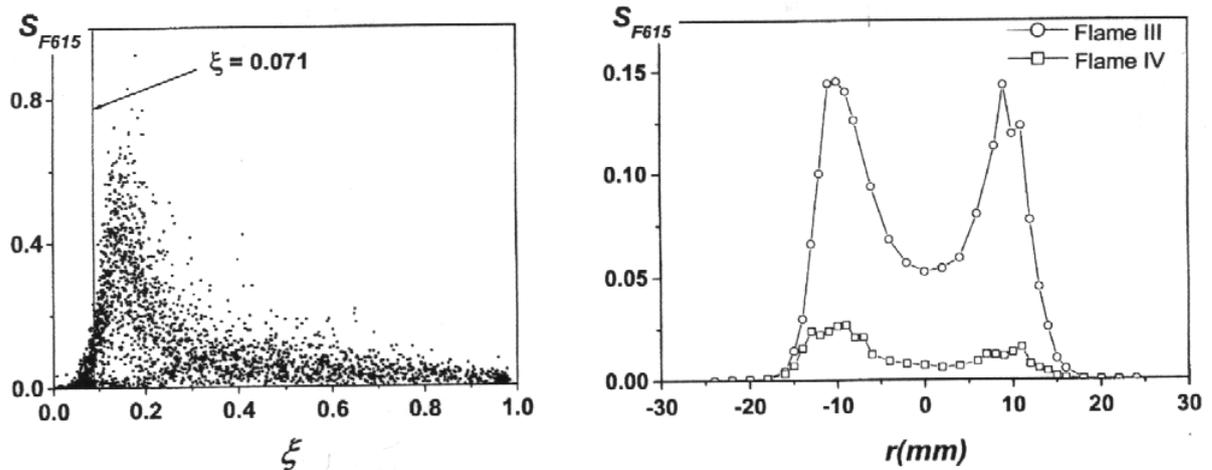


Figura 4 – *Esquerda*: Resultados dos sinais de interferência, mostrados através da dispersão dos pontos a 615 nm ( $S_{F615}$ ) versus fração de mistura em  $x=50$  mm na chama III. A linha vertical mostra a posição da fração estequiométrica da mistura  $\xi = 0,071$ . *Direita*: Perfis radiais do sinal da interferência fluorescente a 615 nm em  $x=150$  mm nas chamas III e IV (FONTE: Nooren et al., 2000).

Van den Bercken, (1998), caracterizou o queimador de Delft, através de investigação experimental e numérica através de simulações PDF e Monte Carlo. Obteve dados experimentais de temperatura e de fração volumétrica da fuligem e adicionalmente a pressão parcial do vapor de água e acetileno ( $C_2H_2$ ), através de tomografia por absorção da emissão no infravermelho (IREAT – Infra-Red Emission/Absorption Tomography), variando o comprimento de onda. Para validar os dados, usou uma sonda de sucção para retirar amostras de gás da chama para obtenção da fração volumétrica da fuligem, tendo sido retirada a água da amostra. Os dados experimentais foram utilizados em simulações numéricas para verificar a relação entre a fuligem e a transferência de calor por radiação. Obteve também medidas de temperatura, através de termopar de fio fino e através de CARS. Estudou ainda a influência da turbulência sobre os resultados obtidos, verificando que as medidas de absorção são pouco influenciadas e que a influência sobre a emissão é considerável e dependente do comprimento de onda, havendo grande diferença de temperatura para comprimentos de onda menores.

Os resultados mostraram que a temperatura relativa à fuligem, medida através da tomografia, é muito maior que a obtida por termopares. Qualitativamente, os vários

perfis estudados foram semelhantes aos resultados obtidos por simulação PDF (Probability density function).

Andraus (2003), utilizando um queimador com as mesmas dimensões do queimador de Delft (o mesmo usado neste trabalho), analisou as características de uma chama difusiva turbulenta de gás natural, com intuito de investigar a formação de  $\text{NO}_x$ . Obteve o perfil de temperatura através de termopar de fio fino, através de anemômetro de fio quente o perfil de velocidade, através de análise ótica com câmeras CCD's e posterior tratamento tomográfico, verificou a presença dos radicais  $\text{C}_2$ , CH, CN e obteve ainda o perfil da composição dos gases da exaustão para estudo das regiões de formação de  $\text{NO}_x$  térmico e imediato.

Através de diferentes combinações de combustível e ar, verificou que as luminosidades dos radicais CH e  $\text{C}_2$  possuem grande similaridade com o perfil de temperatura.

Com relação à concentração de NO, esta é máxima na zona de reação onde se tem temperaturas mais altas e a mais alta concentração de radicais. Em condições de queima pobre, ou seja, com excesso de oxidante, o radical CN pode ser utilizado como indicador do perfil de NO, pois quando não se observa a presença do radical CN, a concentração de  $\text{NO}_x$  deixa de variar indicando que menor quantidade de NO é produzida. Próximo à estequiometria notou que, com a adição de um hidrocarboneto insaturado na zona de reação foi possível erradicar o CN.

## 1.5 GÁS NATURAL

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos tanto em terra quanto no mar, acumulado em rochas porosas, podendo ser encontrado juntamente com petróleo (gás associado), ou sozinho (gás não associado). É um combustível fóssil, obtido pela degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, pela degradação da matéria orgânica e do carvão por temperatura e pressão elevada, ou pela alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

A matéria orgânica fóssil é também chamada de querogêneo e pode ser de dois tipos: querogêneo seco, proveniente de matéria vegetal, e o querogêneo gorduroso, proveniente de algas e matéria animal.

No processo de formação do planeta, a transformação da matéria orgânica vegetal, celulose e lignina, produziu o querogêneo seco, que ao alcançar maiores profundidades na crosta terrestre sofreu um processo gradual de cozimento, transformando-se em linhito, carvão negro, antracito, xisto carbonífero e metano, dando origem às reservas de carvão do planeta.

Já o querogêneo gorduroso não sofreu o processo de cozimento e deu origem ao petróleo. Nos últimos estágios de degradação deste, o petróleo apresenta-se como condensado volátil associado a hidrocarbonetos gasosos com predominância do metano, é esta a razão de se encontrar o gás natural associado. Assim o gás natural bruto é uma mistura variada de hidrocarbonetos, cujo principal componente é o metano ( $\text{CH}_4$ ). O gás natural não associado apresenta maiores teores de metano, enquanto que o associado apresenta maiores porcentagens de etano, propano, butano e outros hidrocarbonetos mais pesados.

O gás natural não tem cor e é inodoro, sendo adicionado de compostos de enxofre para se detectar vazamentos. Não se trata, portanto, de um produto derivado do petróleo, mas sim de formação semelhante.

Enquanto as reservas mundiais de petróleo se concentram no Oriente Médio (ver Figura 5), as reservas de gás natural estão mais distribuídas ao redor do mundo como se pode ver nas Figuras 6 e 7. Isso permite que se tenha acesso ao gás natural em diversas fontes diferentes, garantindo um mercado competitivo, com reservas diversificadas e pouco dependentes de crises internacionais e políticas, com estabilidade de preços e garantia de fornecimento, mesmo mediante conflitos políticos.

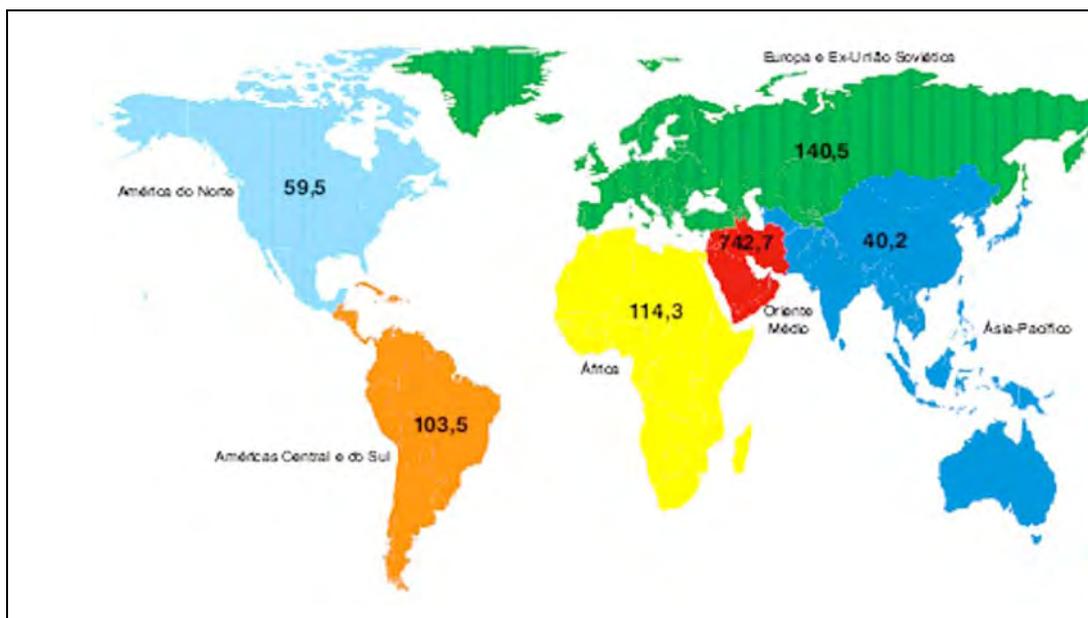


Figura 5 - Reservas provadas de petróleo, segundo regiões geográficas, 2005 (bilhões b).(FONTE: ANP/SDP; BP Amoco, Tabela 1.1).

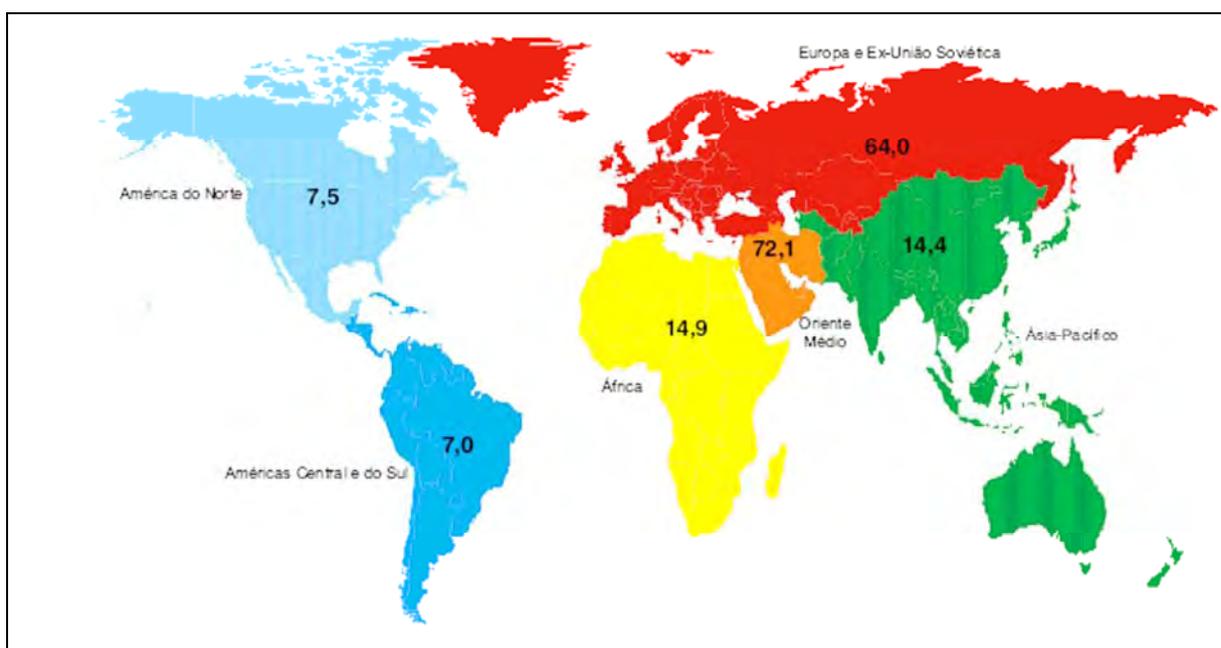


Figura 6 – Reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas, 2005 (trilhões m³).(FONTE: ANP/SDP; BP Amoco, Tabela 1.5).

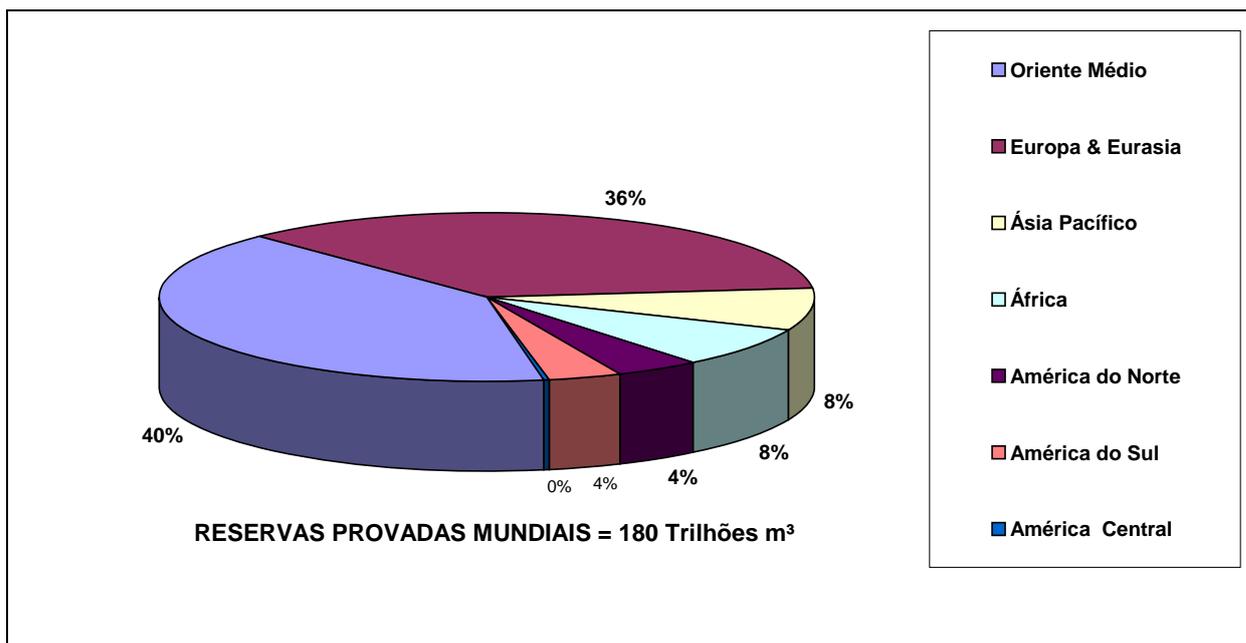


Figura 7 – Distribuição percentual das reservas mundiais de gás natural.(FONTE: BP Statistical Review of World Energy 2005).

A Figura 8 mostra um panorama das reservas brasileiras de gás natural, segundo unidades da Federação, tanto em terra quanto em mar.

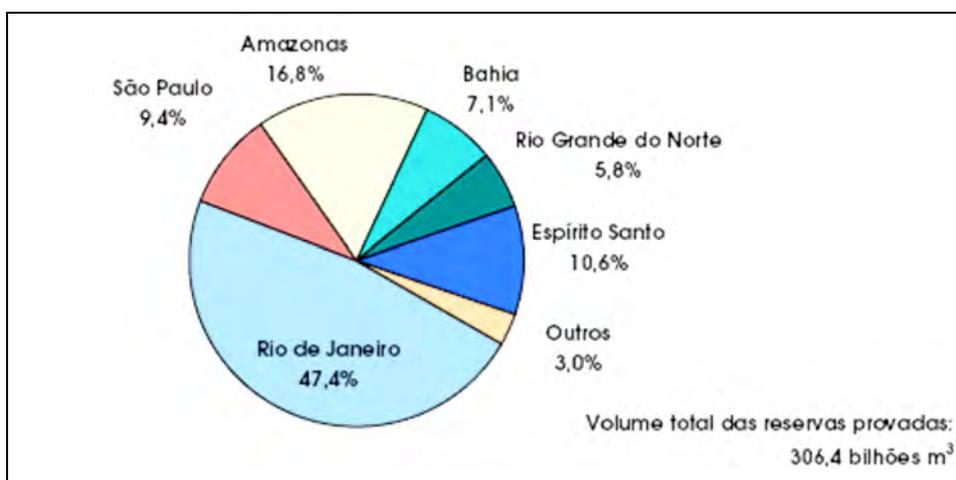


Figura 8 – Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas, 2005.(FONTE: ANP/SDP, Tabela 2.4).

Com relação ao aspecto de segurança, pode-se destacar que possui massa específica menor que a do ar, o que facilita sua dispersão para a atmosfera e para que

ele se inflame é necessário que seja submetido a uma temperatura superior à 620 °C (o álcool se inflama a 200 °C e a gasolina a 300 °C). Ele ainda não provoca asfixia, ou seja, ele não se acumula nas camadas inferiores, pois se dissipa para a atmosfera.

Quanto à toxicidade, o gás natural não é quimicamente tóxico se inalado ou ingerido acidentalmente, pois ao contrário do CO que se combina com a hemoglobina ocupando o lugar do oxigênio, transportando-o do pulmão para todo o organismo, causando falência dos sistemas, o gás natural é inerte no corpo humano.

Observando-se a Tabela 5 pode-se verificar que seu limite de inflamabilidade inferior é alto, ou seja, para se atingir as condições de auto-sustentação da combustão se faz necessário uma quantidade significativa de combustível em relação à quantidade total de ar em um ambiente e como este é menos denso que o ar, se dissipa rapidamente. Observa-se ainda que a faixa entre os limites de inflamabilidade superior e inferior é estreita, significando que mesmo que o limite de inflamabilidade inferior seja atingido em um ambiente interno e se inicie a combustão, sua auto-sustentação é logo perdida, pois rapidamente se atinge o limite de inflamabilidade superior e o gás natural se torna diluente do ar.

Dos combustíveis utilizados atualmente, o gás natural é um dos mais ecológicos, pois reduz bastante a emissão de poluentes em relação à queima de outros combustíveis. Sua queima é limpa, praticamente isenta de resíduos tóxicos como o SO<sub>2</sub>, sua redução é de até 98%. Possui menores emissões de CO, de hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, e uma grande redução de NO<sub>x</sub>, além de formar pouca fuligem.

A Tabela 5 apresenta algumas propriedades do gás natural utilizado neste trabalho, o qual é proveniente da Bacia de Campos/RJ.

Tabela 5 – Propriedades químicas e físicas do gás natural da Bacia de Campos/RJ (FONTE: COMGAS/BR)

<b>Composição Química do Gás Natural (% volumétrica)</b>	
Metano (CH <sub>4</sub> )	89,44 %
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	6,7 %
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2,26 %
Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0,31 %
Iso-Butano (iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0,15 %
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,8 %
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0,34 %

<b>Propriedades Físico-Químicas do Gás Natural</b>	
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,741
Densidade	0,624
Poder calorífico inferior (PCI)	8283 kcal/m <sup>3</sup>
Poder calorífico superior (PCS)	9400 kcal/m <sup>3</sup>
Massa Molecular Aparente	17,367 g/mol
Velocidade de Chama (H <sub>2</sub> =346)	49,4 cm/seg
Limite inflamabilidade superior (LSF)	14,9 (% gás no ar)
Limite de inflamabilidade inferior (LIF)	4,8 (% gás no ar)
Relação Gás / Ar	1 / 9,96 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )

As especificações do gás para consumo são ditadas pelo Regulamento Técnico ANP N° 3/2002, anexo à Portaria N° 104, de 8 de julho de 2002, emitida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). O gás natural, de origem nacional ou importada, comercializado no Brasil é classificado por região geográfica conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações técnicas para o gás natural no Brasil.

Especificação do Gás Natural <sup>(1)</sup>							
Característica	Unidade	Limite <sup>(2)(3)</sup>			Método		
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste, Centro-Oeste	ASTM	ISO	
Poder calorífico superior <sup>(4)</sup>	kJ/ m <sup>3</sup>	34.000 a 38.400		35.000 a 42.000		D3588	6976
	kWh/m <sup>3</sup>	9,47 a 10,67		9,72 a 11,67			
Índice de Wobbe <sup>(5)</sup>	kJ/m <sup>3</sup>	40.500 a 45.000		46.500 a 52.500		-	6976
Metano, mín.	% vol.	68,0		86,0		D1945	6974
Etano, máx.	% vol.	12,0		10,0			
Propano, máx.	% vol.	3,0					
Butano e mais pesados, máx.	% vol.	1,5					
Oxigênio, máx.	% vol.	0,8		0,5			
Inertes (N <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> ), máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0			
Nitrogênio	% vol.	Anotar		2,0			
Enxofre Total, máx.	mg/m <sup>3</sup>	70				D5504	6326-2 6326-5
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S), máx. <sup>(6)</sup>	mg/m <sup>3</sup>	10,0	15,0	10,0		D5504	6326-2 6326-5
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	°C	-39	-39	-45		D5454	-

## Observações:

- (1) O gás natural deve estar tecnicamente isento, ou seja, não deve haver traços visíveis de partículas sólidas e partículas líquidas.
- (2) Limites especificados são valores referidos a 293,15 K (20 °C) e 101,325 kPa (1 atm) em base seca, exceto ponto de orvalho.
- (3) Os limites para a região Norte se destinam às diversas aplicações exceto veicular e para esse uso específico devem ser atendidos os limites equivalentes à região Nordeste.
- (4) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15 K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.
- (5) O índice de Wobbe é calculado empregando o Poder Calorífico Superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do Poder Calorífico Superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado pela fórmula constante do Regulamento Técnico.
- (6) O gás odorizado não deve apresentar teor de enxofre total superior a 70 mg/m<sup>3</sup>.

## 1.6 POLUENTES GASOSOS ATMOSFÉRICOS

A necessidade de controle e redução dos poluentes atmosféricos se torna cada vez mais relevante no cenário mundial. Estudos recentes desenvolvidos por Scholze et al. (2007) mostram que as grandes florestas do mundo e principalmente a Amazônia, serão seriamente perturbadas se o aquecimento global não for contido. Um cenário extremamente grave virá à tona se a temperatura global subir mais 3°C por ano, em

média, até 2100. Assim, o impacto sobre a Terra, se nada for feito, estaria garantido por pelo menos mais 200 anos. Até 88% dos biomas, que ocupam juntos mais de 5% da superfície terrestre, seriam afetados. No caso dos biomas que ocupam mais de 10% do planeta, 13% dessa área seria transformada. Está nessa lista boa parte das grandes florestas tropicais do mundo. Além da região amazônica, os ecossistemas asiáticos também seriam diminuídos.

Os poluentes gasosos atmosféricos sob regulamentação são o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e os hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, designados por UHC (Unburned Hydrocarbons).

As emissões de NO<sub>x</sub> e de SO<sub>2</sub> contribuem para a formação da chuva ácida, pois na presença da umidade do ar e do ozônio das baixas camadas, reagem formando HNO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A chuva ácida (pH menor ou igual a 5,5) libera do solo metais tóxicos (como Zn, Pb, Cu, Cd, e Hg). Esses metais podem alcançar rios, ser ingeridos pelo homem e causar sérios problemas à saúde. Além dos problemas ambientais, o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ataca as partes metálicas dos equipamentos, podendo causar altas taxas de corrosão.

O enxofre é encontrado na maioria dos combustíveis líquidos usados atualmente, principalmente em frações pesadas da destilação do petróleo e em carvões minerais. Neste trabalho foi utilizado o gás natural como combustível, o qual depois de processado não possui enxofre em sua composição. Entretanto compostos de enxofre em pequenas quantidades lhes é adicionado para a detecção de vazamentos.

Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa são o CO<sub>2</sub> (encontrado em maior quantidade), juntamente com CO, o metano e os CFC's (clorofluorcarbonetos).

O efeito estufa é um processo que ocorre quando uma parcela dos raios infravermelhos refletidos pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como consequência disso, a temperatura da Terra fica retida e não é liberada ao espaço, permanecendo maior do que seria na ausência desses gases. O efeito estufa dentro de uma determinada faixa é de vital importância pois, sem ele, a vida como a conhecemos não existiria.

Embora esse fenômeno seja uma característica natural, a ação do homem tem aumentado demasiadamente a concentração desses gases na atmosfera, principalmente

a partir da década de 80, fazendo com que a temperatura da Terra aumente de forma excessiva. Segundo estudos do IPCC (“Intergovernmental Panel on Climate Change”), a temperatura da Terra aumentou entre 0,3 a 0,6 graus Celsius nos últimos 100 anos.

As moléculas dos hidrocarbonetos reagindo com oxigênio se quebram formando CO, que posteriormente se oxida a CO<sub>2</sub>. O processo de oxidação é bastante lento, salvo se houver H<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O presentes, pois CO reage mais rapidamente com OH do que com O ou O<sub>2</sub>. Esse processo pode ser visto pelo mecanismo a seguir (Glassman,1987): a primeira reação (4) é lenta, resultando em baixa taxa de formação de CO<sub>2</sub>, sendo este formado em sua maior parte na terceira reação (6). As reações (7) e (8) correspondem à presença de H<sub>2</sub> em quantidade considerável. Se tivermos alta pressão e na presença de HO<sub>2</sub> ocorrerá a reação (10).



A oxidação do CO a CO<sub>2</sub>, assim como a formação de UHC, são dependentes da taxa de mistura entre oxidante e combustível e do tempo de residência suficiente dentro do combustor e ambos possuem o mesmo comportamento com relação à sua emissão e à taxa de reação.

NO<sub>x</sub> é o termo que designa a soma NO + NO<sub>2</sub>. Embora no processo de combustão haja maior emissão de NO que NO<sub>2</sub>, ao entrar em contato com a atmosfera há a oxidação do NO a NO<sub>2</sub>, segundo Lacava (2000). A emissão do NO e do NO<sub>2</sub> está associada às altas temperaturas; portanto, torna-se necessário evitar picos de temperatura, como o que ocorre em misturas estequiométricas.

Segundo Lyons (1982), em uma combustão onde haja um excesso de oxidante, se ocorrer uma melhor mistura entre os reagentes, haverá redução na formação de NO<sub>x</sub>.

Dos poluentes atmosféricos, o  $\text{NO}_x$  é aquele que de forma direta apresenta menores riscos à saúde. No entanto, o  $\text{NO}_x$  é o precursor principal da formação de “smog” fotoquímico. “Smog” é uma névoa marrom amarelada que aparece primariamente sobre áreas urbanas em dias ensolarados. Os componentes do “smog” incluem  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , componentes orgânicos voláteis (“*Volatile Organic Compounds - VOC*”),  $\text{SO}_2$ , aerossóis, e material particulado. Esta mistura resulta a partir da reação entre poluentes atmosféricos sob forte luz solar. O “smog” ocorre primordialmente em meses de verão, quando há muita luz do sol e as temperaturas são maiores. Em quantidade, o “smog” ameaça as pessoas, os animais e as plantas. O poluente atmosférico predominante no smog ao nível do solo, encontrado em áreas urbanas é o ozônio ( $\text{O}_3$ ).

O  $\text{NO}_x$  pode ser formado por três mecanismos distintos:

- Mecanismo de Zeldovich ( $\text{NO}_x$  térmico), predominante em altas temperaturas (acima de  $1500^\circ\text{C}$ ), formado pela oxidação do  $\text{N}_2$  atmosférico e numa faixa ampla de razões de equivalência, formado principalmente na região de pós-chama, ou seja, depois de ocorrer a oxidação completa do combustível, por ser uma reação mais lenta do que o processo de combustão. Este mecanismo é constituído das seguintes reações, segundo Hayhurst et al (1980):



Segundo Westenberg (1971), pode-se estimar a taxa de formação do NO térmico, demonstrando a importância da temperatura na sua formação, através da equação:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 6.10^{10} T^{-1/2} \cdot \exp(-69090/T) \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot [\text{N}_2] \quad (14)$$

onde:

$t$  = tempo (s)

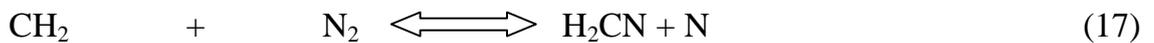
$T$  = temperatura (K)

$[O_2]$  = concentração de  $O_2$  (moles/cm<sup>3</sup>)

$[N_2]$  = concentração de  $N_2$  (moles/cm<sup>3</sup>)

$[NO]$  = concentração de NO (moles/cm<sup>3</sup>)

- $NO_x$  imediato (“*prompt*”  $NO_x$ ), cujo mecanismo foi proposto por Fenimore (1971), ver Figura 9. Ele se origina de forma mais rápida que o térmico, formado na região de frente de chama, a partir de radicais de hidrocarbonetos que não foram totalmente consumidos, principalmente CH e  $CH_2$ , segundo Blauwens et al. (1977) provenientes do combustível, com nitrogênio atmosférico, para formar NO, cujas principais reações do mecanismo se encontram na seqüência:



O HCN é então convertido em N através das seguintes etapas:



Então o N se converte em NO seguindo os mecanismos:



O NO térmico representa mais de 70% de todo o NO formado, exceto quando se tem combustão rica (excesso de combustível), quando se tem maior formação de NO “prompt”, segundo Lacava (2000).

- $\text{NO}_x$  do combustível, resultante da oxidação do nitrogênio existente no combustível, que em geral é quebrado em radicais de menor peso molecular como o HCN, CN,  $\text{NH}_2$ , NH e N, que posteriormente se converte em NO, por reações que ocorrem no mecanismo proposto por Fenimore, apresentado por Glarborg (1993), como mostra a Figura 9.

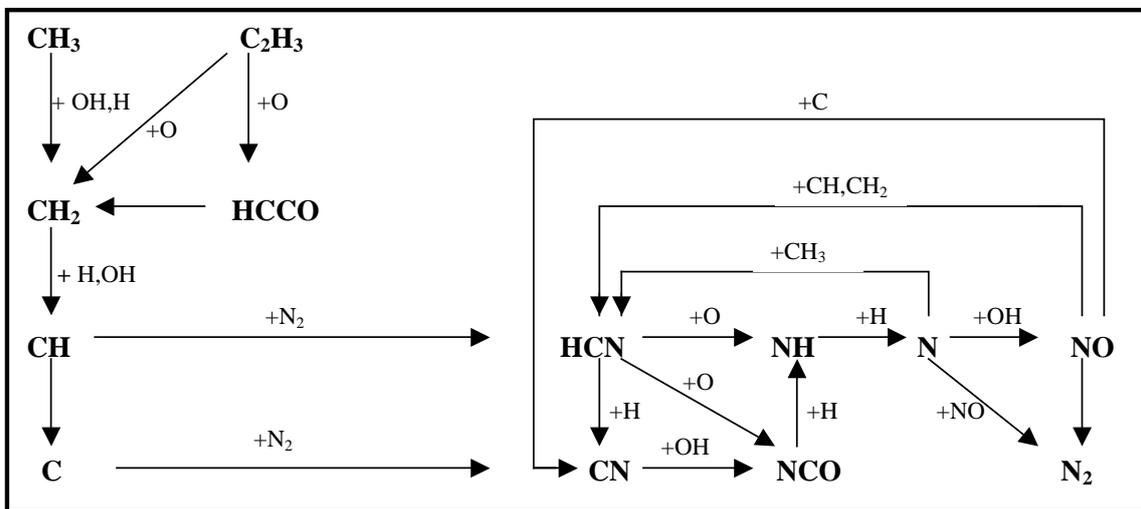


Figura 9 - Mecanismo de Fenimore (FONTE: Glarborg, 1993).

Pela Figura 10, nota-se que com a variação da razão de equivalência, tendo-se como objetivo a diminuição das emissões de CO, pode-se obter um aumento nas emissões de  $\text{NO}_x$ , isso porque o NO térmico depende da relação entre a temperatura e a razão de equivalência. Assim se torna necessário combater essas emissões juntamente.

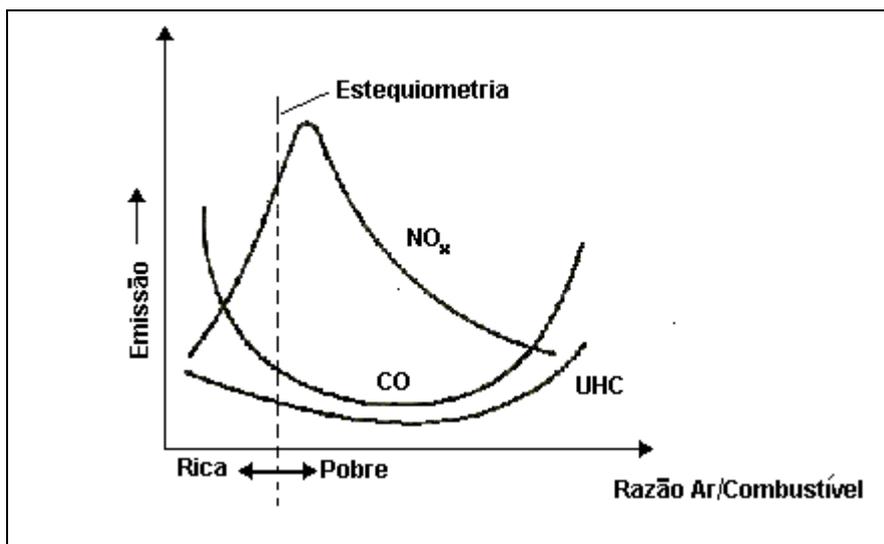


Figura 10 – Emissão de poluentes em função da razão de equivalência. (FONTE: Lefebvre, 1983)

Os hidrocarbonetos não queimados (UHC) podem ser definidos como aqueles que são emitidos na atmosfera sem que tenham sido oxidados totalmente, ou os resultantes da degradação térmica de hidrocarbonetos de maior peso molecular naqueles de menor peso, segundo Lefebvre (1983). Normalmente, sua emissão está associada à mistura entre combustível/oxidante e ao tempo de residência na câmara de combustão, seu comportamento e as atitudes relacionadas ao seu controle, são próximos aos tomados com relação às emissões de CO.

A emissão de fuligem está diretamente ligada à falta de oxigênio e a taxa de mistura entre combustível e oxidante. Está associada às reações de craqueamento dos hidrocarbonetos, reações que em fase gasosa geram núcleos condensados sólidos que competem com o mecanismo de oxidação, ocorrendo mais significativamente em misturas ricas e elevada temperatura, segundo Williams (1976).

## CAPÍTULO 2 ESTRUTURA EXPERIMENTAL DO TRABALHO

Este capítulo apresenta os dispositivos referentes a toda a estrutura experimental utilizada neste trabalho. Apresenta inicialmente a montagem experimental do queimador e posteriormente faz uma descrição dos métodos usados para a realização de medidas na região de chama, bem como dos equipamentos necessários e especificações técnicas.

### 2.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Como mencionado anteriormente, neste trabalho utilizou-se uma instalação com a mesma configuração da instalação desenvolvida e caracterizada na Universidade Técnica de Delft (TUDelft, Holanda), caracterizada também pela Sandia National Laboratories (EUA) e pela Universidade de Sydney (Austrália).

Esta configuração é conhecida como queimador de Delft e tem sido utilizada como configuração padrão para comparação de dados experimentais e de modelos teóricos desenvolvidos. A Figura 11 apresenta o esquema do queimador de Delft, utilizado pelas Instituições descritas acima. A montagem experimental original do queimador utilizada neste trabalho encontra-se no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Cachoeira Paulista, instituição esta que mantém convênio de pesquisa com a UNESP, Campus de Guaratinguetá / SP. Tal instalação pode ser vista na Figura 12 e mostra: (a) detalhe da saída do queimador, (b) esquema da estrutura experimental e (c) fotografia desta montagem.

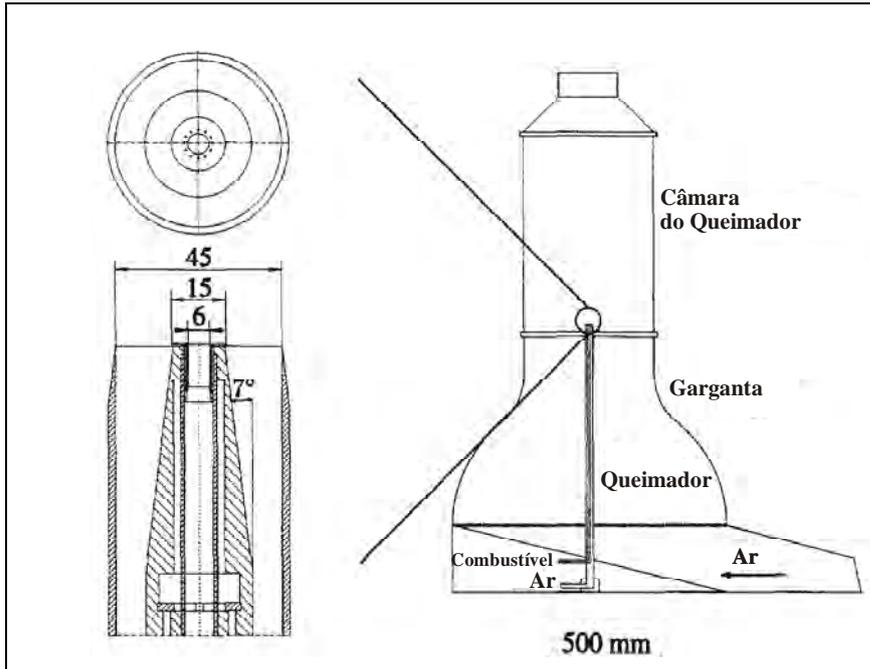


Figura 11–Esquema da saída do Queimador de Delft (à esquerda) e da estrutura experimental, composta pela garganta e câmara que circundam o queimador (FONTE: Van den Bercken, 1998).

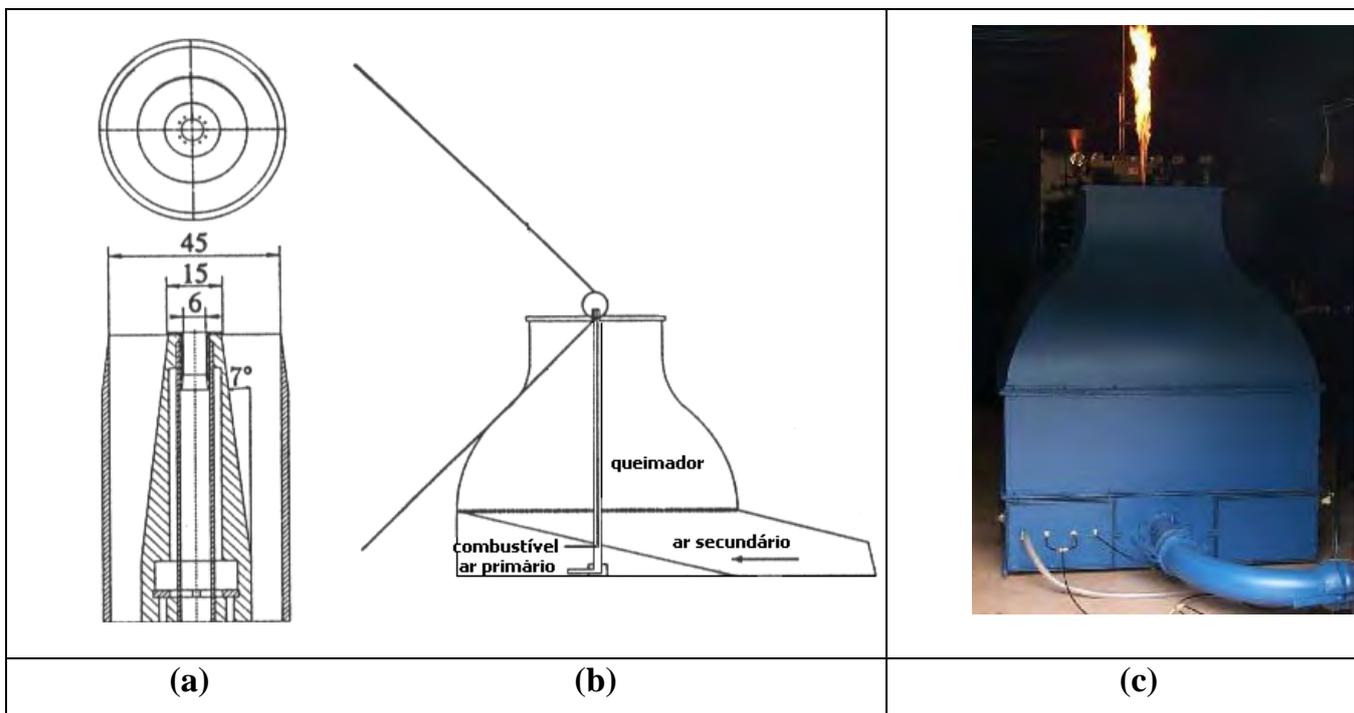


Figura 12 – Queimador de Delft original do LCP /INPE, (a) saída do queimador; (b) montagem experimental e (c) fotografia da montagem.

Observa-se que a configuração original do queimador de Delft, possui a câmara do queimador, que foi omitida do projeto desenvolvido no LCP / INPE, pois os testes experimentais utilizados em trabalhos realizados neste queimador, necessitavam de acesso direto à chama, o que seria inviabilizado pela câmara do queimador.

Este trabalho se propõe a utilizar a combustão pulsante no queimador de Delft, através da excitação acústica do ar primário. Desta forma, foi construído um queimador idêntico ao de Delft, tendo sido realizado neste, pequenas alterações para adição do sistema acústico. Tal modificação refere-se, como mencionado, à linha de ar primário que sofreu acréscimo em seu comprimento e na qual foram instalados o alto-falante, responsável pela excitação acústica do ar, e a câmara de desacoplamento, dispositivo este que simula tubo aberto para a atmosfera e permite a injeção do ar. Ainda referente às modificações no queimador original, instalou-se um transdutor de pressão e um medidor de temperatura PT 100, instalado na câmara de desacoplamento e construiu-se uma estrutura para acesso à chama. Um esquema da montagem experimental com as alterações realizadas pode ser visto na Figura 13 (a) e a fotografia desta é mostrada na Figura 13 (b), enquanto a Figura 13 (c) apresenta um detalhe da saída do queimador, com a chama piloto acesa.

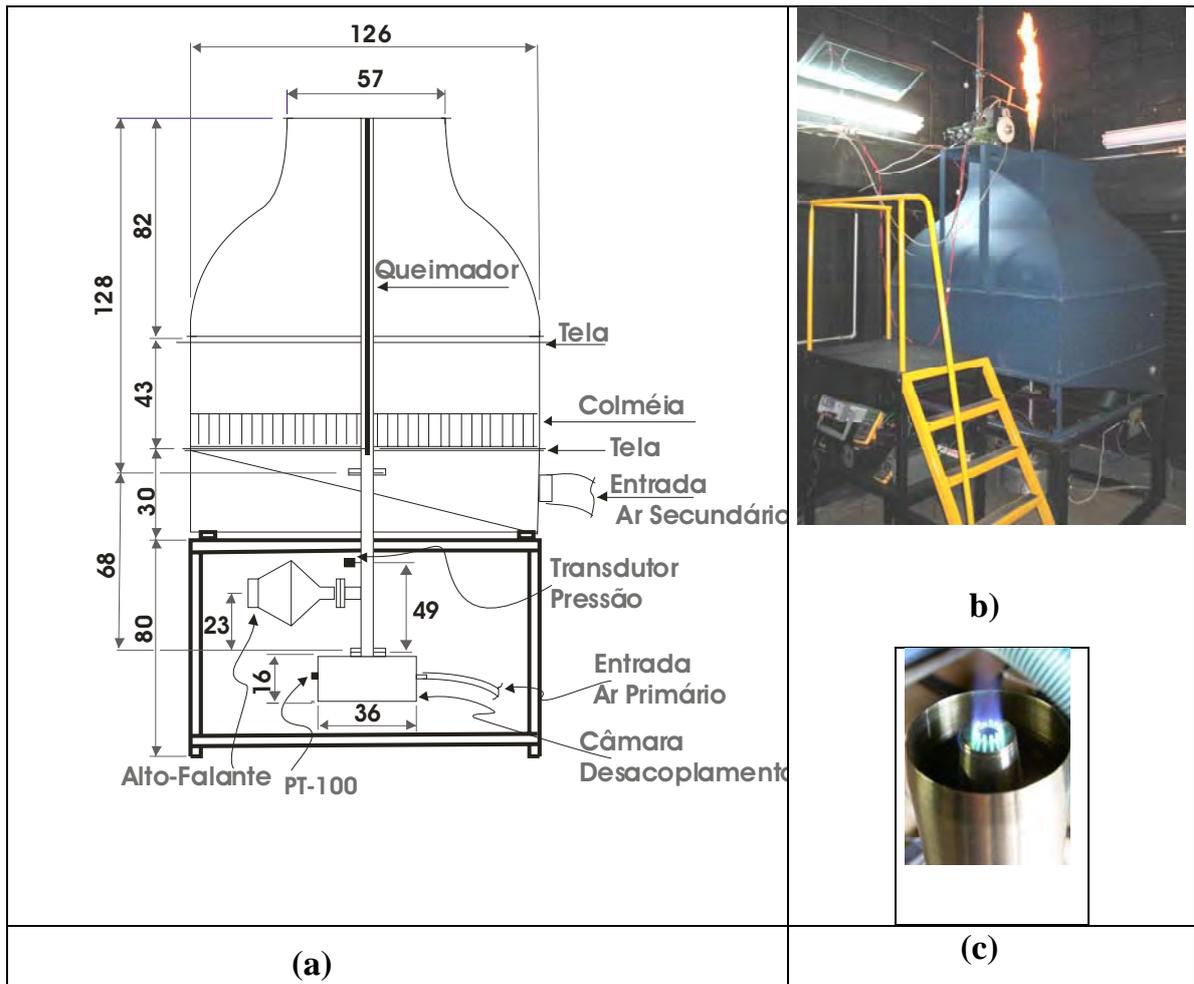


Figura 13 – Instalação Experimental do Queimador alterada para inclusão de sistema acústico: (a) esquema, (b) fotografia e (c) detalhe da saída do queimador, com a chama piloto acesa.

De uma forma geral, abaixo se encontram descritas as alterações realizadas no queimador de Delft, conforme Figura 13 (a) para a inclusão do sistema acústico:

- Comprimento do tubo por onde flui o ar primário, de diâmetro 45 mm, foi adicionado em 68 cm, através de flange, sendo fixado na parte inferior deste, também através de flange, a câmara de desacoplamento e perpendicular ao tubo, o alto-falante.
- Câmara de desacoplamento com diâmetro interno de 35 cm e altura de 16 cm, foi adicionada e nesta foi colocada uma mangueira de  $\frac{3}{4}$ ", a 8 cm de sua base, para a entrada de ar primário no arranjo experimental.

- O alto-falante foi instalado através de flanges, em posição estratégica, a qual permite obter a maior amplitude de pressão possível no ar acusticamente excitado, tendo sido colocado a 23 cm da extremidade superior da câmara de desacoplamento.
- Todo o aparato experimental foi elevado a 75 cm do chão, através de vigas em U, soldadas, formando uma estrutura para suportar o peso de todo o arranjo. Foi também colocado um posicionador central para o queimador na parte inferior da montagem, entre o transdutor de pressão e o alto-falante.
- Transdutor de pressão, colocado um a  $\frac{1}{4}$  do comprimento do tubo de 45 cm, ou seja, a 49 cm da extremidade superior da câmara de desacoplamento, posição escolhida pela facilidade de acesso e por corresponder ao segundo harmônico do tubo, possibilitando a medição das frequências naturais do queimador. O local onde foi fixado o transdutor de pressão foi cuidadosamente calculado, de acordo com trabalho desenvolvido por Flügel (2006). Este transdutor é responsável pela conversão do sinal de pressão acústico em sinal elétrico.
- PT 100, com escala de 0 a 100 °C, para se obter a temperatura do ar na câmara de desacoplamento, colocado a 8 cm de sua base. A monitoração desta temperatura se torna necessária para o cálculo dos harmônicos no queimador.
- Construção de estrutura com vigas em U (escada), tubos em aço inox (corrimão), perfis retangulares de aço 1010 e chapa anti-derrapante (plataforma) para acesso à chama com segurança para a realização dos testes experimentais, conforme mostra a Figura 13 (b).

## 2.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E ESPECIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS

Este item apresenta a metodologia e equipamentos utilizados no sistema operacional. Inicialmente apresenta o sistema utilizado para a geração do campo acústico a ser aplicado na chama e posteriormente, o sistema de posicionamento, necessário à varredura axial e radial da chama o equipamento usado para monitorar a chama. A seguir mostra a metodologia utilizada nos testes experimentais, bem como a descrição e especificações dos equipamentos usados neste trabalho, referentes à análise na região de chama, dos gases e da temperatura, assim como para a realização de tomografia de chama.

### 2.2.1 Sistema de atuação acústica

Neste trabalho é aplicado um campo acústico diretamente sobre o ar primário do sistema operacional. O esquema do sistema de atuação acústica, responsável pela oscilação da chama, pode ser visto na Figura 14. A fonte do campo acústico é o alto-falante Snake, modelo ESX 125 de 12”, com impedância nominal de 8 ohms e 400W de potência, responsável pela excitação acústica do ar, suportando uma tensão de 30V, monitorada por multímetro Minipa MS60. O sinal eletrônico responsável pela forma da onda (senoidal) e pela frequência é gerado em um gerador de funções Agilent 33120A, com amplitude de 1,4 Vrms (1,98 V de pico). Antes de ser injetado no circuito do alto-falante, o sinal eletrônico passa por um amplificador Advanced XT550.

Para se verificar a amplitude de pressão do ar excitado, colocou-se um transdutor piezoelétrico Kistler 7261, que converte o sinal de pressão acústica em sinal elétrico. Esse sinal proveniente do transdutor passa por um amplificador de carga Kistler 5006, sendo na seqüência lido em multímetro Minipa 2082.

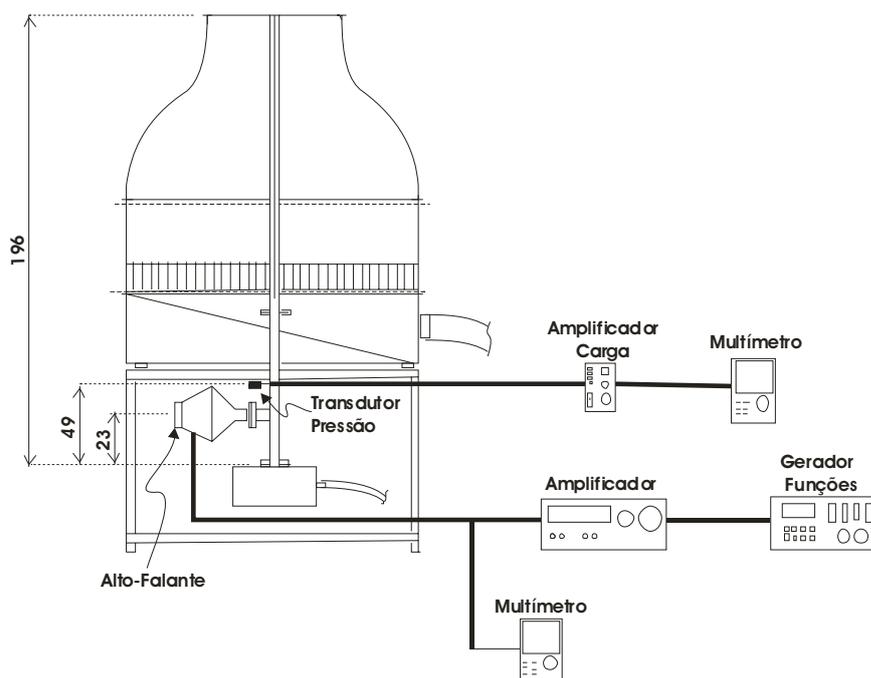


Figura 14 – Esquema do Sistema de Atuação Acústica.

### 2.2.2 Sistema de posicionamento e monitoramento da chama

O sistema de posicionamento permite que sejam feitas medidas tanto na direção axial quanto radial da chama. A este sistema podem ser acoplados os medidores de gases e de temperatura, possibilitando a varredura da chama, característica fundamental para a realização deste trabalho. Uma descrição detalhada dos pontos de varredura será apresentada no item 4.1.2.

A combinação de um conjunto de dispositivos, formado por uma mesa de coordenadas, uma escala vertical e barra metálica (Graminho), resultou no sistema de posicionamento, que permite leituras de até 1/10 mm tanto nas variações axiais quanto radiais. A Figura 15 (a) mostra uma visão frontal do sistema de posicionamento (mesa de coordenadas e parte da escala vertical e barra metálica) e (b) mostra a visão lateral do sistema de posicionamento.

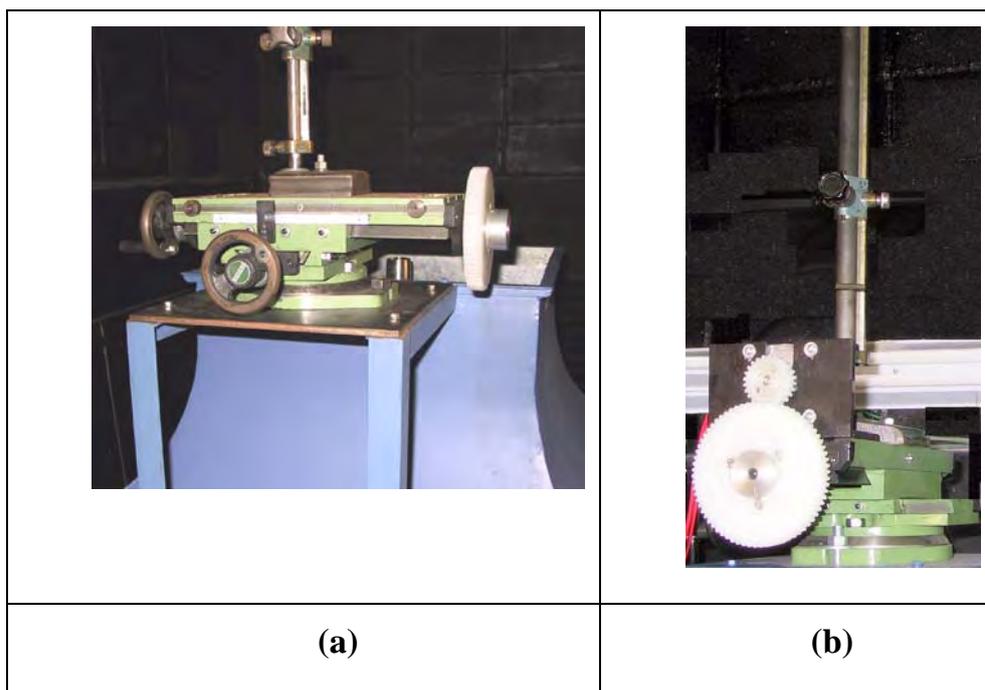


Figura 15 – Sistema de Posicionamento (a) visão frontal, (b) visão lateral.

Para movimentar o sistema de posicionamento foi utilizado um dispositivo mecânico, com comando através de micro computador, composto por um motor de passo, Step Syn, Modelo: 103814–5242, DC: 2,5 V, 4,6 A, com 1.8 graus/ passo, um programa desenvolvido para este fim específico e um circuito eletrônico para interface de controle de motor de passo. O programa para controle do motor de passo, existente no LCP / INPE, foi desenvolvido em linguagem de programação Borland C++.

A fim de monitorar a chama, visto que o sistema de aquisição de dados está fixado em local distante do queimador, foi utilizado um dispositivo de visualização composto de mini câmera e aparelho de TV, sendo indispensável sua utilização, pois uma possível extinção da chama poderia gerar riscos de explosão.

### 2.2.3 Análise de gases

#### 2.2.3.1 Sonda para captação de gases

Neste trabalho foi utilizada uma sonda refrigerada para a realização da análise dos gases na região de chama. Por esta metodologia constituir método intrusivo, no desenvolvimento de seu projeto, levaram-se em consideração as possíveis influências dinâmicas, químicas e térmicas sobre o escoamento reativo, com o intuito de se minimizar tais efeitos.

A introdução de uma sonda em um escoamento, causa uma perturbação fluido-dinâmica (altera a distribuição de pressão estática), mas isto ocorre principalmente em escoamentos com baixa velocidade ou escoamentos com “*swirl*”. Neste trabalho, tem-se escoamento turbulento, o que constitui portanto, um pré-requisito para minimização de erros.

Segundo Bilger (1976), para minimizar a perturbação fluido-dinâmica da sonda, a distância entre a extremidade e o corpo da sonda deve ser de no mínimo, sete vezes o diâmetro da mesma e o ângulo de sua extremidade superior tem de ser pequeno o suficiente para não distorcer a chama e a amostra de gás.

Outro fator que deve ser considerado é o material com que foi construída a sonda, pois as características catalíticas de alguns metais poderão causar erros significativos na medida da temperatura e da concentração das espécies químicas segundo Bowman (1977). Apesar da atividade catalítica ocorrer em sondas metálicas, foi observada sua ocorrência também em sondas de quartzo, conforme Collins e Downs (1975) e de sílica de acordo com Allen (1975).

Levando em consideração todas estas observações e a viabilidade econômica, optou-se por construir a sonda, com as mesmas dimensões da sonda existente no LCP/INPE, utilizada no trabalho de Andraus (2003), seu esquema pode ser visto na Figura 16.

A sonda foi construída em aço inoxidável 304 com canais isolados para refrigeração, sendo este último requisito necessário para cessar as reações químicas dos gases succionados e para manter as características mecânicas desta.

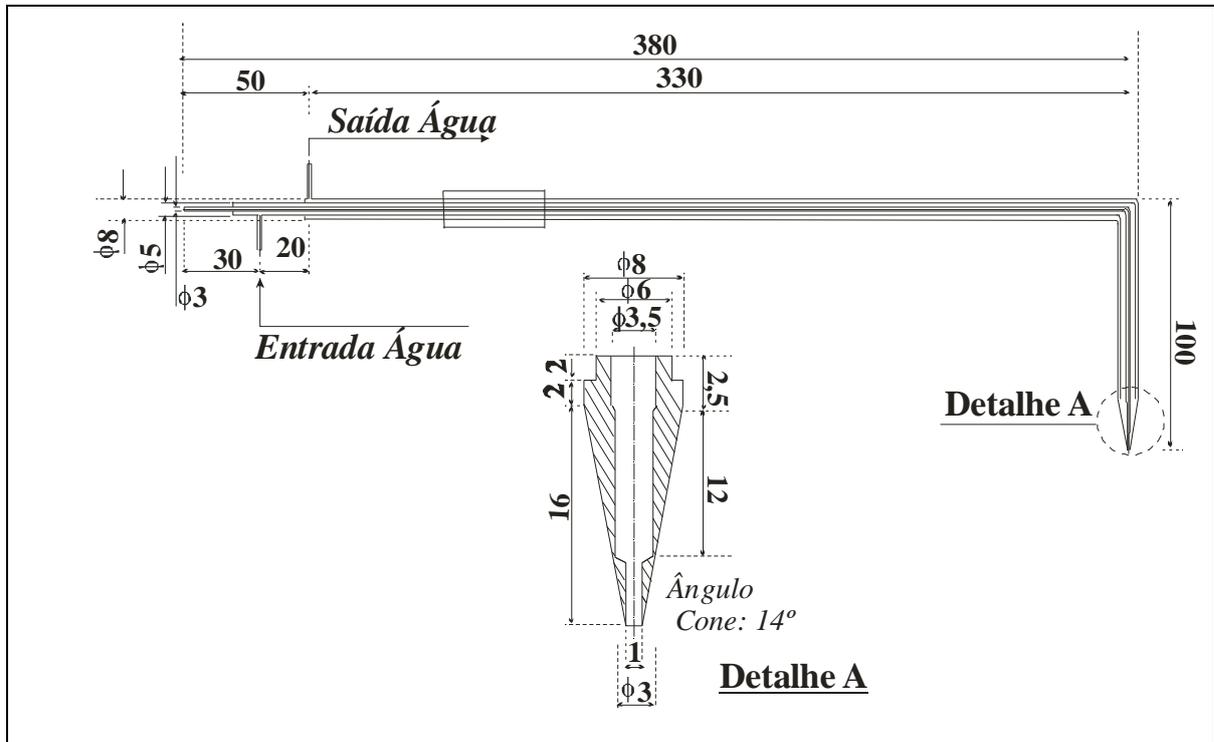


Figura 16 – Esquema da Sonda dos Gases (dimensões em mm)

Ela possui diâmetro de 1 mm, com um ângulo de cone de  $14^\circ$ , ou seja, menor que  $20^\circ$ , condição necessária para sondas construídas em material com alta taxa de perda de calor e/ou alta atividade catalítica em 100 kPa. A Figura 17 apresenta o sistema de posicionamento e a sonda de gases.

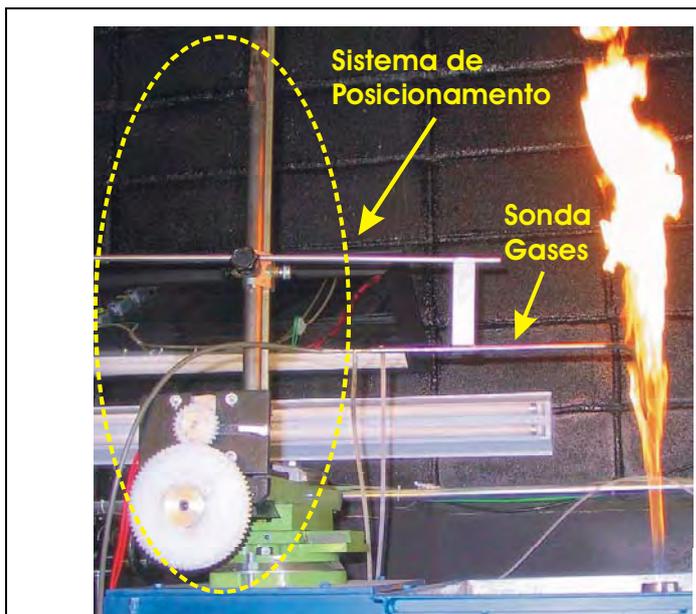


Figura 17 – Sistema de posicionamento acoplado com a Sonda de Gases.

### 2.2.3.2 Instrumentação para análise dos gases

Para a obtenção das concentrações das espécies, foram utilizados um analisador do tipo quimiluminescente, com erro de medida de  $\pm 0,5\%$  para análise do  $\text{NO}_x$ , analisadores do tipo infravermelho para as análises de  $\text{CO}$  5% com erro de medida de  $\pm 0,05\%$ , de  $\text{CO}$  10% com erro de medida de  $\pm 0,1\%$  e  $\text{CO}_2$  com erro de medida de  $\pm 0,2\%$  e um analisador do tipo termomagnético para o  $\text{O}_2$  com erro de medida de  $\pm 0,2\%$ .

A Figura 18 mostra o esquema global da montagem experimental com a sonda refrigerada para análise dos gases, os analisadores de gases e o sistema de aquisição de dados (ver item 2.2.5). Mostra também a chama a ser analisada e todo o percurso feito pela amostra dos gases coletada da chama, através de bomba de diafragma, sendo primeiramente retirada a água desta através de condensador. Posteriormente a amostra passa por filtros montados em série para reter particulados maiores que  $25\mu\text{m}$  e filtros de membrana Milipore de fibra de vidro para particulados menores, até atingir os analisadores, os quais utilizam gases de calibração.

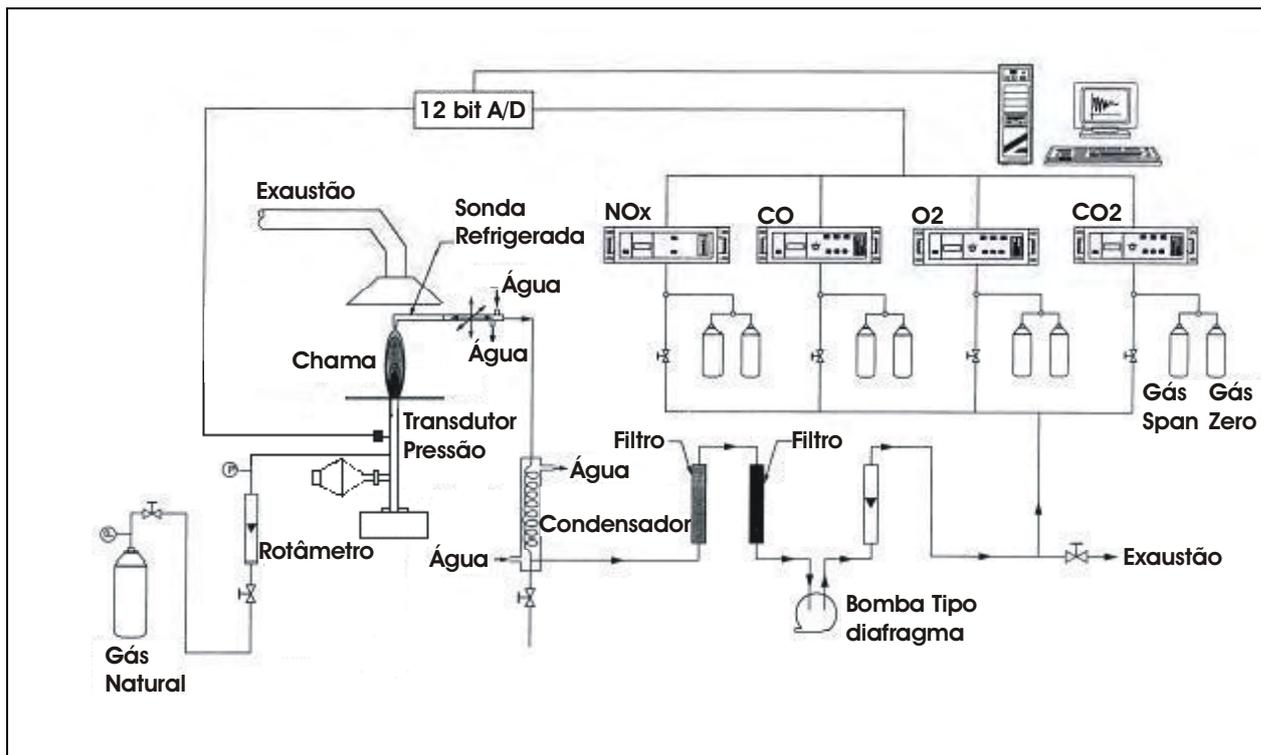


Figura 18 – Esquema Geral da Instalação Experimental

A fim de determinar a vazão adequada para que sejam succionados os gases apenas do ponto desejado e não da vizinhança, um cuidado especial foi adotado na sucção das espécies majoritárias na chama. Sempre há a necessidade de se minimizar as influências da introdução da sonda no escoamento da chama, o que é alcançada com velocidade de sucção isocinética. Entretanto, as perturbações são mais significativas em escoamentos matematicamente descritos por equações elípticas, sendo que, em escoamentos parabólicos em que os erros nas medidas são minimizados. Como este escoamento, sendo parabólico, faz com que não seja necessária amostragem isocinética.

Neste trabalho foi utilizada a vazão de sucção proposta por Andraus (2003). Em seu trabalho a fim de verificar a vazão de sucção ideal para a sucção dos gases da chama e ao levar em consideração os analisadores de gases, notou que a vazão ideal seria da ordem de 3 l/min, dividida em:

- 0,75 l/min para os analisadores de CO, CO<sub>2</sub>, montados em série;
- 0,25 l/min para o analisador de O<sub>2</sub>;

- 1/min para o analisador de  $\text{NO}_x$ .

Entretanto esta vazão se tornou inviável, ao ser levado em consideração, as influências da sonda no escoamento, visto que havia a sucção dos gases da região vizinha do ponto analisado na chama. Desta forma foi adotada a vazão de sucção da sonda de 1 l/min, dividida em:

- 0,4 l/min para os analisadores de CO e  $\text{CO}_2$ ;
- 0,4 l/min para o analisador de  $\text{NO}_x$ ;
- 0,2 l/min para o analisador de  $\text{O}_2$ .

#### **2.2.4 Sistema de medição de temperatura**

Os termopares constituem um dos instrumentos experimentais mais utilizados em pesquisas realizadas em combustão. Podem ser utilizados para determinar temperaturas locais médias e flutuações de temperatura (Andraus, 2003; van den Bercken, 1998; van Maaren, 1994; Heitor e Moreira, 1985; Bradley e Matthews, 1968).

O sistema de medição de temperatura na chama é constituído de sonda, suporte para sonda, termopar tipo R e suporte para todo este conjunto, necessário para acoplar este dispositivo ao sistema de posicionamento, conforme mostrado na Figura 19. As medidas de temperatura obtidas na chama, são enviadas para o sistema de aquisição de dados, tópico este a ser tratado no item 2.2.2.5.

Este sistema de medição de temperatura construído, descrito acima, possui as mesmas características do sistema anteriormente existente no LCP/INPE.

O termopar de fio fino, do tipo R, feito em liga Pt/PtRh 13% de  $38\mu\text{m}$ , permite, devido à sua pequena espessura, obter medidas de temperatura média no interior da

chama e das flutuações de temperatura, podendo ser utilizado em temperaturas de até 1900 K.

É constituído por um fio de  $38\mu\text{m}$  e por outro fio com a mesma composição química, porém com diâmetro maior, de  $500\mu\text{m}$ , o qual que age como haste condutora, necessária por ter maior resistência mecânica e por tornar mais fácil seu manuseio, aumentando o tempo de vida útil do termopar. Este conjunto de fios é colocado no interior de um tubo capilar cerâmico de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com teor de pureza de 99,7% e depois o tubo cerâmico é então colocado no interior de um tubo de aço inoxidável, o qual age como uma sonda. A Figura 19 mostra os esquemas do (a) termopar tipo R e (b) da Sonda do termopar de fio fino, respectivamente.

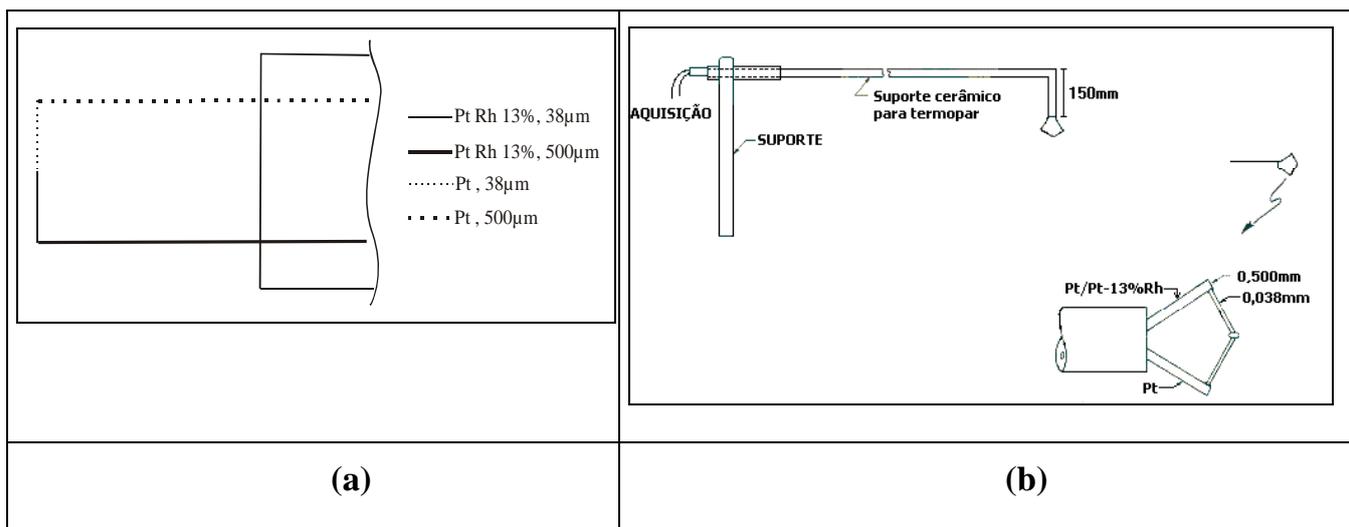


Figura 19 – (a) Esquema do Termopar Tipo R no interior do Tubo Cerâmico (b) e Esquema da Sonda do Termopar de Fio Fino.

Um cuidado especial foi tomado com relação à solda dos fios do termopar. Para tal, foi utilizada uma bancada existente no Laboratório Professor Feng, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). A soldagem foi feita colocando-se as extremidades dos fios uma em frente à outra e passando-se uma corrente através dessas. É necessária uma carga entre 90 e 120 mJ durante 400 ms para se soldar os fios Pt e Pt Rh 13% do termopar tipo R.

A Figura 20 mostra (a) uma fotografia da sonda fixada no suporte e (b) o detalhe da extremidade da sonda onde são acoplados os fios de 38 $\mu$ m.

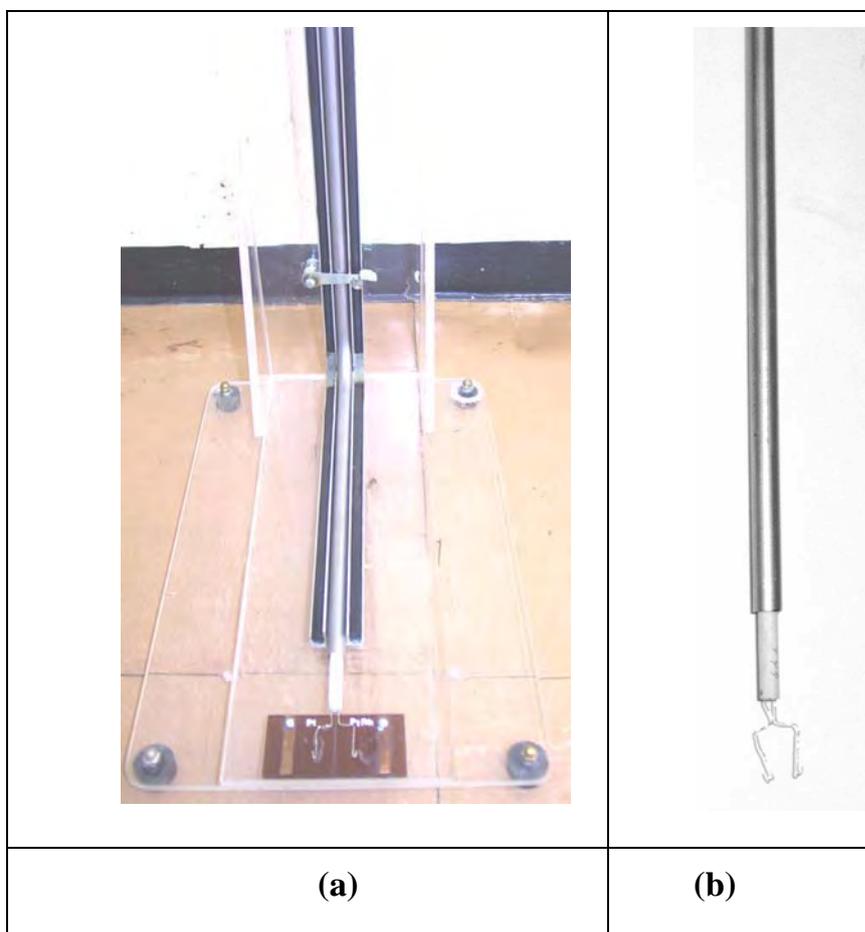


Figura 20 – (a) Sonda fixada no suporte, (b) Detalhe da extremidade onde são fixados os fios de 38 $\mu$ m.

### 2.2.5 Sistema de aquisição de dados

O Sistema de Aquisição de dados é formado por um módulo de condicionamento de sinal da National Instruments, SCXI - 1102, composto por uma placa de aquisição de dados, modelo PCI - AT-MIO 16E, com velocidade de aquisição de 1,25MS, com 32 Canais de Entradas para Termopares, 16 Canais de Entradas Analógicas, 10 Canais de Entradas diferenciais, 6 Canais de Saídas digitais. A aquisição é feita em ambiente Lab View, versão 6I.

A Figura 21 apresenta uma das telas do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

Os sinais provenientes das medidas das concentrações dos gases, da temperatura e da frequência e amplitude de pressão, aplicadas ao escoamento, são enviados para este sistema de aquisição e armazenados.

A cada dois segundos é impressa em uma planilha, a leitura das medições das concentrações das espécies majoritárias, da frequência e amplitude de pressão, sendo cada leitura impressa, a média de 100 leituras feitas. Para cada condição de teste realizada esperou-se que o sistema entrasse em regime permanente e então se iniciava a coleta de dados.

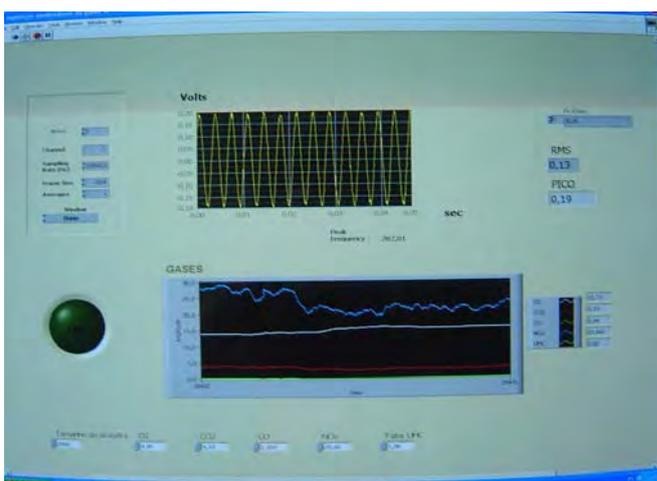


Figura 21 – Amostragem da tela do sistema de aquisição de dados

## 2.2.6 Tomografia de chama

Através da análise tomográfica, torna-se possível realizar o mapeamento de propriedades físicas, como por exemplo, a distribuição dos radicais na chama, objeto de estudo deste trabalho, sendo possível a verificação qualitativa dos mesmos, devido à quimiluminescência.

De uma forma geral, a aquisição de imagens para a tomografia de chama, requer a utilização de câmera CCD para a obtenção das imagens, filtros interferométricos e

computador, acoplado de placa de captura de imagens. A Figura 22 apresenta um esquema do sistema de aquisição de imagens no processo tomográfico.

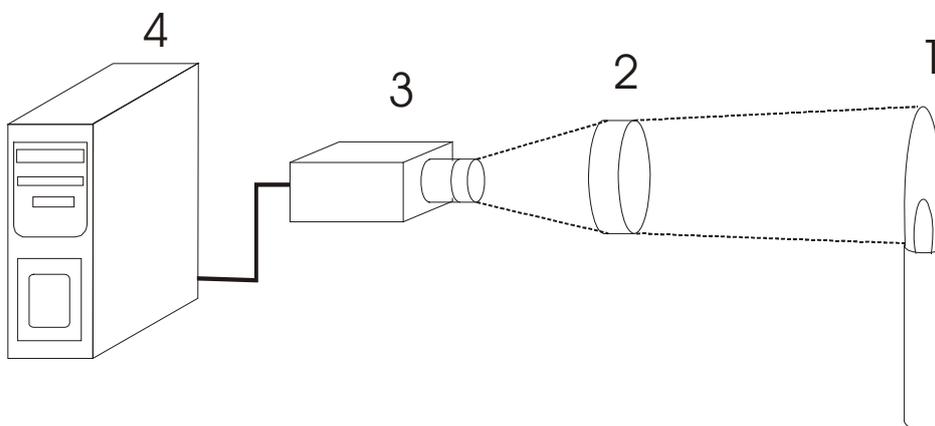


Figura 22 – Esquema do sistema de aquisição de imagens: 1) Chama a ser estudada; 2) Filtro Óptico; 3) Câmera CCD; 4) Computador.

Para a realização da tomografia se tornou necessário a construção de um tomógrafo. Segundo Veríssimo (2006), para a realização adequada do projeto de um tomógrafo, é imprescindível uma análise teórica dos parâmetros do sistema óptico. Com relação à reconstrução das imagens obtidas pela CCD, neste trabalho optou-se pela utilização de um algoritmo desenvolvido no LCP/INPE.

Assim, os subitens a seguir, apresentam uma breve descrição sobre a quimiluminescência, o estudo teórico do sistema óptico, o projeto do tomógrafo, o algoritmo usado nesta análise e por fim apresenta a descrição técnica dos equipamentos componentes do sistema de tomografia.

#### 2.2.6.1 Quimiluminescência

A quimiluminescência ocorre quando moléculas eletronicamente excitadas (radicais) decaem para o estado fundamental, emitindo uma luz (fóton).

Esses radicais emitem fótons em determinados comprimentos de onda. Para identificar a presença e a distribuição dos radicais existentes nas chamas, há a necessidade de se utilizar filtros ópticos, que deixam passar a luz dentro de um intervalo de comprimento de onda especificado. Ao selecionar um determinado comprimento de onda do filtro óptico, pode-se identificar a presença e a distribuição do radical (correspondente aquele comprimento de onda) na chama.

As principais espécies químicas que emitem fótons, através da quimiluminescência, em chamas são o  $C_2$ , CH e OH.

Este trabalho apresenta os resultados da análise tomográfica realizada na região de chama com filtros de interferência na região do visível para os radicais  $C_2$  e CH e também para a Fuligem.

A Figura 23 ilustra o processo de quimiluminescência, mostrando exemplos dos mecanismos de reação do  $C_2$  e CH, produzindo moléculas eletronicamente excitadas ( $C_2^*$  e  $CH^*$ ), respectivamente.

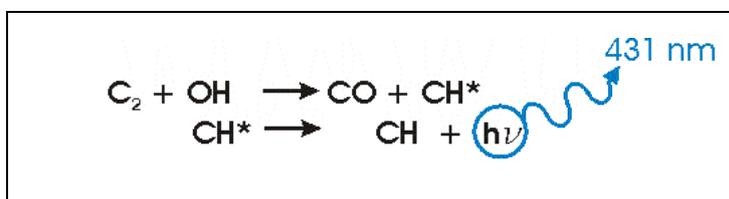
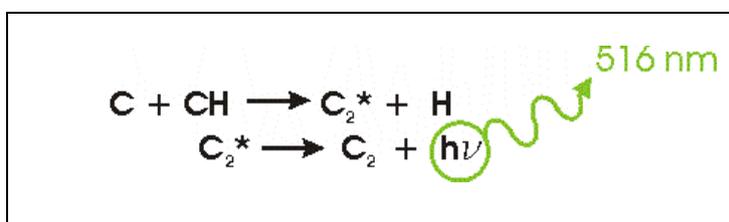


Figura 23 – Esquema do Processo de Quimiluminescência e suas respectivas linhas de emissão.

A Tabela 7 apresenta a banda da emissão quimiluminescente de alguns radicais.

Tabela 7 - Banda de emissão quimiluminescente de alguns radicais (FONTE: Peterson e Oh, 2000).

<b>Radical</b>	<b>Banda de emissão (nm)</b>
<b>CN</b>	359 – 422
<b>CH</b>	420 – 440
<b>C<sub>2</sub></b>	438 – 516
<b>OH</b>	306 – 330
	280 – 287
<b>NH</b>	320 – 340

Outra forma de energia radiante procedente da combustão é a chamada “radiação de corpo negro”.

O corpo negro é definido como um corpo capaz de absorver toda radiação eletromagnética de qualquer comprimento de onda que nele incida (absorvedor perfeito). Por outro lado, em equilíbrio termodinâmico com o meio, o corpo negro, pelo princípio da conservação da energia, deverá ser um emissor perfeito. A interação das ondas eletromagnéticas com a matéria do corpo se dá devido ao fato de a matéria ser formada de partículas eletricamente carregadas em constante movimento oscilatório. Sempre que as cargas mudam seu estado de movimento há a emissão de radiação eletromagnética.

A fuligem numa chama é composta por partículas de carbono que se formam pela queima incompleta de combustível. Estes aglomerados têm, de maneira geral, geometria esférica e vão se comportar como emissores de radiação térmica. Suas emissões máximas de radiação dependerão da temperatura.

Por este motivo, o mapeamento de radicais numa chama deveria ser executado utilizando-se filtros interferométricos que permitissem a passagem de radiação na faixa

de comprimento de onda e como a fuligem emite radiação em todos os comprimentos de onda, o estudo de radicais por emissão quimiluminescente, utilizando-se desses filtros, deve ser feito em chamas limpas, ou seja, sem a presença de fuligem.

A Tabela 8 apresenta os filtros ópticos interferométricos, referentes aos comprimentos de onda emitidos pelos radicais analisados neste trabalho.

Tabela 8 – Radicais analisados neste trabalho e comprimentos de onda dos filtros interferométricos respectivos a tais radicais.

<b>Radical</b>	<b>Comprimento de onda do Filtro Interferométrico (nm)</b>
CH	435,8
C <sub>2</sub>	514,5

Visto que a fuligem é emitida em todos os comprimentos de onda, aqui se optou por utilizar um filtro de 800 nm para a análise desta, visto que este comprimento encontra-se distante de 516 nm, que corresponde ao máximo comprimento de onda no qual ocorre emissão do radical C<sub>2</sub> e de 435,8 que corresponde ao radical CH, sendo ambos os radicais analisados neste trabalho. Assim, provavelmente em 800 nm será obtida somente a emissão da fuligem.

#### 2.2.6.2 Análise teórica do sistema óptico

Para o desenvolvimento do projeto do Tomógrafo e a obtenção de resultados confiáveis, provenientes da aplicação do algoritmo de reconstrução tomográfica, se torna relevante levar em consideração alguns parâmetros ópticos, para se realizar o adequado projeto do tomógrafo, utilizando-se para tal da Óptica Geométrica e da Óptica de Fourier, segundo Veríssimo (2006). Desta forma, o estudo baseado na Óptica Geométrica é apresentado a seguir.

Maiores detalhes sobre a Óptica de Fourier podem ser obtidos no trabalho de Veríssimo (2006).

O conhecimento de tais fundamentos ópticos permite estimar a distância em que a câmera deverá ser posicionada em relação à chama e verificar se a imagem formada é aquela que contém todas as informações necessárias e confiáveis para a realização da análise experimental, informações estas tais como, a resolução, a profundidade de campo, “*f number*”, magnificação entre outras.

Mediante tais informações torna-se possível a minimização do erro causado pelo sistema de aquisição de dados, a fim de se poder realizar a reconstrução confiável das secções transversais, ou mesmo de uma estrutura tridimensional da chama.

Entende-se por resolução de um sistema óptico o menor detalhe do objeto que pode ser distinguido na imagem. Por profundidade de campo entende-se como a extensão da área da imagem que aparece totalmente no foco do sistema óptico, ou seja, é a mínima e máxima distância em que um objeto pode ser posicionado em relação ao sistema óptico, mantendo a nitidez da imagem neste sistema.

A magnificação é o tamanho da imagem formada em um plano, neste caso na câmera CCD, e o “*f number*” é a relação entre a distância focal e a abertura da lente, sendo este um número adimensional.

Assim, torna-se necessário estudar qual é a melhor abertura efetiva da lente,  $AL$ , para obter a profundidade de campo maior que o objeto a ser estudado (chama), e assim posicionar a câmera CCD de modo que obedeça a todos estes parâmetros, formando uma imagem confiável em seu sensor.

O sensor da câmera é composto de vários elementos microscópicos que recebem o nome de pixel.

Pixel vem do inglês “*Picture*” (*Pix* é a abreviatura em inglês para *Picture*) e “*Element*”, ou seja, elemento da imagem, ao qual é possível atribuir-se uma cor. Ou seja, um pixel é a menor unidade de uma imagem digital (CCD), sendo que o conjunto de milhares de pixels formam a imagem inteira. Assim quanto maior for o número de pixels, melhor a resolução que a imagem terá. Trata-se de um sensor de imagem

constituído, na verdade, pelo agrupamento de milhares ou milhões de minúsculos sensores. Os pixels têm formato quadrado, correspondendo ao formato desses minúsculos sensores que capturam a luz.

Entretanto pixel ao ser analisado um objeto, neste caso a chama, tem significado diferente, cada pixel representa o valor da integração ao longo da chama e o mesmo define a resolução da imagem formada pelo sistema óptico e conseqüentemente a resolução da região de reconstrução.

Assim, a Figura 24 mostra o esquema da imagem formada no sistema óptico, bem como os principais parâmetros de uma lente de câmera CCD, segundo a Óptica Geométrica.

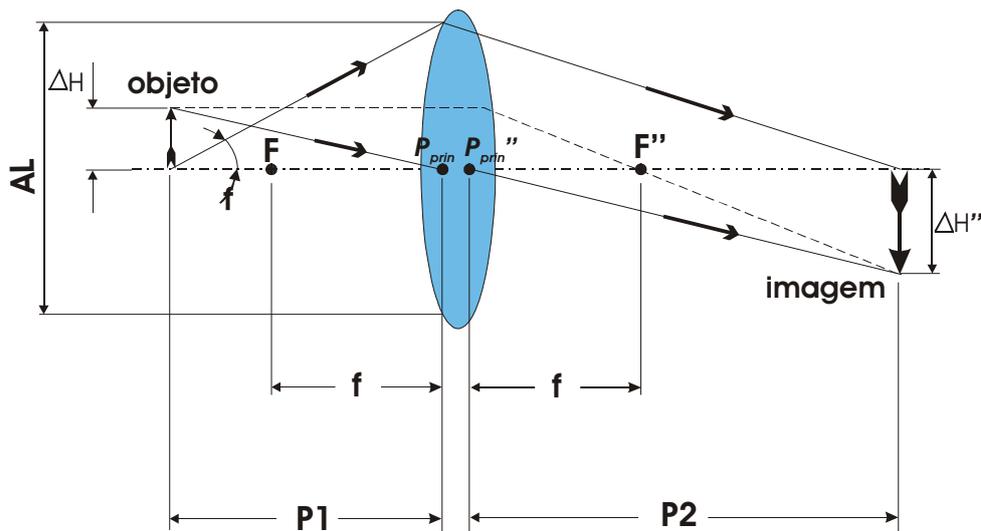


Figura 24 –Formação da imagem no sistema óptico e os principais parâmetros de uma lente

Onde:

- **F** = ponto focal entre a lente e o objeto
- **F''** = ponto focal entre a lente e a imagem
- **f** = distância focal
- **P<sub>prin</sub>** e **P<sub>prin</sub>''** = pontos principais da lente
- **P1** = distância do objeto ao ponto principal **P<sub>prin</sub>**

- $P_2$  = distância da imagem ao ponto principal  $P_{\text{prin}}$ ”
- $\Delta H$  = tamanho do objeto
- $\Delta H''$  = tamanho da imagem
- $AL$  = abertura efetiva da lente

Assim, utilizando-se da Geometria Óptica, a profundidade de campo pode ser calculada através da equação:

$$P_c = 2R \frac{f}{AL} = 4\lambda f / \#^2 \quad (22)$$

Onde:

- $P_c$  = Profundidade de campo
- $R$  = Resolução do sistema óptico
- $f$  = Distância focal
- $AL$  = Abertura da lente
- $\lambda$  = Propagação de onda no meio
- $f/\#$  = número  $f$ , (*f-number*, na língua inglesa)

Sendo:

$$R = 2\lambda \frac{f}{AL} = 2\lambda f / \# \quad (23)$$

$$\lambda = \lambda_o / n, \text{ onde "n" é o índice de refração do meio} \quad (24)$$

$$f / \# = \frac{f}{AL} \quad (25)$$

Para o desenvolvimento do tomógrafo, foi necessário também levar em consideração a Magnificação, denotada por  $Mag$ , definida pela relação:

$$Mag = \frac{P2}{P1} \quad (26)$$

Desta forma, se o tamanho da imagem for menor do que o tamanho do objeto a magnificação será menor do que um, se forem iguais a magnificação será igual a um e se for maior, a magnificação será maior do que um.

Para o cálculo da distância do objeto até a lente ( $P1$ ) e a distância da lente até o plano-imagem ( $P2$ ), tem-se:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{P1} + \frac{1}{P2} \quad (27)$$

Isolando  $P1$  e  $P2$  em (26) e substituindo-os respectivamente em (27), tem-se:

$$P1 = f \frac{(1 + Mag)}{Mag} \quad (28)$$

$$P2 = f (1 + Mag) \quad (29)$$

### 2.2.6.3 Tomógrafo

O tomógrafo foi projetado para acoplar 6 (seis) câmeras CCD fixadas em diversos ângulos em torno da chama, obtendo de forma simultânea e instantânea a aquisição de imagens, ou para acoplar uma única câmera, girando em vários ângulos ao redor da chama. Problemas técnicos com a placa de captura, utilizada para acoplar as seis câmeras tornou inviável tal configuração. Optou-se então pela configuração com uma câmera CCD, na qual a placa de captura utilizada, fornece a imagem

resultante da média das imagens obtidas na chama para a realização da reconstrução tomográfica da chama.

Ao levar-se em consideração os parâmetros ópticos acima descritos, objetivando a redução dos custos e principalmente a redução do tempo de realização deste projeto, construiu-se o primeiro tomógrafo, como mostra a Figura 25. Para tal, utilizou-se um anel em liga de alumínio de 64 cm, diâmetro interno de 58cm e altura de 2,5 cm, tendo sido nele acoplado um braço em perfil retangular para adaptar a câmera CCD.

Testes iniciais, mostraram que tal estrutura em liga de alumínio não suportou a massa do braço e da CCD devido à sua pequena espessura e pouca resistência, dificultando seu giro nos diferentes ângulos a serem utilizados nos testes experimentais. Além deste fato, a estrutura mostrou-se não estável com a utilização do campo acústico, pois esta vibrava em demasia quando se iniciava a aplicação do campo acústico, tornando assim, impossível a obtenção de imagens confiáveis, capturadas pela CCD.

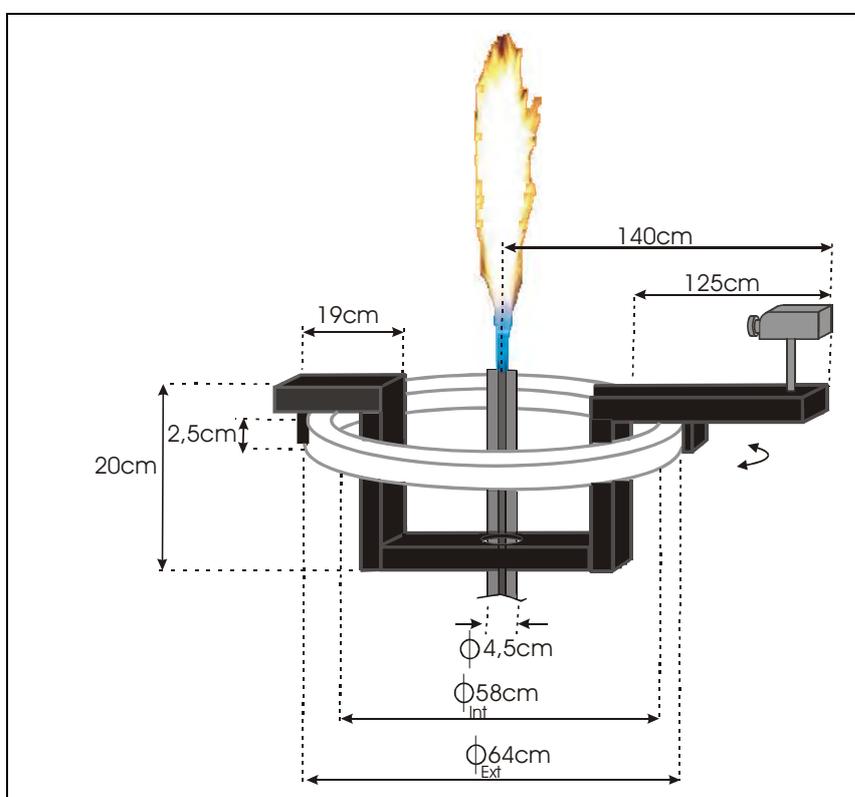


Figura 25 –Esquema do Tomógrafo inicialmente projetado para este trabalho.

A partir dos estudos já realizados do sistema óptico, projetou-se o segundo tomógrafo, utilizando-se algumas partes da estrutura do primeiro, mais robusto e de forma a atender às necessidades de estabilidade e resistência para a realização dos experimentos tomográficos, cujo esquema pode ser visto na Figura 26.

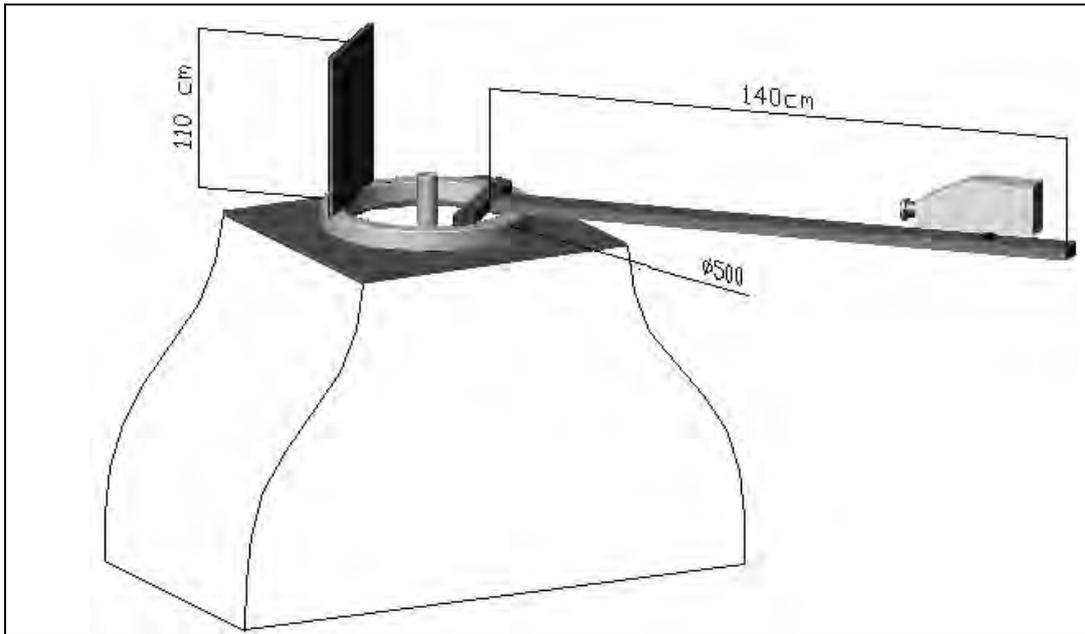


Figura 26 – Esquema do segundo Tomógrafo

O arranjo experimental do tomógrafo com a câmera CCD e um detalhe deste, alocado próximo ao queimador podem ser vistos, respectivamente na Figura 27 (a) e (b).

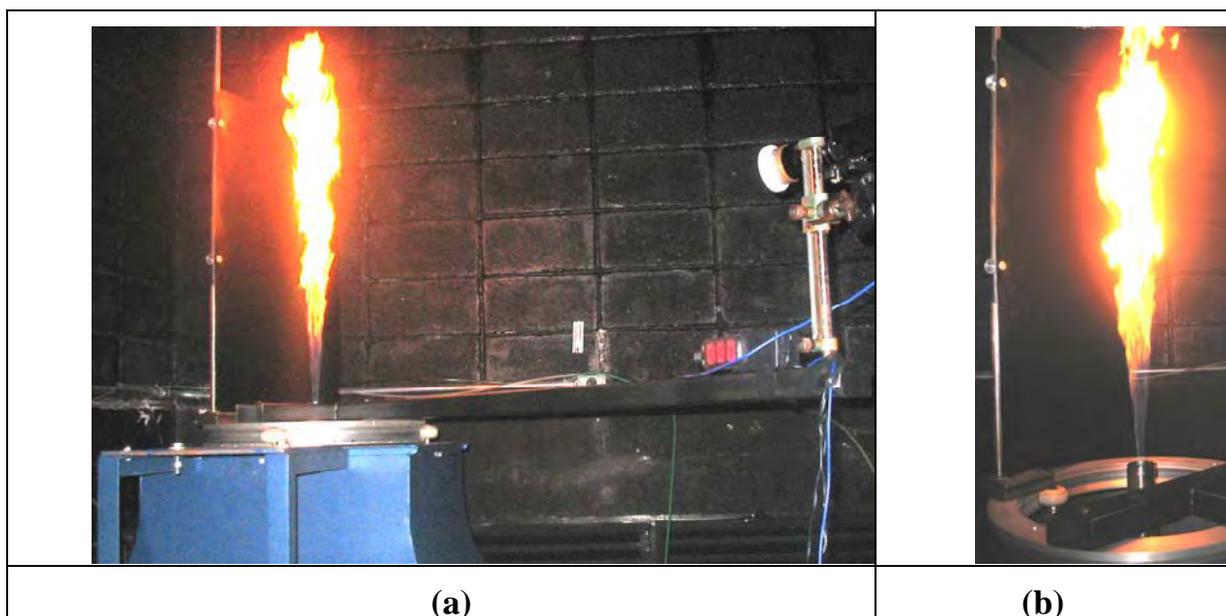


Figura 27 – Segundo tomógrafo acoplado com a CCD (a) Arranjo Experimental, (b) detalhe deste próximo ao queimador.

O tomógrafo consiste em um anel de alumínio, com diâmetro externo de 50 cm, diâmetro interno de 40 cm e altura de 5 cm, acoplado de braço com sistema de giro de 360 graus (obtido através do uso de rodas de nylon) e contra-peso para fixação de CCD's, através de suporte, a fim de posicionar a câmera CCD em diversos ângulos de projeção a uma distância adequada da chama.

Optou-se, como já mencionado, pela utilização de uma câmera movimentando-se ao redor da chama em diversos ângulos, de  $0^{\circ}$  a  $170^{\circ}$ , variando de  $10^{\circ}$ .

Para a montagem e instalação do sistema tomográfico foi necessário elevar a estrutura experimental em 10 cm, através de perfis de aço, além da necessidade da desmontagem e re-montagem de partes do arranjo experimental. Posteriormente, centralizou-se e nivelou-se tanto o queimador quanto o tomógrafo, para garantir que a câmera CCD capturasse os dados em um único plano perpendicular correspondente ao eixo central do queimador. Posteriormente, a fim de garantir a mesma aquisição de imagens pela câmera CCD para todas as condições de testes, realizaram-se testes em todas as posições axiais e radiais utilizadas neste trabalho, verificando-se que para todas as variáveis, não havia alterações nas imagens capturadas pela CCD.

Para a luminosidade não interferir nos resultados, o experimento foi realizado em uma sala de cor preta fosca, tendo sido colocado no tomógrafo na posição de 180° em relação à CCD, um fundo de zinco, com altura de 110 cm e largura de 46 cm, pintado em preto fosco, sendo que este fundo gira à medida em que a CCD gira, ou seja, o fundo gira junto com a CCD, garantindo assim, que para todos os testes em todos os ângulos se mantivesse a mesma intensidade luminosa de fundo para a chama.

A fim de impedir a ocorrência de trepidações na câmera CCD, durante a captura das imagens por ocasião da imposição do campo acústico, foram adaptados três suportes de borracha anti-vibratório, posicionados entre este e a parede.

#### 2.2.6.4 Equipamentos constituintes do sistema de análise tomográfica

A obtenção de imagens da chama para a realização da reconstrução tomográfica, requer a utilização de equipamentos específicos e adequados, a fim de garantir a correta captura e armazenamento dessas imagens para posterior reconstrução tomográfica. Para tal, utiliza-se uma câmera CCD, sendo nesta acopladas uma lente objetiva e posteriormente filtros interferométricos em comprimento de onda específico para cada espécie a ser analisada. As imagens captadas pela CCD são processadas em um computador, utilizando-se placa de captura de imagens. A Figura 28 mostra um esquema do funcionamento de uma câmera CCD. Posteriormente, realiza-se então a reconstrução tomográfica das imagens.

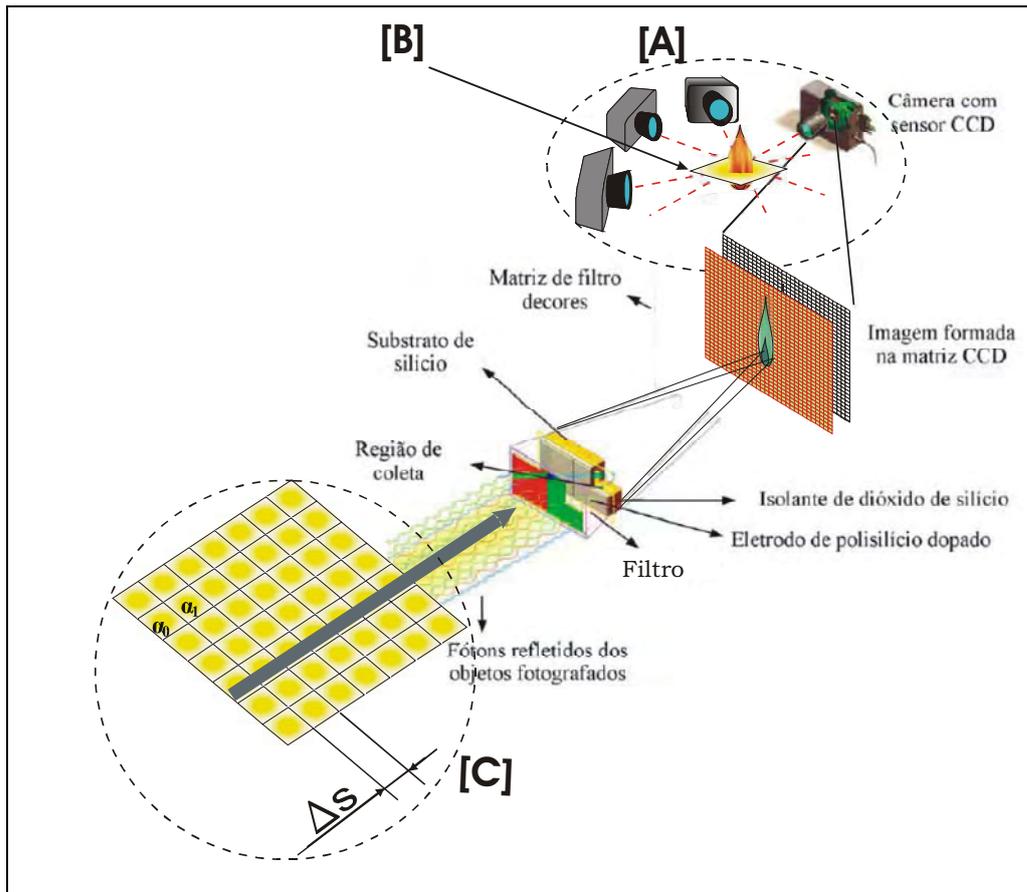


Figura 28 - Esquema representando raios de luz sendo transformados em sinais elétricos por uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*). (FONTE:Silva, 1999).

A especificação técnica dos equipamentos utilizados na tomografia é descrita a seguir:

- Câmera CCD Marshall V-1070-EIA, 480 linhas na vertical e 520 linhas na horizontal com sensibilidade mínima de 0,02 LUX (unidade de medida da intensidade da luz), sendo o tamanho do sensor CCD de 7,95mm x 6,45mm com controle do seu tempo de exposição à luz entre 1/125 á 1/10000 segundos;
- Lente Objetiva Fujinon CF50B 1:1,4/50;
- Placa de captura Matrox Meteor/RGB com taxa de aquisição de até 42Mb/s;
- Filtro interferométrico, da Melles Griot, na região do visível de comprimento de onda de 800 nm (para a fuligem); Tolerância de +3,0/-0 nm; FWHM (Full-

Width Half-Maximum):  $10 \pm 2$  nm; Pico de transmitância mínima de 45%; Diâmetro de 50mm; P/N: 03 FII 004.

- Filtro interferométrico, da Melles Griot, na região do visível de comprimento de onda de 514,5 nm (para o radical  $C_2$ ); Tolerância de  $+2,0/-0$  nm; FWHM (Full-Width Half-Maximum):  $10 \pm 2$  nm; Pico de transmitância mínima de 50%; Diâmetro de 25 mm; P/N: 03 FIL 004.
- Filtro interferométrico, da Melles Griot, na região do visível de comprimento de onda de 435,8 nm (para o radical CH); Tolerância de  $+2,0/-0$  nm; FWHM (Full-Width Half-Maximum):  $10 \pm 2$  nm; Pico de transmitância mínima de 40%; Diâmetro de 25 mm; P/N: 03 FIM 004.

A Figura 29 apresenta o conjunto formado pelo sistema para aquisição de imagens.

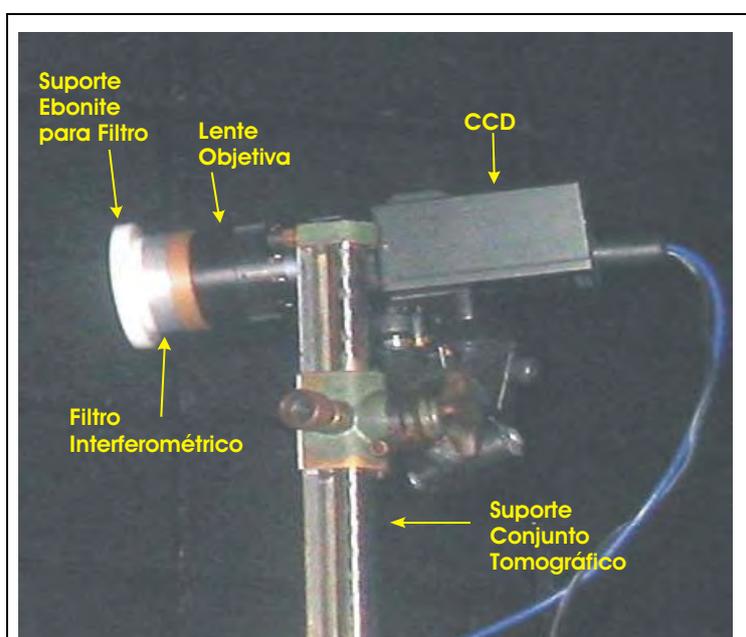


Figura 29 – Conjunto responsável pela aquisição de imagens para tomografia.

Utilizou-se uma distância de trabalho de 140 cm entre a CCD e a chama, conforme Figura 26, distância focal 1,5 e “*f number*” 4.

Os filtros interferométricos foram acoplados na objetiva através de suportes de ebonite.

O tempo de aquisição e armazenamento dos dados no computador foi cerca de 40 segundos para uma média de 150 imagens e o tempo de posicionamento do braço articulado em cada ângulo de projeção de aproximadamente 3 minutos, com o obturador (estrutura responsável pelo controle do tempo em que a luz irá incidir sobre a CCD).

Foi utilizada a mesma abertura óptica e tempo de exposição dos pixels para aquisição das imagens para todos os testes.

#### 2.2.6.5 Algoritmo usado na análise tomográfica

Como mencionado acima, para a realização da análise tomográfica de chama, optou-se aqui por utilizar o algoritmo para reconstrução bidimensional de chama denominado “Retro-projeção”, ou na língua inglesa, “Back Projection”. O princípio consiste em redistribuir as projeções, neste caso, coletadas pelo sensor de uma câmera CCD, ao longo da região de reconstrução.

Este algoritmo, foi desenvolvido com correções e adaptações para a realização de tomografia em chamas, utilizando-se de poucos ângulos, no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - LCP do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, por Veríssimo (2002, 2003, 2004 e 2006).

Em princípio, o diagnóstico de chamas por tomografia é a reconstrução de uma secção transversal da chama a partir de suas projeções. No sentido exato da palavra, uma projeção em um dado ângulo é a integral da imagem na direção daquele ângulo.

Este algoritmo é baseado na transformada de Radon, segundo Radon (1917), ou seja, a transformada inversa e possibilita, além da reconstrução de objetos axissimétricos, a reconstrução de objetos sem simetria, utilizando-se de poucos ângulos de projeção, obtendo-se resultados consideráveis com relação à distribuição

espacial dos radicais. Inicialmente é feita a aquisição de imagens através de câmera CCD e posteriormente é realizada sua reconstrução tomográfica, através do algoritmo “*Back Projection*”.

O princípio básico da Transformada de Radon é que são realizadas várias integrais de linha em um ângulo fixo e o conjunto das integrais realizadas é denominada projeção em um ângulo. O sensor da câmera é composto de vários elementos microscópicos sensíveis à luz e cada elemento recebe o nome de pixel. O valor em cada pixel é o resultado de todas as emissões das radiações provenientes da chama, que representa a integração ao longo da mesma, porém, como o pixel tem uma largura, entende-se que a integração é feita ao longo de uma faixa que atravessa a chama. Com isso presume-se que o tamanho de cada pixel e a sua quantidade, define a resolução da imagem formada pelo sistema óptico e conseqüentemente a resolução da região de reconstrução.

Assim, o conjunto de integrais de linha em um ângulo fixo é a Transformada de Radon naquele ângulo, chamada de projeção.

O conjunto das infinitas projeções denomina-se a Transformada de Radon da função.

A Equação 30 descreve o operador “*Back projection*” sobre a função projeção.

$$b(x, y) = B \int_{\mathbf{0}}^{\pi} \tilde{f}(p, \phi) = \int_{\mathbf{0}}^{\pi} f(x \cos \phi + y \sin \phi, \phi) d\phi \quad (30)$$

O resultado é uma imagem “borrada” que não representa a função, que se deseja reconstruir, em duas dimensões. Para obter a imagem real em duas dimensões é preciso aplicar a convolução ao resultado da equação (30) com o inverso do raio, ou seja:

$$b(x, y) = f(x, y) ** \frac{1}{r} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x', y') dx' dy'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2]^{1/2}} \quad (31)$$

Onde:

$$x = r \cos \phi$$

$$y = r \sin \phi .$$

Este algoritmo permite a utilização de vários ângulos de projeção, desta forma, este poderá ser utilizado ao se realizar a aquisição de imagens de várias câmeras CCD.

## **CAPÍTULO 3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO**

### **3.1. CÁLCULOS INICIAIS**

Este capítulo apresenta os cálculos necessários para se determinar as condições iniciais do trabalho, tendo sido estas adotadas em todo o desenvolvimento que se seguiu.

Inicialmente mostra-se o procedimento para obtenção das vazões dos gases de alimentação da chama principal (gás natural e ar primário) e da chama piloto (acetileno, hidrogênio e ar), através do balanço de massa. Em seguida, é mostrado o cálculo dos cinco primeiros harmônicos no queimador de Delft, modificado, para a inclusão do sistema acústico e por fim o cálculo do número de Reynolds para as condições de entrada dos gases da alimentação da chama principal.

#### **3.1.1 Vazões dos gases de alimentação**

Na chama principal tem-se como combustível o gás natural (GN), proveniente de cilindros de estocagem, queimando difusivamente com o ar primário, obtido por compressor à pistão modelo MSWV 72 FORT / 425, marca SCHUZ. Na chama piloto tem-se como combustível uma mistura de acetileno / hidrogênio e como oxidante o ar, todos provenientes de cilindros, tendo suas vazões medidas por rotâmetros.

Foram determinadas a priori, as vazões dos gases reagentes. Assim pré definiu-se a vazão mássica de gás natural veicular e a razão de equivalência global ( $\phi_G$ ), tendo sido adotados os valores propostos por Andraus (2003). As vazões de alimentação dos demais gases reagentes foram então calculadas a partir destes parâmetros, utilizando-se do princípio de conservação de massa.

Desta forma, a Tabela 9, apresenta os parâmetros pré-definidos com relação à  $\varnothing_G$  e à vazão de alimentação do GN, utilizadas neste trabalho. A seguir são apresentados os cálculos referentes às vazões dos demais reagentes.

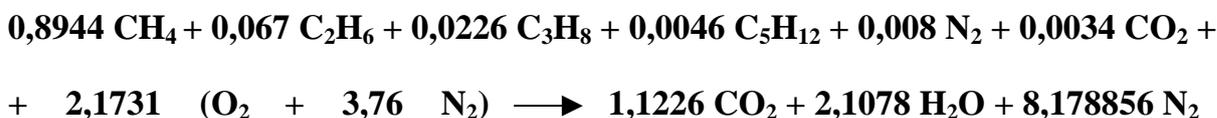
Tabela 9 – Condições de alimentação a serem utilizadas no trabalho.

Condição	Razão de Equivalência Global ( $\varnothing_G$ )	Gás Natural (GN) (g/s)
I	0,82	0,21
II	0,95	0,29

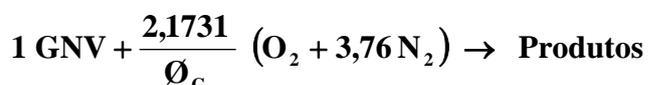
### 3.1.1.1 Velocidade do ar secundário e vazão do ar primário

O ar secundário é fornecido por compressor radial, com vazão de ar constante para ambas as condições de trabalho e velocidade aproximada de 0,35 m/s, garantindo um escoamento laminar.

Com relação ao cálculo do ar primário, tem-se na estequiometria, para a reação de 1 mol de GN com ar:



Para  $\varnothing_G$  menor ou igual a 1,0 pode-se usar para cálculo da vazão de ar equação:



Sendo a massa molecular do  $O_2 = 32 \text{ g/gmol}$ , do GN =  $17,999 \text{ g/gmol}$  e do  $N_2 = 28 \text{ g/gmol}$ , tem-se na Tabela 10, o balanço de massa para a reação do gás natural, do ar primário para as vazões e razões de equivalência adotadas, bem como a potência das respectivas chamas e a velocidade do ar secundário.

Tabela 10 – Condições de entrada dos gases de alimentação.

Condição	Vazão mássica GN	Fração molar GN	Potência da chama	Vazão mássica Ar Primário	Fração molar O <sub>2</sub>	Fração molar N <sub>2</sub>	Velocidade Ar Secundário
	(g/h)	%	(kW)	(kg/h)	%	%	(m/s)
I	756	7,35	10,3	15,3	19,47	73,11	0,35
II	1044	8,41	14,3	18,2	19,24	72,35	0,35

Para a chama principal, tem-se que a razão Carbono / Hidrogênio  $\left(\frac{C}{H}\right)$  para o GN da ordem de:

$$\frac{C}{H} = \frac{1,1226}{4,2156} = 0,2663$$

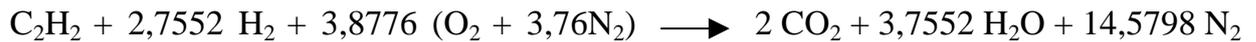
### 3.1.1.2) Vazões dos gases da chama piloto (CP)

Os cálculos das vazões dos gases da chama piloto são apresentados detalhadamente no Anexo I.

Mantendo a mesma relação Carbono / Hidrogênio  $\left(\frac{C}{H}\right)$  da chama principal, para a chama piloto tem-se:

$$\frac{C}{H} = \frac{2}{x} = 0,2663 \quad \longrightarrow \quad x = 7,5103$$

Na reação estequiométrica para a chama piloto tem-se então:



Assim, tem-se:

**A) Cálculo da vazão mássica de acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) piloto.**

A potência da chama piloto (P<sub>CP</sub>) é 1% da potência da chama principal. A potência da chama piloto pode ser definida como:

$$P_{CP} = \dot{m}_{CP} \times PCI_{CP} \quad (32)$$

Onde:

- PCI<sub>CP</sub>, representa o poder calorífico inferior da chama piloto (kJ/kg<sub>comb</sub>), definido por:

$$PCI_{CP} = - \frac{\bar{h}_{RP}^o}{M_{comb}} \quad (33)$$

- $\bar{h}_{RP}^o$ , representa a entalpia padrão de combustão, ou seja, a diferença entre o somatório do número de moles dos produtos multiplicado pelas suas respectivas entalpias padrão, menos o número de moles dos reagentes multiplicado pelas suas respectivas entalpias padrão, (kJ/gmol);
- $M_{comb}$ , representa a massa molecular do combustível (kg/kgmol).

➤ **Para a Condição I, tem-se:**

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2} = 6,12 \text{ g/h}_{\text{comb}}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 4,49 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,63 \text{ g/h}$$

### B) Cálculo da vazão mássica de ar da chama piloto

Adotando  $\varnothing_G = 1,4$  na chama piloto tem-se:

$$\varnothing_G = \frac{n^\circ \text{ oxigênio na reação estequiométrica}}{n^\circ \text{ oxigênio na reação real}} \quad (34)$$

Assim:  $\dot{m}_{\text{Ar Piloto}} = 73,85 \text{ g/h}$

➤ **Para a Condição II, tem-se:**

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2} = 8,44 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,63 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 6,19 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{\text{Ar Piloto}} = 101,84 \text{ g/h}$$

Tem-se na Tabela 11 um resumo das condições de vazão de alimentação dos gases a serem utilizadas neste trabalho.

Tabela 11 – Vazão mássica dos gases de alimentação da chama principal e chama piloto.

Condição	GN	Ar Primário	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Piloto	H <sub>2</sub> Piloto	Ar Piloto
	(g/h)	(kg/h)	(g/h)	(g/h)	(g/h)
I	756	15,3	1,63	4,49	73,85
II	1044	18,2	2,25	6,19	101,84

### 3.1.2 Cálculo dos harmônicos no queimador de Delft

Para a realização desses cálculos, foram levados em consideração alguns parâmetros e descritos outros, como se segue:

- Tubo com ambas as extremidades abertas;
- $\gamma_{Ar} = 1,4$ ;
- Massa molecular do ar:  $M_{Ar} = 0,029$  kg/kmol;
- Constante Universal dos Gases:  $R = 8,314$  J/mol;
- Comprimento do tubo ( $L$ ) = 1,96 m;
- Temperatura ambiente ( $T$ ): 293 K;
- Velocidade do som no ar:  $v = \sqrt{\gamma_{Ar}RT / M_{Ar}}$  m/s;
- Frequência dos harmônicos:  $f_n = nv/2L$ , para  $n = 1,2,3,4\dots$ etc.

Foram calculadas as frequências correspondentes aos cinco primeiros harmônicos do queimador de Delft utilizado neste trabalho, para várias temperaturas. Estas frequências são apresentadas na Tabela 12.

As correções dos efeitos de borda, não foram necessários nestes cálculos, em razão do comprimento do tubo (196 mm) ser muito maior que seu diâmetro (45 mm), portanto, essas correções se tornam negligenciáveis para esse caso.

Tabela 12 – Frequências correspondentes aos cinco primeiros harmônicos do queimador de Delft, em função da temperatura.

Temperatura		Velocidade (m/s)	Frequência dos Harmônicos (Hz)				
(°C)	(K)		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>
19,0	292,0	342,3	87,3	174,7	262,0	349,3	436,7
20,0	293,0	342,9	87,5	175,0	262,4	349,9	437,4
21,0	294,0	343,5	87,6	175,3	262,9	350,5	438,2
22,0	295,0	344,1	87,8	175,6	263,3	351,1	438,9
23,0	296,0	344,7	87,9	175,9	263,8	351,7	439,6
24,0	297,0	345,3	88,1	176,2	264,2	352,3	440,4
25,0	298,0	345,8	88,2	176,5	264,7	352,9	441,1
26,0	299,0	346,4	88,4	176,7	265,1	353,5	441,9
27,0	300,0	347,0	88,5	177,0	265,6	354,1	442,6
28,0	301,0	347,6	88,7	177,3	266,0	354,7	443,3
29,0	302,0	348,2	88,8	177,6	266,4	355,3	444,1
30,0	303,0	348,7	89,0	177,9	266,9	355,8	444,8
31,0	304,0	349,3	89,1	178,2	267,3	356,4	445,5
32,0	305,0	349,9	89,3	178,5	267,8	357,0	446,3
33,0	306,0	350,5	89,4	178,8	268,2	357,6	447,0
34,0	307,0	351,0	89,5	179,1	268,6	358,2	447,7
35,0	308,0	351,6	89,7	179,4	269,1	358,8	448,5
36,0	309,0	352,2	89,8	179,7	269,5	359,4	449,2
37,0	310,0	352,7	90,0	180,0	270,0	359,9	449,9
38,0	311,0	353,3	90,1	180,3	270,4	360,5	450,6
39,0	312,0	353,9	90,3	180,5	270,8	361,1	451,4
40,0	313,0	354,4	90,4	180,8	271,3	361,7	452,1

### 3.1.3 Cálculo do número de Reynolds para o ar primário e o gás natural nas condições de entrada

Os cálculos para o número de Reynolds são apresentados detalhadamente no Anexo II.

#### 3.1.3.1 Cálculo do número de Reynolds para o ar primário

##### ➤ Condições de Entrada

Vazão de Ar Primário:

Condição I: 15,3 g/h = 0,00425 kg/s

Condição II: 18,2 kg/h = 0,00506 kg/s

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_e}{\mu} = \frac{4 \cdot m_t}{\pi \cdot \mu \cdot D_e} \quad (35)$$

Sendo:

- $m_t$  = vazão mássica do fluido (kg/s)
- $\mu$  = viscosidade do fluido (kg/m.s)
- $D_e$  = Diâmetro equivalente (m)

##### ➤ Cálculo do $D_e$

$$D_e = 42,4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

##### ➤ Cálculo da viscosidade absoluta ( $\mu$ ) à temperatura “t”

Utilizando-se a fórmula de Sutherland, a viscosidade de um gás é dada por:

$$\mu_{gás} = \mu_o \cdot \left( \frac{273 + t}{273} \right) \cdot \frac{273 + C_n}{273 + C_n + t} \quad (36)$$

Fazendo uso da fórmula de Herning-Zipperer, tem-se para a viscosidade da mistura:

$$\mu_{mistura} = \frac{n_1 \cdot \mu_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot Tc_1} + n_2 \cdot \mu_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot Tc_2} + \dots + n_n \cdot \mu_n \cdot \sqrt{M_n \cdot Tc_n}}{n_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot Tc_1} + n_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot Tc_2} + \dots + n_n \cdot \sqrt{M_n \cdot Tc_n}} \quad (37)$$

Onde:

- $\mu_o$  = viscosidade absoluta a 0 °C (x 10<sup>-6</sup> p)
- $t$  = temperatura (°C)
- $C_n$  = número de Sutherland
- $n_n$  = número de moles do gás (% volumétrica)
- $\mu_n$  = viscosidade absoluta do gás à temperatura  $t$
- $M_n$  = massa molecular do gás
- $Tc_n$  = temperatura crítica do gás (K)

Dados:

- Composição do ar: 79% N<sub>2</sub> e 21% O<sub>2</sub>
- Temperatura “ $t$ ” = 25 °C
- $Tc_{nitrogênio} = 126,2$  K
- $Tc_{oxigênio} = 126,2$  K
- $\mu_o_{nitrogênio} = 166 \times 10^{-6}$  p
- $\mu_o_{oxigênio} = 192 \times 10^{-6}$  p

Assim:

➤ **Para a Condição I ( $\phi=0,82$ )**

$$Re_{ar \text{ primário}} = 6922,2$$

➤ **Para a Condição II ( $\phi=0,95$ )**

$$Re_{ar \text{ primário}} = 8241,5$$

### 3.1.3.2 Cálculo do número de Reynolds para o gás natural

Dados:

- Composição do Gás Natural: 89,44% CH<sub>4</sub>; 6,7% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 2,26% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 0,34% CO<sub>2</sub>; 0,8% N<sub>2</sub>; 0,15% i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> e 0,31% C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>
- Temperatura “t” = 25°C
- $T_c_{CH_4} = 190,8 \text{ K}$
- $T_c_{C_2H_6} = 305,3 \text{ K}$
- $T_c_{C_3H_8} = 369,8 \text{ K}$
- $T_c_{CO_2} = 304,2 \text{ K}$
- $T_c_{N_2} = 126,2 \text{ K}$
- $T_c_{i-C_4H_{10}} = 408,1 \text{ K}$
- $T_c_{C_5H_{12}} = 469,9 \text{ K}$
- $\mu_o_{CH_4} = 100 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{C_2H_6} = 86,1 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{C_3H_8} = 75 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{CO_2} = 138 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{N_2} = 166 \times 10^{-6} \text{ p}$

Assim:

- $\mu_{CH_4} = 107,87 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{C_2H_6} = 93,73 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{C_3H_8} = 81,9 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{CO_2} = 150,26 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{N_2} = 177,6 \times 10^{-6} \text{ p}$

Para o cálculo das  $\mu_{C_4H_{10}}$  e  $\mu_{C_5H_{12}}$ , utilizando-se a expressão de Chapman e Enskog, calcula-se a viscosidade de um gás pode ser calculada usando o potencial de Lennard-Jones:

$$\mu = 2,6693 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{M \cdot t}}{\sigma^2 \cdot \Omega_{\mu}} \quad (38)$$

onde:

- $M$  = massa molar (kg/kg-mol)
- $t$  = temperatura (K)
- $\sigma$  = diâmetro efetivo de colisão entre duas moléculas (Å)
- $\Omega_{\mu}$  = integral de colisão para a viscosidade (adimensional)

Dados:

- $\sigma_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 5,769 \text{ \AA}$
- $\sigma_{\text{iC}_4\text{H}_{10}} = 5,341 \text{ \AA}$
- $\Omega_{\mu \text{C}_5\text{H}_{12}} = 1,629$
- $\Omega_{\mu \text{iC}_4\text{H}_{10}} = 1,587$

Assim:

$$\mu_{\text{iC}_4\text{H}_{10}} = 75,52 \times 10^{-6} \text{ p}$$

$$\mu_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 68,11 \times 10^{-6} \text{ p}$$

Desta forma, tem-se para o gás natural:

$$\mu_{\text{gás natural}} = 10,545 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

Dados:

- $D_{\text{GN}} = 6 \text{ mm} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $\dot{m}$  (Condição I) = 756 g/h = 0,2 g/s =  $0,2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
- $\dot{m}$  (Condição II) = 1044 g/h = 0,29 g/s =  $0,29 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

➤ *Para a Condição I ( $\phi=0,82$ )*

$$Re_{GN} = 4025$$

➤ *Para a Condição II ( $\phi=0,95$ )*

$$Re_{GN} = 5836$$

### 3.2 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO

Este item apresenta a metodologia utilizada nos ensaios iniciais, destinados a definir as condições de trabalho a serem adotadas para todas as análises experimentais que se seguiram, ou seja, para a análise dos gases, para a temperatura e tomografia de chama.

Inicialmente, apresenta-se os harmônicos do queimador a frio, obtidos experimentalmente através de análise da frequência e do sinal de pressão acústica, usando somente o tubo do queimador, sem escoamento e posteriormente, com escoamento de ar para as Condições I e II.

Então foram realizados ensaios à quente, para as Condições I e II, levantando-se o ponto “lift” da chama. Posteriormente, avaliou-se a necessidade de utilização da chama piloto para ancorar a chama principal, bem como a do ar secundário.

#### 3.2.1 Verificação experimental dos harmônicos do queimador

Os ensaios iniciais se destinam à verificação das frequências de trabalho a serem utilizadas, correspondentes às maiores amplitudes de pressão obtidas no queimador. Colocou-se, para todos os testes realizados, tensão de 1,4 V no gerador de funções, e

15 V no alto-falante. Inicialmente foram verificadas as frequências correspondentes às maiores amplitudes de pressão do tubo, sem vazão de ar e sem queima, cujos resultados são apresentados na Figura 30.

A seguir, realizaram-se testes com o ar primário, de acordo com as vazões estabelecidas na Tabela 11, sem queima, para as Condições I e II. Os resultados são apresentados nas Figuras 31 e 32.

A comparação entre os testes realizados, pode ser visto na Figura 33.

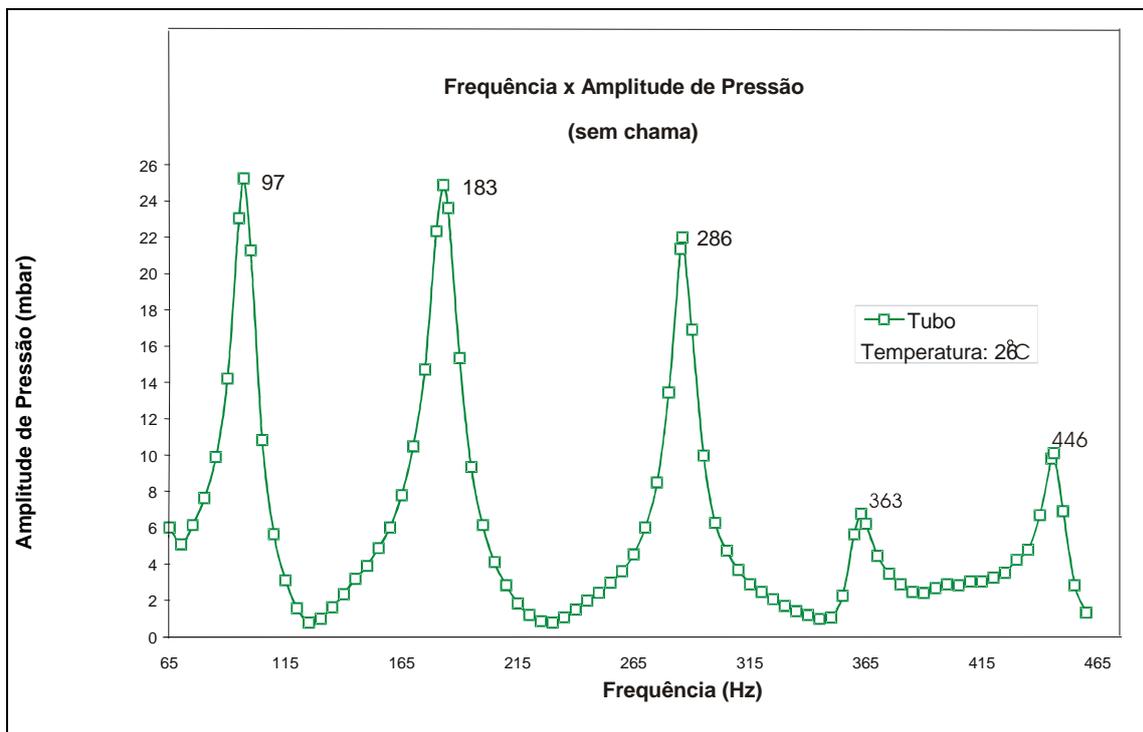


Figura 30 – Frequências x Amplitudes de Pressão para o tubo, sem vazão de ar e sem queima e temperatura ambiente de 26 °C (Erro máximo:  $\pm 0,56$  mbar).

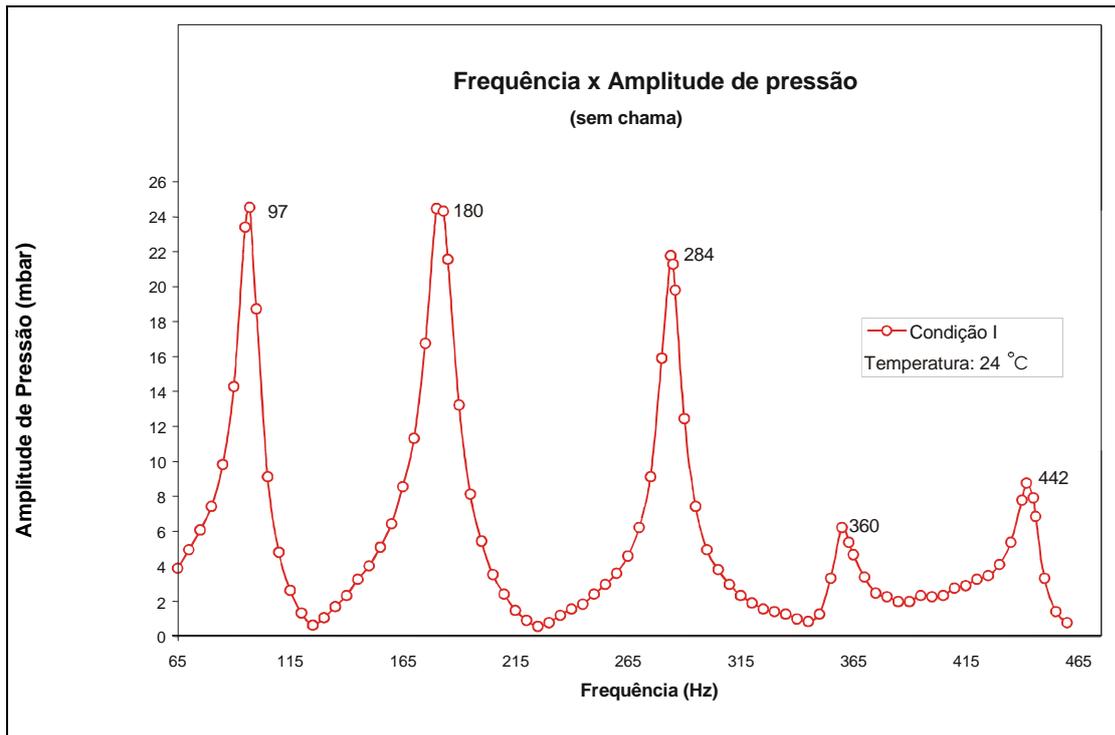


Figura 31 – Frequências x Amplitudes de Pressão na Condição I, com escoamento de ar primário, sem queima e temperatura ambiente de 24 °C (Erro máximo:  $\pm 0,56$  mbar).

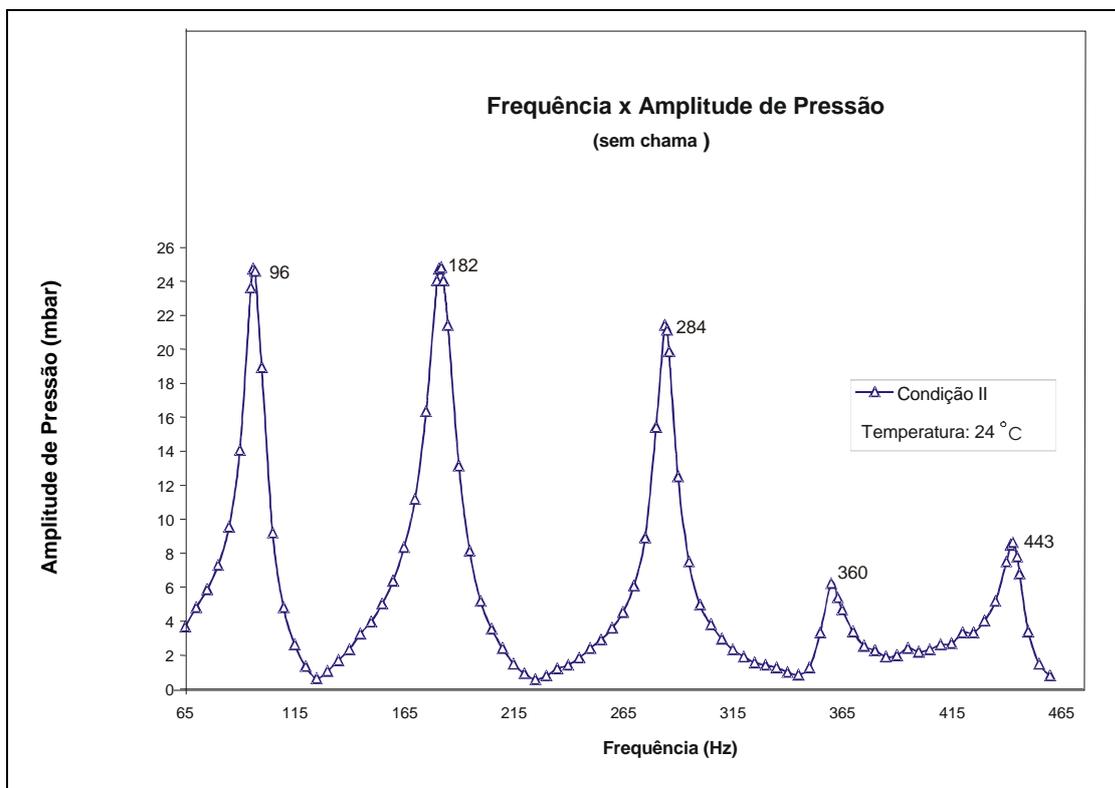


Figura 32 – Frequências x Amplitudes de Pressão na Condição II, com escoamento de ar primário, sem queima e temperatura ambiente de 24 °C (Erro máximo:  $\pm 0,56$  mbar).

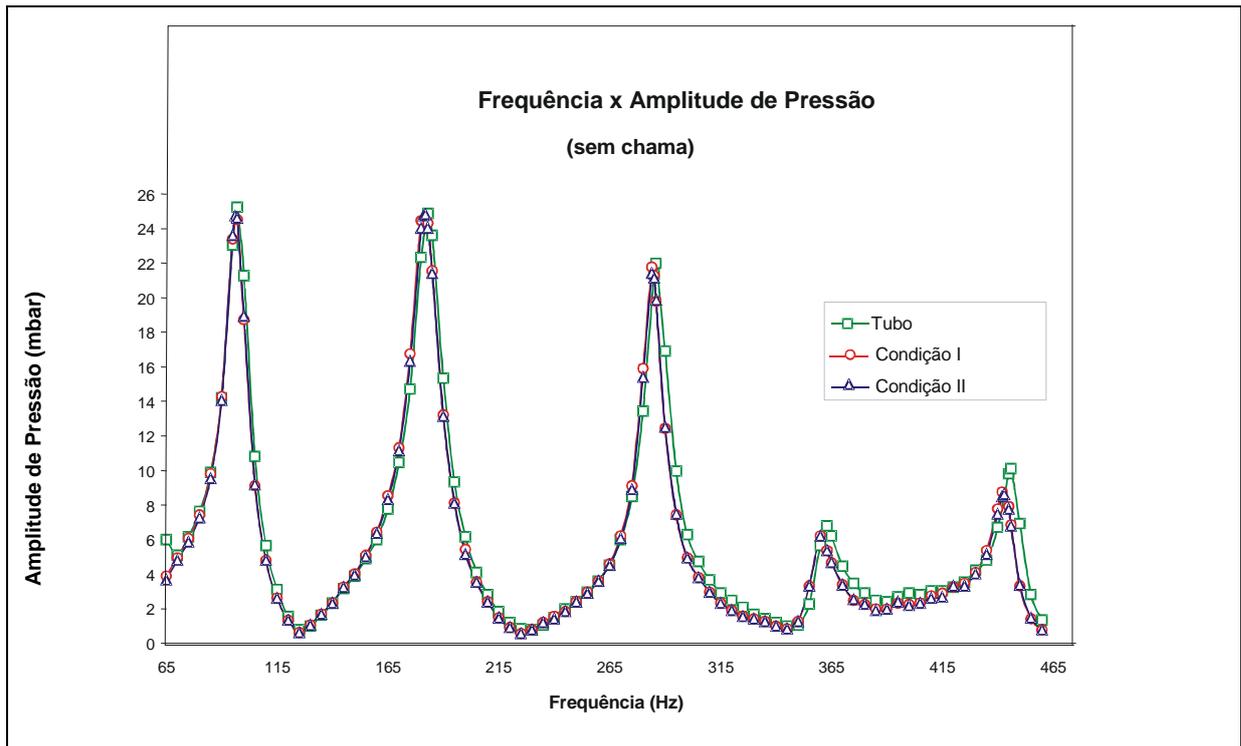


Figura 33 – Comparação das Frequências x Amplitudes de Pressão para os testes realizados (Erro máximo:  $\pm 0,56$  mbar).

A presença do escoamento de ar praticamente não altera o valor da frequência dos harmônicos e as amplitudes de pressão para as condições I e II, tomando-se como referência aquelas obtidas no tubo, mostrando que o ar injetado não altera o comportamento acústico do queimador, conforme mostra a Figura 33.

A Tabela 13 mostra os valores das frequências correspondentes aos picos de amplitude obtidas experimentalmente a frio, com suas respectivas temperaturas de teste e os valores das frequências dos harmônicos calculados, em função desta mesma temperatura.

Tabela 13 - Comparação dos valores calculados e experimentais das frequências dos harmônicos em função da temperatura.

T = 26 °C		T = 24 °C		
Frequência (Hz)		Frequência (Hz)		
Experimental	Teórica	Experimental		Teórica
Tubo		Condição I	Condição II	
97	88,4	97	96	88,1
183	176,7	180	182	176,2
286	265,1	284	284	264,2
363	353,5	360	360	352,3
446	441,9	442	443	440,4

A pequena divergência existente entre as frequências calculadas e as experimentalmente obtidas, conforme Tabela 13, é causada por alterações existentes no tubo, como por exemplo, a adição de todo o aparato necessário para a chama piloto, ou mesmo a introdução da câmara de desacoplamento neste. Acredita-se serem os resultados bastante satisfatórios, visto que os cálculos realizados levam em consideração apenas, um tubo aberto em ambas extremidades, ou seja, o tubo utilizado não é idealizado.

### 3.2.2 Ponto de “lift” da chama - definição das condições acústicas de trabalho

A seguir foram realizados testes à quente para as duas condições de trabalho, a fim de verificar os harmônicos do queimador com a adição da chama, testes estes destinados também, a verificar o ponto de “lift” da chama, ou seja, estabelecer as condições de máxima amplitude de pressão a ser aplicada ao escoamento de ar primário, que permitisse manter a chama ancorada, levando em consideração o limite do alto-falante.

Uma chama pode ser ancorada (estabilizada) em determinados limites de velocidade de escoamento dos reagentes no interior do tubo. Se esta velocidade for muito alta, não será possível ancorar a chama na borda do queimador (tubo), a velocidade do gás excede a velocidade de queima em todas linhas de corrente e a onda de combustão se desprende, a chama tenderá a escapar e se apagar “*blow off*”.

Para escoamentos com alta velocidade e/ou misturas ricas em combustível, acima do limite de “*blow off*”, haverá o carreamento do ar atmosférico, tornando a mistura progressivamente pobre em combustível, podendo haver a formação de uma chama suspensa “*lifted flame*” em alguma posição acima da borda do queimador, isso ocorre devido à alta velocidade do escoamento.

Através da excitação acústica é possível estender o limite de “*blow off*” em mais de 25% e melhorar a estabilidade de uma “*lifted flame*” (Chao e Jeng, 1992).

A Tabela 14 apresenta as frequências correspondentes aos cinco primeiros harmônicos do queimador, obtidos á quente, com suas respectivas tensões, aplicadas ao alto-falante e amplitudes de pressão máximas, referentes aos limites impostos pelo ponto de “*lift*” da chama.

Tabela 14 – Condições Acústicas oriundas de testes para verificar o ponto de “*lift*” da chama.

<b>Condição I</b>			<b>Condição II</b>		
Frequência	Tensão Alto Falante	Amplitude de Pressão	Frequência	Tensão Alto Falante	Amplitude de Pressão
(Hz)	(V)	(mbar)	(Hz)	(V)	(mbar)
97	5,0	10,0	96	14,0	21,2
181	8,0	14,0	181	9,0	17,0
282	19,0	16,0	283	24,0	27,0
358	22,0	8,0	357	24,0	8,1
441	25,0	12,0	439	25,0	12,1

É importante notar nestes ensaios, que a chama permanece ancorada para alguns casos específicos, utilizando-se amplitudes de pressão maiores que as aqui apresentadas, mas estas condições permitem à chama permanecer estável por curto período de tempo e não suficiente para a realização de alguns ensaios, como os da análise dos gases ou os da temperatura, tendo assim sido descartados a possibilidade de sua utilização.

Nota-se que para a maioria das frequências adotadas, o valor limite para a escolha das condições de trabalho foi a amplitude de pressão imposta ao escoamento de ar primário, com exceção da frequência correspondente ao quinto harmônico, onde a chama permaneceu estável até o limite máximo de potencial permitido pelo alto-falante.

Posteriormente, a fim de se verificar a evolução do efeito da atuação acústica sobre a chama, dividiu-se esta amplitude de pressão máxima em três amplitudes menores, objetivando uma análise seqüencial deste efeito, à medida que a amplitude de pressão vai aumentando.

Para a realização de todos os testes subseqüentes deste trabalho, adotaram-se as frequências correspondentes aos três primeiros harmônicos do queimador, visto que nestes foram obtidas maiores amplitudes de pressão. Para cada uma destas frequências, sua respectiva amplitude de pressão máxima foi então subdividida, sendo estas classificadas em máxima (correspondente à máxima amplitude), seqüencialmente média e mínima.

Desta forma, a Tabela 15 mostra a as características acústicas a serem seguidas para os ensaios referentes à análise dos gases, temperatura e análise tomográfica de chama, para as Condições I e II.

Tabela 15 – Condições Acústicas de Ensaio a serem seguidas para a Condição I e II.

Condição I		Condição II		Classificação
Frequência	Amplitude Pressão	Frequência	Amplitude Pressão	Amplitude
(Hz)	(mbar)	(Hz)	(mbar)	
97	3,5	96	7,1	Mínima
97	7	96	14,1	Média
97	10	96	21,2	Máxima
181	6	181	5,7	Mínima
181	11	181	11,3	Média
181	14	181	17	Máxima
282	7	283	9,9	Mínima
282	10	283	9,8	Média
282	16	283	27	Máxima

### 3.2.3 Influência da chama piloto sobre a estabilidade da chama principal

Para verificar a eficiência da chama piloto sobre a estabilidade da chama principal foram conduzidos ensaios para as vazões definidas na Tabela 11, nas frequências dos harmônicos, mostrados na Tabela 14, a fim de estabelecer a máxima amplitude de pressão aplicada ao escoamento que mantivesse a chama ancorada.

Um valor crítico levado em consideração nestes ensaios foi o máximo potencial permitido pelo alto-falante que é de 30 V, mas por segurança, não foi atingido este limite, tendo sido utilizado o máximo de 25 V.

Para tal, foi utilizado o sistema de atuação acústico visto na Figura 14 e descrito na seção 2.2.1, com as seguintes características:

- Potencial máximo no alto-falante: 25 V;
- Amplitude no amplificador de carga Kistler: 50mbar;
- Amplitude colocada no gerador de funções: 1,44 V RMS Pico (2,04 V Pico).

As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados da amplitude de pressão e da tensão aplicada ao alto-falante, respectivamente, ambas variando com as frequências correspondentes aos cinco primeiros harmônicos no queimador, conforme Tabela 14, para a situação com e sem a presença da chama piloto para as Condições I e II.

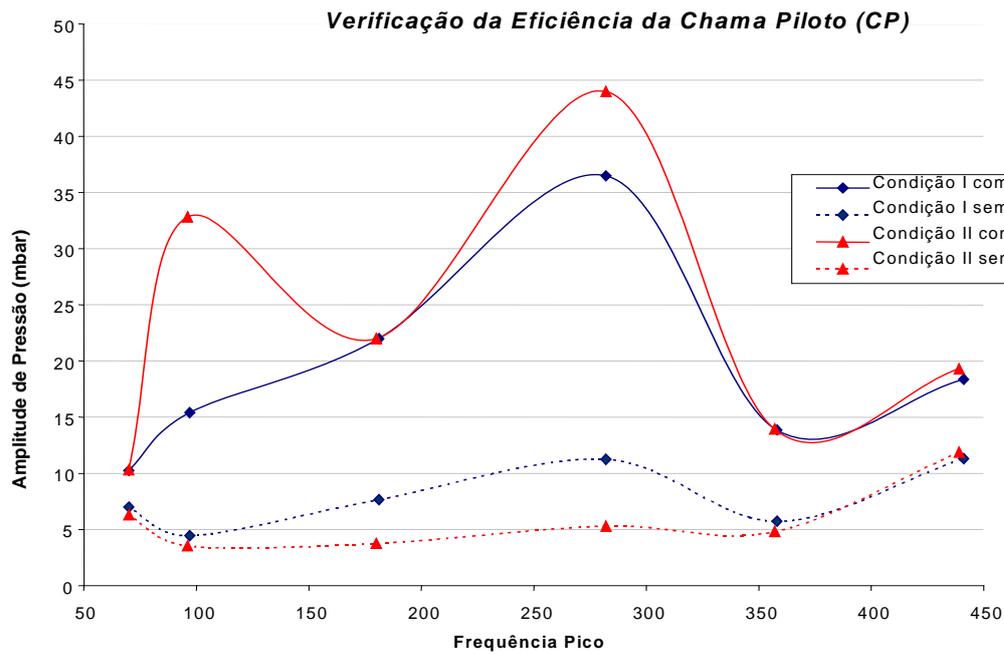


Figura 34 – Variação da amplitude de pressão com relação à frequência dos harmônicos no tubo, para as Condições I e II com e sem a Chama Piloto (Erro máximo:  $\pm 1,01$  mbar).

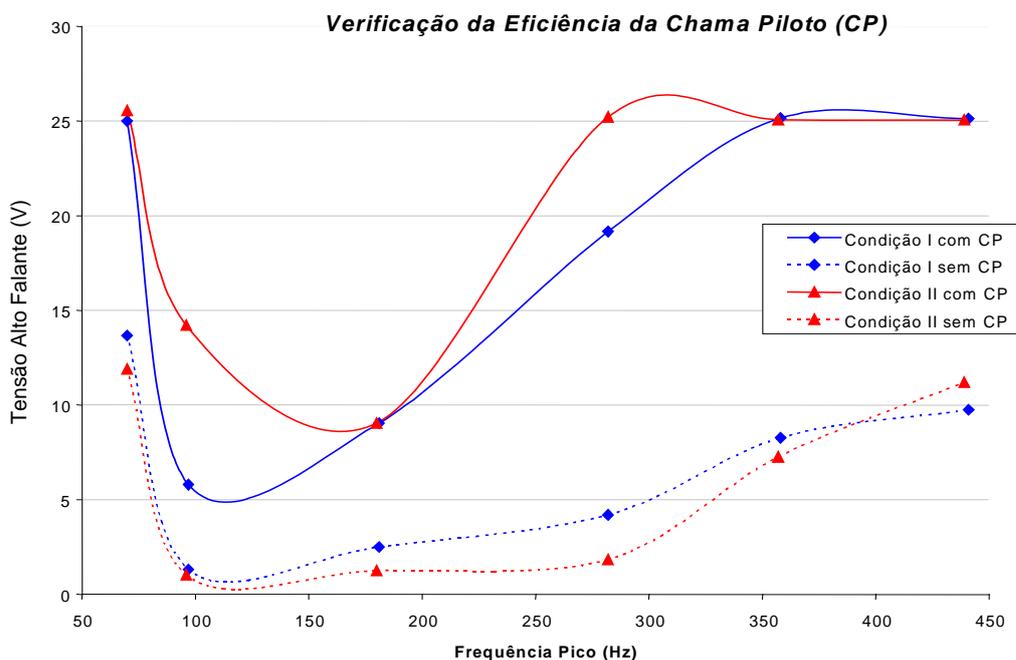


Figura 35 – Variação da tensão aplicada ao alto-falante, com relação à frequência dos harmônicos no tubo, para as Condições I e II com e sem a Chama Piloto (Erro máximo:  $\pm 1,01$  mbar).

Os resultados apontaram ser imprescindível a utilização das chamas piloto neste trabalho, fato este que inviabilizaria a realização dos testes propostos. As chamas piloto se mostraram indispensáveis para a estabilização da chama principal na borda do queimador, para ambas as condições de trabalho e em todas as frequências utilizadas.

Verificou-se, por exemplo que com a chama piloto em 282 Hz, foi possível colocar uma tensão de 19 V no alto-falante para a Condição I e 25 V para a Condição II, obtendo respectivamente, 36,5 mbar e 44 mbar de amplitude de pressão para estas condições, enquanto que, sem a chama piloto foi colocado 4,2 V para a Condição I e 1,8 V para a Condição II.

### 3.3 CORREÇÕES DAS MEDIDAS NO SISTEMA DE ATUAÇÃO ACÚSTICO

A calibração dos equipamentos utilizados no sistema de atuação acústico foi feita no decorrer da realização dos testes experimentais. Não foi possível sua calibração antes de se iniciar os ensaios experimentais, devido a problemas técnicos. Desta forma, depois de já obtidos alguns resultados, houve a necessidade de correção das medidas das amplitudes de pressão acústica.

Os equipamentos calibrados foram o gerador de funções Agilent 33120A, o amplificador de sinal Advanced XT550, o alto-falante Snake modelo ESX 125 de 12”, o transdutor de pressão piezoelétrico Kistler 7261, o amplificador de carga Kistler 5006 e os multímetros Minipa Modelo ET 2082, onde são monitorados o potencial elétrico levado ao alto-falante e a amplitude de pressão imposta ao ar excitado.

Verificou-se a necessidade de correção dos valores obtidos no amplificador de carga Kistler, gerando-se para tal a equação matemática abaixo:

$$AP_{\text{real}} = 1,4707 \times AP_{\text{lida}} + 0,0043 \quad (39)$$

onde:

- $AP_{\text{real}}$  = Amplitude de Pressão corrigida (Vrms);
- $AP_{\text{lida}}$  = Amplitude de Pressão lida no amplificador de carga (Vrms).

O Anexo III apresenta detalhadamente o procedimento para a calibração do equipamento a ter os valores corrigidos, realizada por Flügel (2006) e seus resultados.

A Tabela 16 mostra as amplitudes de pressão para as Condições I e II e seus respectivos valores corrigidos. Os dados a serem apresentados nos próximos itens deste trabalho trarão seus valores já corrigidos com relação à amplitude de pressão.

Tabela 16 – Valores corrigidos para Condições Acústicas de Trabalho para Condição I e II.

Condição I			Condição II		
Frequência	Amplitude Pressão	Amplitude Pressão Corrigida	Frequência	Amplitude Pressão	Amplitude Pressão Corrigida
(Hz)	(mbar)	(mbar)	(Hz)	(mbar)	(mbar)
97	3,5	5,5	96	7,1	11
97	7	10	96	14,1	23
97	10	15	96	21,2	31
181	6	8,5	181	5,7	8,5
181	11	16	181	11,3	17
181	14	21	181	17	25
282	7	10	283	9,9	15
282	10	15	283	19,8	30
282	16	23	283	27	38

Desta forma a Tabela 17 mostra a seqüência de testes com relação às condições acústicas que foram utilizadas nos ensaios que se seguiram, com os valores corrigidos.

Esta seqüência, a qual é iniciada pela letra “A” seguindo até a letra “T”, corresponde à ordem do roteiro de testes a serem seguidos para a análise das medidas de concentração dos gases, temperatura e tomografia realizados na região de chama.

Tabela 17 – Seqüência Acústica de Testes para os Ensaios, com valores corrigidos, a serem seguidas para a Condição I e II.

<b>Condição I</b>			<b>Condição II</b>		
Seqüência de Testes	Frequência	Amplitude	Seqüência de Testes	Frequência	Amplitude
	(Hz)	(mbar)		(Hz)	(mbar)
<b>(A)</b>	sem atuação		<b>(K)</b>	sem atuação	
<b>(B)</b>	97	5,5	<b>(L)</b>	96	11
<b>(C)</b>	97	10	<b>(M)</b>	96	21
<b>(D)</b>	97	15	<b>(N)</b>	96	31
<b>(E)</b>	181	8,5	<b>(O)</b>	181	8,5
<b>(F)</b>	181	16	<b>(P)</b>	181	17
<b>(G)</b>	181	21	<b>(Q)</b>	181	25
<b>(H)</b>	282	10	<b>(R)</b>	283	15
<b>(I)</b>	282	15	<b>(S)</b>	283	30
<b>(J)</b>	282	23	<b>(T)</b>	283	38

## **CAPÍTULO 4 METODOLOGIA, RESULTADOS E COMENTÁRIOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Os resultados aqui apresentados têm por objetivo avaliar as influências causadas pela imposição do campo acústico sobre a chama, apresentando os valores obtidos para a situação com e sem a excitação acústica. Apresenta também as variações das posições radiais e axiais a serem realizados os testes experimentais, deduzidos a partir das medidas de altura da chama.

Apresenta desta forma metodologia, resultados e comentários referentes ao comprimento da chama, à interferência do ar secundário nas medidas efetuadas na chama, à análise dos gases e temperatura e à reconstrução tomográfica da chama.

### **4.1 COMPRIMENTO DA CHAMA E POSIÇÕES AXIAIS E RADIAIS PARA VARREDURA DA CHAMA**

#### **4.1.1 Comprimento da chama**

Ensaio foram conduzidos a fim de verificar os efeitos do campo acústico sobre o comprimento da chama, bem como, para se definir a variação axial e radial a ser utilizada neste trabalho para a realização dos ensaios experimentais.

Nestes ensaios, a sonda de gases foi posicionada na região central do queimador (ponto de referência), nas Condições I e II de vazão. Variou-se axialmente a posição da sonda até a concentração de CO atingir concentração menor que 0,1%. O critério utilizado para determinar o final da chama, é o de que, a concentração de CO tendendo à zero, indica término da reação química e conseqüentemente a extremidade de chama.

Optou-se por concentração de CO menor que 0,1% e não 0%, pois com a atuação acústica a chama tende a oscilar radialmente, correndo-se o risco da sonda estar numa região fora da chama. Este procedimento foi feito para as vazões de gases da Tabela 11 e condições acústicas da Tabela 17. Os resultados referentes às medidas do comprimento da chama são apresentados na Tabela 18, juntamente com as concentrações do O<sub>2</sub> ([O<sub>2</sub>]), CO<sub>2</sub> ([CO<sub>2</sub>]), CO ([CO]) e NO<sub>x</sub> ([NO<sub>x</sub>]) nestes comprimentos da chama.

Tabela 18 – Altura da Chama e composição dos Gases para a Condição I e II em sua extremidade superior.

<b>Seqüência de Testes</b>	<b>Altura Chama</b>	<b>[O<sub>2</sub>]</b>	<b>[CO<sub>2</sub>]</b>	<b>[CO]</b>	<b>[NO<sub>x</sub>]</b>
	(mm)	(%)	(%)	(%)	(ppm)
(A)	780	13,89	3,57	0,10	25,80
(B)	780	14,73	3,62	0,09	27,96
(C)	720	14,20	3,70	0,10	28,59
(D)	630	13,98	3,76	0,09	29,42
(E)	765	14,05	3,76	0,10	28,72
(F)	635	14,00	3,74	0,08	29,39
(G)	595	13,53	4,05	0,10	30,59
(H)	745	13,86	3,80	0,10	27,92
(I)	720	13,96	3,85	0,08	27,53
(J)	615	13,77	4,10	0,09	26,76
(K)	850	13,72	4,30	0,11	29,66
(L)	790	14,38	3,81	0,07	25,26
(M)	700	14,49	3,95	0,07	22,40
(N)	600	15,32	3,42	0,05	14,48
(O)	840	13,77	3,91	0,07	25,08
(P)	730	14,05	4,27	0,10	26,66
(Q)	710	13,71	4,01	0,06	22,47
(R)	830	13,76	4,13	0,07	27,19
(S)	720	13,74	4,21	0,07	25,61
(T)	690	13,31	4,45	0,10	26,51

Com relação à concentração dos gases da extremidade superior da chama, levando-se em consideração o desvio padrão, as medidas pouco se alteram com relação às condições de atuação aplicadas.

Como exemplo, a Figura 36 apresenta o resultado deste procedimento, mostrando o comprimento da chama na Condição II para a situação com atuação acústica de 96 Hz e diferentes amplitudes.

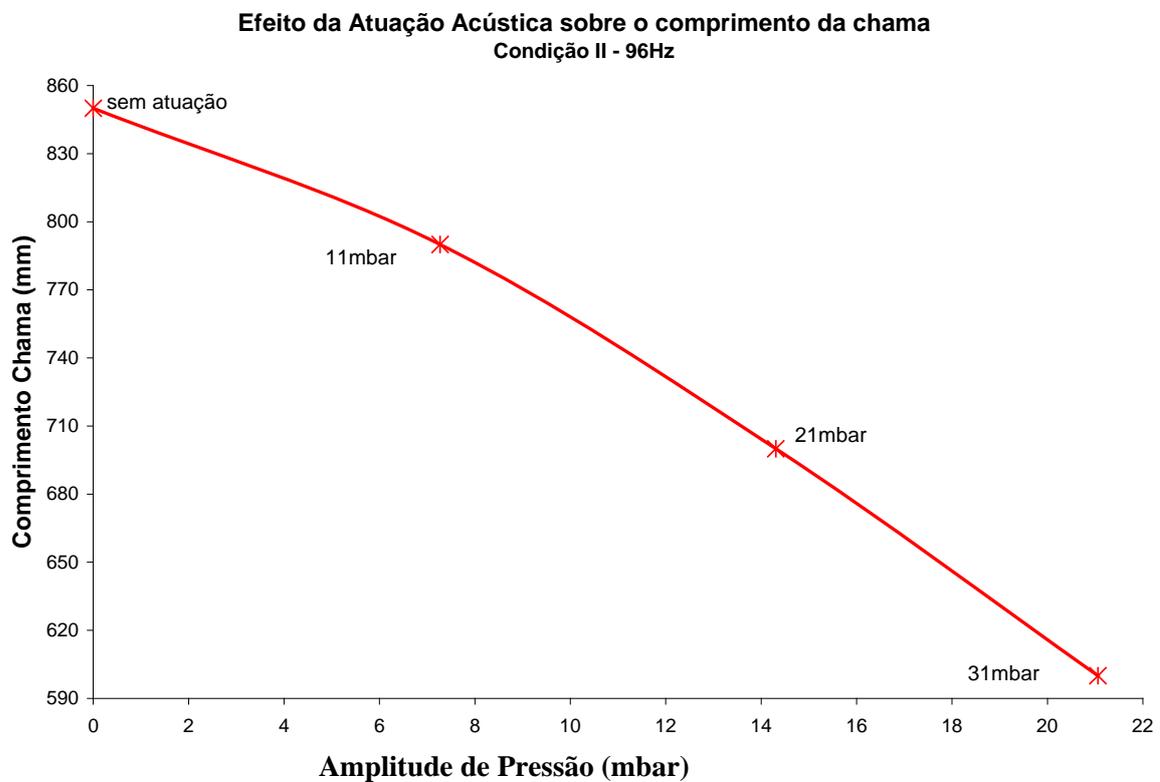


Figura 36 – Comprimento da chama com a atuação acústica em 96 Hz e diferentes amplitudes de pressão para a Condição II (Erro máximo:  $\pm 20,4$  mm).

A Figura 37 apresenta uma comparação do comprimento da chama nas Condições I e II para as frequências correspondentes aos três primeiros harmônicos do queimador.

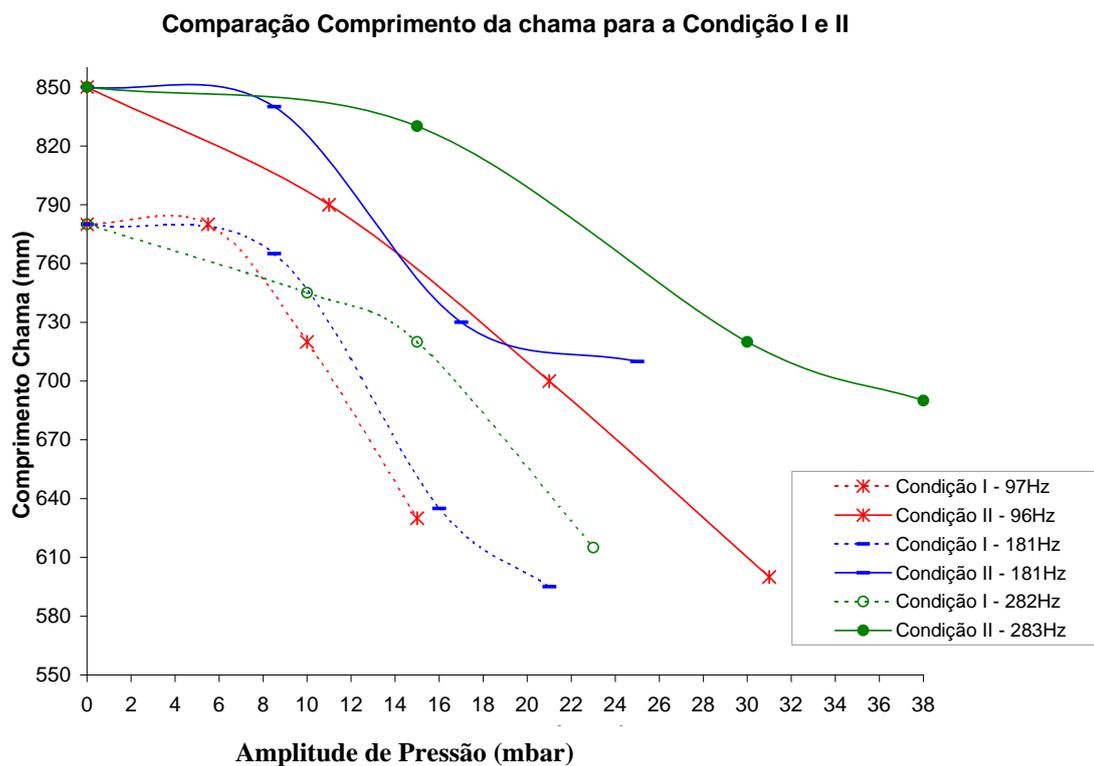


Figura 37 – Comparação do comprimento da chama para as Condições I e II, para diferentes frequências e diferentes amplitudes de pressão (Erro máximo:  $\pm 20,4$  mm).

É verificado que assim como para a Condição I, para a Condição II, o campo acústico diminui o comprimento da chama à medida que há o aumento gradativo da amplitude de pressão, supostamente por este melhorar a mistura entre oxidante e combustível.

A chama na Condição II, para a situação com e sem atuação acústica, tem comprimento maior, condição esta onde se tem excesso de ar de 5%, enquanto que na Condição I, tem excesso de 22% com velocidade do jato de ar maior. Com o aumento da velocidade do ar há um maior cisalhamento na chama, o que resulta em um escoamento mais turbulento. Outro ponto interessante é que as curvas seguem o mesmo perfil para a Condição I e II, variando apenas o comprimento da chama.

#### **4.1.2 Posições axiais e radiais para varredura da chama**

Verificada a altura da chama para todas as situações de atuação, foram então definidas as variações radiais e axiais a serem adotadas neste trabalho. Estipularam-se as posições axiais de 50mm, 150mm e 250mm, visto a relevância das reações nesta região, tendo sido estas também adotadas por Nooren et al. (2000), Peeters et al. (1994), Andraus (2003), entre outros.

Para a varredura radial na chama, verificou-se que em 50 mm e 150 mm havia alterações consideráveis nas concentrações das espécies químicas na chama, à medida que era alterada a condição de atuação, em pequenas distâncias radiais, assim optou-se pela variação radial de 1 em 1 mm nestas posições. Entretanto em 250 mm (posição axial) estas alterações não foram significativas, optando-se por variar os pontos radiais de 2 em 2 mm. Realizaram-se as medidas radiais nos pontos onde era possível verificar visivelmente a existência da chama.

A Tabela 19, mostra a relação dos testes realizados para a análise dos gases e para o campo de temperatura para a Condição I e II, sendo a variação radial é denotada por \*.

Tabela 19 – Relação das posições para varredura da chama

Condição de Atuação	Variação Axial / *Variação Radial na chama		
(A)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(B)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(C)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(D)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(E)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(F)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(G)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(H)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(I)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(J)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(K)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(L)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(M)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(N)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(O)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(P)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(Q)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(R)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(S)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm
(T)	50mm / *1mm	150mm / *1mm	250mm / *2mm

#### 4.2 INTERFERÊNCIAS DO AR SECUNDÁRIO NA CHAMA PRINCIPAL

O queimador de Delft é originalmente composto por câmara de ar secundário, conforme pode ser visto na Figura 11 como já mencionado, o queimador utilizado neste trabalho foi construído com as mesmas características daquele, adaptado apenas com sistema acústico, cujo esquema e fotografia podem ser vistos na Figura 13 (a) e (b), respectivamente.

O ar secundário, possui velocidade aproximada de 0,35 m/s para as condições de trabalho I ( $\varnothing_G = 0,82$ ) e II ( $\varnothing_G = 0,95$ ), o que garante escoamento laminar, sendo este fornecido por compressor radial. No projeto do queimador original, sua existência tem por finalidade garantir, que não haja nenhuma influência do escoamento externo sobre a chama, o que poderia alterar as medidas realizadas.

Com o objetivo de se verificar a existência de alguma influência do ar secundário sobre as medidas feitas na chama, realizou-se alguns testes com e sem a sua presença para as vazões da Tabela 11, nas condições acústicas apresentadas na Tabela 17. A Figura 38 apresenta o resultado de testes da análise dos gases para a Condição I de atuação em 150mm, 181 Hz e 16 mbar, salientando-se que os demais resultados seguem a mesma tendência dos aqui apresentados.

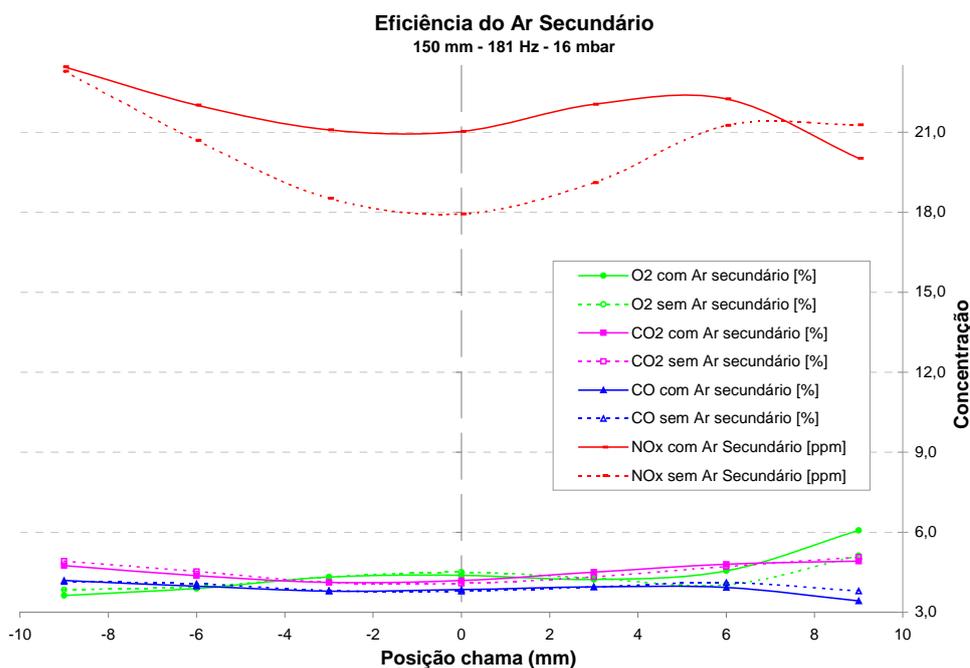


Figura 38 – Concentração dos gases para a situação com e sem a utilização do Ar secundário (Erro máximo:  $\pm 0,5\%$ ).

Verifica-se que o escoamento de ar secundário causa uma pequena alteração nas emissões de  $\text{NO}_x$ , porém a variação desta concentração não é significativa nos testes. Para os demais gases, ele pouco influencia os resultados obtidos na região de chama

com relação à concentração dos gases, podendo optar-se ou não pela sua utilização. Isto provavelmente ocorre pelo fato do arranjo experimental estar em um ambiente fechado.

#### 4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS GASES

Foram realizados testes para se verificar a composição na chama das espécies CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, conforme mencionado no item 2.2.3, para as vazões de alimentação apresentadas na Tabela 11, condições acústicas descritas na Tabela 17 e nas posições radiais e axiais, conforme Tabela 19.

Cabe salientar que cada valor apresentado para cada condição de trabalho (Ex: Condição I, 97 Hz – 5,5 mbar – posição axial: 50mm – posição radial: 1 mm), representa a média aritmética dos dados adquiridos e registrados a partir do sistema de aquisição e aqui representados, ou seja, cada valor é a média aritmética de uma planilha para uma determinada condição. Os valores apresentados com relação à análise dos gases, são originados a partir de 646 planilhas trabalhadas para a Condição I e 633 planilhas para a Condição II, obtidas através do sistema de aquisição de dados, para os testes citados, o que demanda razoável dedicação e tempo.

A fim de verificar o efeito da atuação acústica sobre a chama, foram gerados gráficos para uma determinada condição acústica de acordo com a Tabela 17, para as alturas axiais de 50, 150 e 250mm, para cada gás analisado (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub>), variando-se as concentrações das espécies em função da variação de posição radial. Foi gerado um total de 36 gráficos, não sendo necessária a apresentação de todos, visto semelhança qualitativa dos resultados. Aqui serão mostrados alguns casos relevantes, que demonstrem uma tendência nos resultados.

Aqui serão apresentados os resultados referentes às medidas dos gases na região de chama com e sem a influência do campo acústico, respectivamente para a Condição I e Condição II. Posteriormente, são apresentados as concentrações dos gases com seus

valores corrigidos, pois se verificou diluição dos produtos da combustão com  $O_2$  e finalmente é mostrada uma comparação entre as concentrações das espécies para as duas condições de vazão.

### 4.3.1 Análise dos gases na Condição I

As Figuras 39, 40 e 41 apresentam a concentração de CO em 97 Hz e 5,5, 10 e 15 mbar, respectivamente.

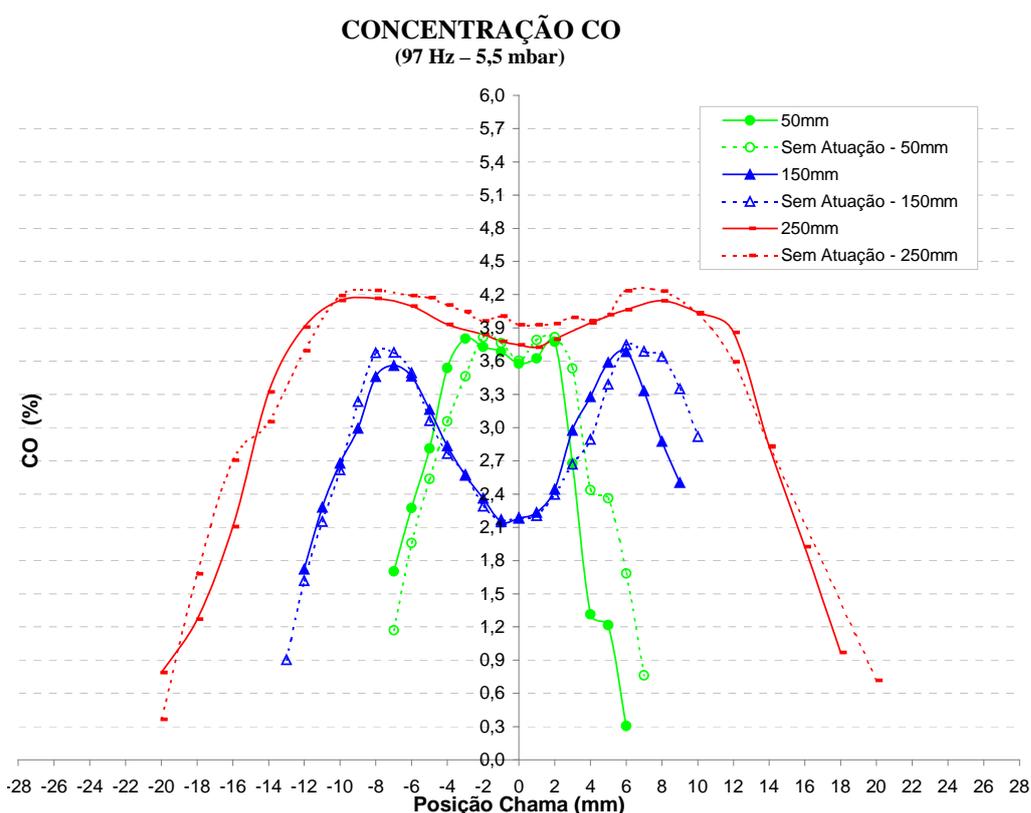


Figura 39 – Concentração de CO a 97 Hz e 5,5 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Nota-se pela Figura 39 que a atuação acústica pouco altera a estrutura da chama com relação à concentração de CO, havendo apenas em alguns pontos sua diminuição, possivelmente por termos nesta condição, amplitude de pressão bastante baixa. Porém

à medida que esta sofre incremento, conforme pode ser visto nas Figuras 40 e 41, verifica-se uma tendência nas curvas para cada altura axial, que gradativamente vão modificando seu formato.

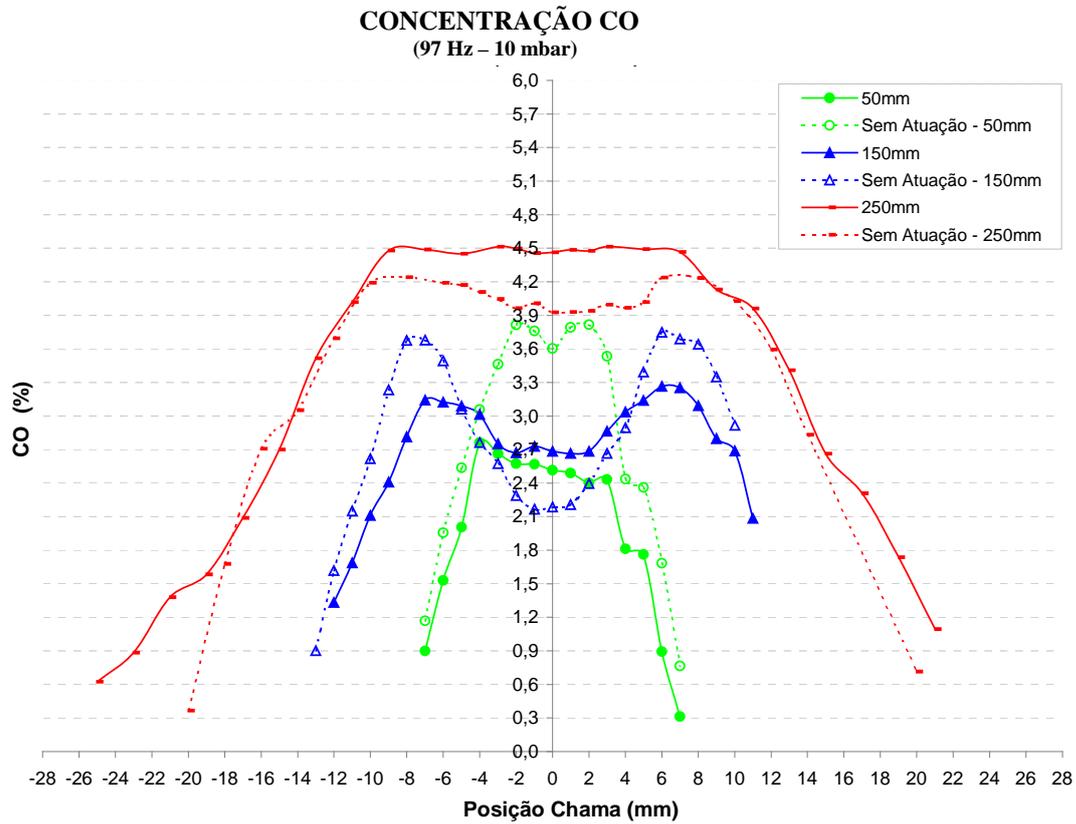


Figura 40 – Concentração de CO a 97 Hz e 10 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

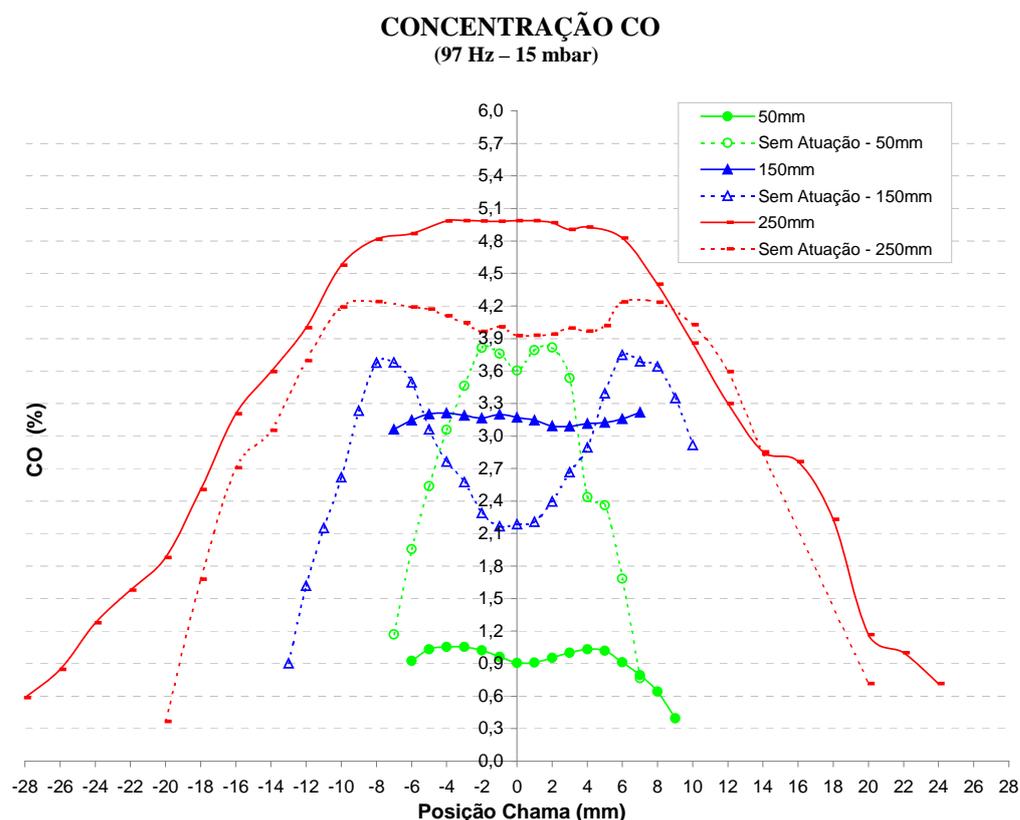


Figura 41 – Concentração de CO a 97 Hz e 15 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Nas Figuras 40 e 41, para o primeiro harmônico, a 50 mm da base da chama, a atuação diminui acentuadamente a emissão de CO com relação aos ensaios sem atuação. Entretanto em 150 mm, há uma tendência da concentração de CO se manter maior no centro e regiões vizinhas, onde tem-se tradicionalmente alta velocidade de chama. Porém, em alguns pontos nas extremidades da chama, existe concentração menor com atuação do que sem atuação acústica.

A partir deste ponto serão apresentados os resultados referentes à aplicação das amplitudes máximas, pois esta condição constitui-se representativa das demais amplitudes de pressão.

A figura 42 mostra a concentração de CO para 181 Hz a 21 mbar, enquanto a Figura 43 mostra concentração de CO a 282 Hz e 23 mbar.

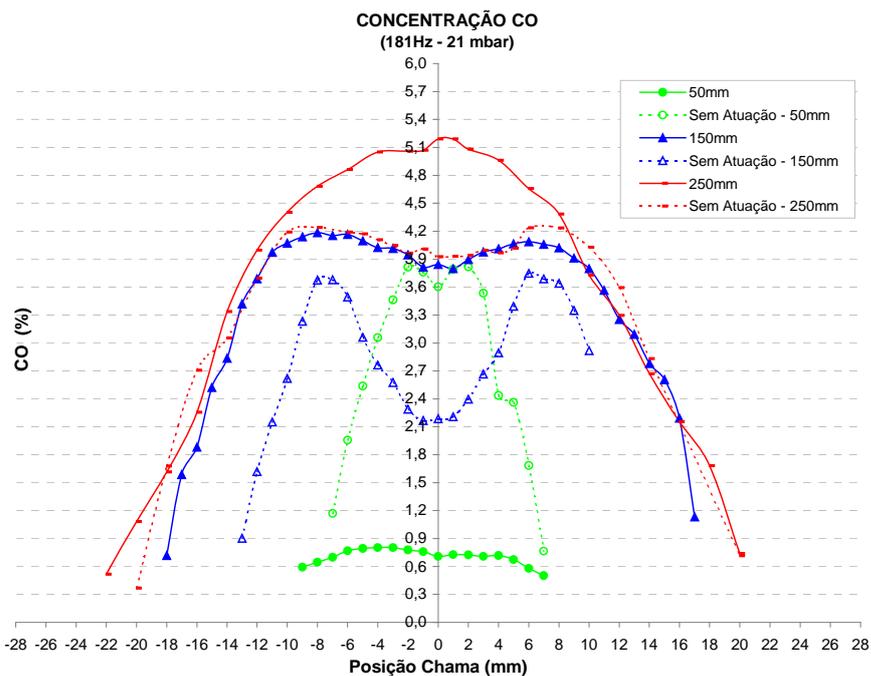


Figura 42 – Concentração de CO a 181 Hz e 21 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

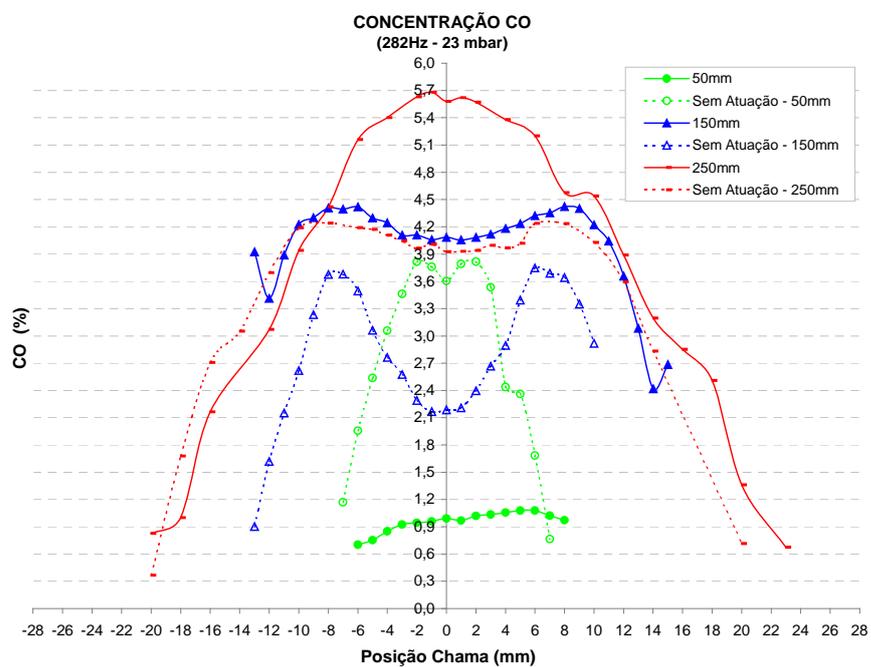


Figura 43 – Concentração de CO a 282 Hz e 23 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Em 50 mm (posição axial), Figura 42, a atuação diminui acentuadamente a concentração de CO enquanto que em 150 e 250 mm ocorre incremento. A mesma

análise pode ser estendida à Figura 43, onde se tem comportamento semelhante, ou seja, verifica-se que a atuação neste harmônico (terceiro) tem comportamento semelhante nas curvas do primeiro e segundo harmônico, indicando que a concentração de CO não se altera qualitativamente com a utilização de diferentes harmônicos.

Sabe-se que à medida que o escoamento reativo se desenvolve na direção axial, o CO tende a se converter a CO<sub>2</sub>. Até 250mm não foi possível constatar essa evolução, nem mesmo para a situação com oscilação. Contudo, medidas feitas ao longo do eixo central do queimador, por ocasião da medição do comprimento da chama, mostraram esta tendência, pois foi adotado como o final da chama, como já visto, o ponto onde a concentração de CO atingiu o valor da sensibilidade do analisador de gás (0,01%) no eixo de centro do queimador, admitindo que esse é o ponto final da combustão.

As Figuras 44, 45 e 46 apresentam a concentração de NO<sub>x</sub> para 97 Hz / 15 mbar, 181 Hz / 21 mbar e 282 Hz / 23 mbar, respectivamente.

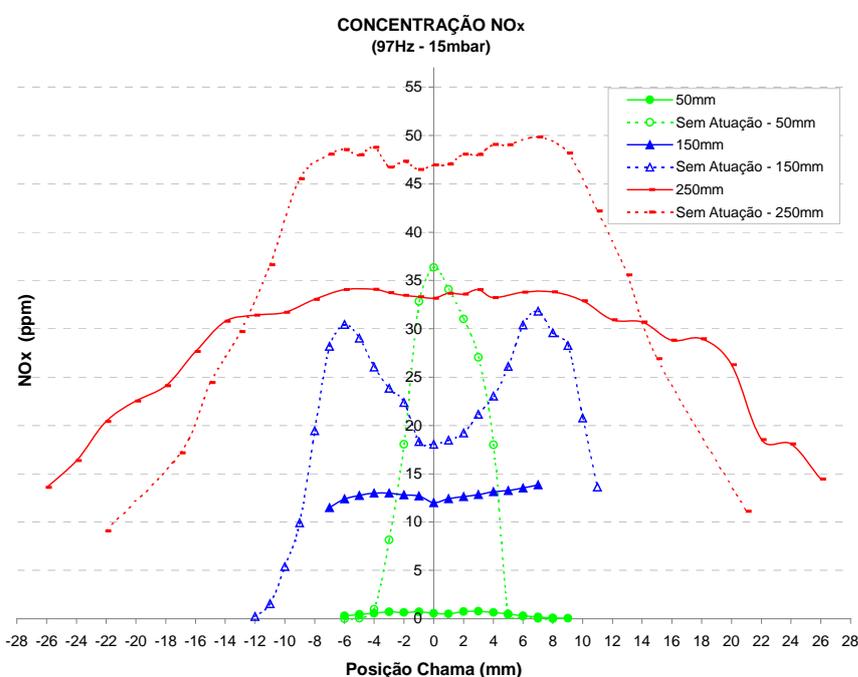


Figura 44 – Concentração de NO<sub>x</sub> a 97 Hz e 15 mbar (Erro máximo: ± 2,3 ppm).

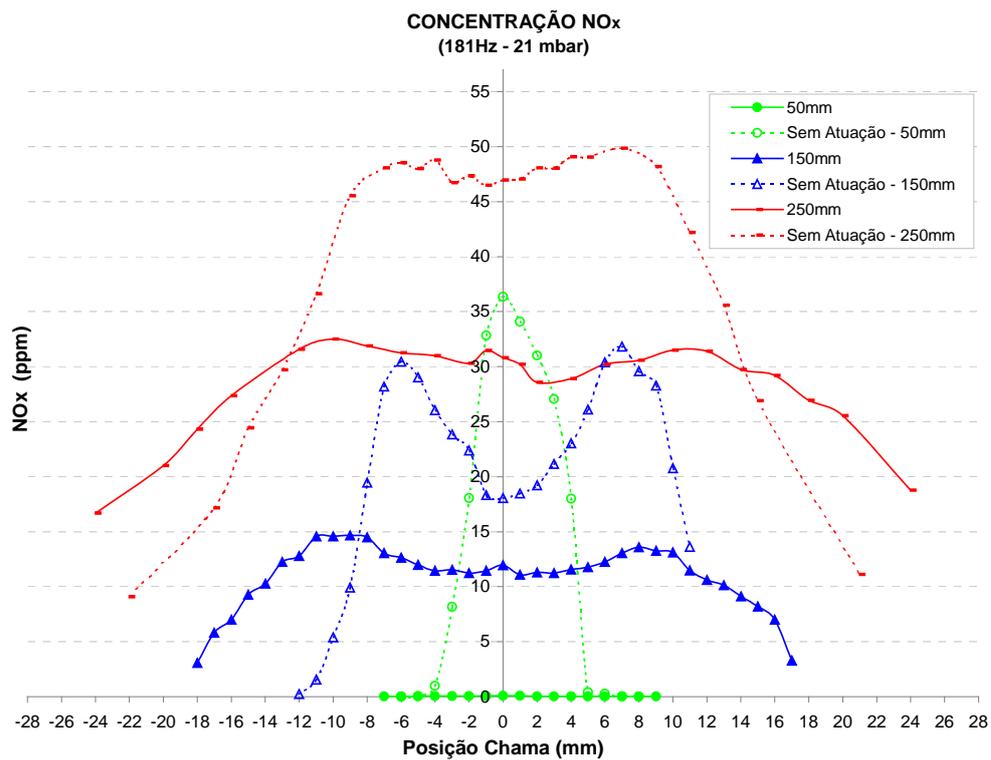


Figura 45 – Concentração de NO<sub>x</sub> a 181 Hz e 21 mbar (Erro máximo: ± 2,3 ppm).

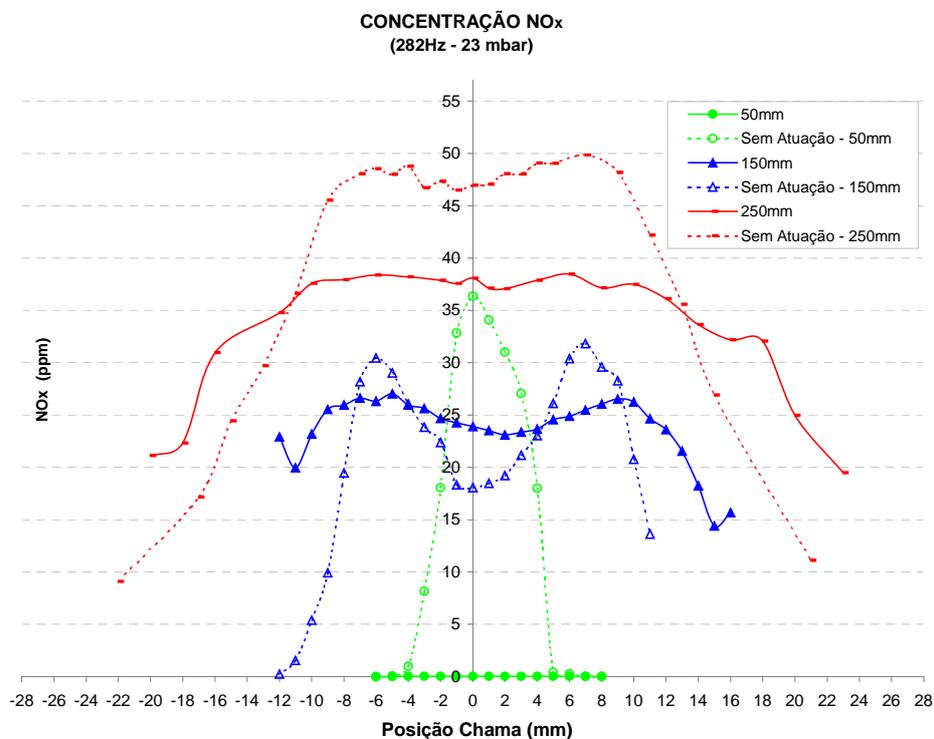


Figura 46 – Concentração de NO<sub>x</sub> a 282 Hz e 23 mbar (Erro máximo: ± 2,3 ppm).

Pela Figura 44 verifica-se que a atuação acústica diminui a concentração de  $\text{NO}_x$  tanto em 50mm, 150mm e 250mm, obtendo-se em algumas regiões, especialmente em 50 mm, concentração de 0%, levando-se em consideração o erro do analisador. Verifica-se que a atuação acústica minimiza os picos de emissão de  $\text{NO}_x$ , suavizando-os.

Nota-se através da Figura 45 o mesmo comportamento para o  $\text{NO}_x$  visto na Figura 44, isto é, a distribuição de  $\text{NO}_x$  também é afetada pela presença do campo acústico. Quando a atuação está presente, a região próxima ao queimador (50mm) caracteriza-se pela ausência de formação de  $\text{NO}_x$ . O efeito da pré-mistura que o campo acústico propicia para a região mais próxima à saída do queimador acaba sugerindo um ambiente menos favorável à formação do  $\text{NO}_x$ , ou seja, temperaturas relativamente baixas, inibindo a formação principalmente do  $\text{NO}_x$  térmico, hipótese esta que poderá ser mais bem avaliada com a apresentação dos perfis de temperatura na chama. Em 150mm e 250mm, nota-se que o campo acústico também altera a presença do  $\text{NO}_x$  na chama. Quando não há atuação, a máxima concentração de  $\text{NO}_x$  ocorre na fronteira de chama, decaindo tanto para o lado interno como para o externo desta. Quando a atuação é imposta, os pontos de máximo são suavizados e a concentração de  $\text{NO}_x$  fica mais bem distribuída radialmente e com menor concentração.

Pode ser verificado pela Figura 46 comportamento qualitativo semelhante aos dois primeiros harmônicos, isto é, com o campo acústico tem-se concentração de  $\text{NO}_x$  igual ou próxima de 0 ppm em 50mm, havendo decréscimo desta em 150 e 250mm, com exceção das extremidades das curvas.

Apesar das observações sobre as Figuras 44, 45 e 46 não se torna possível, com estes resultados, predizer se a atuação acústica aumenta ou diminui o total de  $\text{NO}_x$  emitido, pois a combustão não é confinada em uma câmara, impossibilitando avaliar a emissão global. Embora não tenham sido aqui apresentados todos os resultados da concentração de  $\text{NO}_x$ , verifica-se nitidamente, que para todas as frequências, à medida que se aumenta a amplitude de pressão diminui-se gradativamente a emissão de  $\text{NO}_x$  localmente

As Figuras 47, 48 e 49 mostram a concentração de  $O_2$  para 97 Hz / 15 mbar, 181 Hz / 21 mbar e 282 Hz / 23 mbar, respectivamente.

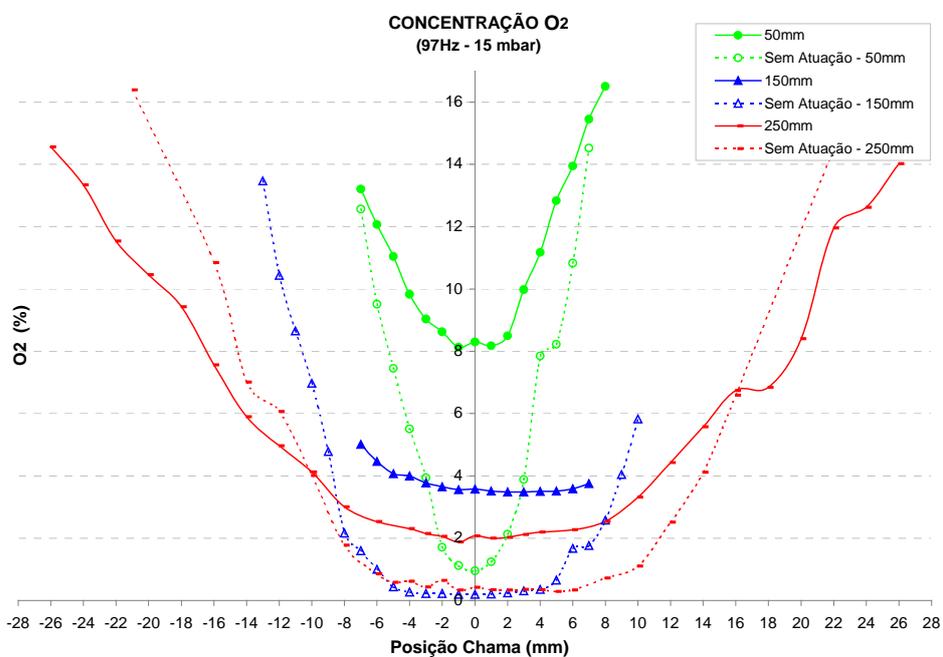


Figura 47 – Concentração de  $O_2$  a 97 HZ e 15 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

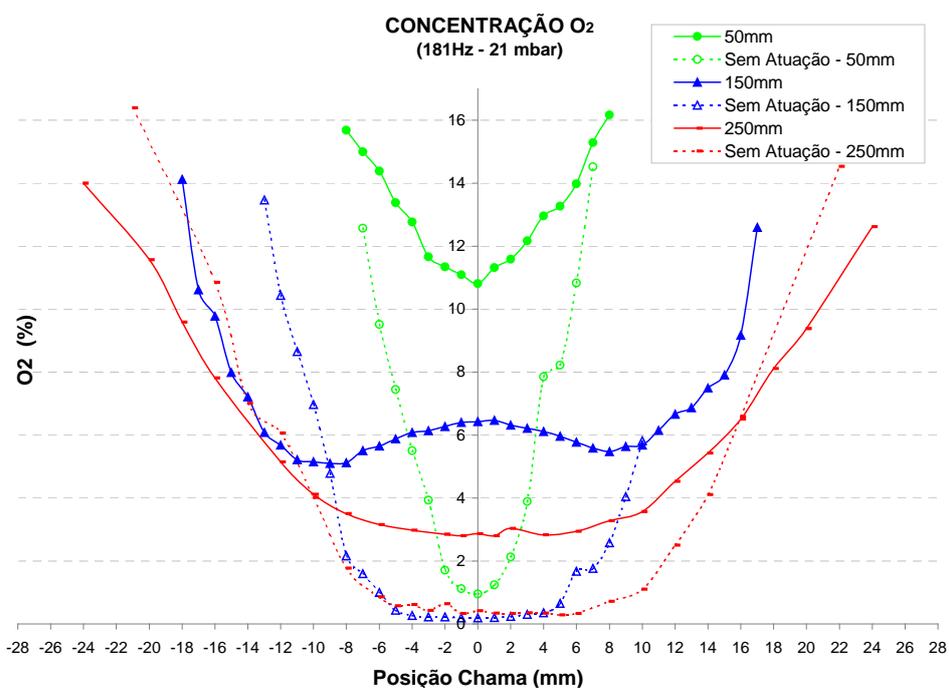


Figura 48 – Concentração de  $O_2$  em 181 HZ – 21 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

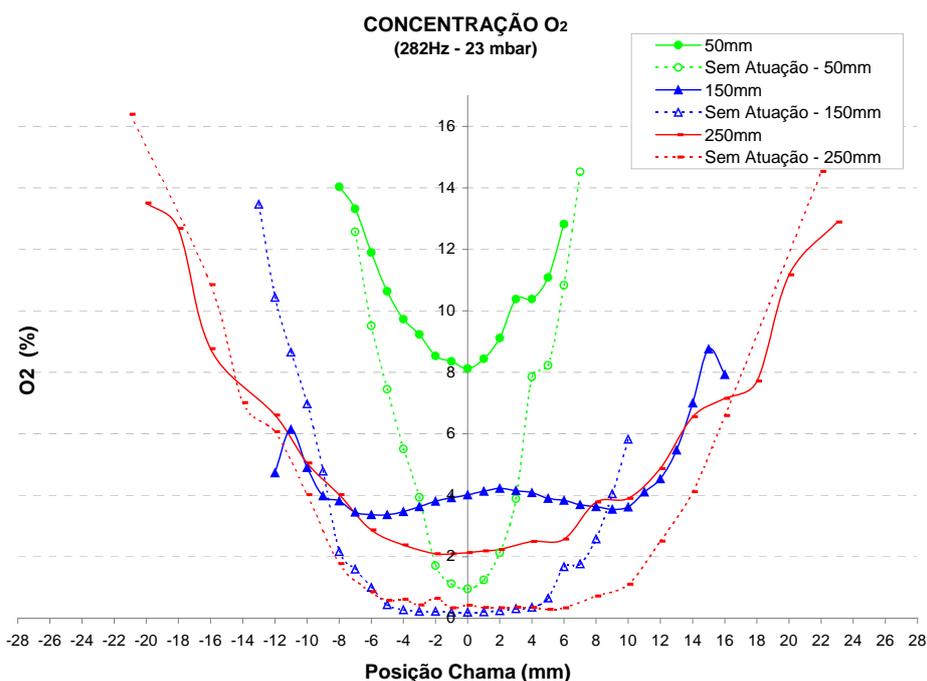


Figura 49 – Concentração de O<sub>2</sub> em 282 Hz – 23 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

Verifica-se que há aumento na concentração de O<sub>2</sub> para qualquer variação axial, especialmente na região central do queimador, em 50, 150 e 250mm, sendo exceção a região periférica em 150mm e 250mm. A presença do campo acústico induz a presença de oxigênio no interior da chama, tirando-lhe o caráter totalmente difusivo, para os três harmônicos.

As Figuras 50, 51, 52 apresentam as concentrações de CO<sub>2</sub> em 97 Hz / 15 mbar, 181 Hz / 21 mbar e 282 Hz / 23 mbar, respectivamente.

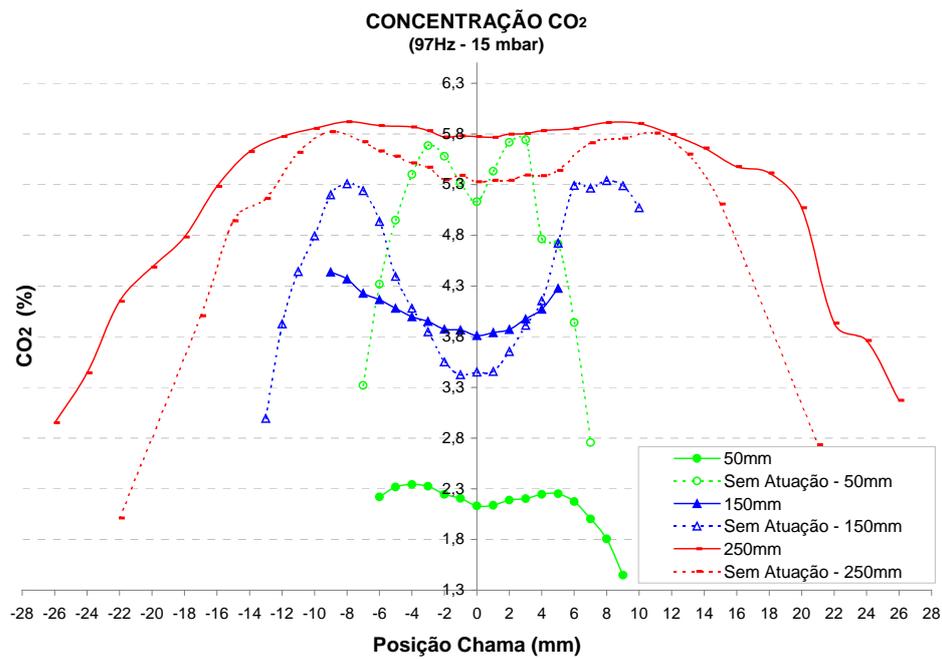


Figura 50 – Concentração de CO<sub>2</sub> a 97 Hz – 15 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

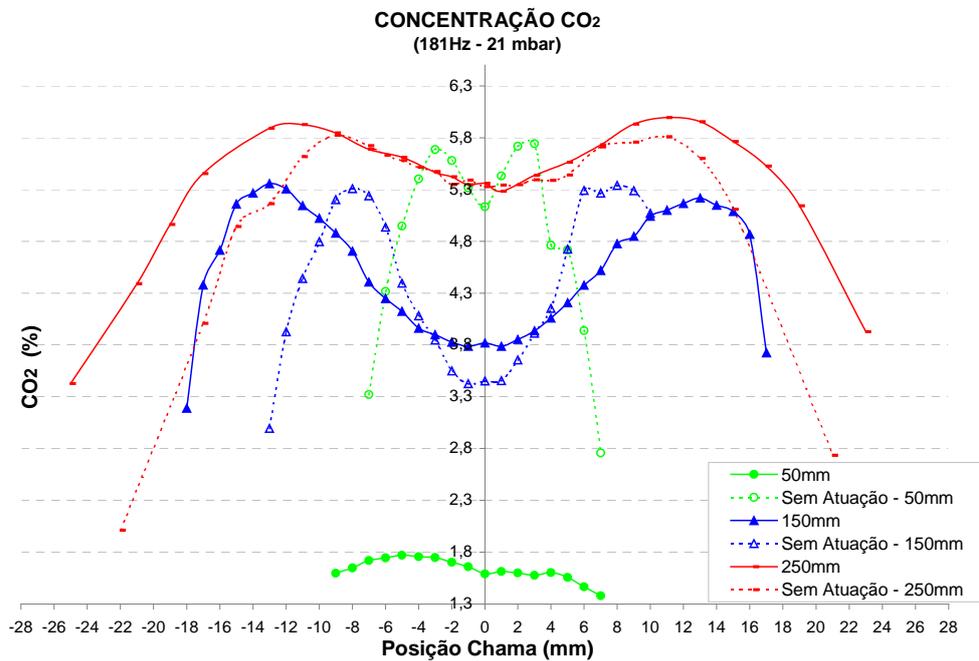


Figura 51 – Concentração de CO<sub>2</sub> em 181 Hz - 21mbar (Erro máximo:  $\pm 0,21\%$ ).

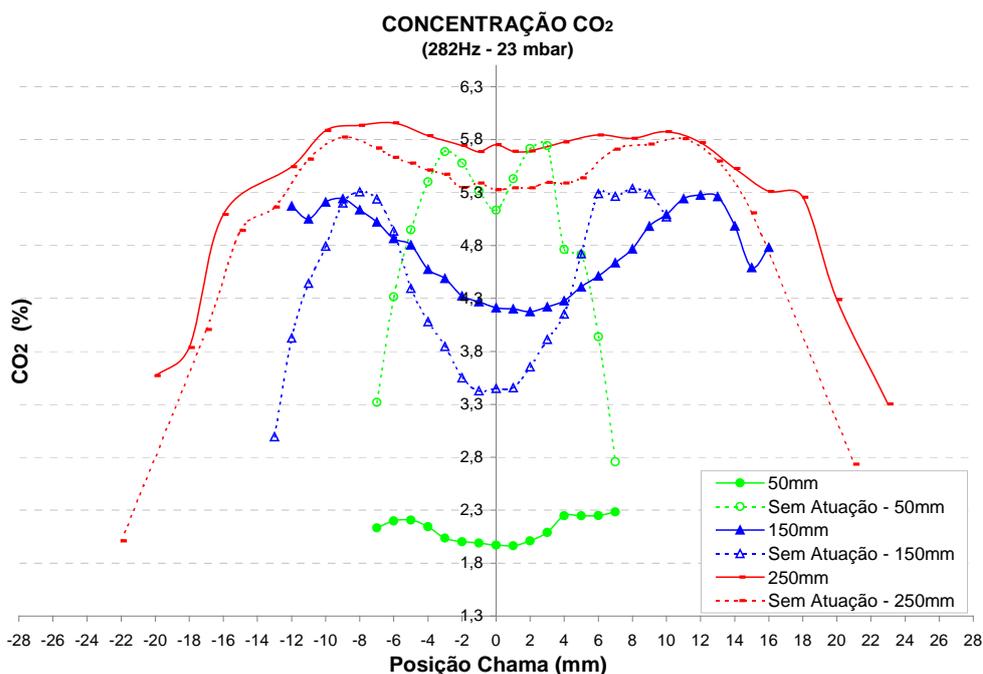


Figura 52 – Concentração de CO<sub>2</sub> em 282 Hz – 23 mbar (Erro máximo:  $\pm 0,21\%$ ).

Como visto, a concentração de CO<sub>2</sub> segue a mesma tendência de comportamento das curvas de CO, verifica-se que a 50mm da base do queimador e com atuação acústica, ocorre diminuição na % CO<sub>2</sub> para as mesmas condições de atuação, conforme Figuras 41, 42 e 43 e conforme Figuras 47, 48 e 49, ocorre aumento razoável na concentração de O<sub>2</sub>.

Para a posição de 150mm, ocorre na região central da chama incremento na concentração de CO<sub>2</sub> e em 250mm este incremento se estende a toda a região da chama, comportamento este semelhante qualitativamente à distribuição do CO, havendo em tais posições incremento na concentração de O<sub>2</sub>. Este é um indício de que a presença do campo acústico induz à presença de ar na região central da chama e dilui os produtos da combustão na chama, indicando a necessidade de ser realizada a correção nestes valores.

A Figura 53 apresenta uma fotografia da chama de GN na Condição I (a) sem atuação acústica e (b) com atuação acústica.

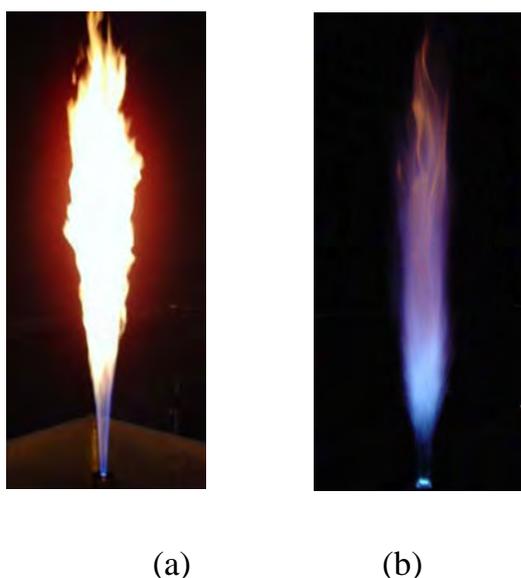


Figura 53 - Chama na Condição I (a) sem atuação acústica e (b) com atuação acústica.

Observando-se a chama sem atuação acústica Figura 53 (a), nota-se que as características apresentadas são típicas de uma chama difusiva, ou seja, chama com a luminosidade bastante fraca na base e com uma coloração azulada, coloração esta característica da não presença de fuligem. Nesta região, em razão da velocidade do jato ainda ser relativamente alta, existe a possibilidade que o ar carregado para a frente de chama misture-se adequadamente com o combustível, evitando zonas de combustão com temperatura elevada e deficiência local de oxidante, desfavorecendo a formação de fuligem. Nos comprimentos mais elevados da chama, considerável quantidade de fuligem pode existir e a chama apresenta uma coloração amarelada. Contudo, a presença do campo acústico afeta consideravelmente a estrutura chama; à medida que a amplitude de oscilação aumenta, a coloração da chama passa a ser azulada, indicando que existe a transformação de uma chama predominantemente difusiva para uma chama com características de pré-misturada, como pode ser visto na Figura 53 (b).

Em queimadores tipo jato de gás combustível como o do presente trabalho, a chama permanecerá ancorada na saída do queimador até um determinado limite de velocidade de injeção do gás. À medida que a velocidade do jato aumenta, também aumenta o efeito de carregamento do ar atmosférico para frente de chama na região

próxima à saída do queimador; efeito conhecido como “*air entrainment*” na língua inglesa.

Para situação sem atuação, verifica-se pela Figura 48 que a 50mm o jato de gás sofre uma forte influência do efeito de “*air entrainment*” e uma mínima quantidade de  $O_2$  se apresenta no eixo de centro do jato. Já para as distâncias 150mm e 250 mm a quantidade de  $O_2$  é praticamente nula, como esperado para uma chama difusiva. Contudo, quando o campo acústico é imposto a presença de  $O_2$  na região central do jato é significativa, indicando que o campo acústico induz uma pré-mistura entre o combustível e o oxidante, além de incrementar o efeito de “*air entrainment*”. Também se nota que a quantidade de  $O_2$  na região central do jato é mais pronunciada nas proximidades do queimador, isto ocorre em razão de que, quanto mais próximo do queimador mais intenso é o campo acústico; além disso, à medida que o escoamento desenvolve-se na direção axial, a maior presença dos produtos de combustão dilui o  $O_2$  e parte desse é consumido pelas reações de combustão.

Como já mencionado anteriormente, a 50mm a concentração de  $CO_2$  (Figura 51) diminui muito quando o campo acústico está presente. Conforme a Figura 48, com a oscilação uma grande quantidade de oxidante se apresenta na região interna do jato, diluindo os produtos de combustão, como o  $CO_2$ . Tomando o ponto onde o  $CO_2$  é máximo como a fronteira da chama, em 150mm e 250mm percebe-se que esta se desloca radialmente com a presença do campo acústico. Também para essas distâncias axiais, os resultados mostram que em alguns pontos ao longo do raio a concentração de  $CO_2$  aumenta em relação à situação não pulsada. Este comportamento está associado ao fato de que a presença do campo acústico diminui o comprimento da chama, conforme Figura 54; portanto, as reações de combustão se finalizam mais próximas ao queimador e, conseqüentemente, a concentração dos produtos de combustão aumenta nessa região.

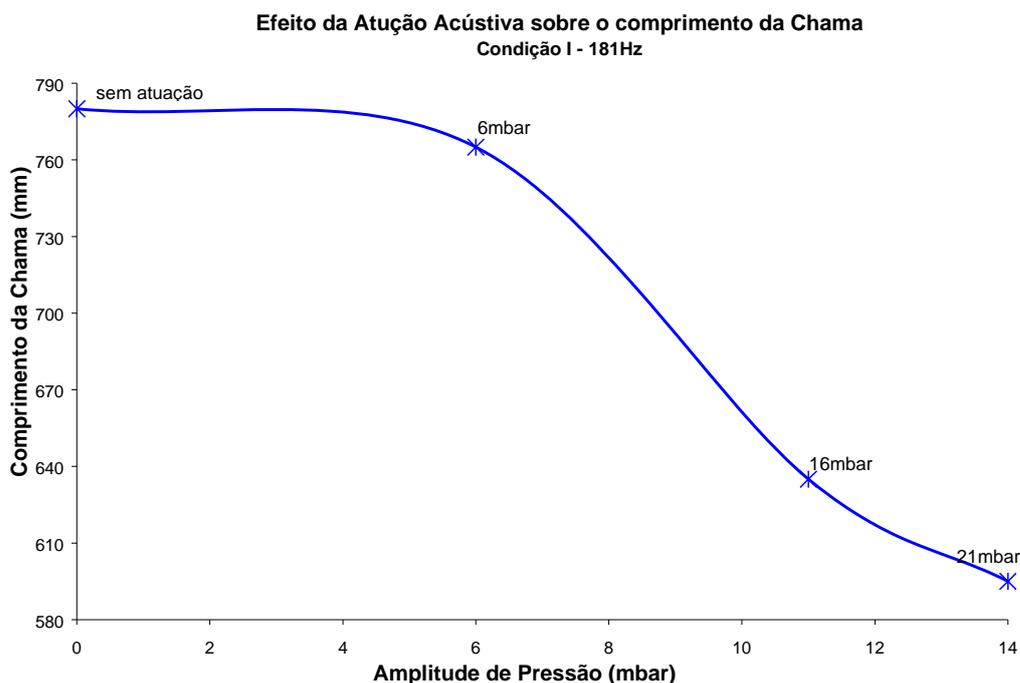


Figura 54 – Comprimento da chama com a atuação acústica em 181 Hz e diferentes amplitudes de pressão para a Condição I (Erro máximo:  $\pm 20,4$  mm).

Comparando-se os valores máximos da amplitude de pressão para determinada frequência (harmônico), ver Figuras 41 a 52, levando-se em consideração a análise de uma mesma espécie de gás, verifica-se que qualitativamente, tem-se o mesmo comportamento para os gráficos. Por exemplo, ao ser analisado o  $\text{NO}_x$ , verifica-se semelhança qualitativa nos gráficos, para as frequências de 97 Hz (Figura 44), 181 Hz (Figura 45) e 282 Hz (Figura 46), isto ocorre para as demais espécies analisadas.

Desta forma, a partir daqui serão apresentados, como já citado, os valores referentes às máximas amplitudes e para apenas uma frequência de trabalho, tendo sido escolhida a frequência correspondente ao segundo harmônico do queimador, ou seja, 181 Hz.

### 4.3.2 Análise dos gases na Condição II

Assim como para a Condição I, para a Condição II, foram realizados testes para se verificar a composição na chama das espécies CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, nas vazões de alimentação apresentadas na Tabela 11, condições acústicas descritas na Tabela 17 e nas posições radiais e axiais, conforme Tabela 19.

Como adotado para a Condição I, cada amplitude de pressão máxima obtida foi dividida em três amplitudes menores, objetivando acompanhar o efeito das oscilações sobre a chama à medida que a amplitude de pressão é incrementada nas frequências correspondentes aos três primeiros harmônicos do queimador, respectivamente, 96 Hz, 181 Hz e 283 Hz, para esta condição de vazão dos gases.

As Figuras 55, 56 e 57 mostram a concentração de CO, respectivamente, para as amplitudes de pressão de 11 mbar, 21 mbar e 31 mbar.

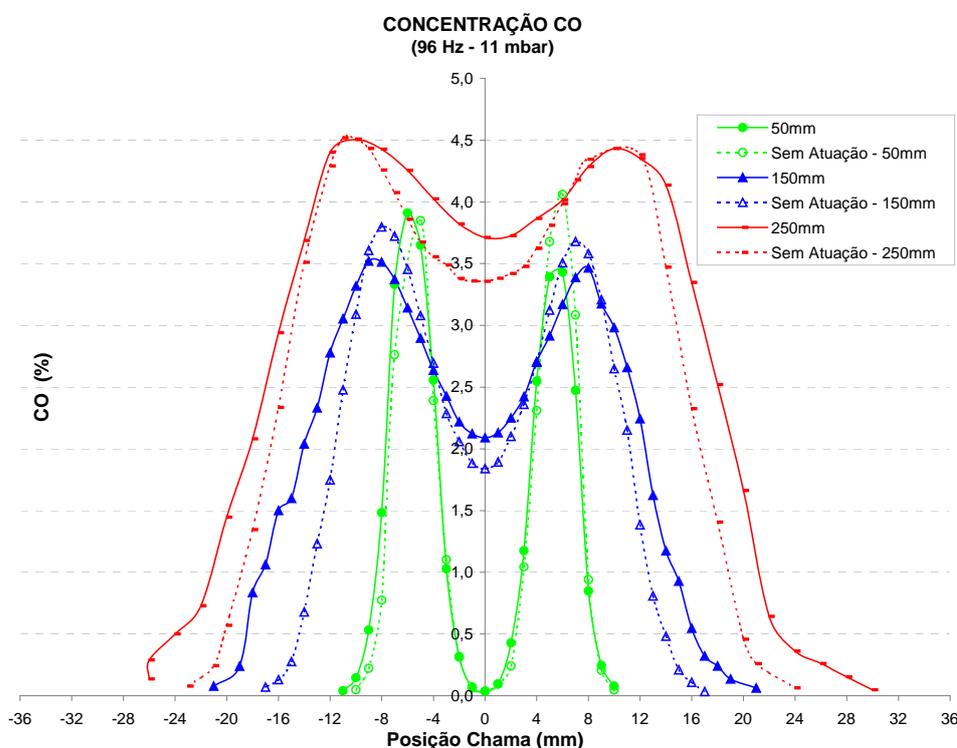


Figura 55 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 11 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

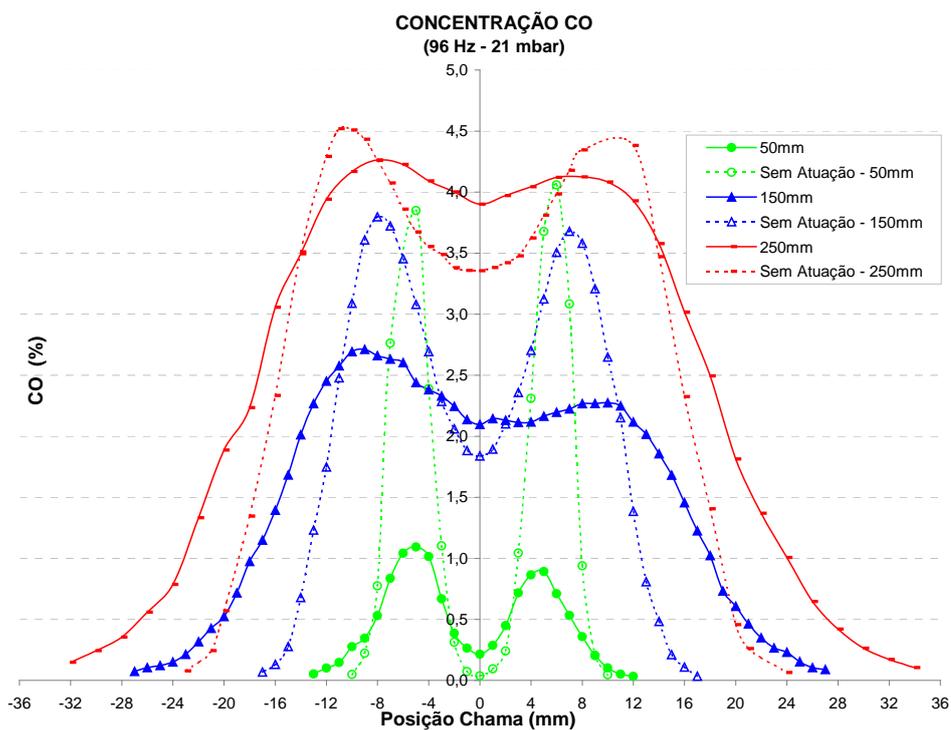


Figura 56 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 21 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

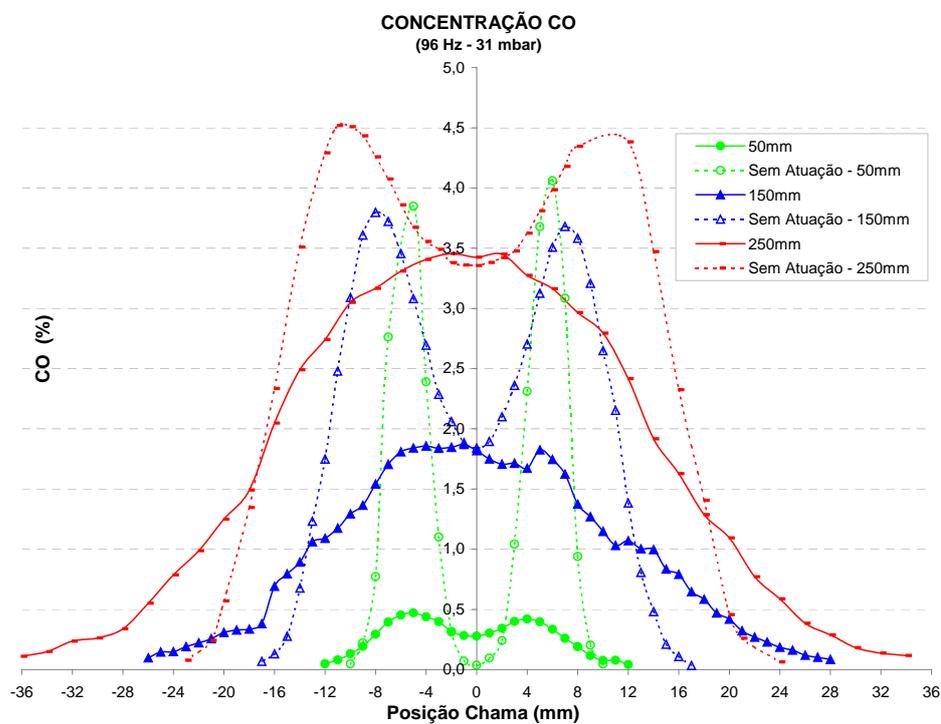


Figura 57 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 96 Hz e 31 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Como ocorreu para a Condição I com relação aos resultados, aqui também não se torna viável apresentá-los na íntegra, desta forma, são apresentados apenas os que são significativos para entender o comportamento global. Desta forma serão apresentados aqui os gráficos referentes às maiores amplitudes de pressão para cada caso.

As Figuras 58 e 59 apresentam a concentração de CO em 181 Hz e 283 Hz para as máximas amplitudes de pressão, respectivamente, 25 mbar e 38 mbar.

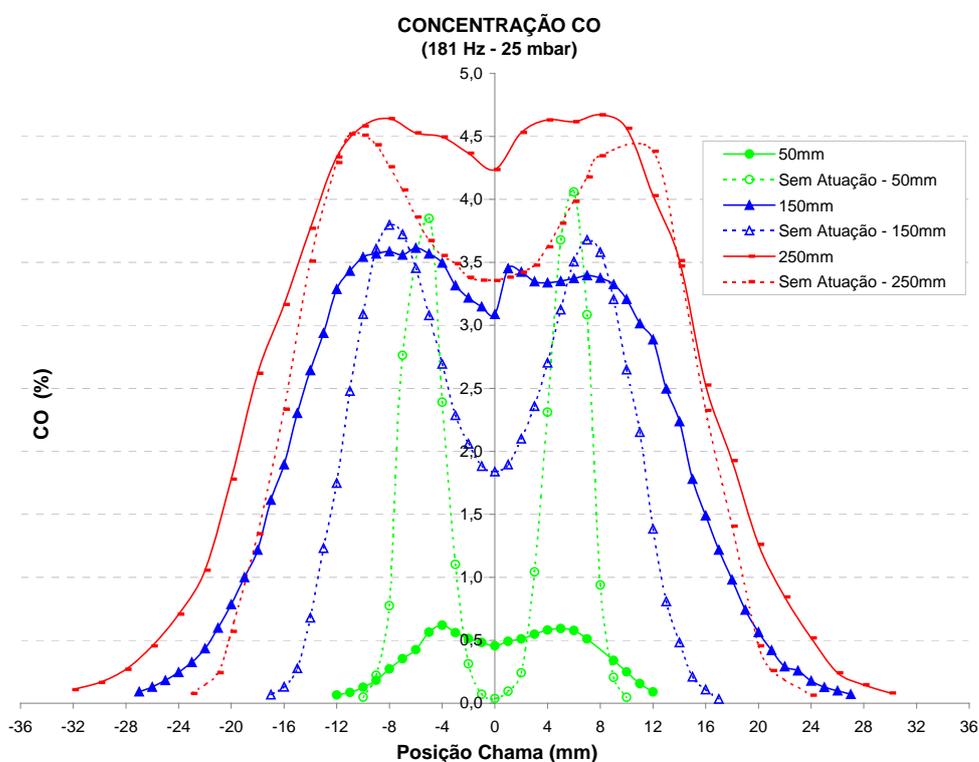


Figura 58 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 181 Hz e 25 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

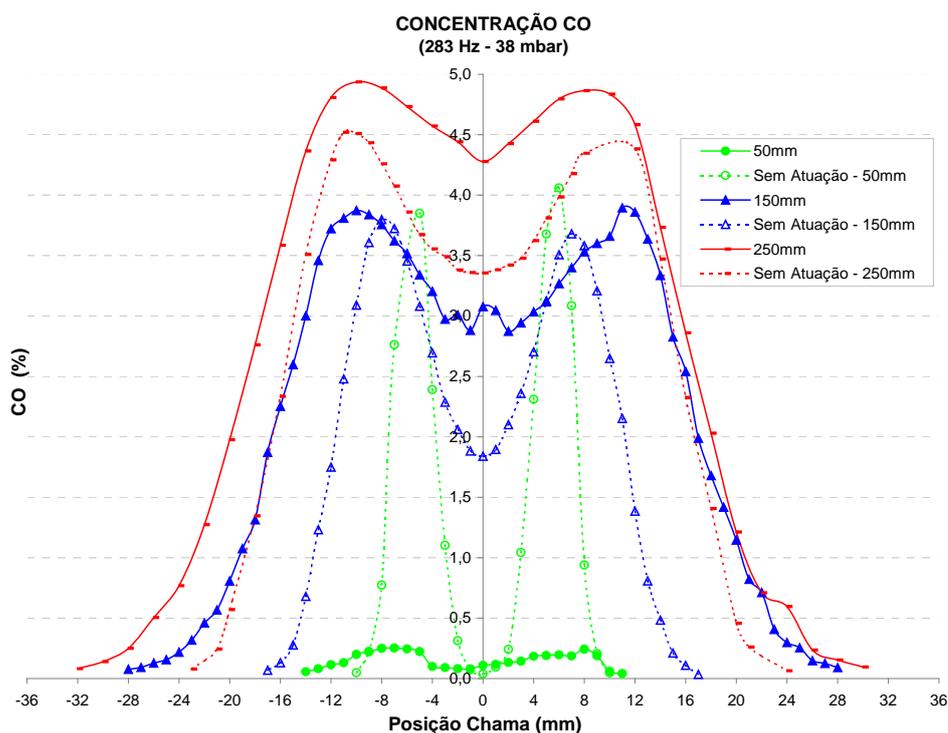


Figura 59 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO a 283 Hz e 38 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Para as máximas amplitudes de pressão, em todas as frequências estudadas, uma tendência nas curvas geradas também pode ser observada, o que exige da apresentação de todos os gráficos, permitindo a apresentação dos que representem de forma efetiva os resultados. Assim para a Condição II será exposta a distribuição radial da concentração de cada gás analisado, em apenas uma condição de trabalho, neste caso, em 181 Hz e 25 mbar, possibilitando comparações com a Condição I, visto se tratarem de condições correspondentes, variando-se somente a razão de equivalência global.

As Figuras 60, 61 e 62 apresentam as concentrações em 181 Hz e 25 mbar para o  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$ , respectivamente.

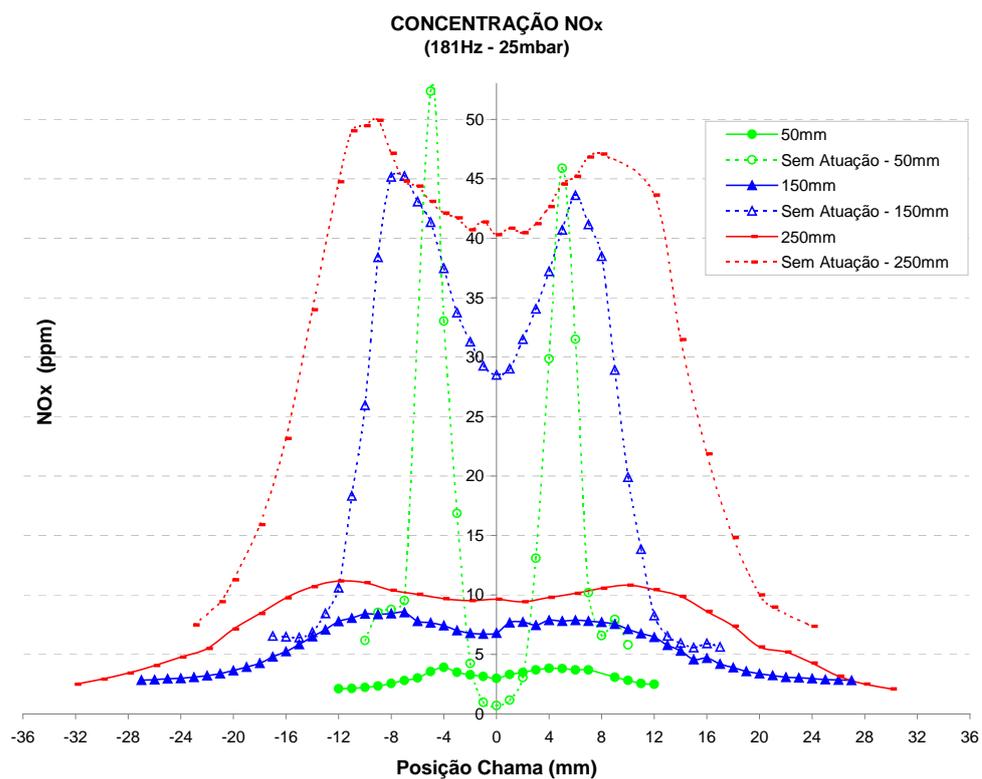


Figura 60 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO<sub>x</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 2,3$  ppm).

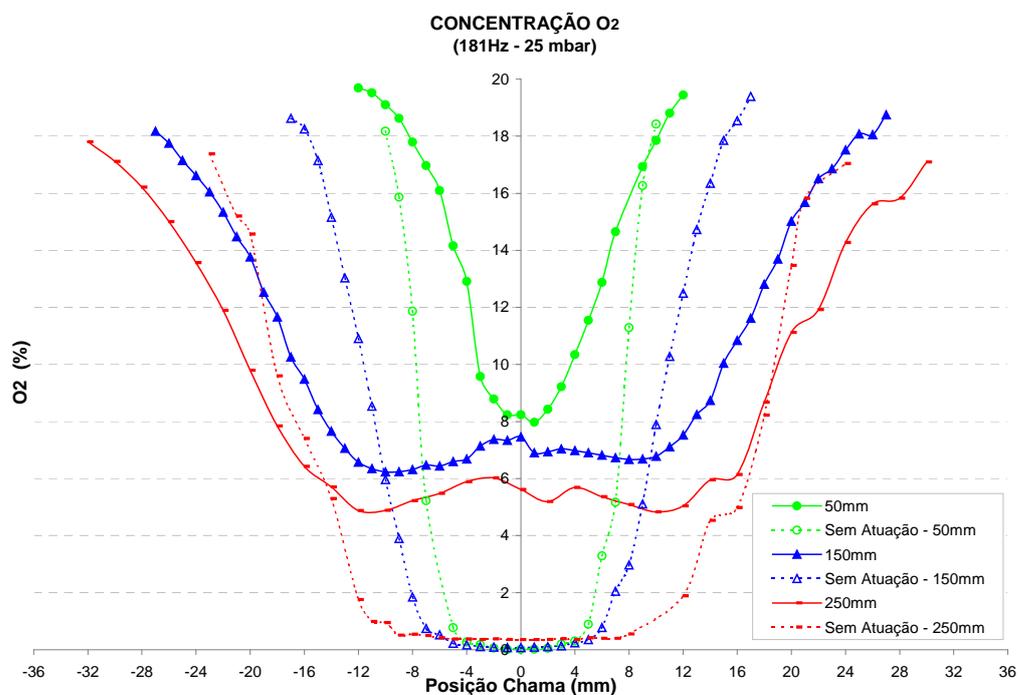


Figura 61 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de O<sub>2</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

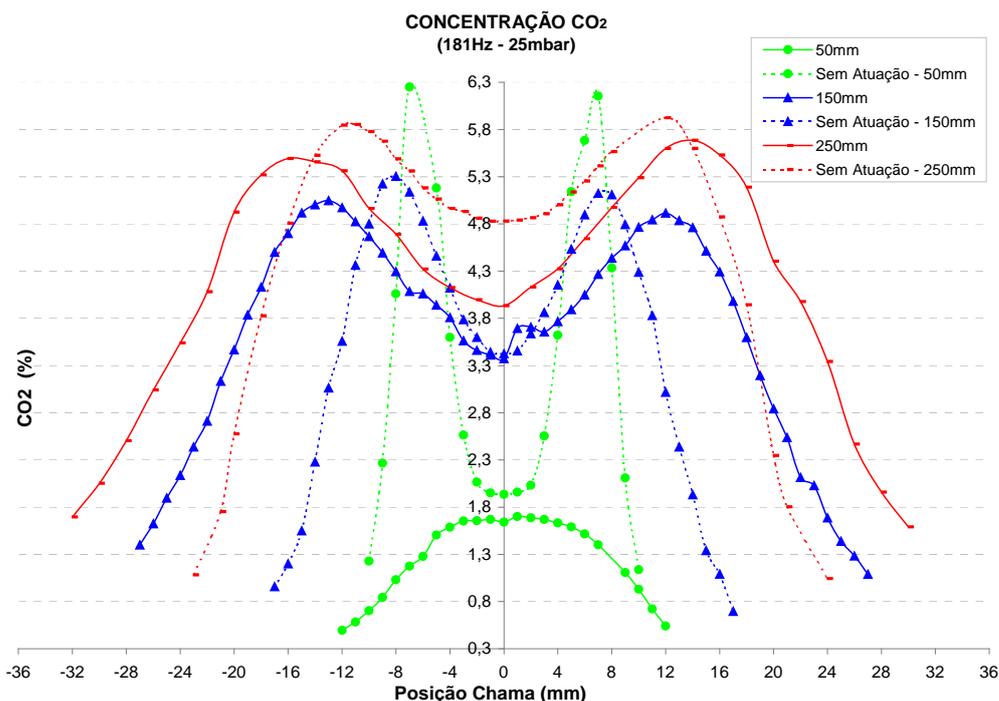


Figura 62 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO<sub>2</sub> a 181 Hz e 25 mbar na Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,21\%$ ).

Verifica-se que, assim como observado para a concentração de CO, a distribuição radial da concentração de NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, seguem o mesmo perfil qualitativo da Condição I.

A concentração de CO para a Condição II, também apresenta a mesma tendência da Condição I e mantém comportamento semelhante à concentração de CO<sub>2</sub>, conforme Figura 62. A conversão de CO em CO<sub>2</sub> somente é verificada através das medidas realizadas para obtenção do comprimento da chama.

Pode-se também para o NO<sub>x</sub> fazer a mesma análise da Condição I, sem atuação tem-se maior concentração de NO<sub>x</sub> na fronteira de chama, enquanto a atuação diminui consideravelmente a concentração de NO<sub>x</sub> nas três posições axiais e o torna bem distribuído ao longo do eixo radial.

Na Condição II, o comportamento qualitativo da concentração de O<sub>2</sub>, no que se refere ao efeito acústico na chama e ao caso sem atuação acústica, é o mesmo descrito para a Condição I. Tem-se perfil típico de chama difusiva para a situação sem atuação acústica, com pequena quantidade de O<sub>2</sub> em 50mm, devido ao “*air entrainment*”, o

que não ocorre em 150 e 250mm. A alta concentração de O<sub>2</sub>, principalmente em 50mm (região mais próxima ao queimador), com o uso do campo acústico, reforça a idéia de que este incrementa o “*air entrainment*”. Também ocorre diluição dos produtos da combustão pelo O<sub>2</sub>, sendo parte deste é consumido nas reações químicas locais.

Com relação à concentração de CO<sub>2</sub>, Figura 62, com a atuação acústica tem-se em 50mm concentração menor que para o caso sem atuação, posição esta, onde se tem grande concentração de O<sub>2</sub>, Figura 61, denotando presença de diluição na região.

A diluição dos produtos da combustão para as duas condições de entrada de vazão utilizadas neste trabalho tornou necessário a realização de correções nas medidas das concentrações dos produtos da combustão.

#### 4.3.3 Correções na concentração dos gases para as Condições I e II

Como mencionado, verifica-se que há presença de oxidante na região de chama diluindo os produtos da combustão, para as Condições I e II, sendo necessário uma correção nos valores medidos das concentrações. Assim as medidas dos gases decorrentes da combustão foram normalizadas para concentração de 3% de O<sub>2</sub>, podendo-se avaliar de forma mais clara a presença espacial dos gases.

Segundo Carvalho Jr. e Lacava (2003), a concentração volumétrica de um gás proveniente do processo de combustão, pode ser corrigida para uma dada concentração de O<sub>2</sub>, pela equação:

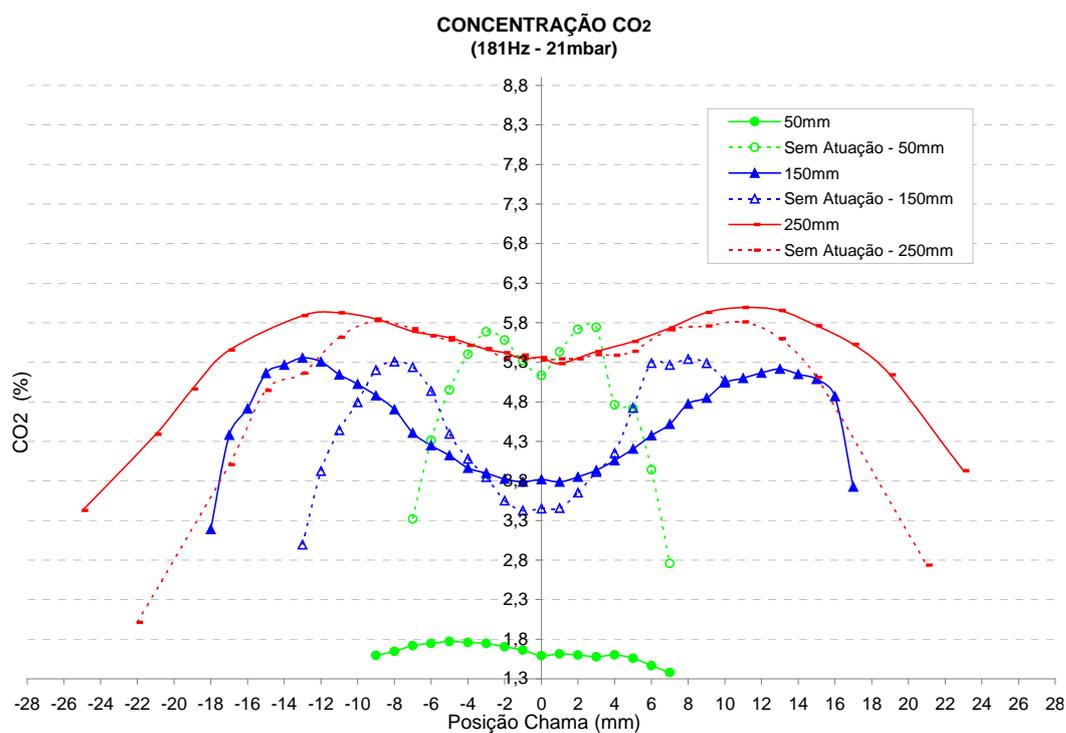
$$[A]_{BS, \text{corr}} = \frac{0,21 - [O_2]_{BS, \text{corr}}}{0,21 - [O_2]_{BS, \text{real}}} [A]_{BS, \text{real}} \quad (40)$$

onde:

- $[A]_{BS, corr}$  = concentração volumétrica em base seca de um “componente qualquer” dos produtos de combustão a ser corrigida;
- $[O_2]_{BS, corr}$  = concentração volumétrica de  $O_2$  a ser usada como base na correção;
- $[O_2]_{BS, real}$  = concentração volumétrica de  $O_2$  em base seca, medida;
- $[A]_{BS, real}$  = concentração volumétrica de “componente qualquer” em base seca, medida.

Esta equação pode ser usada para qualquer combustível e para quaisquer dos componentes dos produtos de combustão.

As Figuras 63, 64 e 65 apresentam as concentrações de  $CO_2$ ,  $CO$  e  $NO_x$ , em 181 Hz e 21 mbar para a Condição I, (a) sem as correções na concentração dos gases e (b) corrigidos os valores das concentrações para 3%  $O_2$ .



(a)

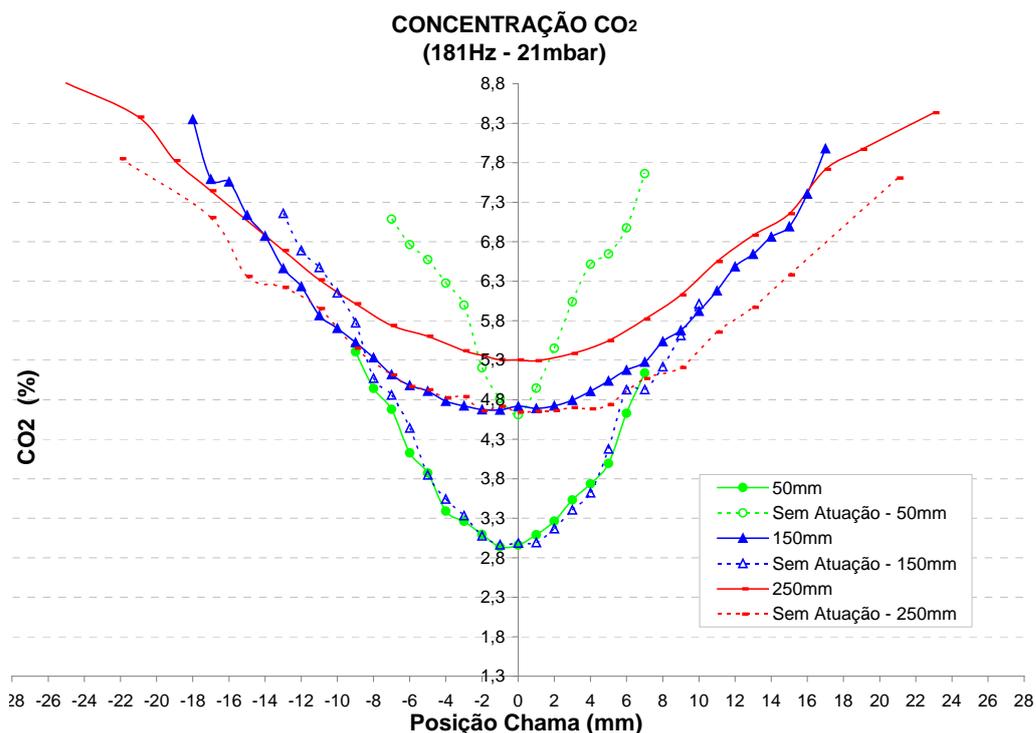


Figura 63 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO<sub>2</sub> na Condição I em 181 Hz e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3%O<sub>2</sub> (Erro máximo:  $\pm 0,21\%$ ).

Verifica-se que a correção na concentração do CO<sub>2</sub>, causa mudança radical na tendência das curvas. Nas posições axiais de 150 e 250mm, tem-se maior concentração de CO<sub>2</sub> para o processo com atuação acústica, indicando que localmente há maior conversão de produtos de oxidação parcial, como o CO, em CO<sub>2</sub>. Observa-se ainda menor concentração de CO<sub>2</sub> na região próxima ao eixo central, que aumenta gradativamente à medida que radialmente aproxima-se das extremidades da chama, provavelmente por esta região possuir maior quantidade de O<sub>2</sub> disponível, sendo este proveniente do ar primário, com tempo de residência e velocidades adequadas para a oxidação do CO. Na Figura 66, mostra-se o esquema do queimador utilizado neste trabalho mostrando seu eixo central e O<sub>2</sub> proveniente do ar atmosférico .

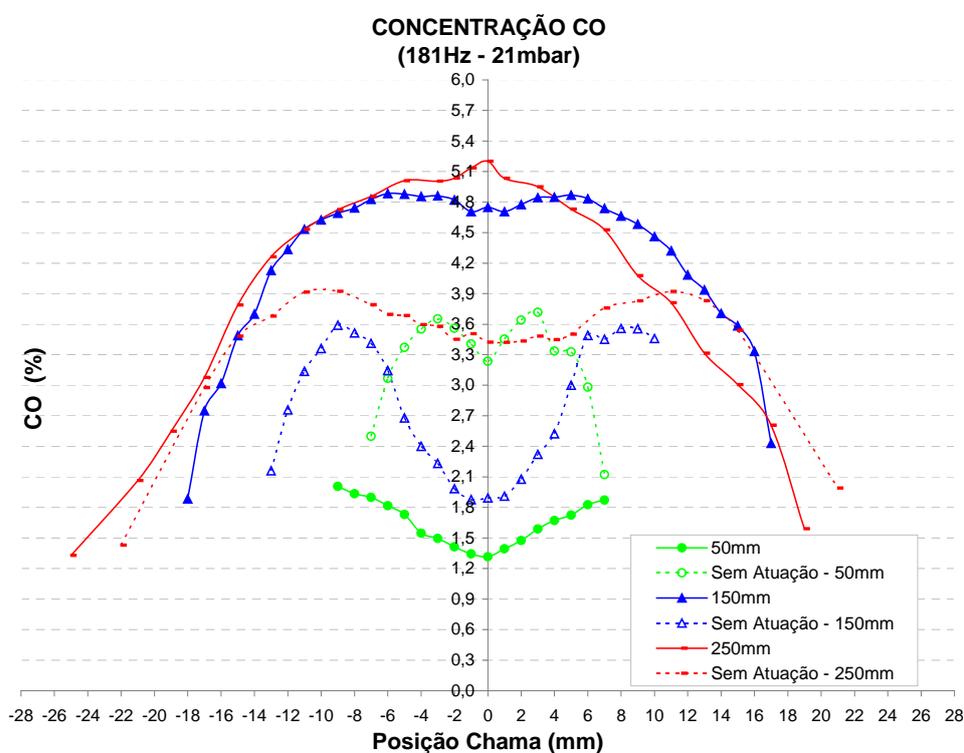
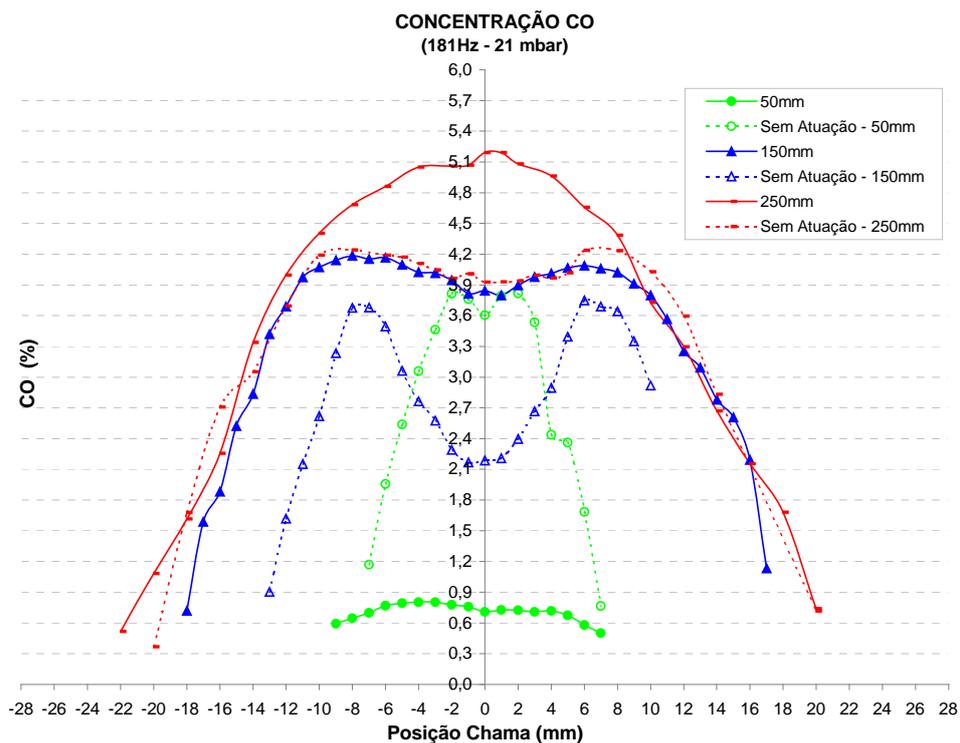


Figura 64 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO na Condição I em 181 Hz e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3% O<sub>2</sub> (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

Com relação ao perfil da concentração de CO, a correção para 3% de O<sub>2</sub>, não induz alterações significativas no perfil das curvas. De uma forma geral é alterada apenas a quantidade de CO nos testes realizados com atuação em 50 e 150mm, que sofrem um pequeno acréscimo, como pode ser visto na Figura 64 (b), em relação a 64 (a), verificando-se que o efeito da diluição “mascarava” os resultados.

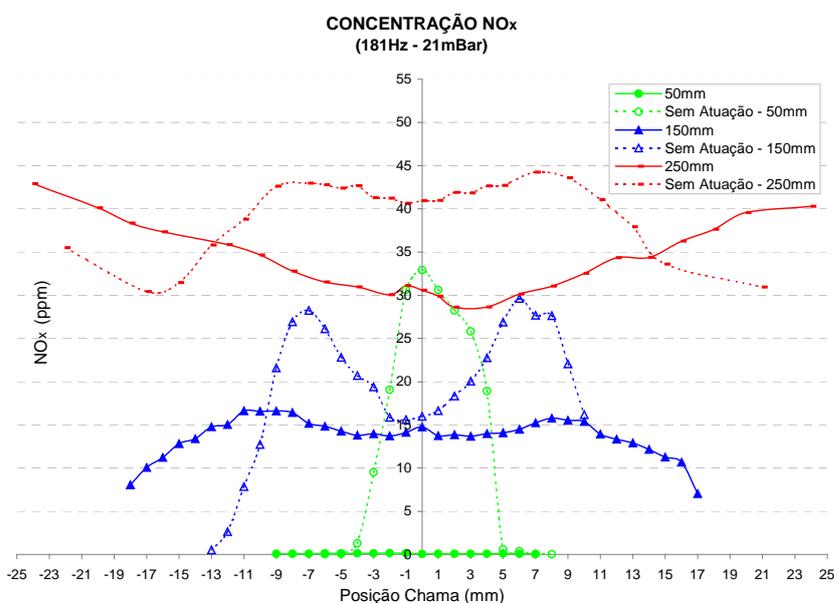
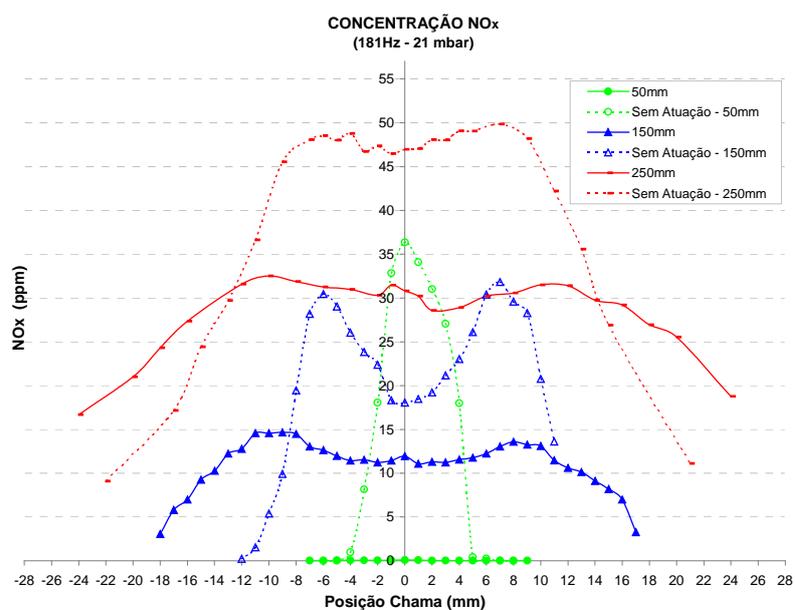


Figura 65 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO<sub>x</sub> na Condição I em 181 HZ e 21 mbar (a) sem correção e (b) com correção para 3%O<sub>2</sub> (Erro máximo: ± 2,3 ppm).

O perfil de  $\text{NO}_x$  mantém a mesma configuração para a concentração, para os casos com e sem a correção para 3% de  $\text{O}_2$ . Há um pequeno incremento na concentração, ver Figura 65 (b) em 250mm nas extremidades radiais da chama, porém, ainda mantém concentração menor de  $\text{NO}_x$  da situação pulsada com relação à não pulsada.

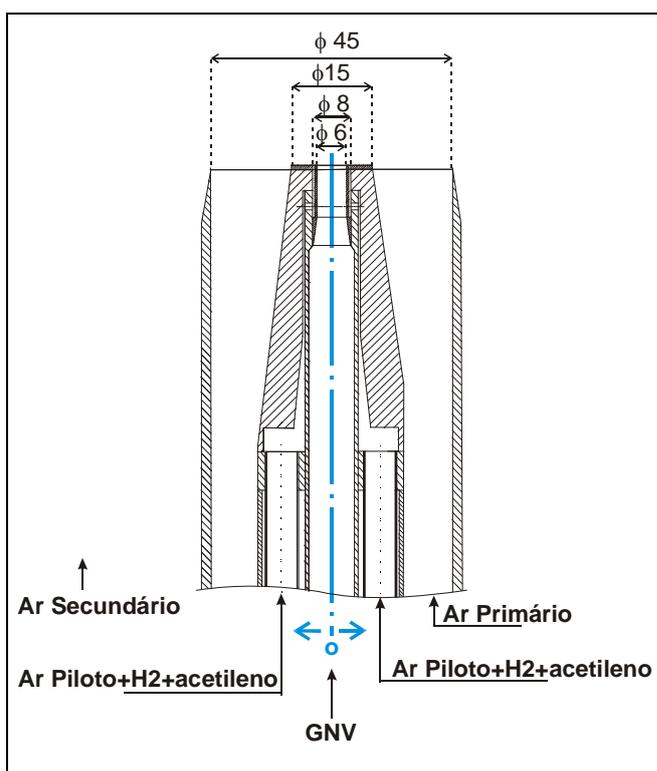
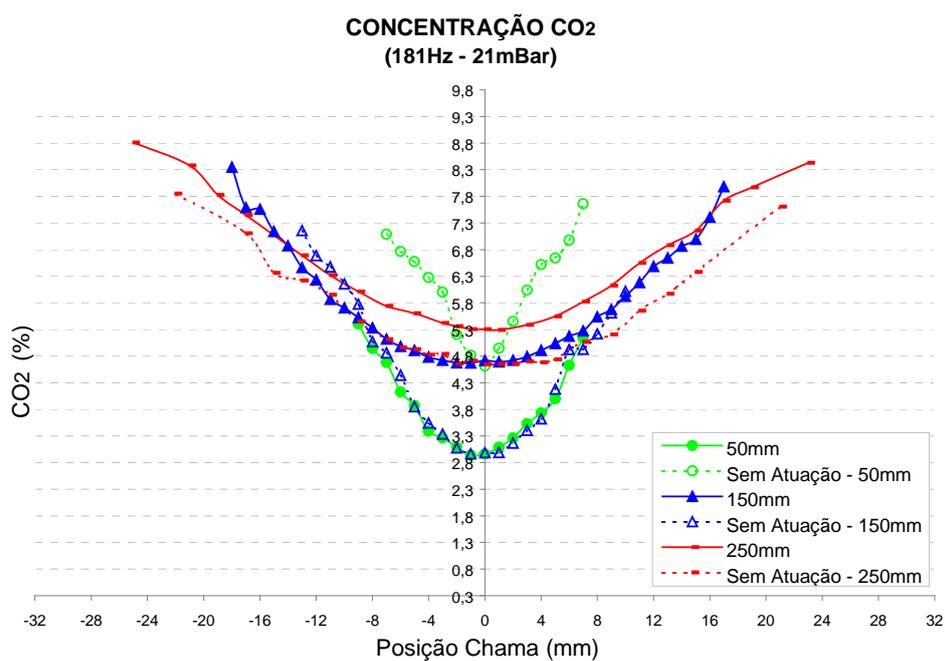


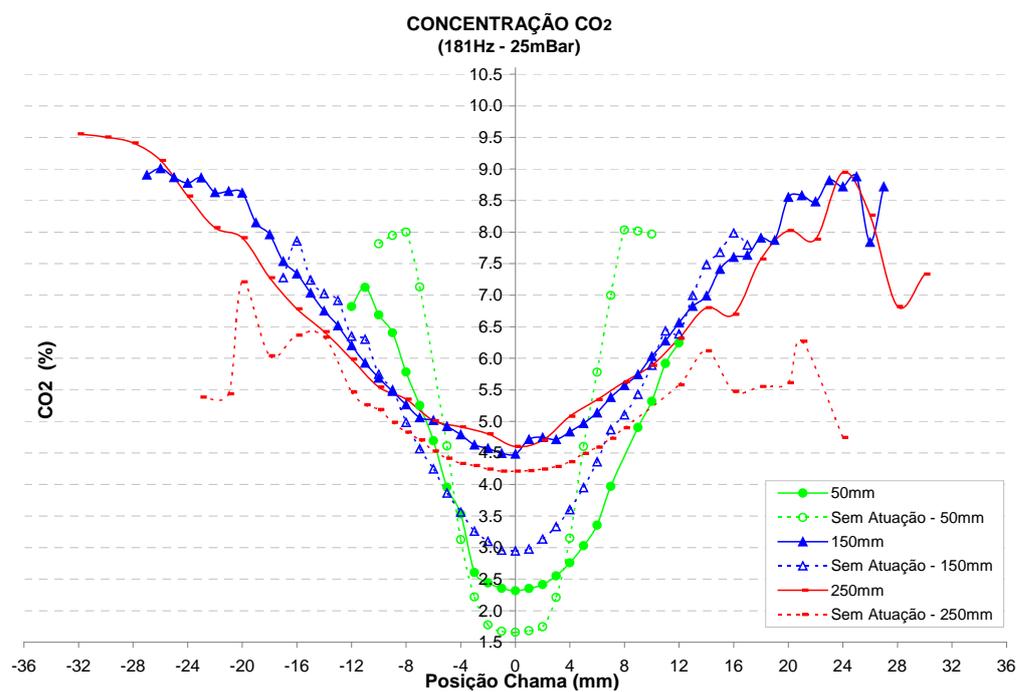
Figura 66 – Esquema do queimador, destacando o eixo central (medidas em mm).

#### 4.3.4 Comparação da concentração dos gases para as condições I e II com valores para 3% $\text{O}_2$

Uma comparação entre as Condições I e II, com relação à análise dos gases, pode ser vista nas Figuras 67 e 68 que apresentam as concentrações de  $\text{CO}_2$ , e  $\text{CO}$  com correção nos valores das concentrações para 3%  $\text{O}_2$  em, (a) 181 Hz e 21 mbar para a Condição I e (b) 181 Hz e 25 mbar para a Condição II.



(a)



(b)

Figura 67 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO<sub>2</sub>, corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de O<sub>2</sub> para (a) Condição I (b) Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,21\%$ ).

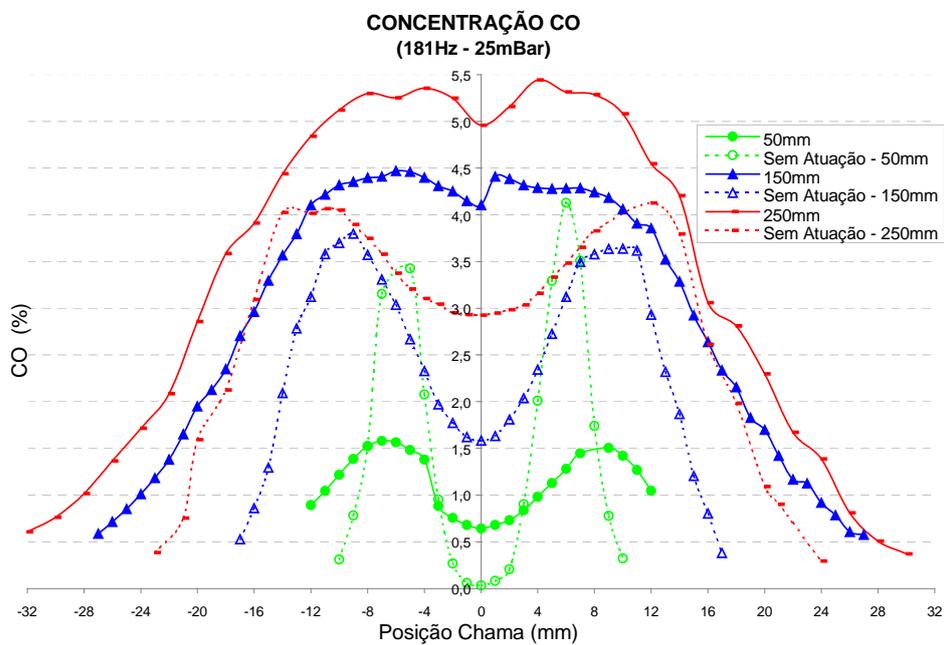
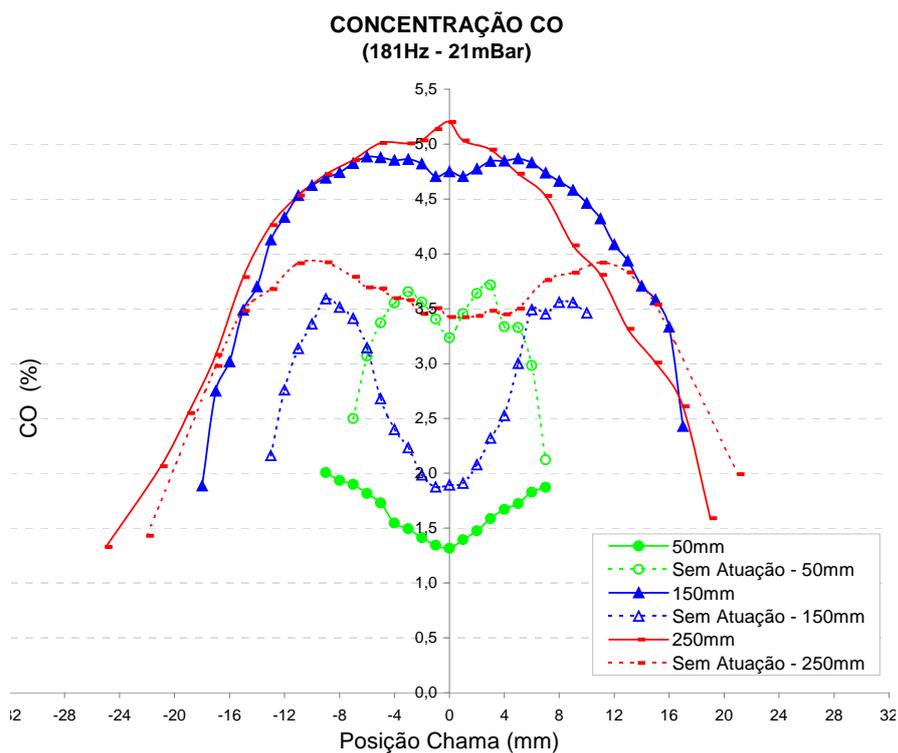
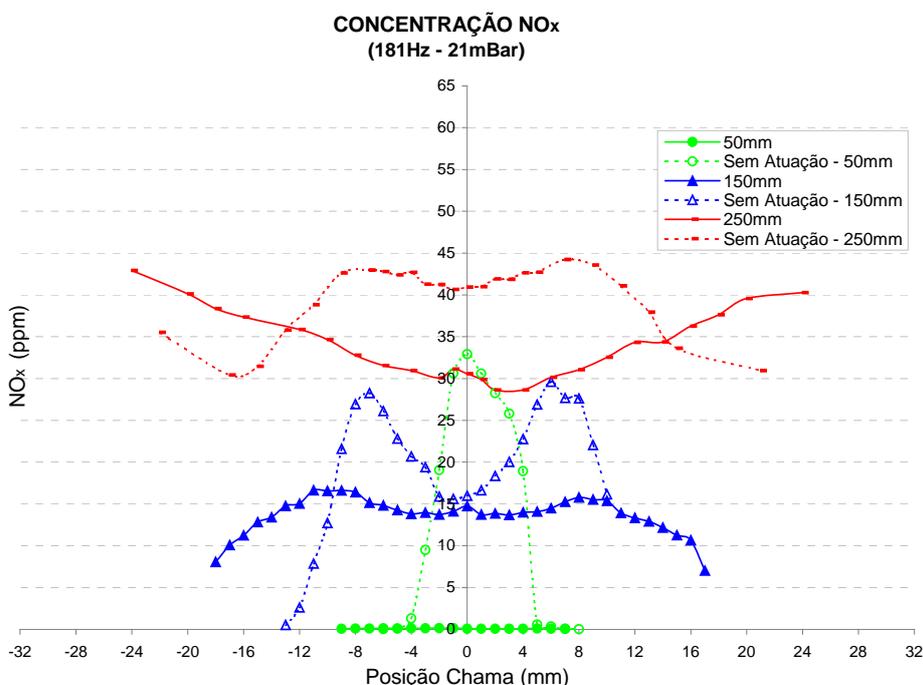


Figura 68 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO, corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de  $O_2$  para (a) Condição I (b) Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,13\%$ ).

O perfil do  $\text{CO}_2$  corrigidas as concentrações para as condições I e II é semelhante, como pode ser visto na Figura 67. Porém na Condição II com a atuação acústica tem-se na região central em 50mm, maior concentração para a situação com atuação acústica do que sem atuação. Tem-se nesta região maior concentração de CO, conforme Figura 68 (b) e menor concentração de  $\text{O}_2$ , conforme Figura 70 (b), se comparado à Condição I. Verifica-se maior concentração de  $\text{CO}_2$  na altura de 50 mm e na Condição II, provavelmente por termos nesta região velocidade menor (na Condição II a vazão de ar tem excesso de 5% e na Condição I 22%) e tempo de residência suficiente para converter parte do CO em  $\text{CO}_2$ .

Pode-se verificar para a concentração de CO, comportamento qualitativo semelhante para as condições I e II, considerando-se os valores corrigidos, com exceção da região de 50 mm na Condição II, como mencionado no parágrafo anterior.

A Figura 69 apresenta a concentração de  $\text{NO}_x$  com correção nos valores das concentrações para 3%  $\text{O}_2$  em, (a) 181 Hz e 21 mbar para a Condição I e (b) 181 Hz e 25 mbar para a Condição II.



(a)

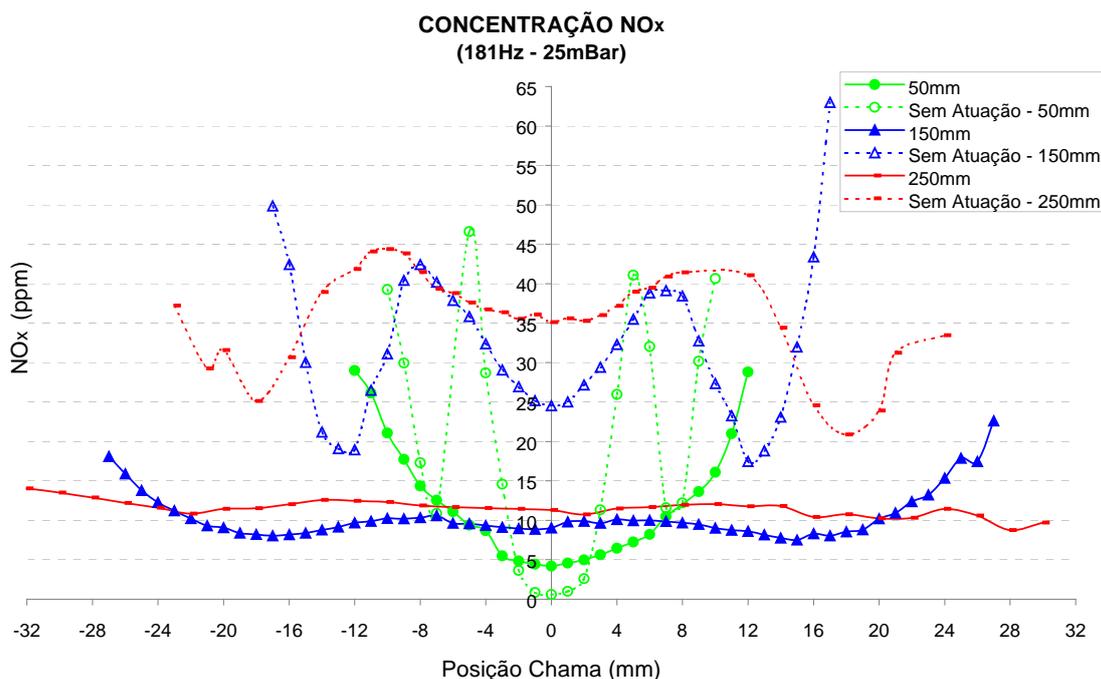
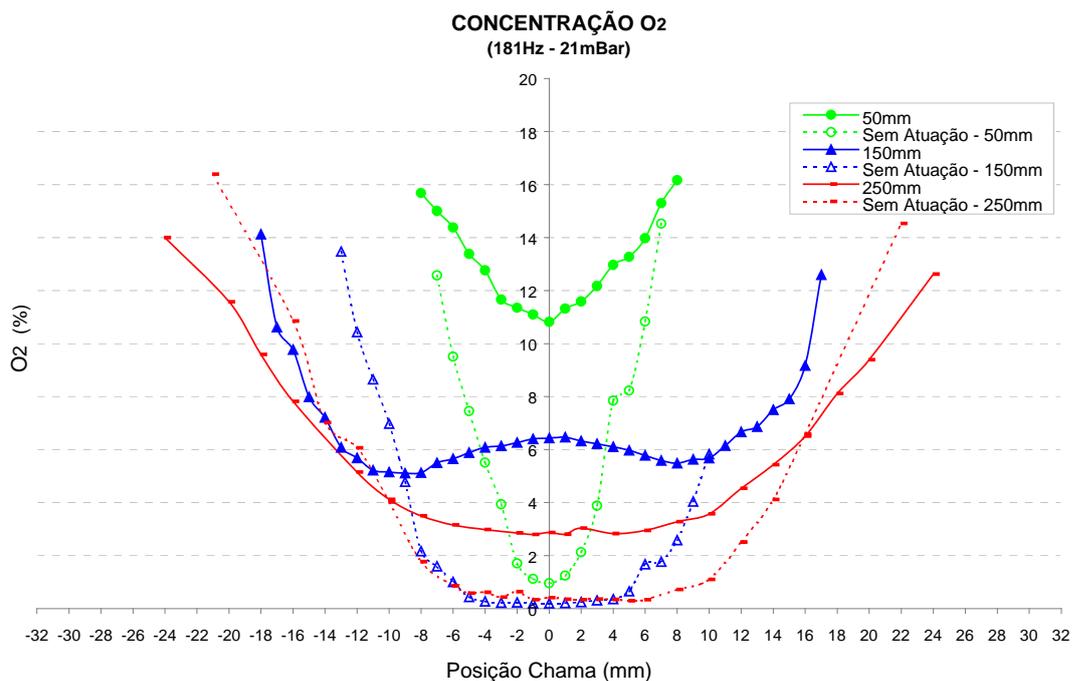


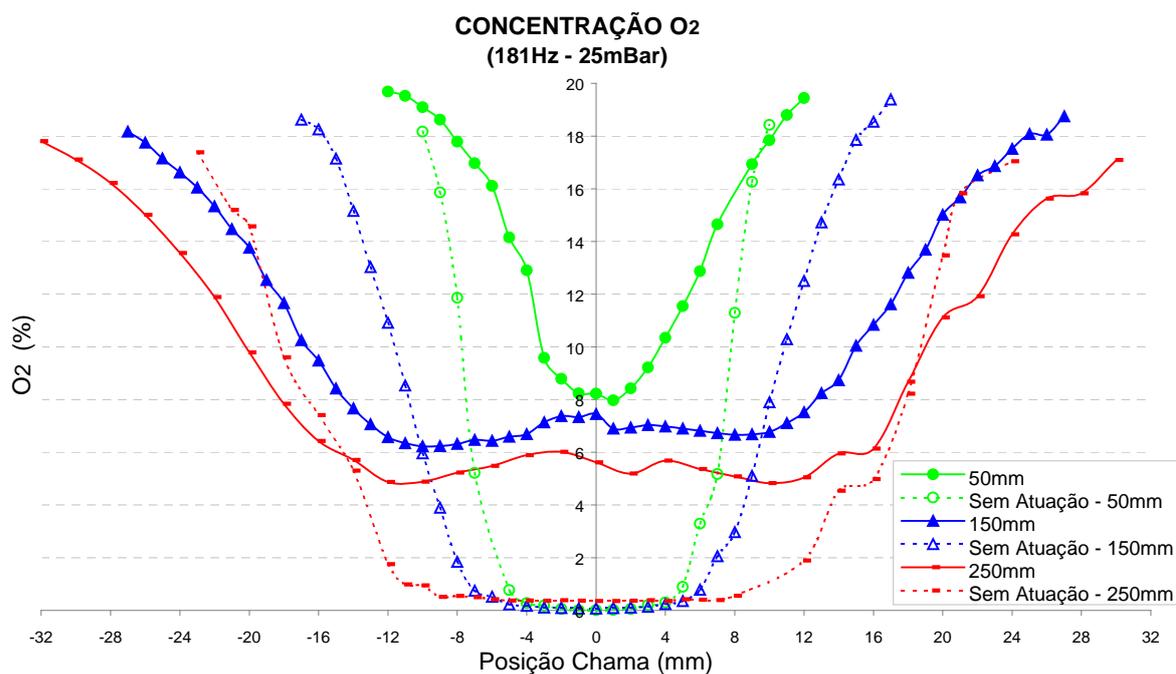
Figura 69 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO<sub>x</sub>, corrigidos os valores da amplitude de pressão e da concentração para 3% de O<sub>2</sub> para (a) Condição I (b) Condição II (Erro máximo: ± 2,3 ppm).

Ocorre redução da concentração de NO<sub>x</sub> para as duas condições de trabalho, quando é aplicada a atuação acústica. Porém em 50mm para a Condição II, há na região central do queimador, maior concentração de NO<sub>x</sub> para a situação com atuação acústica. Isto ocorre provavelmente por esta região possuir maior temperatura, devido à menor quantidade de ar existente nesta região, favorecendo a formação de NO<sub>x</sub> térmico, o que poderá ser mais bem avaliado quando forem apresentados e discutidos os resultados de temperatura.

A Figura 70 apresenta a comparação entre as duas condições de trabalho para a [O<sub>2</sub>].



(a)



(b)

Figura 70 – Distribuição radial da porcentagem volumétrica de O<sub>2</sub> para: (a) Condição I (b) Condição II (Erro máximo:  $\pm 0,38\%$ ).

Tem-se qualitativamente o mesmo perfil nas curvas para as duas condições, principalmente em 150 e 250mm. Na região de 50mm (próxima ao queimador, onde a

influência do campo acústico é mais pronunciada), entretanto, observa-se na Condição I, Figura 70 (a), que a concentração de  $O_2$  é um pouco maior. Como mencionado, este fato está provavelmente associado à maior quantidade de oxidante disponível nesta região e condição de trabalho.

Os perfis obtidos para as condições I e II com relação à concentração dos gases CO,  $CO_2$ ,  $NO_x$  e  $O_2$  possuem comportamento qualitativo semelhante. As curvas para determinada espécie analisada (variando-se apenas a vazão dos gases, mantendo as mesmas condições acústicas) é o mesmo, o que sugere que independente da razão de equivalência utilizada, pode-se esperar resultados qualitativos equivalentes para as análises realizadas.

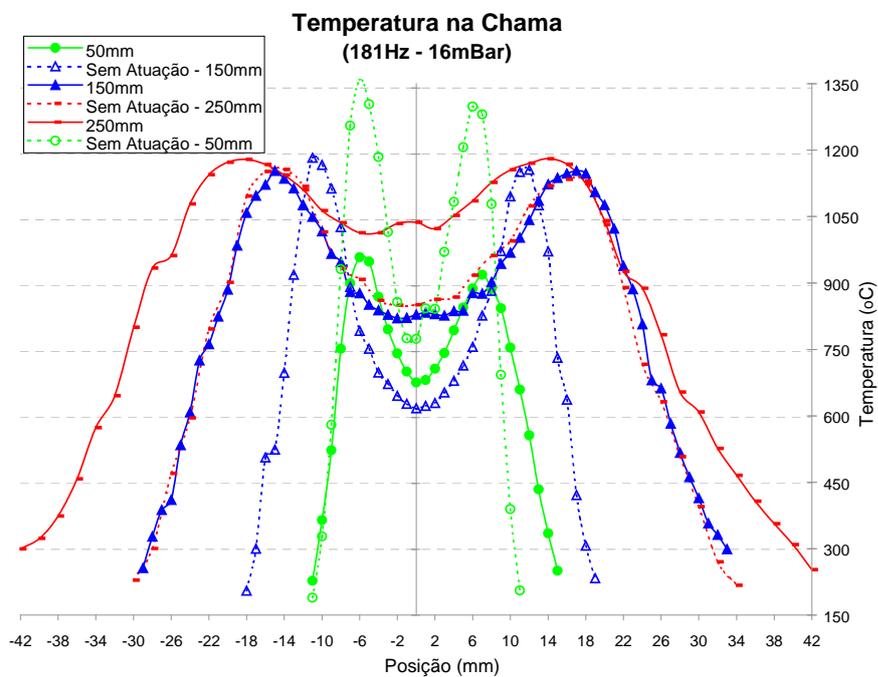
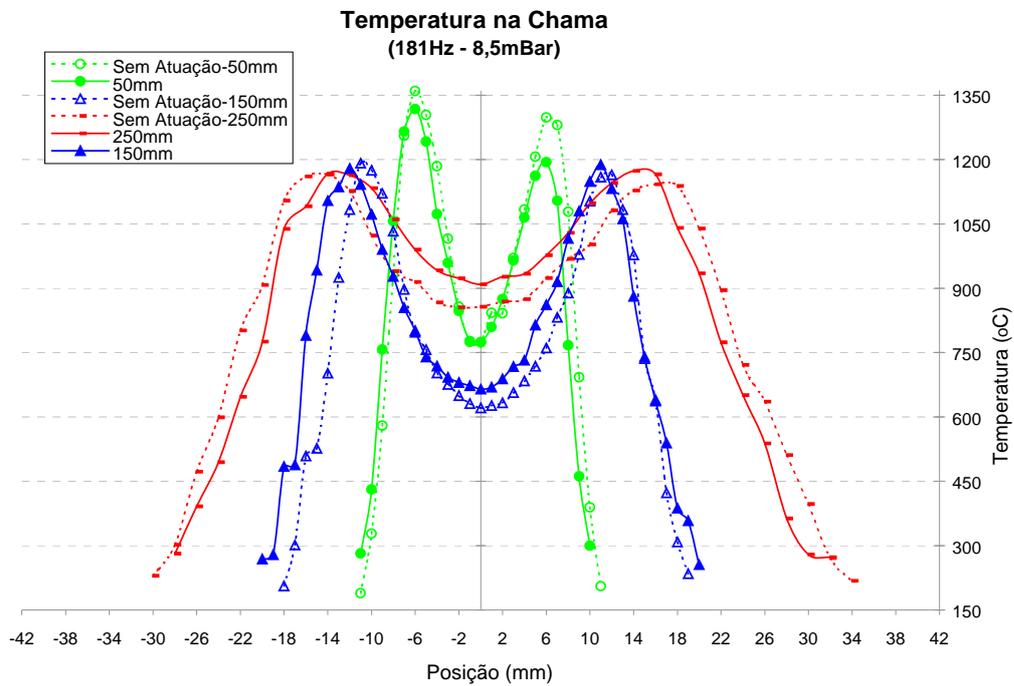
#### 4.4 CAMPO DE TEMPERATURA PARA AS CONDIÇÕES I E II

As medidas de temperatura foram obtidas através de um sistema, apresentado no item 2.2.4 deste trabalho, formado por um termopar de fio fino, do tipo R, feito em liga Pt / PtRh13% de  $38\mu m$  e por uma sonda para sua fixação, cujos esquemas podem ser vistos na Figura 19, onde se observa (a) termopar tipo R e (b) sonda do termopar de fio fino, respectivamente, enquanto a Figura 20 apresenta fotografia (a) sonda fixada no suporte e (b) detalhe da extremidade onde são fixados os fios de  $38\mu m$ .

Foram realizados testes para se verificar a temperatura na chama, nas vazões de alimentação apresentadas na Tabela 11, condições acústicas descritas na Tabela 17 e nas posições radiais e axiais, conforme Tabela 19.

Como ocorreu com a análise dos gases, o campo de temperatura apresentou seus perfis de curvas muito semelhantes para as frequências correspondentes aos três primeiros harmônicos do queimador, mostrando uma mesma tendência nos resultados, tanto para a Condição I como para a II. Assim, serão apresentados aqui os resultados referentes ao segundo harmônico do queimador, ou seja, 181 Hz.

A Figura 71 mostra os perfis de temperatura na Condição I para 181 Hz e: (a) 8,5 mbar, (b) 16 mbar e (c) 21 mbar.



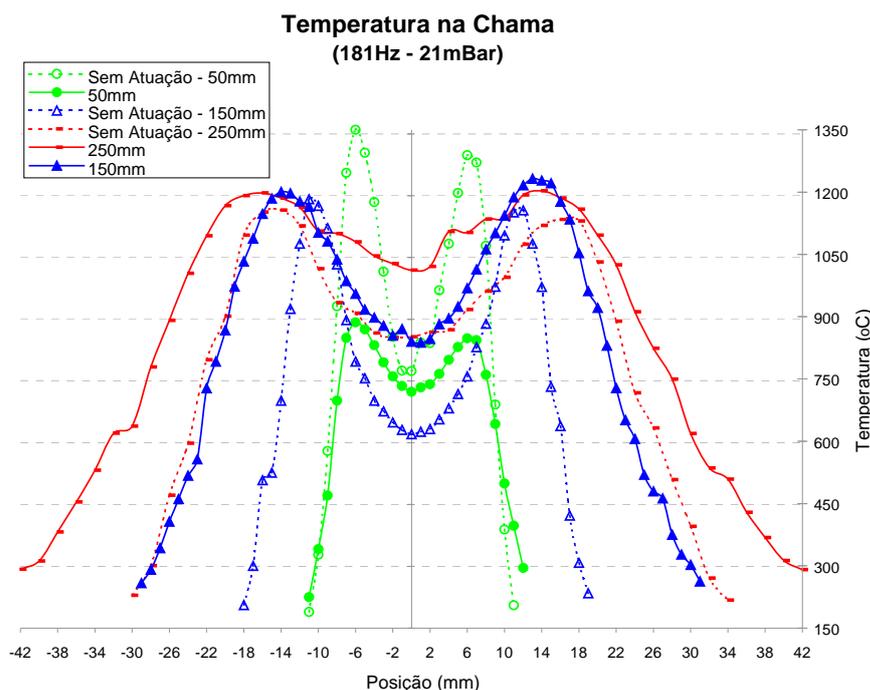


Figura 71 – Distribuição radial da Temperatura na Condição I, corrigidos os valores da amplitude de pressão em 181 HZ e (a) 8,5 mbar (b) 16 mbar e (c) 21 mbar (Erro máximo:  $\pm 30,37$  °C).

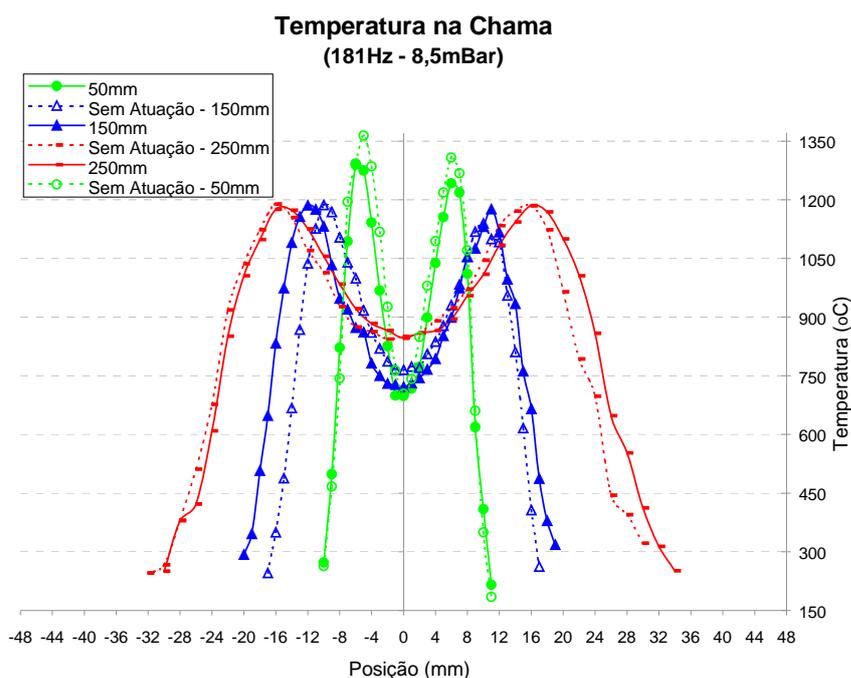
Verifica-se que o campo acústico altera as medidas de temperatura na chama. Com o incremento gradual na amplitude de pressão, as medidas de temperatura vão definindo um perfil característico nas curvas para cada posição axial, como mostra a Figura 71. Observa-se que em 21 mbar (Figura 71 (c)), correspondente à máxima amplitude de pressão estudada, tem-se perfil de temperatura que representa a tendência global, condição acústica esta adotada também para representar a análise dos gases.

Em 50mm, há um decréscimo na temperatura com a atuação acústica (Figura 71 (c)), obtém-se um pico de 1360 °C sem atuação acústica, e na mesma posição radial, esta diminui para 892 °C. Nesta região próxima ao queimador, onde se tem excesso de 22% de oxidante na sua injeção, há grande introdução de O<sub>2</sub> na chama quando é aplicado o campo acústico, como pode ser visto na Figura 70 (a), o que causa provavelmente a diminuição local da temperatura da chama. Isto confirma o que foi dito no item 4.3.1 (Figura 45), ao ser analisada a menor concentração de NO<sub>x</sub> na

região central do queimador em 50mm para a Condição I com atuação acústica, desfavorecendo a formação de  $\text{NO}_x$  térmico.

Em 150 e 250mm há aumento na temperatura com a utilização do campo acústico, verifica-se que este promove uma melhor mistura entre os reagentes, fazendo com que as reações de combustão locais sejam mais eficientes. Ocorre ainda a diminuição no comprimento da chama, concentrando a liberação de energia em um volume menor, aumentando assim a temperatura.

A Figura 72 apresenta o perfil de temperatura para a Condição II, em 181 Hz e: (a) 8,5 mbar, (b) 17 mbar e (c) 25 mbar.



(a)

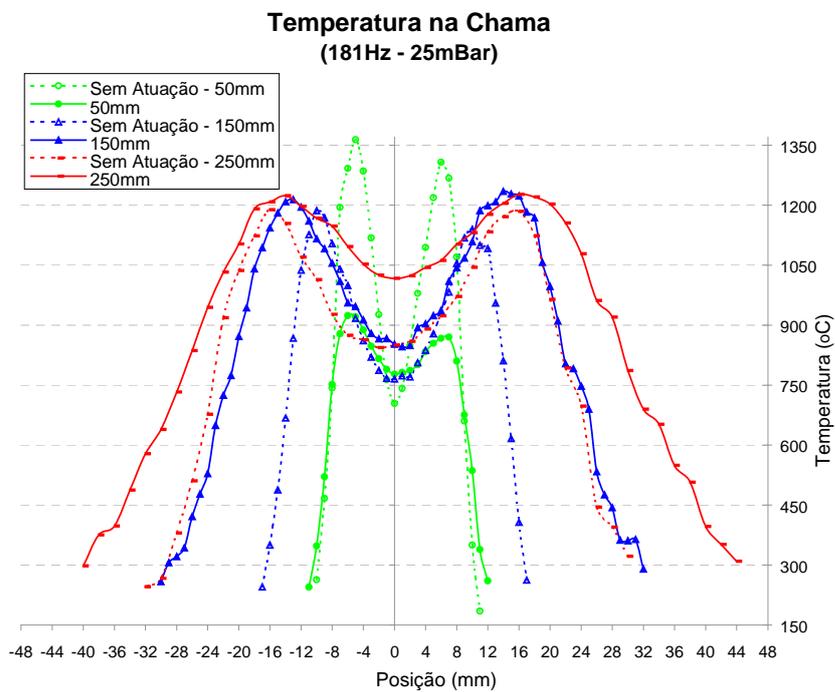
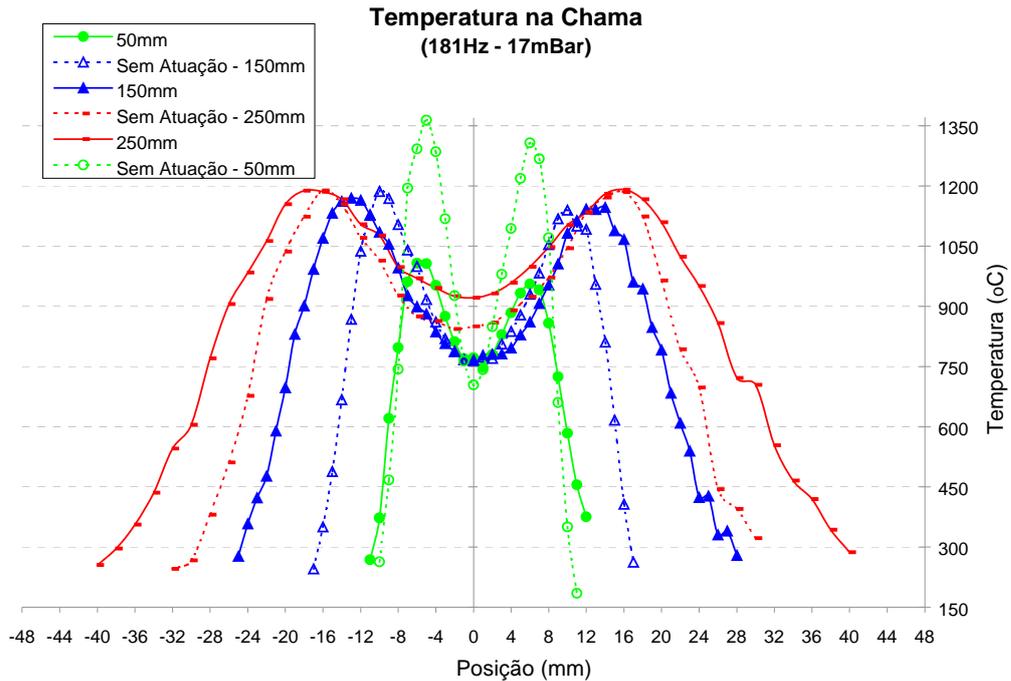


Figura 72 – Distribuição radial da Temperatura na Condição II para 181 Hz e: (a) 8,5 mbar (b) 17 mbar e (c) 25 mbar (Erro máximo:  $\pm 30,37$  °C).

Em 50mm com a atuação acústica tem-se menor temperatura em alguns pontos ao longo da direção radial da chama, porém na região central do eixo do queimador, a temperatura é maior, tem-se 778 °C para o processo com atuação, e 704 °C sem atuação, o que diverge dos resultados obtidos para a Condição I. Como pode ser visto na Figura 70 (a) e (b), nesta região tem-se menor [O<sub>2</sub>] para a Condição II com relação à Condição I, o que, conseqüentemente gera temperaturas mais altas na Condição II.

Com relação à razão de equivalência global utilizada não é notada alteração considerável no incremento da temperatura obtido com a atuação acústica. Para a Condição I em 250mm no eixo central do queimador tem-se, por exemplo, um aumento de 162 °C na temperatura, enquanto que para a mesma posição na Condição II, tem-se aumento de 167 °C na temperatura. A temperatura máxima obtida com a atuação acústica também não parece ser alterada pela razão de equivalência, pois é obtido na posição axial de 150mm, um máximo de 1232 °C para a Condição I, enquanto a Condição II apresenta um máximo de 1235 °C, medidas na mesma posição radial da chama.

#### 4.5 RESULTADOS DA ANÁLISE TOMOGRÁFICA DE CHAMA

Os resultados referentes à tomografia aqui apresentados são divididos em duas partes, a primeira é referente ao levantamento qualitativo das intensidades luminosas da chama por ocasião da utilização de filtros interferométricos em comprimentos de onda pré-selecionados e a segunda se refere à reconstrução tomográfica propriamente dita, utilizando-se das imagens obtidas das chamas.

Para tais testes, como ocorrido para a análise dos gases e temperatura, os testes foram conduzidos nas vazões de alimentação apresentadas na Tabela 11, condições acústicas descritas na Tabela 17 e somente para as posições axiais, descritas na Tabela 19.

#### 4.5.1) Intensidades luminosas da chama

Como citado no item 2.2.6.5, foi utilizado neste trabalho o algoritmo “*Back Projection*” para realizar a reconstrução tomográfica da chama. Inicialmente foram obtidas as projeções da radiação emitida pelos radicais CH, C<sub>2</sub> e pela fuligem presentes na chama. Após a aquisição de imagens, utilizando-se do algoritmo foi realizada a reconstrução tomográfica.

As imagens foram obtidas através de uma câmera CCD acoplada a um computador para registro dos dados, empregando-se equipamentos e filtros em diversos comprimentos de onda, descritos no item 2.2.6.4.

Aqui serão apresentados apenas os resultados das intensidades sem atuação acústica e nas amplitudes de pressão máximas, para a Condição I, visto que esta condição representa a tendência global das intensidades luminosas das diferentes chamas analisadas neste trabalho.

O centro do queimador corresponde à posição referente à metade do valor máximo do eixo dos pixels, ou seja, o zero do eixo dos pixels corresponde ao centro do queimador e conseqüentemente o centro da chama. As intensidades luminosas são apresentadas em escala de cinza, sendo que esta escala varia de 0 (correspondente à cor preta) a 254 (correspondente à cor branca).

A emissão de fuligem pode ser vista através da Figura 73, onde tem-se chama sem atuação acústica. As Figuras 74, 75 e 76 apresentam a chama com atuação acústica a 97 Hz, 181 Hz e 282 Hz, respectivamente.

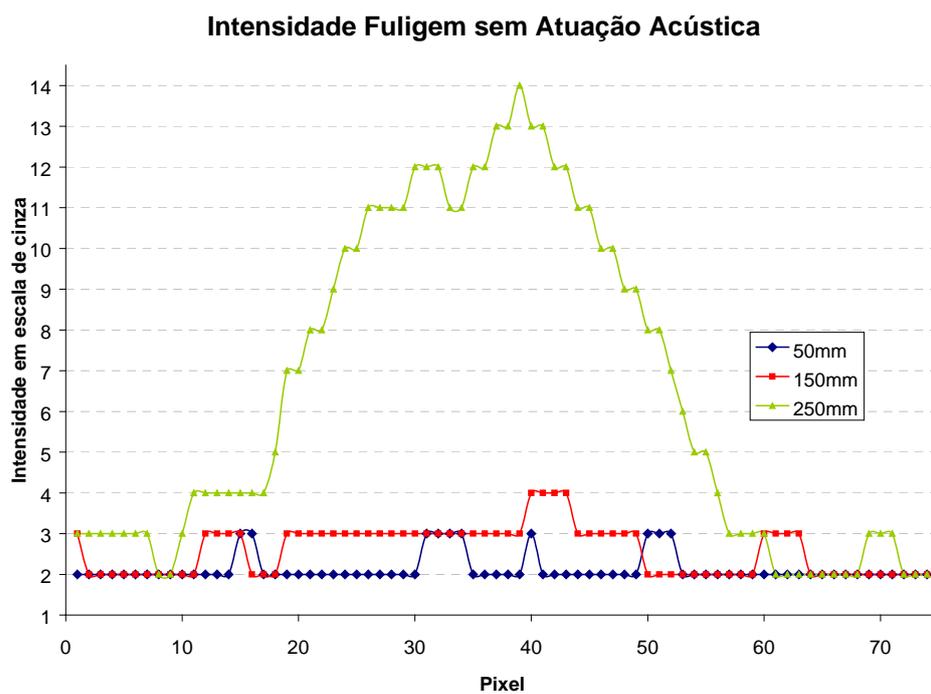


Figura 73 – Intensidade da Fuligem sem atuação acústica na Condição I

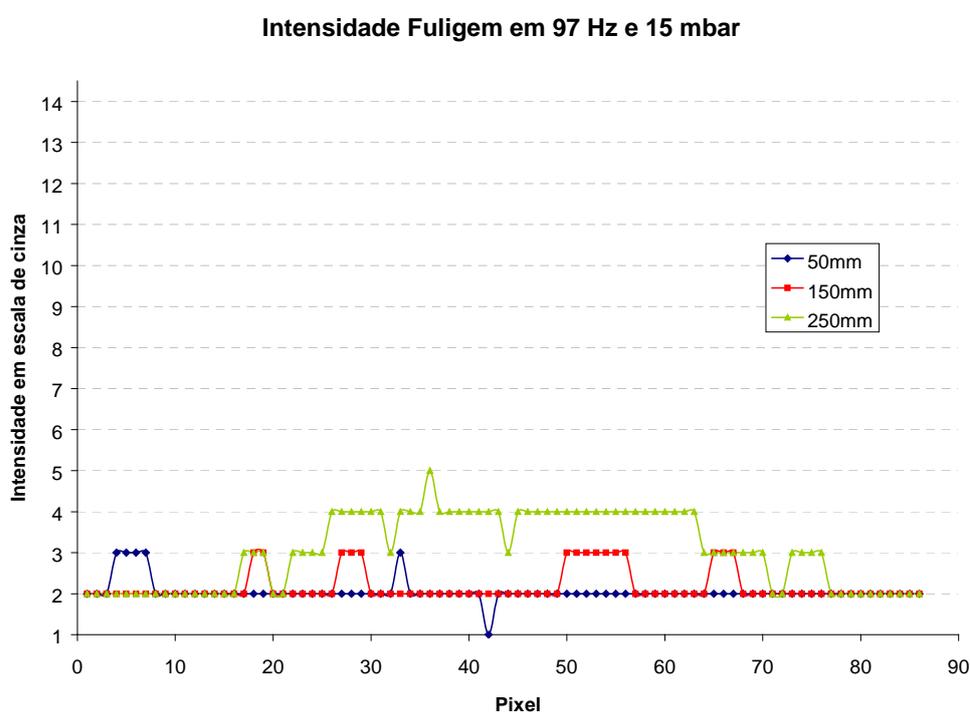


Figura 74 – Intensidade da Fuligem a 97 Hz – 15 mbar na Condição I

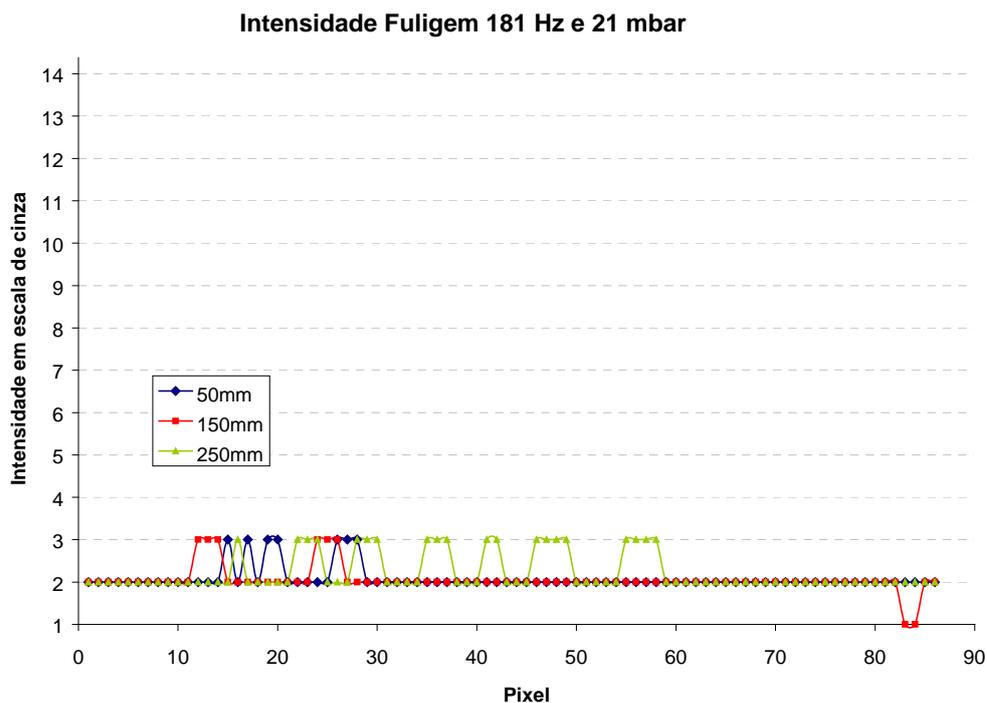


Figura 75 – Intensidade da Fuligem a 181 Hz – 21 mbar na Condição I.

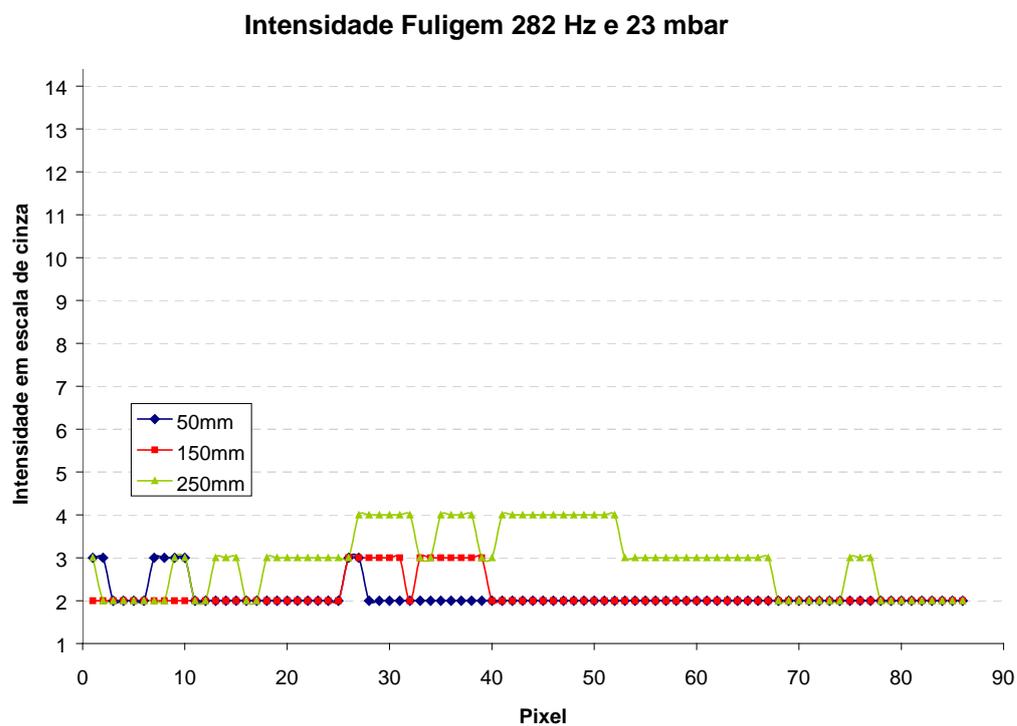


Figura 76 – Intensidade da Fuligem a 282 Hz – 23 mbar na Condição I.

Pode-se verificar através da Figura 73 a grande emissão de fuligem para a situação sem atuação acústica, principalmente para a posição axial de 250 mm e

através das Figuras 74, 75 e 76, verifica-se a grande influência do sinal acústico sobre a estrutura da chama, pois ocorre considerável redução da fuligem para todas as frequências dos harmônicos do queimador em 250mm, denotando queima mais completa em todas as condições de atuação. Uma das causas predominantes para a formação da fuligem é a situação onde se tem condição rica de queima, ou seja, chamas com alta concentração de combustível com relação ao oxidante. Como visto anteriormente, Figura 70 (a) e (b), a combustão pulsante induz à introdução de  $O_2$  na região de chama, promovendo ambiente com excesso de oxidante, o que reduz a formação de fuligem. Pela Figura 75, observa-se para 150 e 250 mm, o mesmo nível de concentração de fuligem obtido em 50mm.

Em todas as frequências de trabalho, houve redução da fuligem para a altura axial de 150mm e mesmo em 50mm, onde se tem baixa concentração de fuligem para o caso sem atuação acústica, em alguns pontos, houve redução em sua emissão.

A seguir são apresentados os resultados das intensidades luminosas em escala de cinza para os radicais  $C_2$  e  $CH$ , porém os dados serão mais cuidadosamente analisados no próximo item sobre tomografia. As Figuras 77, 78, 79 e 80 apresentam as intensidades luminosas em escala de cinza para o radical  $C_2$ , respectivamente para a chama sem atuação e com atuação em 97, 181 e 282 Hz.

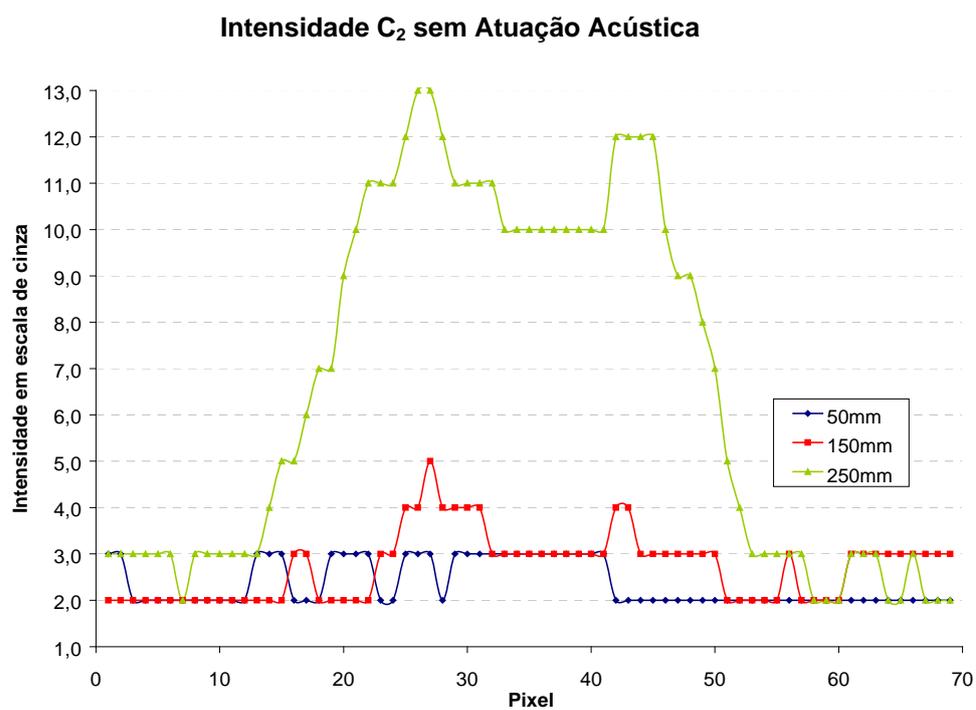


Figura 77 – Intensidade do Radical C<sub>2</sub> sem atuação acústica na Condição I.

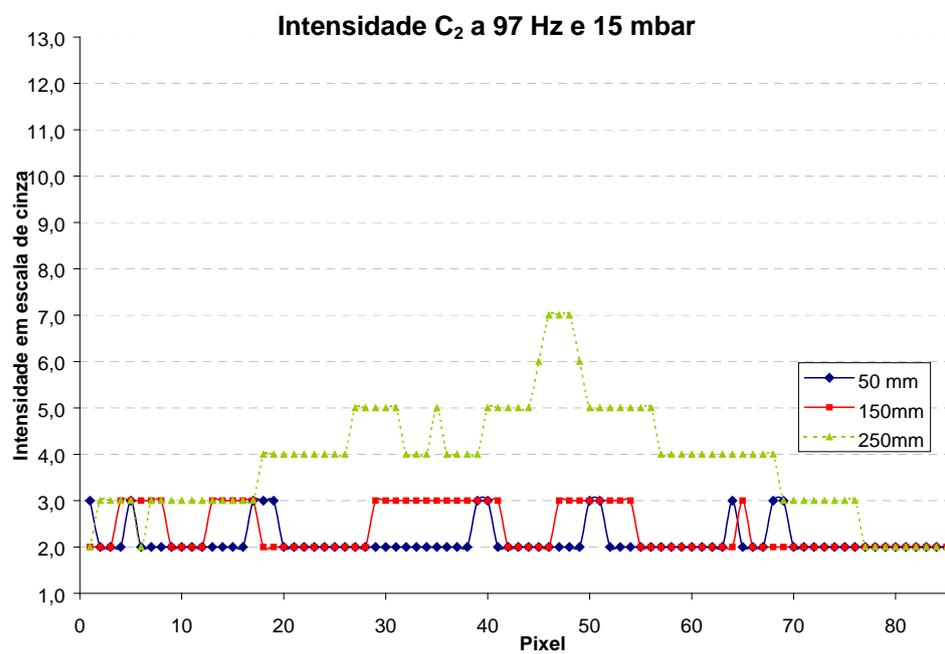


Figura 78 – Intensidade do Radical C<sub>2</sub> a 97 Hz – 15 mbar na Condição I.

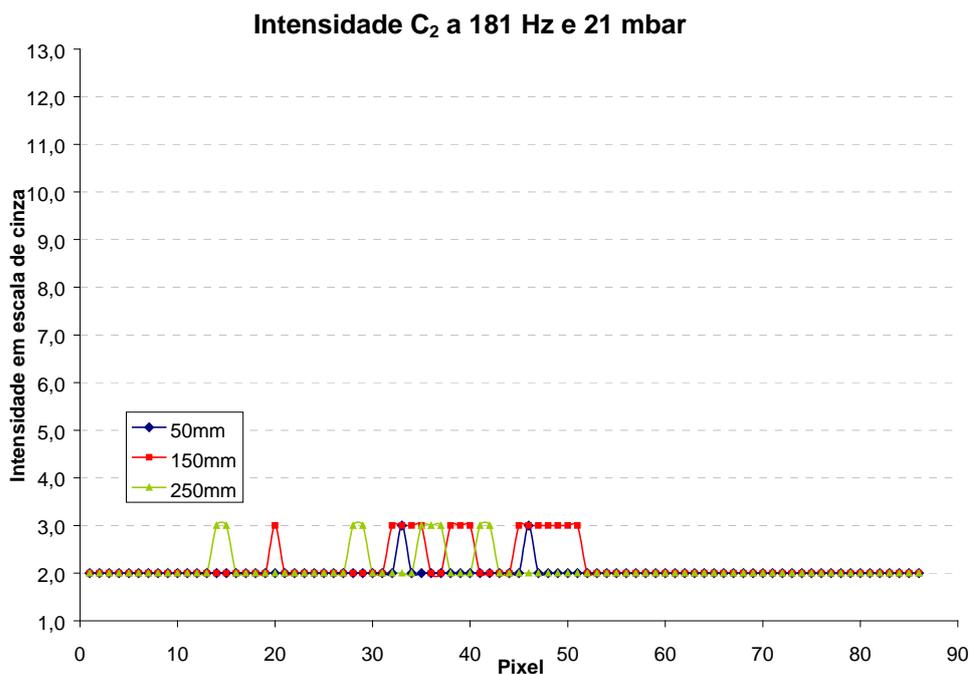


Figura 79 – Intensidade do Radical  $C_2$  a 181 Hz – 21 mbar na Condição I.

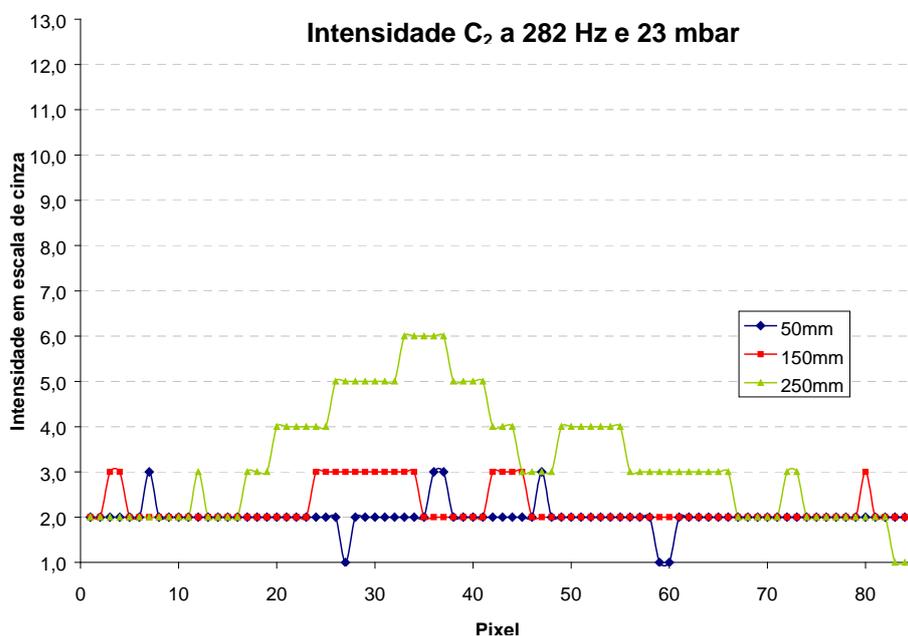


Figura 80 – Intensidade do Radical  $C_2$  a 282 Hz – 23 mbar na Condição I.

Verifica-se que ocorre diminuição na intensidade luminosa do  $C_2$  com a aplicação do campo acústico, principalmente em 250mm, sendo esta redução pouco acentuada em 50mm. Este radical é característico em chamas ricas em combustível, o

que denota aqui a melhor mistura entre combustível e oxidante para as três posições axiais estudadas. Nota-se que para a frequência de 181 Hz e 21 mbar (Figura 79), ocorre redução nas intensidades deste radical, chegando-se ao valor máximo de 3,0 na escala de cinza em algumas regiões da chama e em outras se obtém valores ainda menores.

As Figuras 81, 82, 83 e 84 mostram a variação da intensidade em escala de cinza para o radical CH.

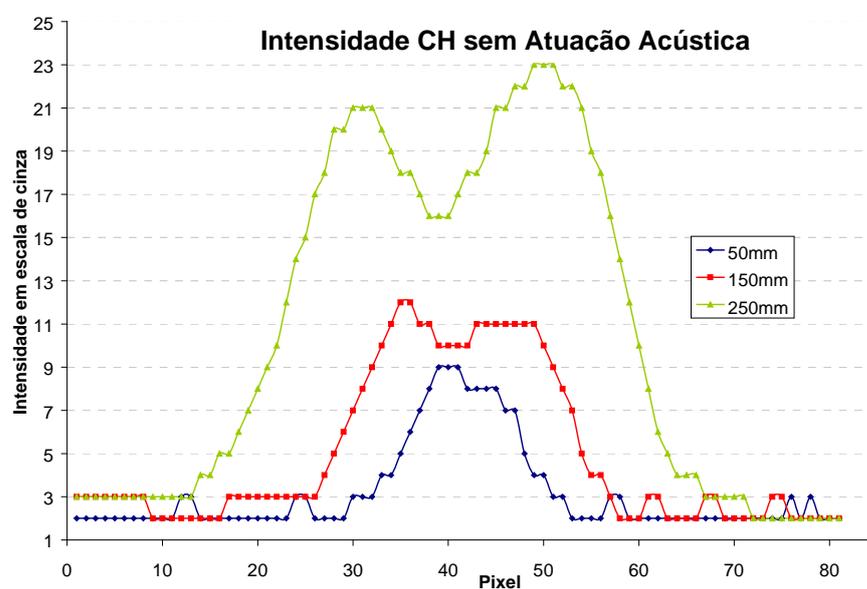


Figura 81 --- Intensidade do Radical CH sem atuação na Condição I.

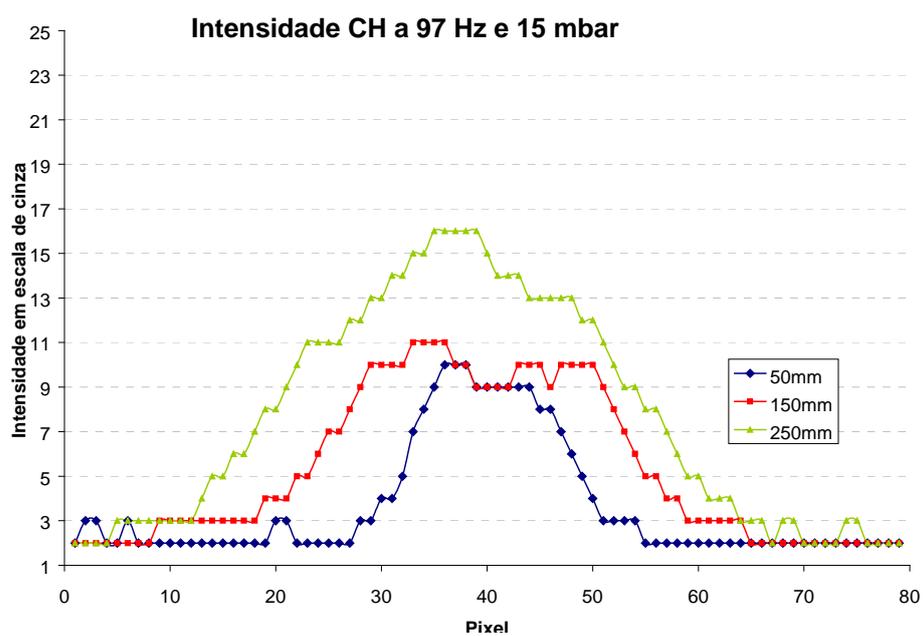


Figura 82 – Intensidade do Radical CH a 97 Hz – 15 mbar na Condição I.

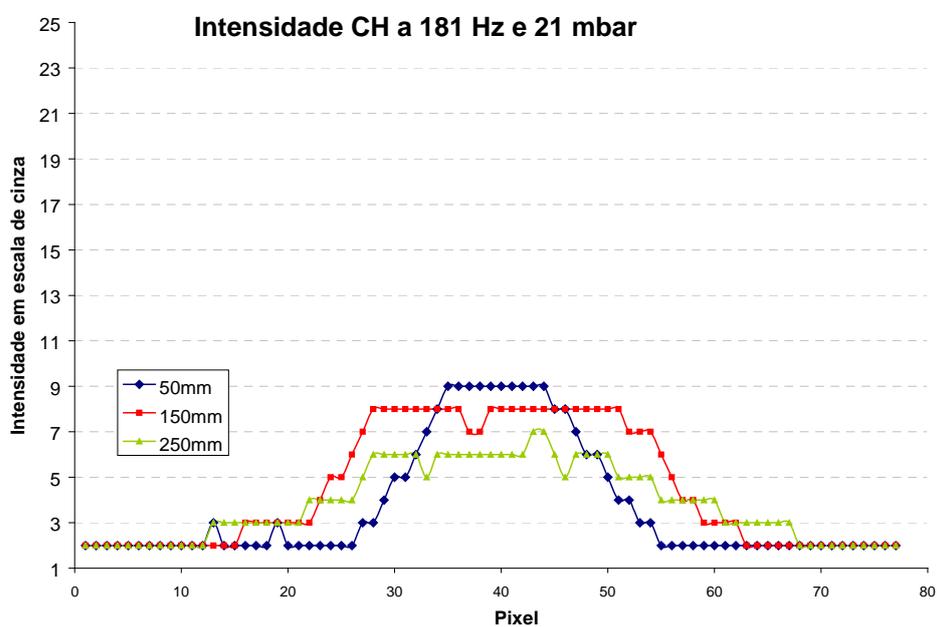


Figura 83 – Intensidade do Radical CH a 181 Hz – 21 mbar na Condição I.

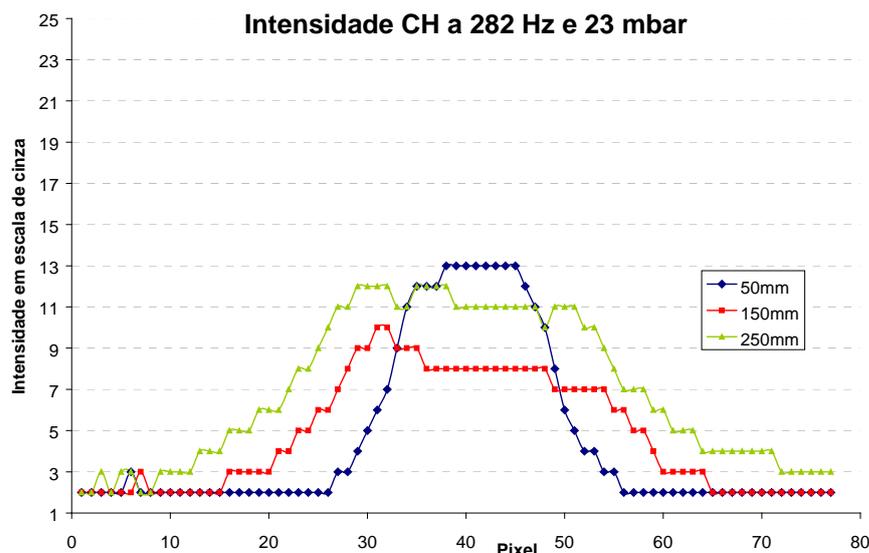


Figura 84 – Intensidade do Radical CH a 282 Hz – 23 mbar na Condição I.

A utilização da atuação acústica promove maior distribuição das intensidades luminosas, principalmente em 150 e 250 mm para o radical CH, ao longo do eixo radial, para todas as freqüências utilizadas neste trabalho. Este comportamento ocorre provavelmente devido às reações de combustão estarem mais espalhadas (quando é imposto o campo acústico), indicando que o campo acústico transforma uma chama difusiva em uma chama com características de pré-misturada.

Abaixo são apresentadas, chamas correspondentes às condições acústicas utilizadas neste trabalho, para a condição de vazão I, apresentando desta forma chamas referentes ao caso sem atuação acústica e para as freqüências de 97 Hz, Figura 85, de 181 Hz, Figura 86 e 282 Hz, Figura 81. Nestas Figuras tem-se em alguns casos, chamas com amplitudes de pressão maiores que as utilizadas neste trabalho, não tendo sido estas utilizadas, por não se manterem ancoradas na base do queimador por tempo suficiente para a realização dos testes.

			
<b>Sem Atuação</b>	<b>97 Hz-5,5 mbar</b>	<b>97 Hz-10 mbar</b>	<b>97 Hz-15 mbar</b>

Figura 85 – Chama não atuada e com atuação a 97 Hz para várias amplitudes de pressão.

		
<b>181 Hz-8,5 mbar</b>	<b>181 Hz-16 mbar</b>	<b>181 Hz-21 mbar</b>

Figura 86 – Chama com atuação a 181 Hz para várias amplitudes de pressão.

				
<b>282 Hz-10 mbar</b>	<b>282 Hz-15 mbar</b>	<b>282 Hz-23 mbar</b>	<b>282 Hz-28 mbar</b>	<b>282 Hz-33 mbar</b>

Figura 87 – Chama com atuação a 282 Hz para várias amplitudes de pressão.

Pode-se notar visivelmente que à medida que se vai aumentando a amplitude de pressão, obtém-se queima mais completa, promovendo chamas mais curtas e com tonalidade azulada. Aleatoriamente, aqui são apresentadas chamas na frequência de 282 Hz e com amplitudes de pressão maiores que as utilizadas nos testes experimentais adotados neste trabalho. Há forte influência da atuação sobre a estrutura da chama, verifica-se que em 28 mbar tem-se a coloração azul bastante acentuada na chama, indicando nesta região chama com característica de pré-misturada e em 33 mbar tem-se a chama com coloração quase que totalmente azul.

#### **4.5.2 Captura e reconstrução tomográfica de imagens da chama**

Anterior à realização efetiva da reconstrução tomográfica é necessário se fazer a correta captura e armazenamento das imagens obtidas, neste caso, da chama, para somente então realizar sua reconstrução tomográfica, assim os subitens a seguir apresentam as imagens médias obtidas da chama e sua reconstrução tomográfica.

##### **4.5.2.1 Imagens médias obtidas da chama em escala de cinza**

Como já mencionado, para a obtenção das imagens, foram utilizados filtros de interferência na região do visível para os radicais  $C_2$  e CH e para a Fuligem, nos comprimentos de onda, conforme mostra a Tabela 20.

Tabela 20 - Comprimento de onda das espécies analisadas neste trabalho.

<b>Espécie</b>	<b>Comprimento de onda</b>
	(nm)
CH	435,8
C <sub>2</sub>	514,5
Fuligem	800

O tempo de aquisição e armazenamento dos dados no computador, foi cerca de 40 segundos para uma média de 150 imagens e o tempo de posicionamento do braço articulado (conforme descrito no item 2.2.6.3) em cada ângulo de projeção de aproximadamente 3 minutos.

As imagens capturadas pela câmera e processadas no computador foram armazenadas em arquivos do tipo TIF. Este arquivo fornece informação de escala de cinza para os pixels e sua localização, tendo como referencial o pixel superior esquerdo de uma figura retangular. Para ler a escala de intensidade luminosa dos pixels foi utilizado o software Mathcad 2001 Professional, sendo que, cada pixel traz as informações da região de reconstrução, ou seja, cada pixel representa o valor da integral ao longo de uma faixa que atravessa a região de reconstrução, neste caso uma seção transversal da chama .

Através do algoritmo “*Back Projection*” foram processadas as informações referentes às imagens obtidas na chama obtendo-se assim a reconstrução tomográfica nas alturas axiais de 50, 150 e 250mm, conforme pode ser visto na Figura 88, para as condições de ensaios já descritas anteriormente, ou seja, vazões de alimentação apresentadas na Tabela 11, condições acústicas descritas na Tabela 17 e para as posições axiais, descritas na Tabela 19.

Foi utilizada a mesma abertura óptica e tempo de exposição dos pixels para aquisição das imagens para todos os testes, ou seja, a distância focal 3 e “*f number*” 4. Como mencionado as imagens apresentadas apresentam intensidades luminosas em escala de cinza, que varia de 0 (cor preta) a 254 (cor branca).

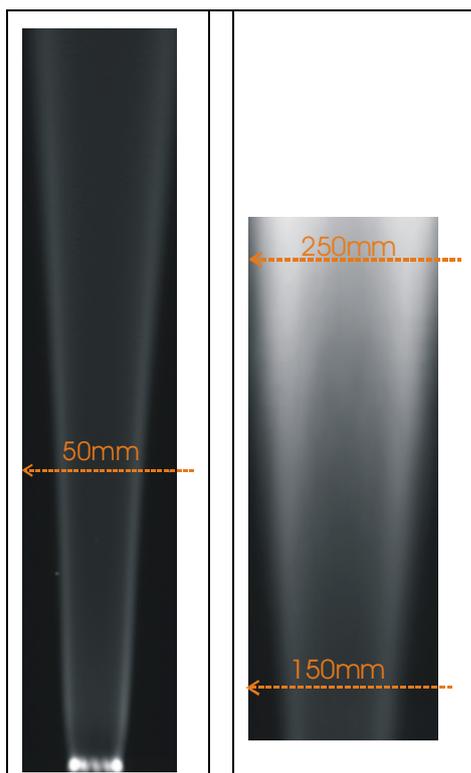
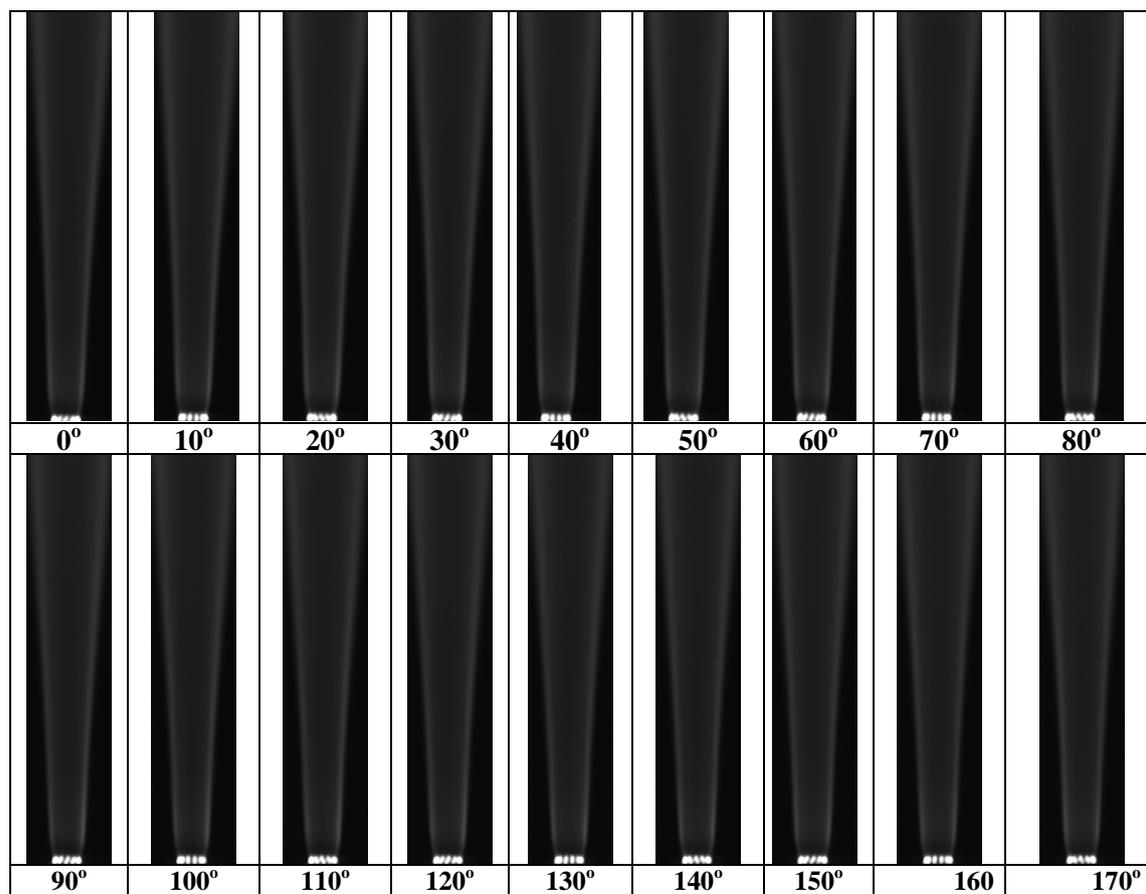


Figura 88 – Localização na chama das alturas axiais de 50, 150 e 250mm.

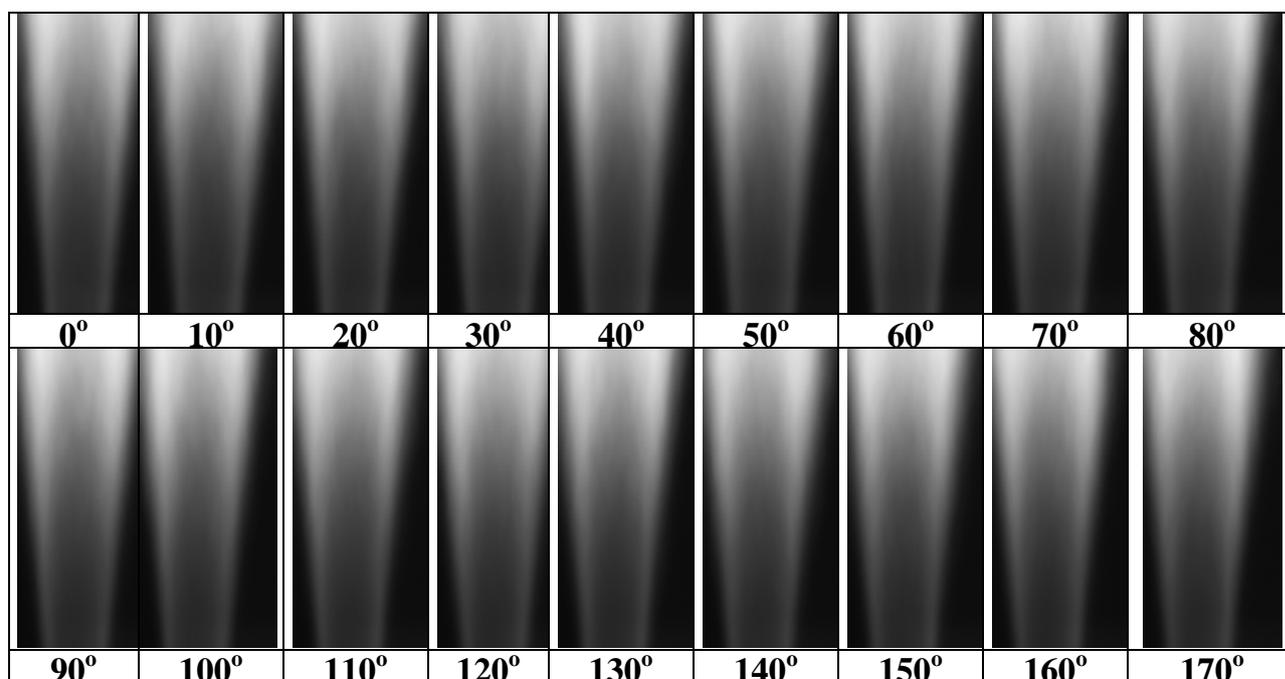
Assim como ocorreu com os resultados referentes à análise dos gases e da temperatura, mostrados anteriormente, optou-se aqui por apresentar alguns resultados dos testes, sendo estes relevantes e que representam de forma qualitativa os demais resultados.

Serão apresentados inicialmente os resultados referentes à situação sem atuação acústica e com atuação acústica para a frequência de 181 Hz e amplitudes mínima, média e máxima, de forma a verificar a evolução da influência do processo acústico na formação dos radicais  $C_2$ , CH e da fuligem, na Condição I, visto que os resultados das demais frequências dos harmônicos do queimador seguem a mesma tendência nos resultados.

A Tabela 21 à Tabela 24 traz as imagens projetadas do radical  $C_2$ , obtidas por câmera CCD em dezoito ângulos diferentes ao redor da chama, na Condição I sem atuação acústica e na frequência de 181 Hz e amplitudes de pressão mínima (8,5 mbar), média (16 mbar) e máxima (21 mbar). As imagens foram capturadas na posição axial de 50 mm (a), 150 e 250 mm (b)

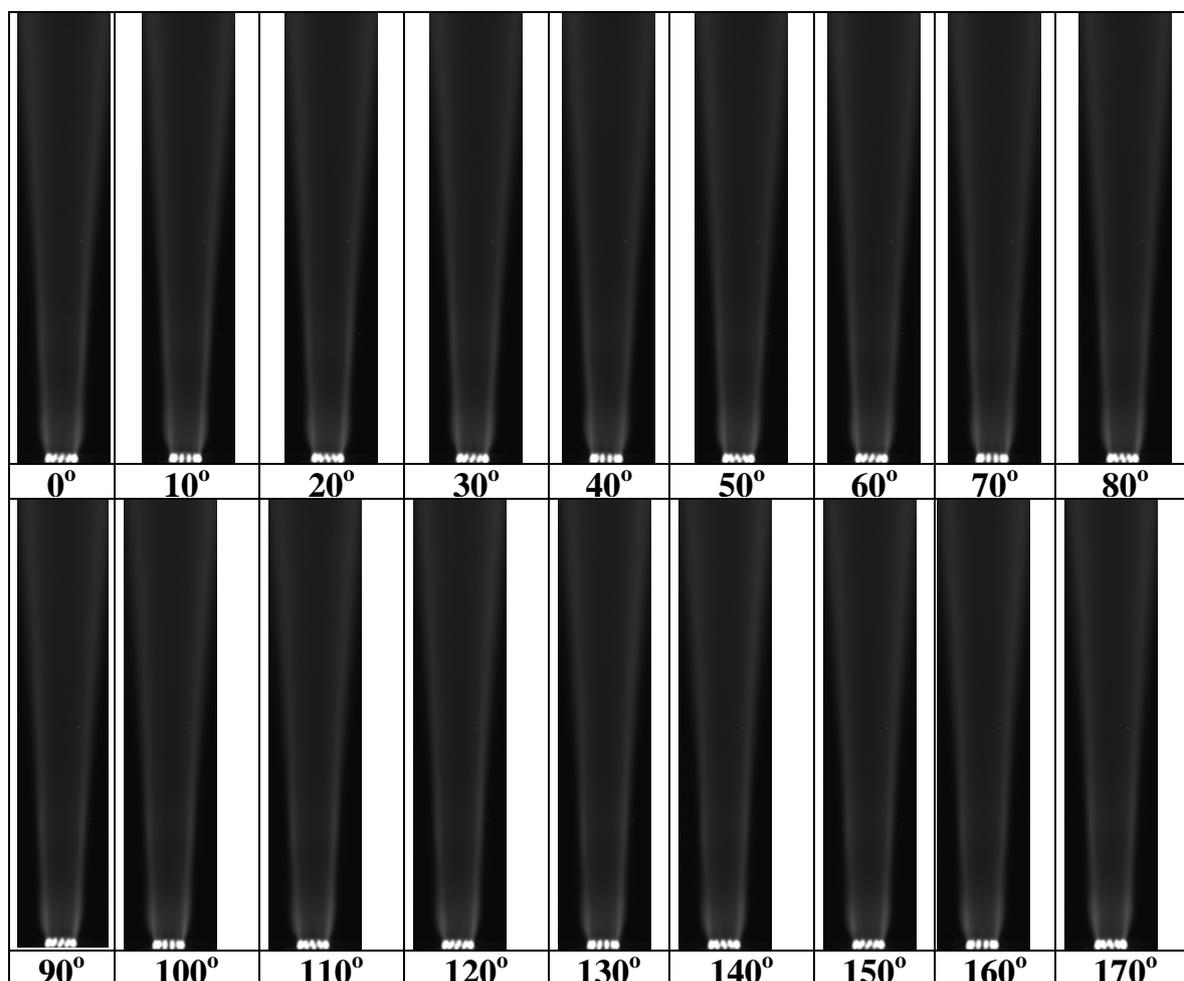
Tabela 21-Imagem projetada do radical  $C_2$  sem atuação acústica ra Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).

(a)

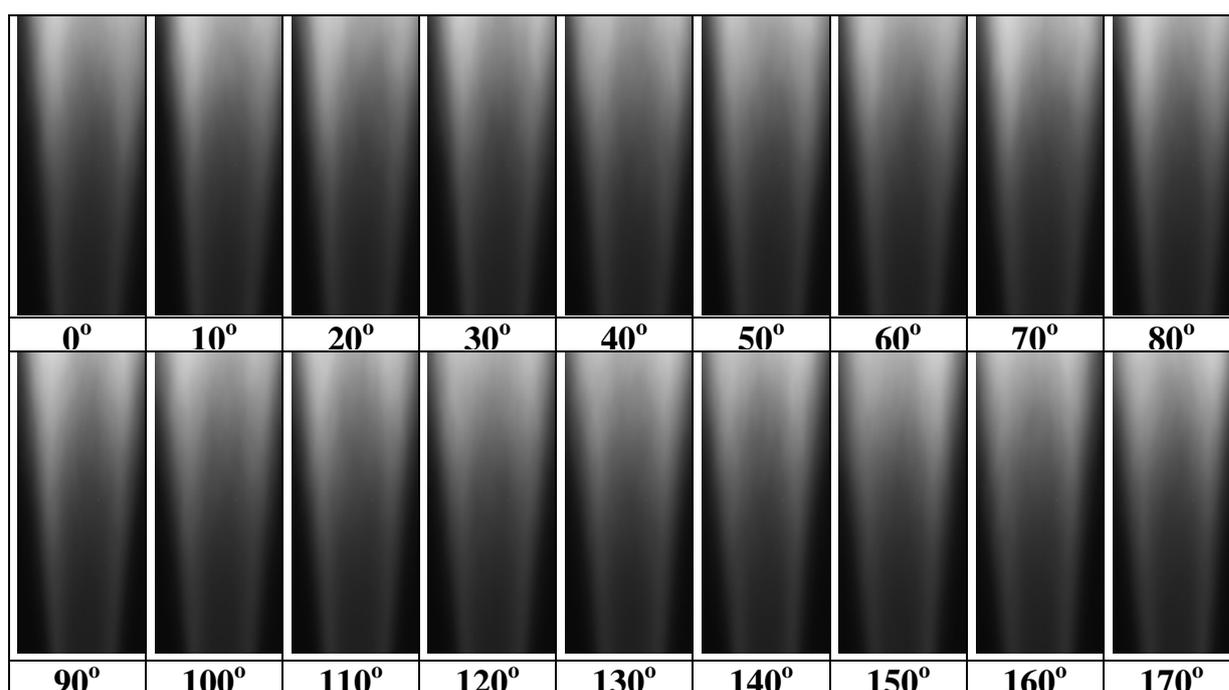


(b)

Tabela 22 - Imagem projetada do radical  $C_2$  com atuação de 8,5 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).

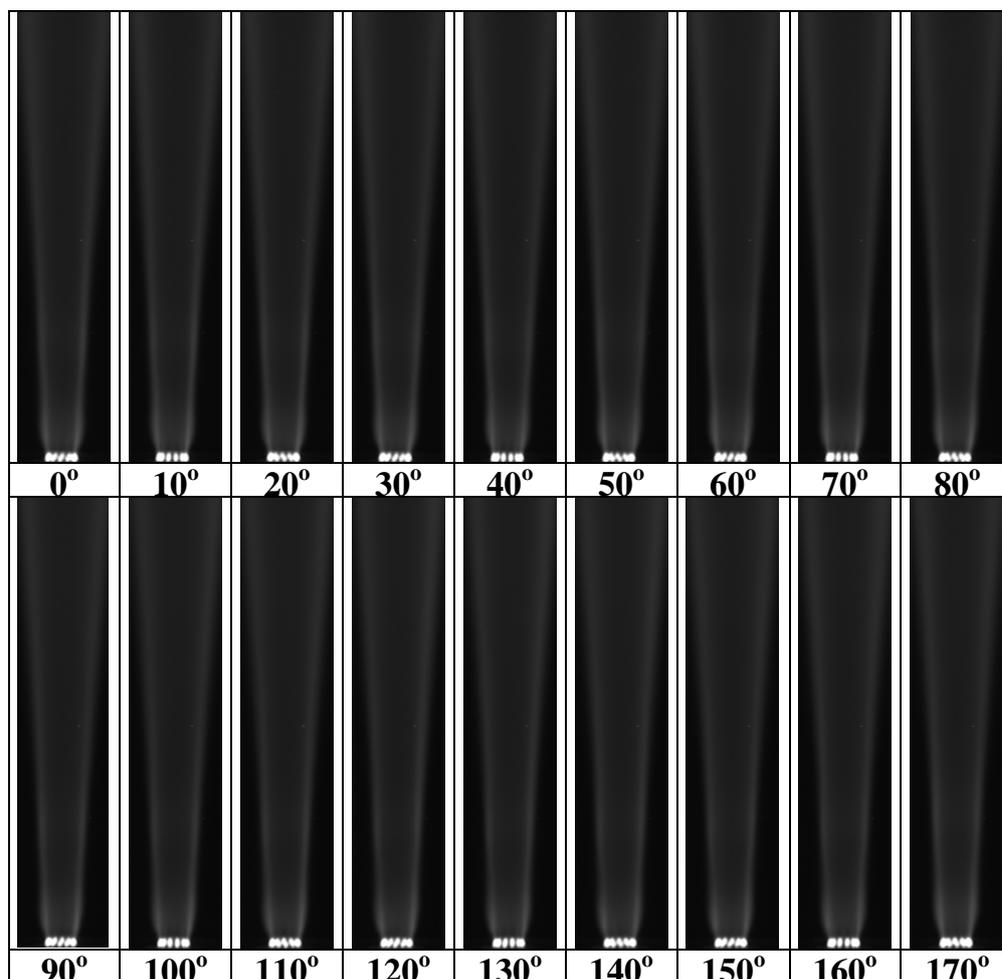


(a)

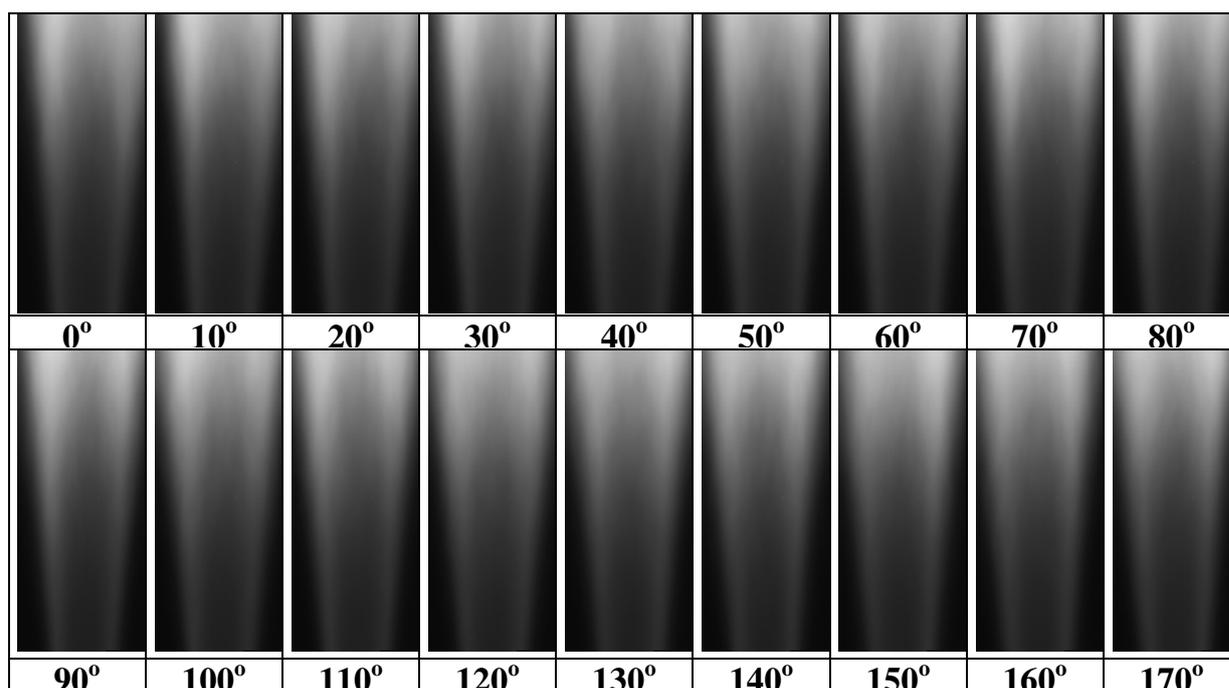


(b)

Tabela 23 - Imagem projetada do radical  $C_2$  com atuação de 16 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).

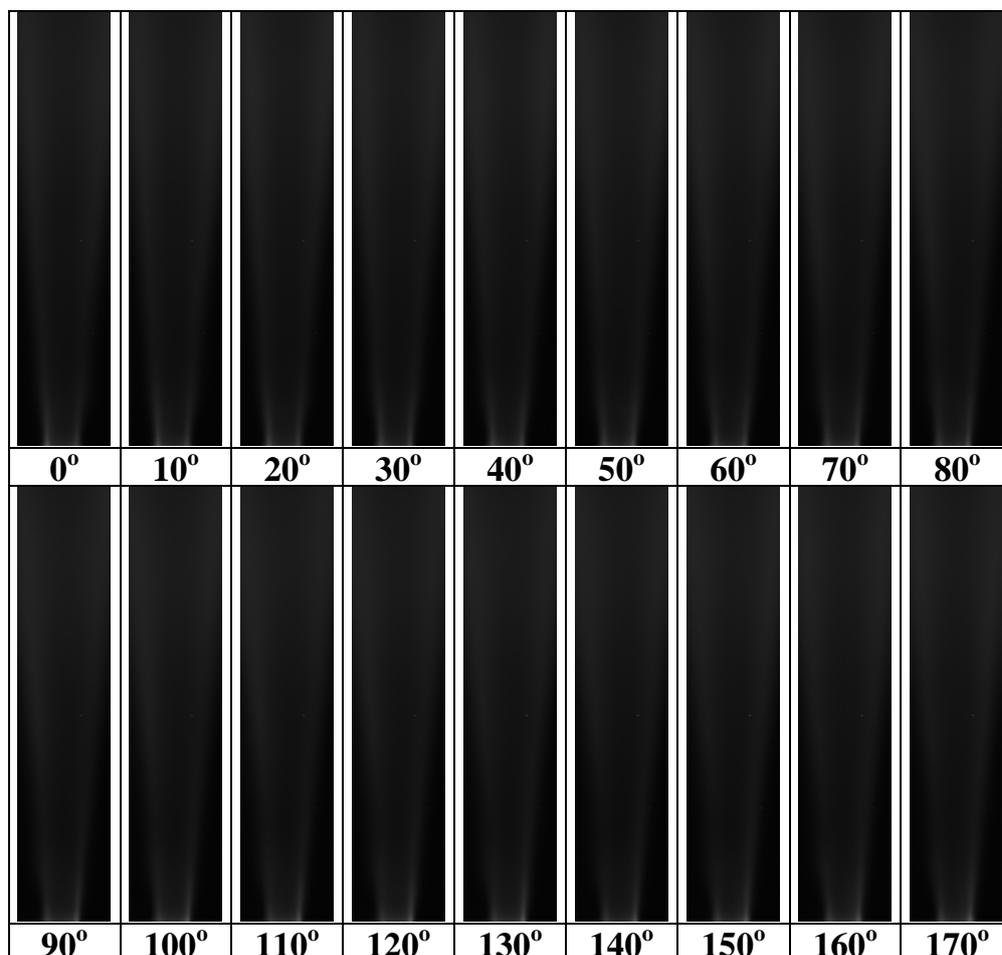


(a)

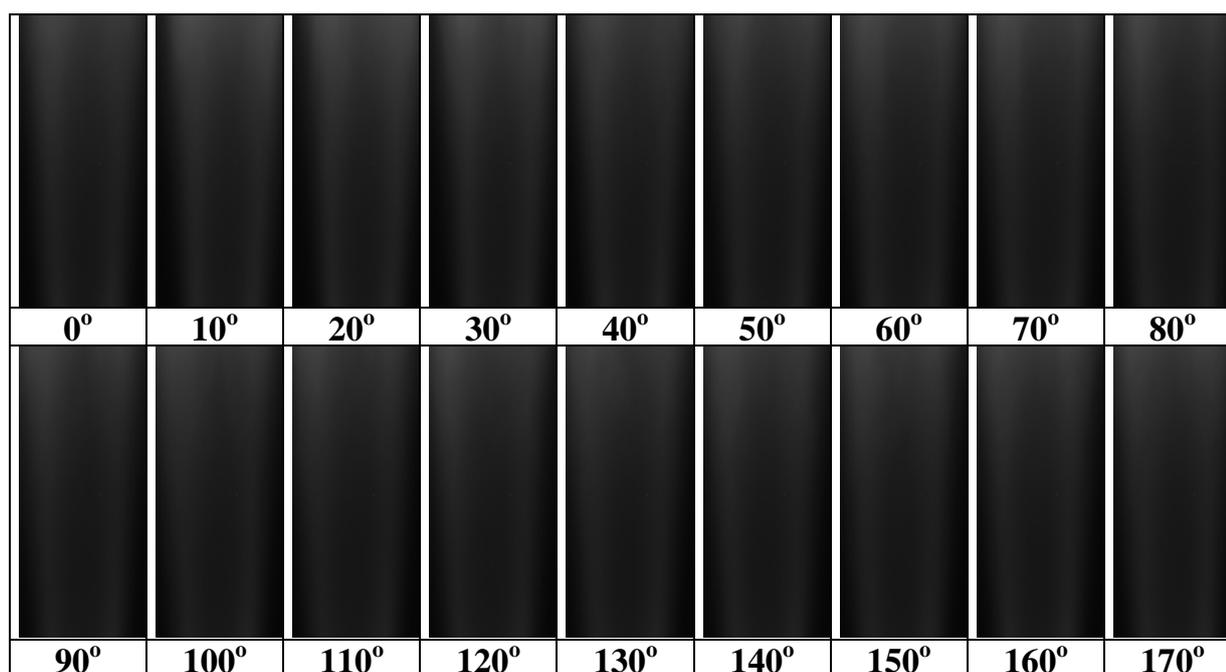


(b)

Tabela 24 - Imagem projetada do radical  $C_2$  com atuação de 21 mbar para Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).



(a)



(b)

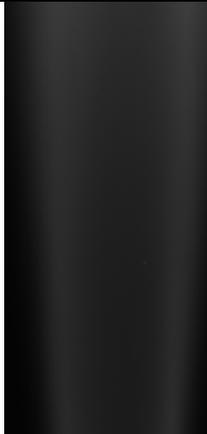
Visualmente pode ser verificado que as imagens projetadas sem atuação acústica possuem intensidade relativamente alta e à medida que a amplitude de pressão aumenta há diminuição nas intensidades das imagens para o radical  $C_2$ . Porém, verifica-se que as imagens obtidas para os diferentes ângulos e diferentes condições de ensaio são semelhantes.

Será apresentado o resultado da imagem projetada para somente um ângulo, o ângulo de  $0^\circ$ , para o radical CH e para a fuligem na Condição I, em 181 Hz e diferentes amplitudes de pressão, vistos nas Tabelas 25 e 26 para as alturas axiais de 50mm (a), 150 e 250mm (b).

Tabela 25 - Imagem projetada do radical CH no ângulo de projeção de  $0^\circ$  sem atuação acústica e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).

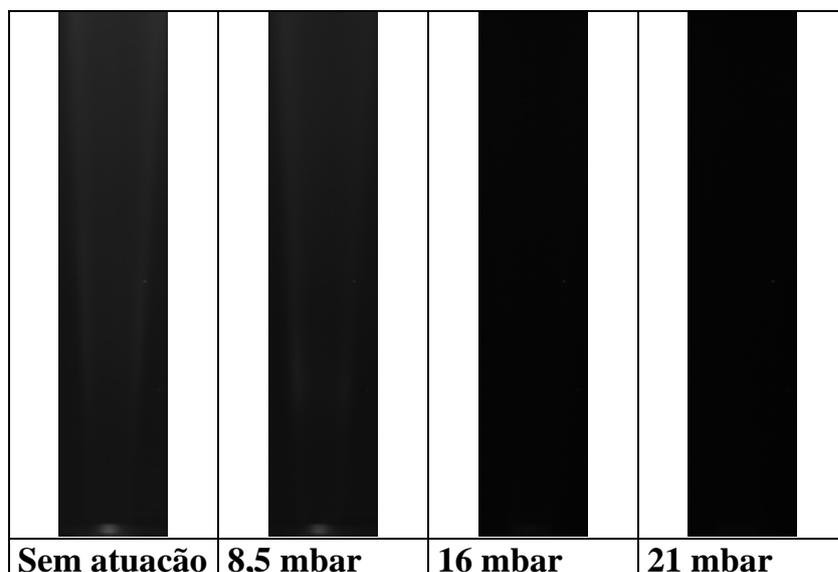
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>

(a)

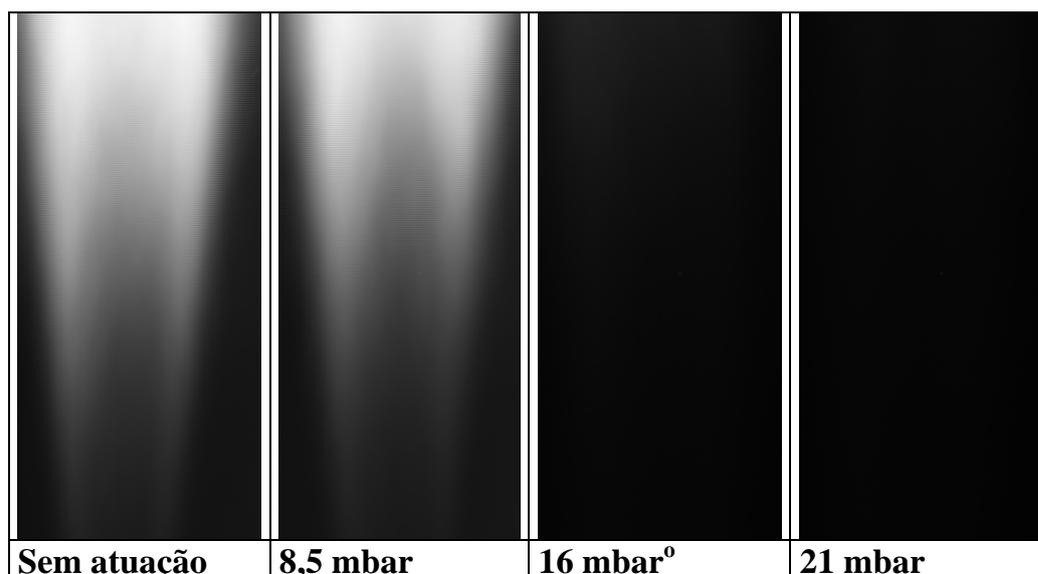
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>

(b)

Tabela 26 - Imagem projetada da fuligem no ângulo de projeção de  $0^\circ$  sem atuação acústica e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I em 50mm (a), 150 e 250mm (b).



(a)



(b)

Assim como ocorreu com o radical  $C_2$ , verifica-se que visualmente, tanto para o radical  $CH$ , como para a fuligem, o processo de atuação acústica promove um decréscimo na intensidade luminosa à medida que é aumentada a amplitude de pressão, provavelmente devido ao fato de que, a região de liberação de energia, anteriormente localizada apenas na fronteira da chama, se espalha e com isso a

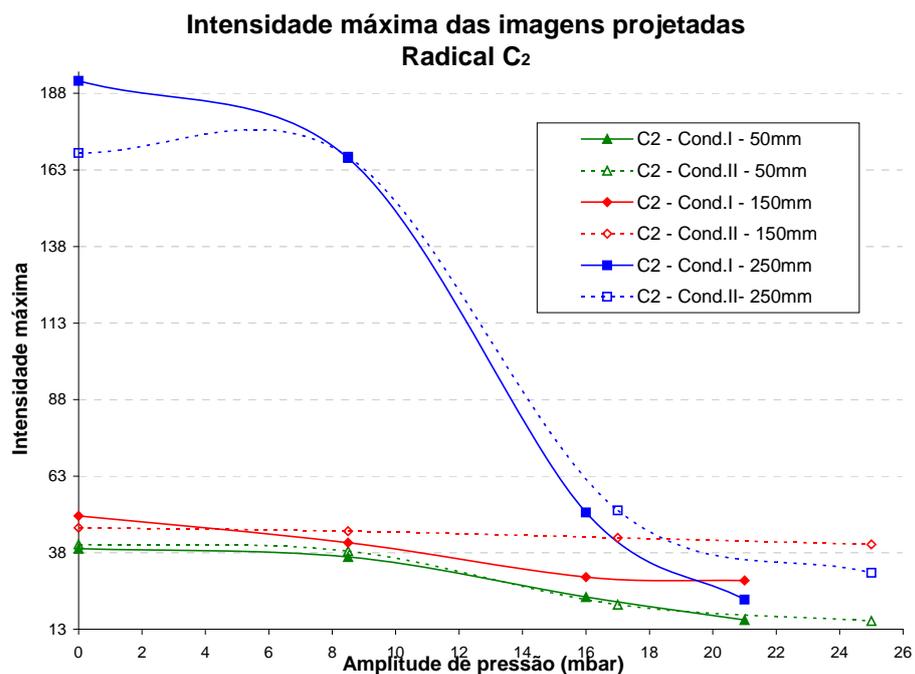
concentração dos radicais se torna mais bem distribuída, com a presença do campo acústico, principalmente em 150 e 250mm.

A Tabela 27 apresenta o valor máximo de intensidade luminosa obtida em cada condição de teste, realizado sem atuação acústica e em 181 Hz, utilizando-se filtros interferométricos para os radicais  $C_2$ , CH e fuligem, para as condições I e II de trabalho, enquanto a Figura 89, apresenta os gráficos para estas situações de ensaio.

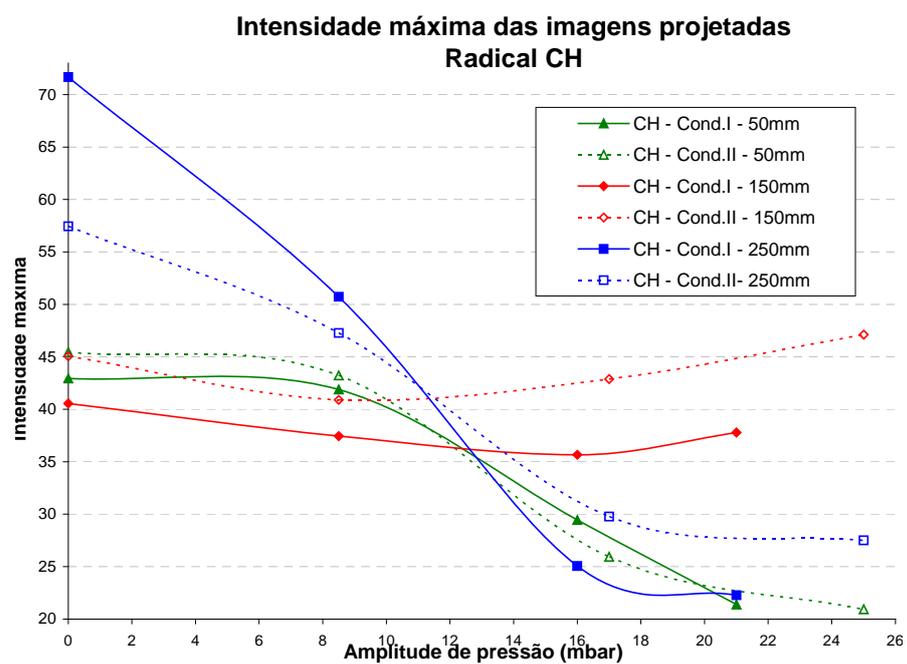
Por exemplo, para a altura de 50 mm, Condição I e com filtro interferométrico para o  $C_2$ , sem o processo de atuação acústica foi obtida a intensidade máxima de 39,28, tendo sido registradas, intensidades menores na chama nesta condição.

Tabela 27 – Intensidades máximas para a condição sem atuação acústica e para 181Hz.

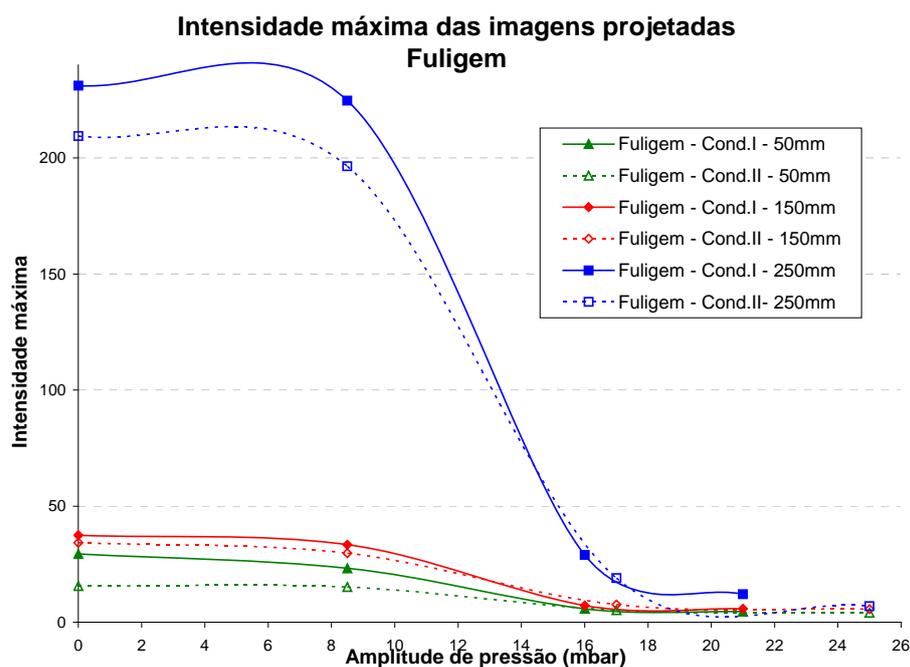
Filtro	Altura (mm)	Condição I		Condição II	
		Regime atuação (mbar)	Intensidade máxima	Regime Atuação (mbar)	Intensidade máxima
C <sub>2</sub>	50	Sem atuação	39,28	Sem atuação	40,72
C <sub>2</sub>	50	8,5	36,61	8,5	38,50
C <sub>2</sub>	50	16	23,50	17	21,00
C <sub>2</sub>	50	21	16,00	25	15,72
C <sub>2</sub>	150	Sem atuação	<b>50,06</b>	Sem atuação	<b>46,17</b>
C <sub>2</sub>	150	8,5	<b>41,28</b>	8,5	<b>45,06</b>
C <sub>2</sub>	150	16	<b>30,06</b>	17	<b>42,83</b>
C <sub>2</sub>	150	21	<b>28,89</b>	25	<b>40,72</b>
C <sub>2</sub>	250	Sem atuação	192,11	Sem atuação	168,56
C <sub>2</sub>	250	8,5	166,83	8,5	167,33
C <sub>2</sub>	250	16	51,17	17	51,83
C <sub>2</sub>	250	21	22,67	25	31,44
CH	50	Sem atuação	<b>42,94</b>	Sem atuação	<b>45,44</b>
CH	50	8,5	<b>41,89</b>	8,5	<b>43,22</b>
CH	50	16	<b>29,44</b>	17	<b>25,94</b>
CH	50	21	<b>21,39</b>	25	<b>20,94</b>
CH	150	Sem atuação	<b>40,56</b>	Sem atuação	<b>45,06</b>
CH	150	8,5	<b>37,44</b>	8,5	<b>40,89</b>
CH	150	16	<b>35,67</b>	17	<b>42,89</b>
CH	150	21	<b>37,78</b>	25	<b>47,11</b>
CH	250	Sem atuação	71,67	Sem atuação	57,44
CH	250	8,5	50,72	8,5	47,28
CH	250	16	25,06	17	29,78
CH	250	21	22,28	25	27,50
Fuligem	50	Sem atuação	29,44	Sem atuação	15,61
Fuligem	50	8,5	23,22	8,5	15,17
Fuligem	50	16	5,78	17	5,22
Fuligem	50	21	4,56	25	4,06
Fuligem	150	Sem atuação	<b>37,44</b>	Sem atuação	<b>34,22</b>
Fuligem	150	8,5	<b>33,39</b>	8,5	<b>29,78</b>
Fuligem	150	16	<b>7,22</b>	17	<b>7,67</b>
Fuligem	150	21	<b>5,78</b>	25	<b>5,61</b>
Fuligem	250	Sem atuação	231,06	Sem atuação	209,39
Fuligem	250	8,5	224,61	8,5	196,39
Fuligem	250	16	29,00	17	19,00
Fuligem	250	21	12,06	25	6,94



(a)



(b)



(c)

Figura 89 – Variação das Intensidades máximas das imagens projetadas com o aumento na amplitude de pressão para os radicais  $C_2$  (a) e CH (b) e para a fuligem (c).

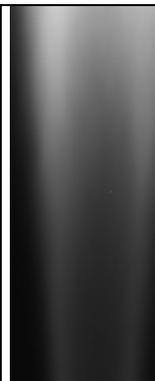
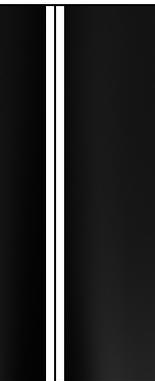
Para os radicais  $C_2$  e CH nas duas condições de trabalho estudadas, para alturas axiais de 50mm, 150 como em 250mm, ocorre diminuição na intensidade luminosa com a imposição do campo acústico, notando-se ainda perfil semelhante nas curvas para as vazões I e II (comparando-se a mesma altura e espécie analisada). Estas observações também podem ser estendidas para a fuligem, a qual teve sua intensidade luminosa chegando próxima de zero, com a utilização da amplitude máxima de atuação para ambas as condições de vazão em todas as alturas axiais.

A fim de se verificar as possíveis divergências existentes entre as imagens luminosas projetadas, para as condições de vazão I e II, são apresentados na Tabela 28, 29 e 30, os resultados obtidos para os radicais  $C_2$ , CH e para a fuligem, respectivamente em 50mm (a), 150 e 250mm (b) para o ângulo de projeção de  $0^\circ$ .

Tabela 28 - Imagem projetada do radical  $C_2$ , no ângulo de projeção de  $0^\circ$  sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm.

							
<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>sem atuação</b>	<b>sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>17mbar</b>	<b>21mbar</b>	<b>25mbar</b>

(a)

							
<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>sem atuação</b>	<b>sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>17mbar</b>	<b>21mbar</b>	<b>25mbar</b>

(b)

Tabela 29 - Imagem projetada do radical CH no ângulo de projeção de  $0^\circ$  sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm.

<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>Sem atuação</b>	<b>Sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>17mbar</b>	<b>21mbar</b>	<b>25mbar</b>

(a)

<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>Sem atuação</b>	<b>Sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>17mbar</b>	<b>21mbar</b>	<b>25mbar</b>

(b)

Tabela 30 - Imagem projetada da Fuligem no ângulo de projeção de  $0^\circ$  sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz nas Condições I e II em (a) 50mm e (b) 150 e 250mm.

<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>Sem atuação</b>	<b>Sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>17mbar</b>	<b>21mbar</b>	<b>25mbar</b>

(a)

<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>	<b>Cond.I</b>	<b>Cond.II</b>
<b>Sem atuação</b>	<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>17 mbar</b>	<b>21 mbar</b>	<b>25 mbar</b>

(b)

Visualmente, não é notada significativa alteração em relação às imagens luminosas projetadas, quando se compara a vazão de alimentação dos gases na situação com e sem o campo acústico. Porém, ao se verificar os valores de intensidade luminosa máxima, nota-se pequenas alterações nos valores obtidos mas sempre seguindo uma mesma tendência nos resultados, conforme pode ser verificado na Figura 89.

#### 4.5.2.2 Utilização do algoritmo para reconstrução da chama

Foi então realizada a reconstrução tomográfica das imagens, as quais possuem 95 pixels, para as condições de trabalho descritas anteriormente.

A Figura 90 apresenta uma referência gradativa de cores para a interpretação da reconstrução tomográfica, correspondentes à intensidade luminosa mínima (cor violeta) e máxima (cor vermelha) dos radicais e da fuligem referentes às imagens obtidas da chama pela CCD.

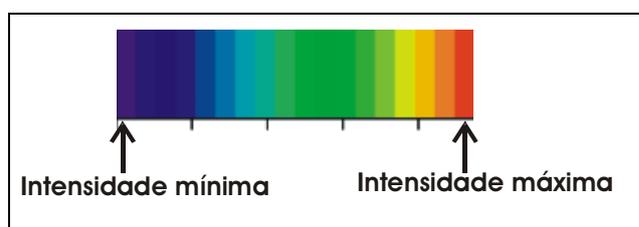


Figura 90 – Referência gradativa para interpretação das intensidades mínimas e máximas da reconstrução tomográfica.

Como já mencionado foi realizada a reconstrução tomográfica através do “*Back-Projection*” em dezoito ângulos em torno da chama (de  $0^{\circ}$  a  $170^{\circ}$ ), cujo resultado é mostrado na Figura 91, o qual apresenta a aplicação do “*Back-Projection*” sobre o perfil de intensidades da chama, em diversos ângulos e para um radical qualquer. Enquanto a Figura 92 mostra o resultado da convolução das imagens obtidas na Figura 91.

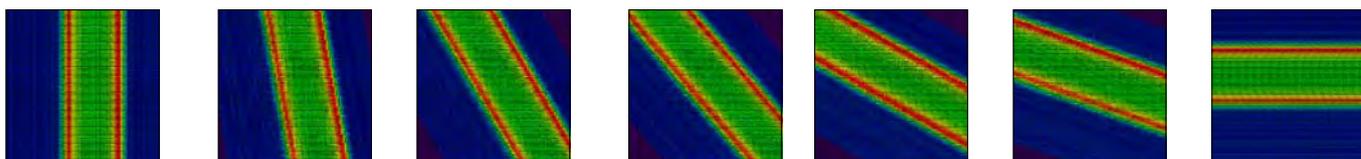


Figura 91 - Aplicação Back-Projection sobre o perfil de intensidades da chama, em diversos ângulos

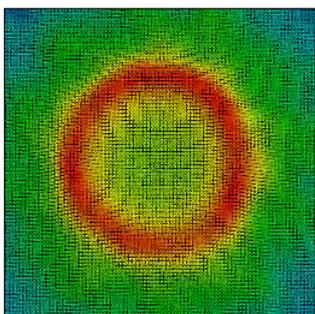


Figura 92 - Resultado da reconstrução tomográfica da seção transversal da chama, através da aplicação da convolução nas imagens da Figura 91

A Tabela 31 à Tabela 48 apresenta os resultados da reconstrução tomográfica para as condições I e II, com as intensidades luminosas máximas para cada caso.

Nestas são apresentados os resultados da situação com e sem atuação acústica para as amplitudes de pressão mínima, média e máxima em 50, 150 e 250mm.

Tabela 31 - Reconstrução Tomográfica do Radical  $C_2$  em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

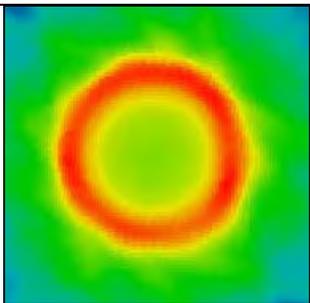
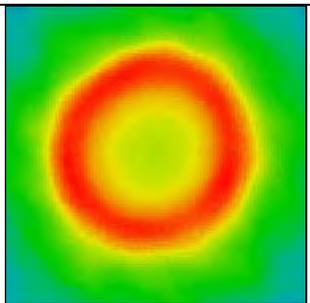
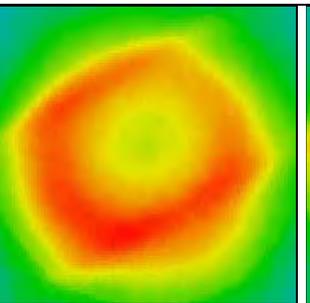
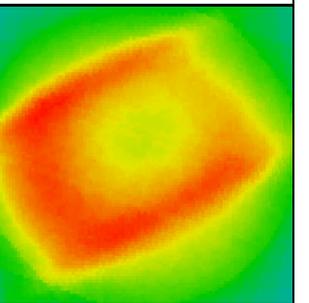
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>
Intensidade: 39,28	Intensidade: 36,61	Intensidade: 23,50	Intensidade: 16,00

Tabela 32 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

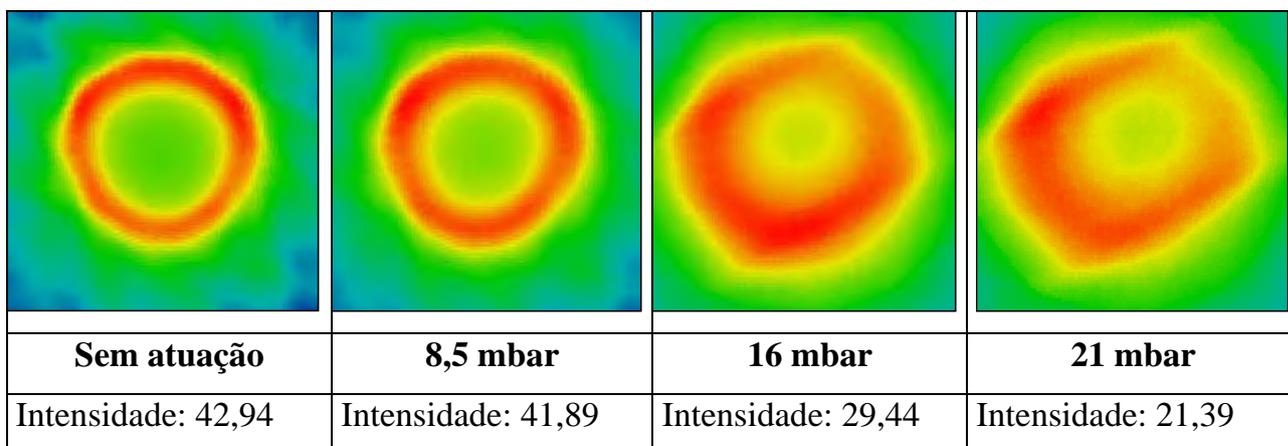


Tabela 33 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

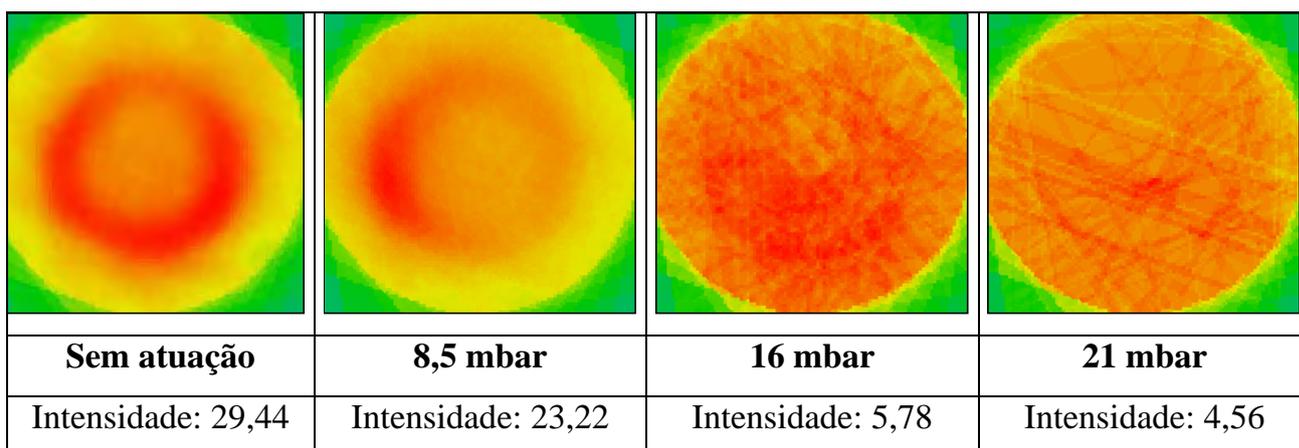


Tabela 34 – Reconstrução Tomográfica do Radical C<sub>2</sub> em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

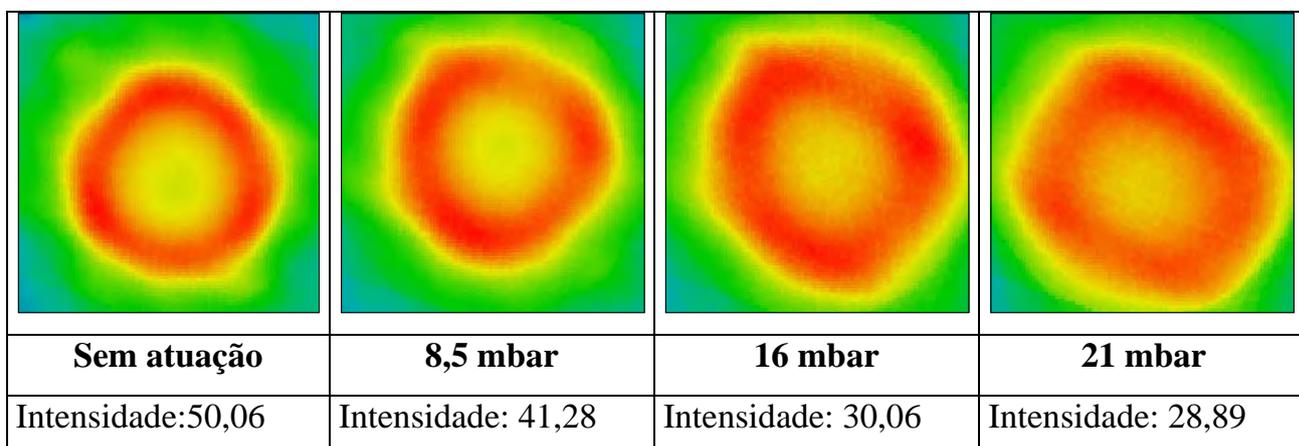


Tabela 35 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

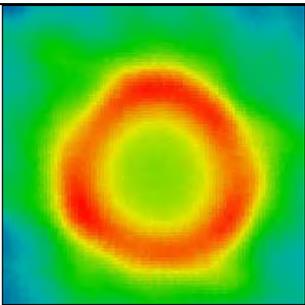
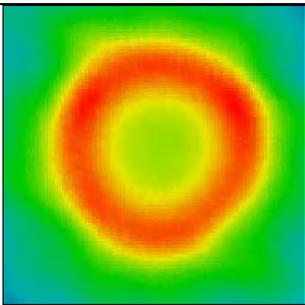
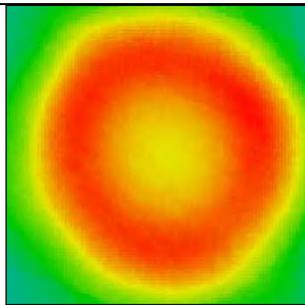
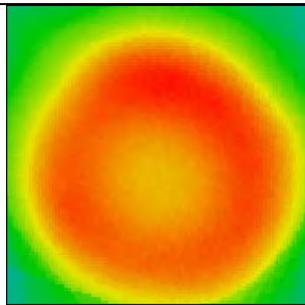
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>
Intensidade: 40,56	Intensidade: 37,44	Intensidade: 35,67	Intensidade: 37,78

Tabela 36 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

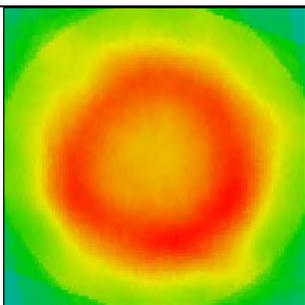
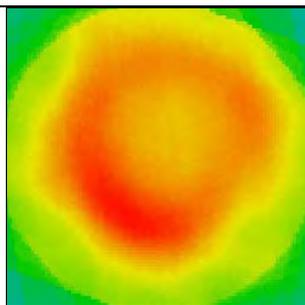
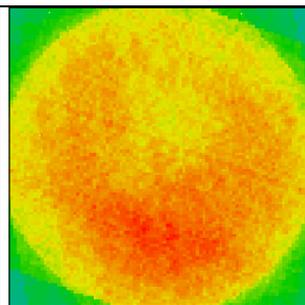
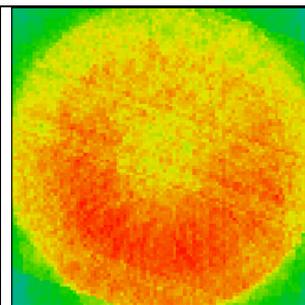
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>
Intensidade: 37,44	Intensidade: 33,39	Intensidade: 7,22	Intensidade: 5,78

Tabela 37 – Reconstrução Tomográfica do Radical C<sub>2</sub> em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

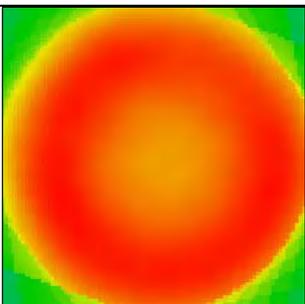
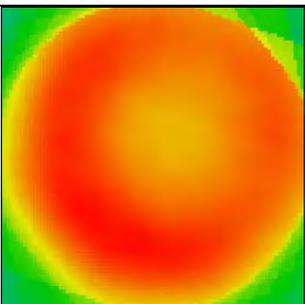
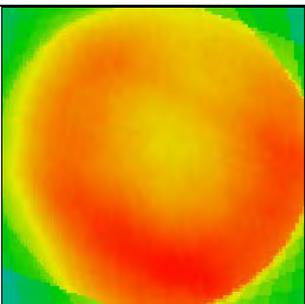
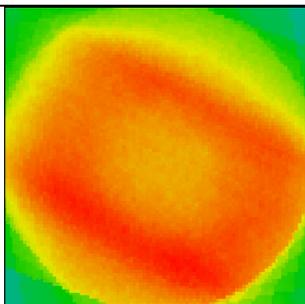
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5mbar</b>	<b>16mbar</b>	<b>21mbar</b>
Intensidade: 192,11	Intensidade: 166,83	Intensidade: 51,17	Intensidade: 22,67

Tabela 38 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz Condição I com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

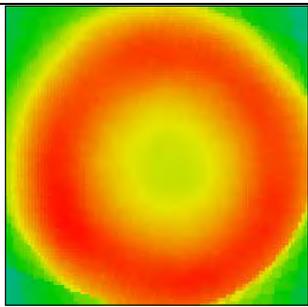
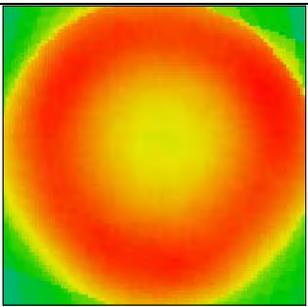
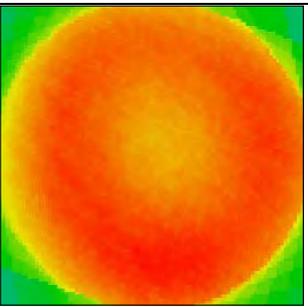
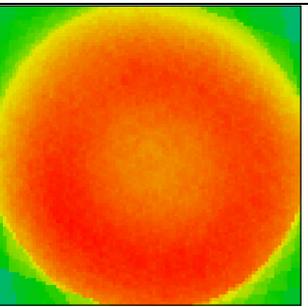
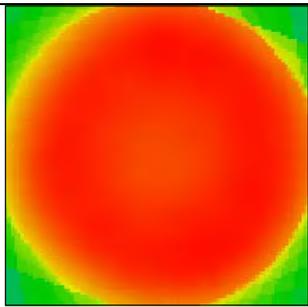
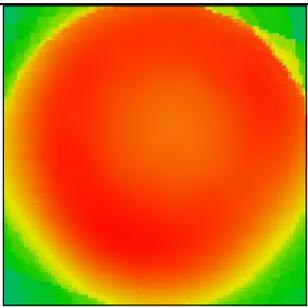
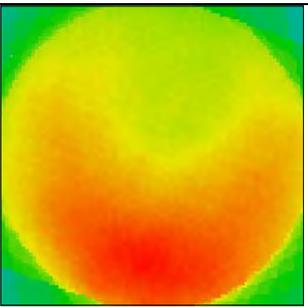
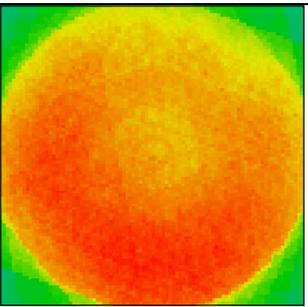
			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>
Intensidade: 71,67	Intensidade: 50,72	Intensidade: 25,06	Intensidade: 22,28

Tabela 39 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

			
<b>Sem atuação</b>	<b>8,5 mbar</b>	<b>16 mbar</b>	<b>21 mbar</b>
Intensidade: 231,06	Intensidade: 224,61	Intensidade: 29,00	Intensidade: 12,06

De uma forma geral, conforme Tabela 27 e Figura 89, verifica-se que à medida que é aumentada a amplitude de pressão ocorre um decréscimo nas intensidades luminosas para as espécies analisadas. Este comportamento porém não ocorre com o radical CH na altura axial de 150mm, que sofre pequeno acréscimo quando neste é imposto a amplitude máxima de atuação. Este comportamento provavelmente ocorre por haver nesta região de queima maior quantidade de oxidante (Figura 70 (a)), devido à proximidade do campo acústico neste local, favorecendo a formação de uma região de chama pobre, ou seja com excesso de oxidante, cenário característico para a

formação do radical CH. Apesar da região axial de 50mm estar mais próxima do campo acústico, sendo sua influência mais acentuada, nesta região tem-se temperatura baixa (Figura 71 (c)) e também menor taxa de reação química na chama, desfavorecendo a formação do radical CH.

Ocorre também maior distribuição dos radicais e da fuligem na região de chama com o gradual aumento da amplitude de pressão, estando estes, sem o processo de atuação acústica concentrados em uma pequena região anular, principalmente para 50 e 150mm.

A fuligem numa chama comporta-se como um corpo negro e emite radiação em todos os comprimentos de onda, como também já mencionado, sendo necessário realizar o estudo de radicais por emissão quimiluminescente em chamas limpas, ou seja, sem a presença de fuligem. Sendo assim, visualmente verifica-se pelas Tabelas 26 e 30, que em 50mm para a situação sem atuação e para amplitudes de pressão mínima média e máxima para a Condição I e II, a presença da fuligem não é observada, o que ocorre também em 150 e 250mm, para as amplitudes de pressão média e máxima, obtendo-se assim para estas condições uma “chama limpa”, o que permite avaliar a presença e distribuição dos radicais  $C_2$  e CH, de forma a garantir que tais resultados não estão “mascarados” pela presença da fuligem.

Nota-se que a atuação acústica promove redução na formação de fuligem, também através da reconstrução tomográfica da chama, vista nas Tabelas 33, 36 e 39 para as alturas axiais de 50, 150 e 250mm e Condição I.

Tabela 40 – Reconstrução Tomográfica do Radical  $C_2$  em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

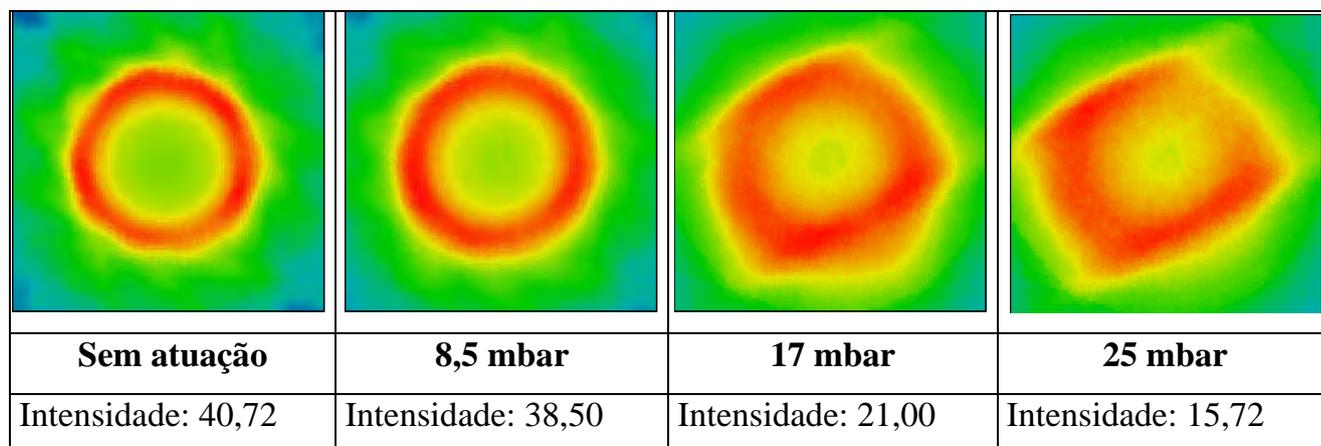


Tabela 41 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

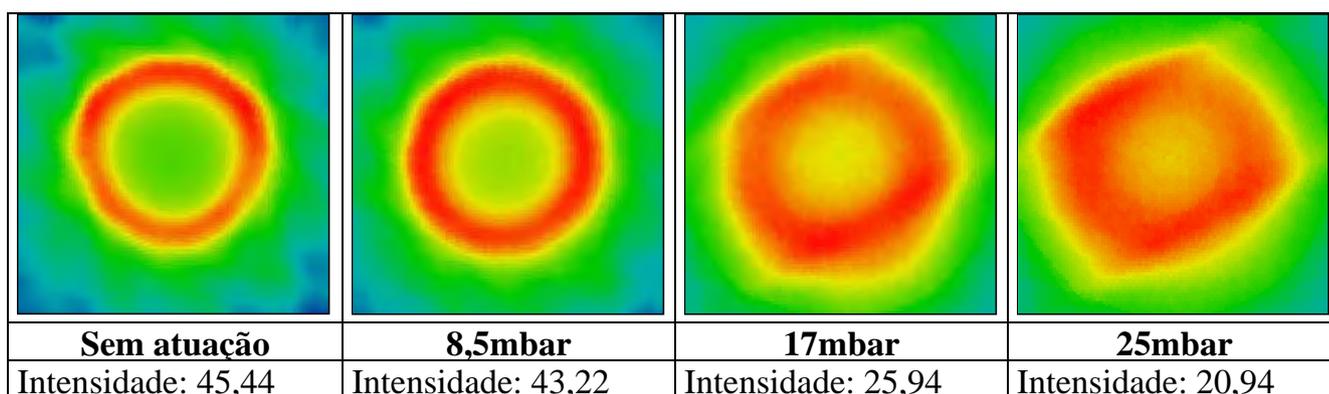


Tabela 42 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 50mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

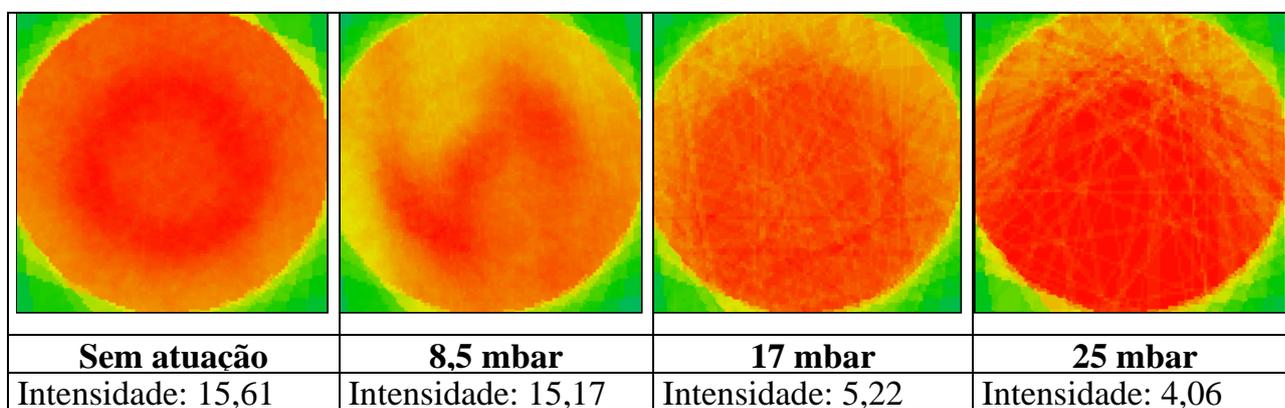


Tabela 43 – Reconstrução Tomográfica do Radical  $C_2$  em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

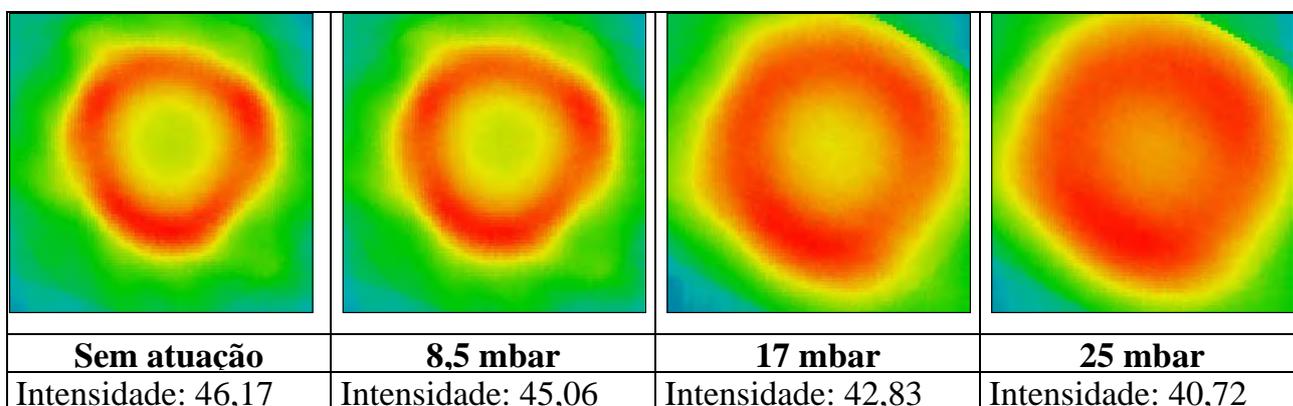


Tabela 44 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 HZ na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

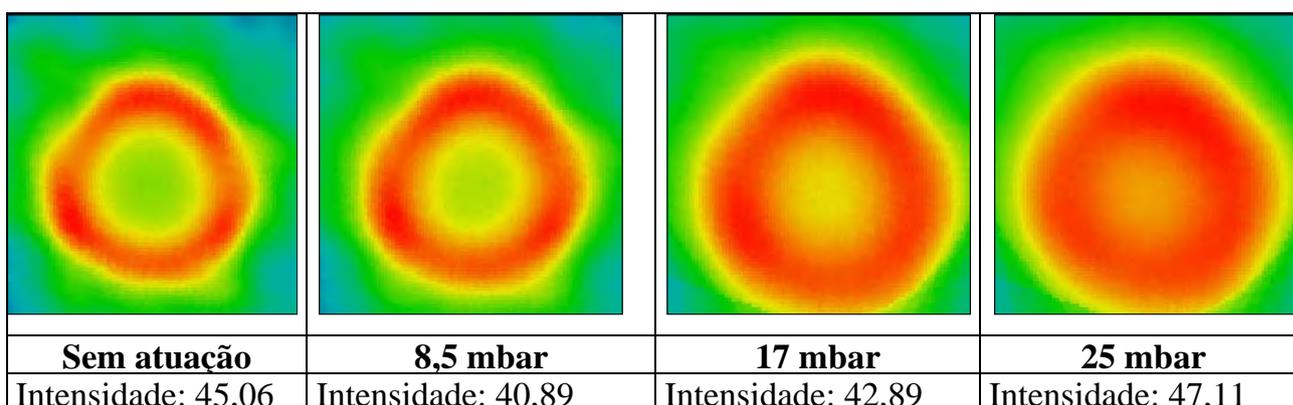


Tabela 45 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 150mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

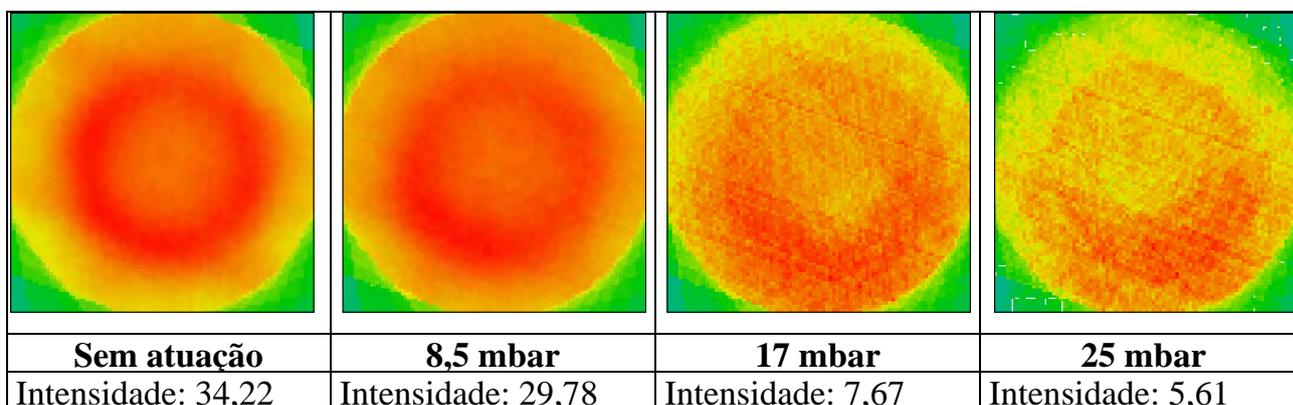


Tabela 46 – Reconstrução Tomográfica do Radical  $C_2$  em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

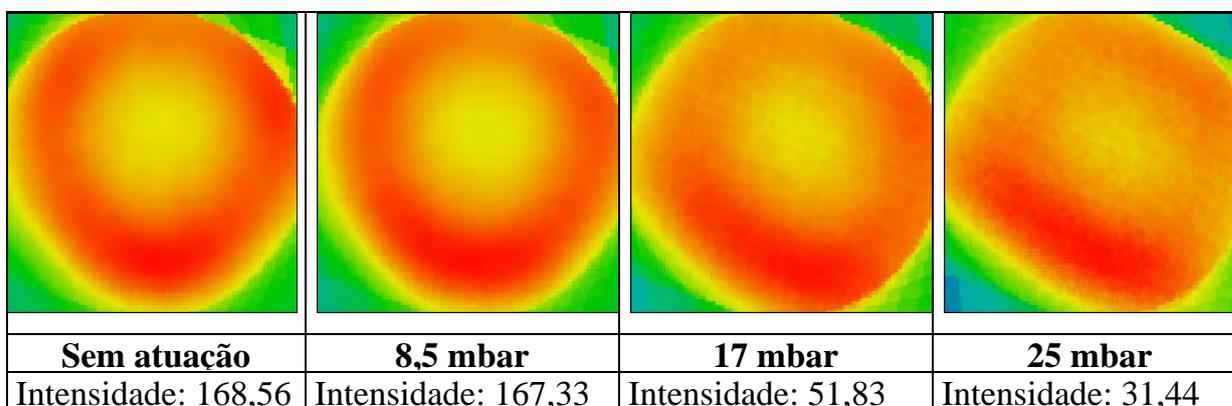


Tabela 47 – Reconstrução Tomográfica do Radical CH em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.

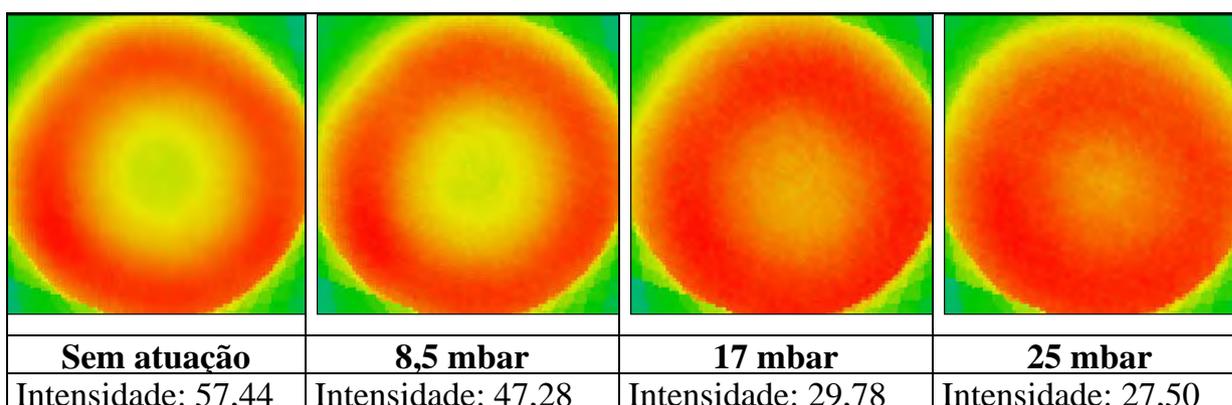
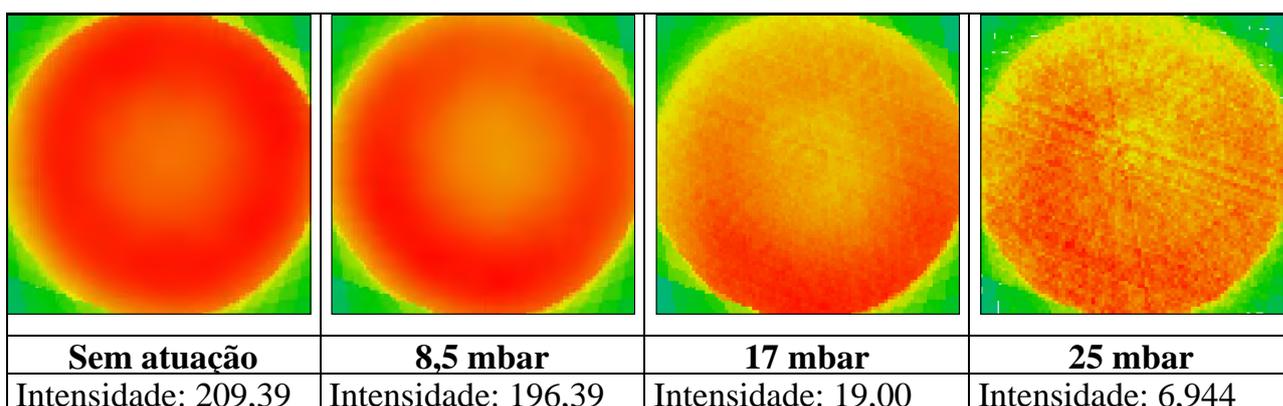


Tabela 48 – Reconstrução Tomográfica da Fuligem em 250mm sem atuação e com atuação na mínima, média, e máxima amplitude de pressão em 181 Hz na Condição II com suas respectivas intensidades luminosas máximas.



Para a Condição II verificam-se as mesmas observações realizadas para a Condição I, ou seja, ocorre maior distribuição dos radicais  $C_2$  e CH na região de chama para 50, 150 e 250mm (Tabela 40, 41, 43, 44, 46 e 47) com o aumento da amplitude de pressão, o que ocorre também com a fuligem (Tabela 42, 45 e 48).

Verifica-se ainda com relação à fuligem que em 250mm (Tabela 48) esta possui maior intensidade, se comparado a 150mm (Tabela 45), enquanto que a altura de 50mm tem menor intensidade que em 150 e 250mm (Tabela 42), pois ao se tomar como ponto de referência zero, a base do queimador, à medida que se aumenta axialmente a posição na chama, ocorre diminuição da temperatura, o que favorece a formação de fuligem, além de, nestas posições a atuação do campo acústico ser menor do que na base do queimador.

Qualitativamente pode-se observar para o radical  $C_2$  que em 50mm (Tabela 31 e 40), em 150mm (Tabela 34 e 43) e em 250mm (Tabela 37 e 46), a reconstrução tomográfica para as condições I e II tem comportamento semelhante, o que também pode ser estendido ao radical CH em 50mm (Tabela 32 e 41), em 150mm (Tabela 35 e 44) e em 250mm (Tabela 37 e 47) e para a fuligem em 150mm (Tabela 36 e 45) e em 250mm (Tabela 39 e 48), indicando que a vazão dos gases de alimentação da chama não altera significativamente a reconstrução tomográfica da chama para estas espécies estudadas.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental sobre a influência do campo acústico na combustão de um queimador de gás natural do tipo jato circular de combustível.

De uma forma geral, os resultados apontaram mudanças significativas na chama, destacando-se regiões com características de pré-mistura, coloração azulada, menor comprimento e decréscimo local na formação de  $\text{NO}_x$ , o qual é um poluente fortemente combatido. Houve também alterações nas concentrações de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ ; além de mudanças na temperatura e na distribuição dos radicais  $\text{C}_2$  e  $\text{CH}$  e na fuligem, espécies analisadas através da tomografia de chama.

Com relação às frequências dos harmônicos do queimador, considerando-se tubo aberto - aberto, foram obtidos resultados experimentais bastante próximos dos teóricos. Desta forma, pode-se concluir que o comportamento acústico do queimador é semelhante ao de um tubo aberto em ambas extremidades e que a vazão de ar que passa pelo interior do queimador não altera suas frequências naturais.

Visivelmente é notado que a presença do campo acústico afeta consideravelmente a estrutura da chama, à medida que a amplitude de oscilação aumenta, a coloração da chama passa a ser azulada, indicando que existe a transformação de uma chama com características predominantemente difusiva para pré-misturada.

Atingiu-se ainda consideráveis amplitudes de oscilação nas frequências naturais do queimador, sendo necessária a utilização de uma chama piloto neste trabalho; esta se torna indispensável nos testes para manter a chama principal estabilizada na borda do queimador, para ambas as condições de trabalho, em todas as frequências utilizadas, sem a qual seria difícil a realização dos testes propostos, visto a impossibilidade de obter amplitudes de pressão altas o suficiente para o estudo da combustão pulsante na chama. Por exemplo, com a chama piloto em 282 Hz, foi possível obter para a Condição I, 36,5 mbar e 44 mbar para a Condição II, enquanto

que, sem a chama piloto obteve-se somente 11,2 mbar para a Condição I e 5,3 mbar para a Condição II.

O campo acústico promove diminuição no comprimento da chama para as condições I e II, à medida que há o aumento gradativo da amplitude de pressão, denotando sua eficiência na melhora da mistura entre oxidante e combustível.

A presença do campo acústico induz a presença de oxigênio no interior da chama, tirando-lhe as características de totalmente difusiva. Para a situação sem atuação acústica tem-se perfil típico de chama difusiva, existe uma pequena quantidade de  $O_2$  na região próxima ao queimador, em 50mm, fenômeno decorrente do “*air entrainment*”, o que não ocorre em alturas axiais mais distantes da base da chama, em 150 e 250mm. Com a utilização do campo acústico, a alta concentração de  $O_2$  principalmente em 50mm, reforça a idéia de que este incrementa o “*air entrainment*”. Com o uso das oscilações, ocorre também diluição dos produtos da combustão pelo  $O_2$ , sendo parte deste consumido nas reações químicas locais. Houve a correção dos valores das concentrações dos produtos da combustão para 3%  $O_2$ , visto que a diluição “mascarava” os resultados.

Com relação à análise dos gases na chama, em 150mm e 250mm houve aumento na concentração de CO com a atuação, pois sendo o CO, produto de oxidação parcial, este tende a converter-se em  $CO_2$ , à medida que o escoamento reativo se desenvolve na direção axial. Até 250mm não foi possível constatar essa evolução, nem mesmo para a situação sem oscilação. Contudo, medidas feitas ao longo do eixo centro do queimador para medição do comprimento da chama, mostraram essa tendência.

Verifica-se que nas posições axiais de 150 e 250mm, tem-se maior concentração de  $CO_2$  para o processo com atuação acústica, indicando que localmente há maior conversão de produtos de oxidação parcial, como o CO em  $CO_2$ .

A atuação diminui consideravelmente e localmente a concentração de  $NO_x$  nas três posições axiais e o torna bem distribuído ao longo do eixo radial.

Verifica-se que o comportamento qualitativo das concentrações de  $O_2$ ,  $CO_2$ , CO  $NO_x$ , com relação ao efeito acústico na chama e para o caso sem atuação acústica,

para nas Condições I e II é o mesmo, o que sugere que independente da razão de equivalência global utilizada, pode-se esperar resultados qualitativos equivalentes para as análises realizadas.

Referindo-se à temperatura, em 50mm, há um decréscimo desta na chama com o uso da excitação acústica, provavelmente devido à grande quantidade de ar presente decorrente do campo acústico, diminuindo localmente a temperatura da chama. Tal hipótese é reforçada pela existência de menor concentração de  $\text{NO}_x$  na região central do queimador, em 50mm, (Condição I), com o uso da atuação acústica, pois a formação de  $\text{NO}_x$  térmico está diretamente ligada à temperatura.

Nas posições axiais de 150 e 250mm, há aumento na temperatura com a utilização do campo acústico, verifica-se que este promove uma melhor mistura entre os reagentes, fazendo com que as reações de combustão locais sejam mais eficientes. Ocorre ainda a diminuição no comprimento da chama, concentrando a liberação de energia em um volume menor, aumentando assim a temperatura.

Com relação à razão de equivalência global utilizada, ou seja, às diferenças existentes entre as vazões de entrada dos gases de alimentação (Condição I e II de trabalho), não é notada alteração considerável no incremento da temperatura, com o uso da atuação acústica.

De uma forma geral, para a reconstrução tomográfica de chama em ambas as condições de trabalho. Verifica-se que ocorre diminuição na intensidade luminosa do  $\text{C}_2$  com a aplicação do campo acústico, principalmente em 250mm, sendo esta redução pouco acentuada em 50mm. Este radical é característico em chamas ricas em combustível, o que denota aqui a melhor mistura entre combustível e oxidante para as três posições axiais estudadas. Para o radical CH, a utilização da atuação acústica promove maior distribuição das intensidades luminosas, principalmente em 150 e 250 mm, ao longo do eixo radial, para todas as frequências utilizadas neste trabalho. Este comportamento ocorre provavelmente devido às reações de combustão estarem mais espalhadas (quando é imposto o campo acústico), indicando que o campo acústico transforma uma chama difusiva em uma chama com características de pré-misturada.

Para os radicais CH e C<sub>2</sub> o processo de atuação acústica promove um decréscimo na intensidade luminosa à medida que é aumentada a amplitude de pressão, denotando que qualitativamente ocorre redução nestas emissões, provavelmente, devido ao fato de que com o campo acústico, a região de liberação de energia, anteriormente localizada apenas na fronteira da chama, se espalha e com isso a concentração dos radicais se torna mais bem distribuída, o que pode ser verificado através da distribuição radial e axial dos gases e da temperatura na chama.

Ocorre considerável redução da fuligem para todas as frequências dos harmônicos do queimador em 250mm, denotando queima mais completa em todas as condições de atuação. Uma das causas predominantes para a formação da fuligem é a situação onde se tem condição rica de queima, ou seja, chamas com alta concentração de combustível com relação ao oxidante. Neste trabalho a combustão pulsante induz à inserção de O<sub>2</sub> na região de chama, promovendo ambiente com excesso de oxidante, o que reduz a formação de fuligem. Observa-se para 150 e 250 mm, o mesmo nível de concentração de fuligem obtido em 50mm.

A presença da fuligem acumulada diminui a troca térmica, provocando o aumento no consumo de combustível, além de promover efeitos nocivos ao meio ambiente, sendo este fator por si só um forte argumento para a utilização da combustão pulsante em sistemas que utilizam o processo de combustão para geração de energia.

Em 250mm, a fuligem possui maior intensidade se comparado a 150mm e 50mm, conforme esperado, pois se tomando como ponto de referência zero a base do queimador, à medida que se aumenta axialmente a posição na chama, ocorre diminuição da temperatura, o que favorece a formação de fuligem, além de, nestas posições a atuação do campo acústico ser menor do que na base do queimador e à medida que se distancia do queimador vai-se somando a concentração da fuligem.

Qualitativamente, observar-se que em 50, 150 e 250mm, os radicais C<sub>2</sub> e CH e a fuligem para as condições I e II têm comportamento semelhante, indicando que a vazão dos gases de alimentação da chama não altera significativamente a reconstrução tomográfica da chama para estas espécies estudadas.

De uma forma geral, observou-se que a atuação acústica, ou seja, a combustão pulsante é um forte aliado para o controle das condições de combustão em que se precise alterar as vazões de ar ou combustível e obter redução das emissões de poluentes e de custos.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Realizar medidas para obtenção do campo de velocidades a frio e à quente, utilizando por exemplo, *PIV* e espalhamento *Rayleigh* e *PLIF* para medir as concentrações de outros compostos da chama, nas mesmas condições dos ensaios realizados neste trabalho para melhor entendimento do processo de “*air entrainment*”.
- Estudo destas chamas em condições confinadas a fim de se entender melhor a formação de  $\text{NO}_x$ .

## REFERÊNCIAS

ALLEN, J. D. Probe sampling of oxides of nitrogen from flames. In: **Combustion and Flame**, 24., 1975. p. 133-136.

ANDRAUS, C. A. M. **Investigação da formação do poluente NO<sub>x</sub> em chamas turbulentas sem pré-mistura**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

BASTOS, V. H. **Investigação de chamas pulsantes difusivas livres**. 2001. Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. No prelo.

van den BERCKEN, R. E. J. **IR Emission/Absorption tomography in flames**. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 1998.

BILGER, R. W. Probe Measurements in Turbulent Combustion. **Proceedings of the SQUID Workshop**, Purdue University, West Lafayette, Ind., New York, Academic Press, Inc.; Washington, D.C., Hemisphere Publishing Corp, p. 333-348, 1976.

BLAUWERS, J.; SMETS, B.; PEETERS, J. Mechanism of “prompt” NO formation in hydrocarbon flames. In: **Symposium International on Combustion**, 16., Cambridge, MA, 1976. Proceedings. Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1976. p. 1055-1071.

BOTURA, C.A. **Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa aplicada ao controle ativo de um combustor tipo tubo de Rijke**. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) – UNESP, Guaratinguetá, 1998. 94p.

BOWMAN, C. T. Probe Measurements in Flames. In: **Progress in Aeronautics and Astronautics**, 53, 1977. p. 3-24.

BRADLEY, D. and MATTHEWS, K.J. Measurement of high gas temperatures with fine wire thermocouples. **Journal Mechanical Engineering Science**, 10:299-305, 1968.

CARVAHO JÚNIOR, J. A. et al. Combustion characteristics of unpulverized coal under pulsating and non pulsating conditions. **Fuel**, London, v. 66, n. 1, 1987. p. 4-8.

CARVALHO JÚNIOR, J. A. et al. Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube. **Combustion and Flame**, New York, NY, v. 76, n. 1, 1989. p. 17-27.

CARVALHO, J. A.J.e LACAVA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. ed.UNESP, São Paulo, 2003.

CHAO, Y.-C.; JENG, M-S. Behavior of the lifted jet flame under acoustic excitation. In: **International Symposium on Combustion**, 24., 1992, Sydney, Australia. Proceedings. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1992. p. 333-340.

CHU, B.T. Stability of systems containing a heat source, the Rayleigh criterion. **National Advisory Committee for Aeronautics research memorandum**, RM56D27, 1956.

CLEMENS, N. T.; PAUL, P.H. Effects of heat release on the near-field flow structure of hydrogen jet diffusion flames. **Combustion and Flame**, New York, NY, v. 102, n. 3, p. 271-284, aug. 1995.

COLLINS, L. W.; DOWNS, W.R. Influence of probe on recombination of atomic hydrogen . In: **Combustion and Flame**, 25., 1975. p. 277-278.

FENIMORE, C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In: **Symposium International on Combustion**, 13., Salt Lake City, UT, 1970. Proceedings. Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, p. 373-380, 1971.

FERREIRA, D.S. **Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes**. 2001. 165 p. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) - UNESP, Guaratinguetá, 2001.

FERREIRA, D.S.; Lacava, P.T.; Carvalho Jr., J.A.; Ferreira, M.A. Efeito das condições de oscilação em chamas confinadas pulsantes. [CD Rom]. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM**, 2001, 16., Uberlândia, MG, nov. 2001. Anais. Rio de Janeiro: ABCM, 2001. p. 272-281.

FLÜGEL, A. D. **Investigação experimental da influência do campo acústico na queima de sprays**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia) – ITA, São José dos Campos, 2006.

GLASSMAN, I. **Combustion**. Orlando, FL: Second edition, Academic Press Inc., 1987.

HAYHURST, A.N.; VINCE, I.M. Nitric oxide formation from N<sub>2</sub> in flames: the importance of prompt NO. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 6, n. 1, p. 35-51, 1980.

HEITOR, M.V. e MOREIRA, L.N. Thermocouples and sample probes for combustion studies. **Progress in Energy and Combustion Science**, 19:259-278, 1993.

LACAVA, P. T. et al. Efeito da frequência e da amplitude de oscilação no formato de chamas pré-misturadas pulsadas. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 15., Águas de Lindóia, 1999. Anais. Rio de Janeiro: ABCM, 1999.

LEFEBVRE, A.H. **Gas turbine combustion**, New York, NY: Taylor & Francis, 1983.

LYONS, V.J. Fuel/air nonuniformity: effect on nitric oxide emissions. **AIAA Journal**, v. 20, n. 5, p. 660-665, 1982.

van MAAREN, A. **One-step chemical reaction parameters for premixed laminar flames**. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 1994.

MASRI, A. R.; DIBBLE, R. W.; BARLOW, R. S. The structure of turbulent nonpremixed flames revealed by Raman-Rayleigh-Lif measurements. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, NY, v. 22, p. 307-362, 1996.

NOOREN, P. A. et al. Raman-Rayleigh-LIF measurements of temperature and species concentrations in the delft piloted turbulent jet diffusion flame. **Applied Physics**, Berlin, v. 71B, p. 95-111, 2000.

PEETERS, T. W. J. et al. Comparative experimental and numerical investigation of a piloted turbulent natural-gas diffusion flame. In: **International Symposium on Combustion**, 25., 1994, Irvine. Proceedings... Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1994. p. 1241-1248.

PETERSON, K. A; OH, D. B. Quantitative, high sensitivity diagnostic of combustion radicals using wavelength-modulated UV sources. In: **Aerospace Sciences Meeting & Exhibit**, 38., 2000, Reno, Nevada. Proceedings : Reston, Virginia: AIAA, 2000. (AIAA 2000-0777).

POPE, S. B. Computations of turbulent combustion: progress and challenges. In: **International Symposium on Combustion**, 23., 1990, Orleans, France. Proceedings. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1990. p. 591-612.

PUTNAM, A.A. & DENNIS, W.R. 1953. A study of burner oscillations of the organ-pipe type. **Transaction of the ASME**, 75: 15–28.

RADON, J. **Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten**. Vienna: Berichte der Sänchsischen Akademie der Wissenschaft, 1917. 262 p.

RAYLEIGH, J. W. S. **The theory of sound**. New York: Dover, 1945. v. 2.

SCHOLZE, M.; KNORR, W.; ARNELL, N. W. and PRENTICE I. C. A climate-change risk analysis for world ecosystems. **Proceedings of the National Academy of Sciences (Pnas)** 103: 13116-13120; published online before print as 10.1073/pnas.0601816103, 2007.

SILVA, R. R. **Processamento de Imagens Radiográficas e Análise de Defeitos em Cordão-de-Solda**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro 1999.

SMITH, N. S. A.; BILGER, R. W.; CHEN, J.-Y. Modelling of nonpremixed hydrogen jet flames using a conditional moment closure method. In: **International Symposium on Combustion**, 24, 1992, Sydney, Australia. Proceedings Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1992. p. 263-269.

STARNER, S. H.; BILGER, R.W. Characteristics of a piloted diffusion flame designed for study of combustion turbulence interactions. **Combustion and Flame**, New York, NY, v. 61, p. 19-38, 1985.

TURNS, S. R. Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: fuel dilution and partial premixing effects. **Combustion and Flame**, New York, NY, v. 93, p. 225-269, 1993.

TYNDALL, J. **Sound**. Greenwood Publish Group, 1970.

VERÍSSIMO, A. S. ; TOLEDO, A. O. Um método tomográfico bidimensional simples para estudar uma chama cilíndricamente simétrica. In: **Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, 25. Caxambu, MG. Anais. São Paulo: SBF, 2002. 1 CD-ROM.

VERÍSSIMO, A. S.; TOLEDO, A. O. Aplicação do método da soma para reconstrução de propriedades físicas e químicas com a técnica algébrica de reconstrução para tomografia computadorizada. In: **Encontro da Escola Brasileira de Ciências Emergentes**, 2, 2002. São José dos Campos. Anais . São José dos Campos: SBF, 2002. 1 CD-ROM.

VERÍSSIMO, A. S.; TOLEDO, A. O.; SANTOS, A. M. Tomografia computadorizada usando a técnica algébrica de reconstrução com iteração. In: **Congresso Brasileiro de Matemática Aplicada e Computacional**, 26., 2003, São José do Rio Preto, SP. Anais. São Paulo: SBMAC, 2003.

VERÍSSIMO, A. S.; QUIRINO, S. F.; KRULL, R. P.; TOLEDO, A. O.; TOLEDO, A. O. Back projection tomography by the simultaneous equations technique. In: **Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, 27, 2004. Poços de Caldas, MG. Anais . São Paulo: SBF, 2004. 1 CD-ROM.

VERÍSSIMO, A. S. **Aplicação de Métodos Tomográficos na Reconstrução Bidimensional de Propriedades de Chamas**. São José dos Campos 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - INPE, 2006.

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

WHOL, K.; GAZLEY, K.; KNAPP, N. Diffusion flames. In: **International Symposium on Combustion**, 3., 1948, Baltimore, MD. Proceedings. Baltimore, MD: The Williams & Wilkins, 1949. p. 288-300.

WILLIAMS, A. Fundamentals of oil combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 2, n. 3, 1976. p 167-179.

ZINN, B.T. **Pulsating combustion** . In: Weinberg, F.J., ed. Advanced combustion methods. London: Academic Press, 1986. p. 113-181.

ZINN, B.T. Pulse combustion applications: past, present and future. In: **Unsteady Applied Sciences** -Vol. 306, Klumer Academic Publishers, 1996. pp.113 – 137.

<[http://www.anp.gov.br/conheca/anuario\\_2006.asp](http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp)>. Acesso em: 03 abr.2007.

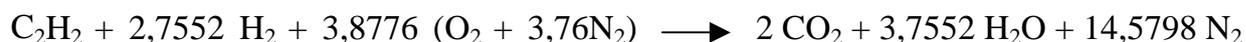
## ANEXO I

### I.1) CÁLCULO DAS VAZÕES DOS GASES DA CHAMA PILOTO

Mantendo a mesma relação Carbono / Hidrogênio  $\left(\frac{C}{H}\right)$  da chama principal, para a chama piloto tem-se:

$$\frac{C}{H} = \frac{2}{x} = 0,2663 \quad \longrightarrow \quad x = 7,5103$$

Na reação estequiométrica para a chama piloto tem-se então:



Assim, tem-se:

#### A) Cálculo da vazão mássica de acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) piloto.

A potência da chama piloto (P<sub>CP</sub>) é 1% da potência da chama principal. A potência da chama piloto pode ser definida como:

$$P_{CP} = \dot{m}_{CP} \times PCI_{CP} \tag{I.1}$$

Onde:

- PCI<sub>CP</sub>, representa o poder calorífico inferior da chama piloto (kJ/kg<sub>comb</sub>), definido por:

$$PCI_{CP} = - \frac{\bar{h}_{RP}^o}{M_{comb}} \quad (I.2)$$

- $\bar{h}_{RP}^o$ , representa a entalpia padrão de combustão, ou seja, a diferença entre o somatório do número de moles dos produtos multiplicado pelas suas respectivas entalpias padrão, menos o número de moles dos reagentes multiplicado pelas suas respectivas entalpias padrão, (kJ/gmol);
- $M_{comb}$ , representa a massa molecular do combustível (kg/kgmol).

➤ **Para a Condição I, tem-se:**

$$\text{Potência chama piloto (P}_{CP}) = 1\% \times 10,3\text{kW} = 103 \text{ W}$$

$$\bar{h}_{RP}^o = 2 (-393522) + 3,7552 (-241826) - 1 (226731) = -1921880 \text{ kJ/kgmol}$$

$$PCI_{CP} = 1921880 \text{ kJ/kgmol} / 31,5104 \text{ kg/kgmol} = 60991,9 \text{ kJ/kg}_{comb}$$

$$\dot{m}_{C_2H_2 + H_2} = 103 \text{ W} / 60991,9 \text{ kJ/kg}_{comb} = 0,0017 \text{ g/s}_{C_2H_2 + H_2} = \mathbf{6,12 \text{ g/h}_{comb}}$$

Na estequiometria:

Para 1 mol  $C_2H_2$ , tem-se 2,7552 mol  $H_2$

$$6,12 \text{ g/h,} \quad - \quad 3,7552 \text{ mol}_{total}$$

$$\dot{m}_{H_2} \text{ g/h} \quad - \quad 2,7552 \text{ mol } H_2$$

$$\dot{m}_{H_2} = \mathbf{4,49 \text{ g/h}}$$

$$6,12 \text{ g/h} \quad - \quad 3,7552 \text{ mol}_{total}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2} \text{ g/h} - 1 \text{ mol C}_2\text{H}_2$$

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,63 \text{ g/h}$$

### B) Cálculo da vazão mássica de ar da chama piloto

Adotando  $\phi_G = 1,4$  na chama piloto tem-se:

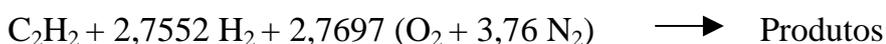
$$\phi_G = \frac{n^\circ \text{ oxigênio na reação estequiométrica}}{n^\circ \text{ oxigênio na reação real}} \quad (\text{I.3})$$

Assim:

$$1,4 = 7,7552 / n^\circ \text{ oxigênio combustão rica}$$

$$n^\circ \text{ Oxigênio combustão rica} = 5,5394$$

Então, para combustão rica, tem-se na chama piloto:



1 mol de combustível ( $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$ ) reage com 2,7697 mol de  $\text{O}_2$

$$31,5104 \text{ g}_{\text{combustível}} - 88,6304 \text{ g O}_2$$

$$1 \text{ g}_{\text{combustível}} - x \text{ g O}_2$$

$$x = 2,813 \text{ g O}_2$$

1 mol de combustível ( $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$ ) reage com 10,414 mol de  $\text{N}_2$

$$31,5104 \text{ g}_{\text{combustível}} - 291,594 \text{ g N}_2$$

$$1 \text{ g}_{\text{combustível}} - y \text{ g N}_2$$

$$y = 9,254 \text{ g N}_2$$

$$\text{Para 1 g}_{\text{combustível}} - 2,813 \text{ g O}_2$$

$$6,12 \text{ g combustível} \quad - \quad x \text{ g}$$

$$\mathbf{x = 17,22 \text{ g O}_2}$$

$$\text{Para 1 g combustível} \quad - \quad 9,254 \text{ g N}_2$$

$$6,12 \text{ g combustível} \quad - \quad y$$

$$\mathbf{y = 56,634 \text{ g N}_2}$$

$$\mathbf{\dot{m}_{\text{Ar Piloto}} = 73,85 \text{ g/h}}$$

➤ **Para a Condição II, utilizando o mesmo raciocínio:**

$$\mathbf{\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2} = 8,44 \text{ g/h}}$$

$$\mathbf{\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,63 \text{ g/h}}$$

$$\mathbf{\dot{m}_{\text{H}_2} = 6,19 \text{ g/h}}$$

$$\mathbf{\dot{m}_{\text{Ar Piloto}} = 101,84 \text{ g/h}}$$

## ANEXO II

### II.1. CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O AR PRIMÁRIO E O GÁS NATURAL NAS CONDIÇÕES DE ENTRADA

#### II.1.1 Cálculo do número de Reynolds para o ar primário

##### ➤ Condições de Entrada

Vazão de Ar Primário:

Condição I: 15,3 g/h = 0,00425 kg/s

Condição II: 18,2 kg/h = 0,00506 kg/s

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot De}{\mu} = \frac{4 \cdot m_t}{\pi \cdot \mu \cdot De} \quad (\text{II.1})$$

Sendo:

- $m_t$  = vazão mássica do fluido (kg/s)
- $\mu$  = viscosidade do fluido (kg/m.s)
- $De$  = Diâmetro equivalente (m)

##### ➤ Cálculo do $D_e$

Diâmetro externo tubo de ar = 45mm =  $45 \times 10^{-3}$  m

Diâmetro tubo GNV + parede = 15mm =  $15 \times 10^{-3}$  m

Área equivalente = Área externa - Área interna

$$\frac{\pi \cdot De^2}{4} = \frac{\pi \cdot (45 \times 10^{-3})^2}{4} - \frac{\pi \cdot (15 \times 10^{-3})^2}{4} \quad \mathbf{D_e = 42,4 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

➤ **Cálculo da viscosidade absoluta ( $\mu$ ) à temperatura “t”**

Utilizando-se a fórmula de Sutherland, a viscosidade de um gás é dada por:

$$\mu_{gás} = \mu_o \cdot \left( \frac{273+t}{273} \right) \cdot \frac{273+C_n}{273+C_n+t} \quad (\text{II.2})$$

Fazendo uso da fórmula de Herning-Zipperer, tem-se para a viscosidade da mistura:

$$\mu_{mistura} = \frac{n_1 \cdot \mu_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot Tc_1} + n_2 \cdot \mu_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot Tc_2} + \dots + n_n \cdot \mu_n \cdot \sqrt{M_n \cdot Tc_n}}{n_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot Tc_1} + n_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot Tc_2} + \dots + n_n \cdot \sqrt{M_n \cdot Tc_n}} \quad (\text{II.3})$$

Onde:

- $\mu_o$  = viscosidade absoluta a 0 °C (x 10<sup>-6</sup> p)
- $t$  = temperatura (°C)
- $C_n$  = número de Sutherland
- $n_n$  = número de moles do gás (% volumétrica)
- $\mu_n$  = viscosidade absoluta do gás à temperatura t
- $M_n$  = massa molecular do gás
- $Tc_n$  = temperatura crítica do gás (K)

Dados:

- Composição do ar: 79% N<sub>2</sub> e 21% O<sub>2</sub>
- Temperatura “t” = 25 °C
- $Tc_{nitrogênio} = 126,2$  K
- $Tc_{oxigênio} = 126,2$  K
- $\mu_o_{nitrogênio} = 166 \times 10^{-6}$  p
- $\mu_o_{oxigênio} = 192 \times 10^{-6}$  p

Assim:

$$\mu_{N_2} = 166 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{273+25}{273}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{273+105}{273+105+25} = 177,57 \times 10^{-6} \text{ p}$$

$$\mu_{O_2} = 192 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{273+25}{273}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{273+125}{273+125+25} = 206 \times 10^{-6} \text{ p}$$

$$\mu_{ar} = \frac{0,79 \cdot 177,57 \times 10^{-6} \sqrt{28 \cdot 126,2} + 0,21 \cdot 206 \times 10^{-6} \sqrt{32 \cdot 154,4}}{0,79 \sqrt{28 \cdot 126,2} + 0,21 \sqrt{32 \cdot 154,4}} = \mathbf{184,37 \times 10^{-6} \text{ p}}$$

$$\mu_{ar} = 184,37 \times 10^{-6} \text{ p} = 18,437 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2 = \mathbf{18,437 \text{ kg/ms}}$$

Desta forma:

➤ Para a Condição I ( $\phi=0,82$ )

$$\text{Re}_{ar \text{ primário}} = \frac{4 \cdot 0,00425 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\pi \cdot 18,437 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 42,4 \times 10^{-3} \text{ m}} = \mathbf{6922,2}$$

➤ Para a Condição II ( $\phi=0,95$ )

$$\text{Re}_{ar \text{ primário}} = \frac{4 \cdot 0,00506 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\pi \cdot 18,437 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 42,4 \times 10^{-3} \text{ m}} = \mathbf{8241,5}$$

## II.1.2 Cálculo do número de Reynolds para o gás natural

Dados:

- Composição do Gás Natural: 89,44% CH<sub>4</sub>; 6,7% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 2,26% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 0,34% CO<sub>2</sub>; 0,8% N<sub>2</sub>; 0,15% iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> e 0,31% C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>
- Temperatura “t” = 25°C
- $T_c_{CH_4} = 190,8 \text{ K}$
- $T_c_{C_2H_6} = 305,3 \text{ K}$
- $T_c_{C_3H_8} = 369,8 \text{ K}$

- $T_c_{CO_2} = 304,2 \text{ K}$
- $T_c_{N_2} = 126,2 \text{ K}$
- $T_c_{C_4H_{10}} = 408,1 \text{ K}$
- $T_c_{C_5H_{12}} = 469,9 \text{ K}$
- $\mu_o_{CH_4} = 100 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{C_2H_6} = 86,1 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{C_3H_8} = 75 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{CO_2} = 138 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_o_{N_2} = 166 \times 10^{-6} \text{ p}$

Assim:

- $\mu_{CH_4} = 107,87 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{C_2H_6} = 93,73 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{C_3H_8} = 81,9 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{CO_2} = 150,26 \times 10^{-6} \text{ p}$
- $\mu_{N_2} = 177,6 \times 10^{-6} \text{ p}$

Para o cálculo das  $\mu_{C_4H_{10}}$  e  $\mu_{C_5H_{12}}$ , utilizando-se a expressão de Chapman e Enskog, calcula-se a viscosidade de um gás pode ser calculada usando o potencial de Lennard-Jones:

$$\mu = 2,6693 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{M \cdot t}}{\sigma^2 \cdot \Omega_\mu} \quad (\text{II.4})$$

onde:

- $M$  = massa molar (kg/kg-mol)
- $t$  = temperatura (K)
- $\sigma$  = diâmetro efetivo de colisão entre duas moléculas (Å)
- $\Omega_\mu$  = integral de colisão para a viscosidade (adimensional)

Dados:

- $\sigma_{C_5H_{12}} = 5,769 \text{ \AA}$
- $\sigma_{i_{C_4H_{10}}} = 5,341 \text{ \AA}$
- $\Omega_{\mu_{C_5H_{12}}} = 1,629$
- $\Omega_{\mu_{i_{C_4H_{10}}}} = 1,587$

Assim:

$$\mu_{i_{C_4H_{10}}} = 75,52 \times 10^{-6} \text{ p}$$

$$\mu_{C_5H_{12}} = 68,11 \times 10^{-6} \text{ p}$$

Desta forma, tem-se para o gás natural:

$$\mu_{\text{gás natural}} = \frac{0,8944 \cdot 107,87 \sqrt{16.190,8} + 0,067 \cdot 93,73 \sqrt{30.305,3} + 0,0226 \cdot 81,9 \sqrt{44.369,8} +}{0,8944 \cdot \sqrt{16.190,8} + 0,067 \cdot \sqrt{30.305,3} + 0,0226 \cdot \sqrt{44.369,8} +} \\ \frac{+ 0,0034 \cdot 150,26 \sqrt{44.304,2} + 0,008 \cdot 177,6 \sqrt{28.126,2} +}{+ 0,0034 \sqrt{44.304,2} + 0,008 \sqrt{28.126,2} +} \\ \frac{+ 0,0015 \cdot 75,52 \sqrt{58.408,1} + 0,0031 \cdot 68,11 \sqrt{72.469,9}}{+ 0,0015 \sqrt{58.408,1} + 0,0031 \sqrt{72.469,9}}$$

$$\mu_{\text{gás natural}} = 10,545 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

Dados:

- $D_{e_{GNV}} = 6 \text{ mm} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $\dot{m}$  (Condição I) = 756 g/h = 0,2 g/s =  $0,2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
- $\dot{m}$  (Condição II) = 1044 g/h = 0,29 g/s =  $0,29 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

➤ *Para a Condição I ( $\phi=0,82$ )*

$$\mathbf{Re}_{\text{GNV}} = \frac{4 \cdot 0,2 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\pi \cdot 10,545 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 6 \times 10^{-3} \text{m}} = \mathbf{4025}$$

➤ *Para a Condição II ( $\phi=0,95$ )*

$$\mathbf{Re}_{\text{GNV}} = \frac{4 \cdot 0,29 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\pi \cdot 10,545 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 6 \times 10^{-3} \text{m}} = \mathbf{5836}$$

## ANEXO III

### III.1 MEDIDAS DE FREQUÊNCIA E PRESSÃO ACÚSTICA

Como mencionado na seção 2.2.1 foi utilizado um transdutor de pressão piezelétrico do tipo Kistler, modelo 7261, para converter as ondas de pressão acústica em sinais elétricos no escoamento de ar primário. Um amplificador de carga também do tipo Kistler, modelo 5006 foi utilizado para amplificar o sinal do transdutor piezelétrico, sendo este posteriormente enviado ao sistema de aquisição de dados.

Mediante a inexistência de equipamentos necessários para a calibração do conjunto transdutor/amplificador de carga, Flügel (2006) realizou um procedimento comparativo para ajuste do referido conjunto.

Este procedimento consistiu na escolha de um conjunto transdutor/amplificador, designado como padrão, de fabricação mais recente e ainda não utilizado (portanto esperou-se que as especificações do fabricante estivessem corretas); este conjunto padrão serviu como referência para a calibração dos demais.

Neste trabalho foi utilizado o conjunto transdutor de pressão e amplificador de pressão 4 (T4). Assim desenvolveu-se um equipamento, conforme Figura III.1, com o intuito de se realizar a calibração comparativa dos transdutores, sendo tal equipamento constituído de uma pequena câmara cilíndrica de aproximadamente  $70 \text{ cm}^3$  e preenchido com esferas de vidro com cerca de 8 mm de diâmetro, com cada uma das faces contendo um furo.

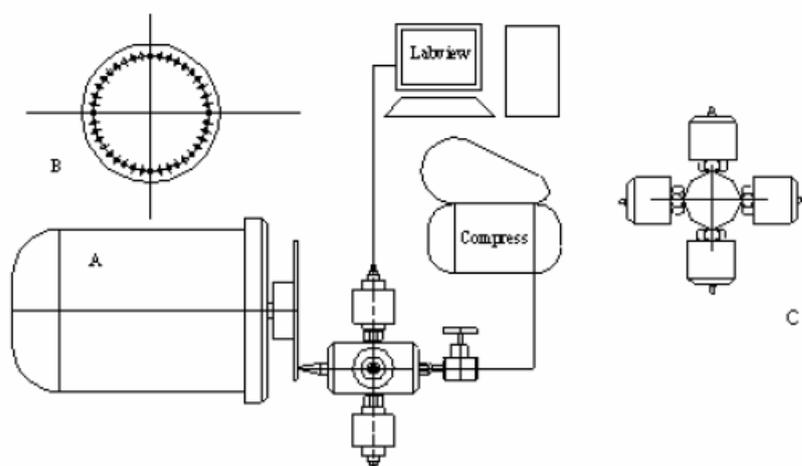


Figura III.1 - Dispositivo de calibração dos transdutores de pressão (FONTE: Flügel, 2006).

(O elemento “A” é um motor controlado por inversor de frequência, “B” é um detalhe do disco com 40 orifícios e “C” é a vista frontal da montagem dos transdutores da câmara barométrica).

Um compressor fornecia ar por um destes orifícios e descarregava por outro. Com estas esferas garantia-se a inexistência de correntes preferenciais no interior da câmara, desde que os sensores estivessem submetidos a uma mesma pressão, o que dependia da pressão de alimentação do ar e das condições de abertura do ponto de descarga. Após o ajuste da pressão do ar, uma válvula agulha controlava a vazão nas proximidades do ponto de alimentação. Com o giro do motor a descarga da câmara alternava entre a condição de aberta ou fechada, ou seja, de acordo com a coincidência ou não dos orifícios, o que propiciava uma oscilação de pressão aproximadamente senoidal na câmara. O controle da amplitude foi possível através da abertura da válvula agulha e do ajuste da pressão de alimentação do ar. Já a frequência estava relacionada à velocidade de giro do motor e ao número de orifícios do disco. A aquisição de dados foi realizada pelo programa “*Labview*”. Após todos os testes verificou-se que as medidas de frequência estavam em concordância com as obtidas a partir do conjunto de referência, como pode ser confirmado pela Figura III.2. Com relação às amplitudes, a Figura III.3 mostra que alguns dos equipamentos estavam completamente desajustados para todas as escalas (1, 2, 5, 10 mbar) sendo necessárias correções da ordem de 50% em algumas situações.

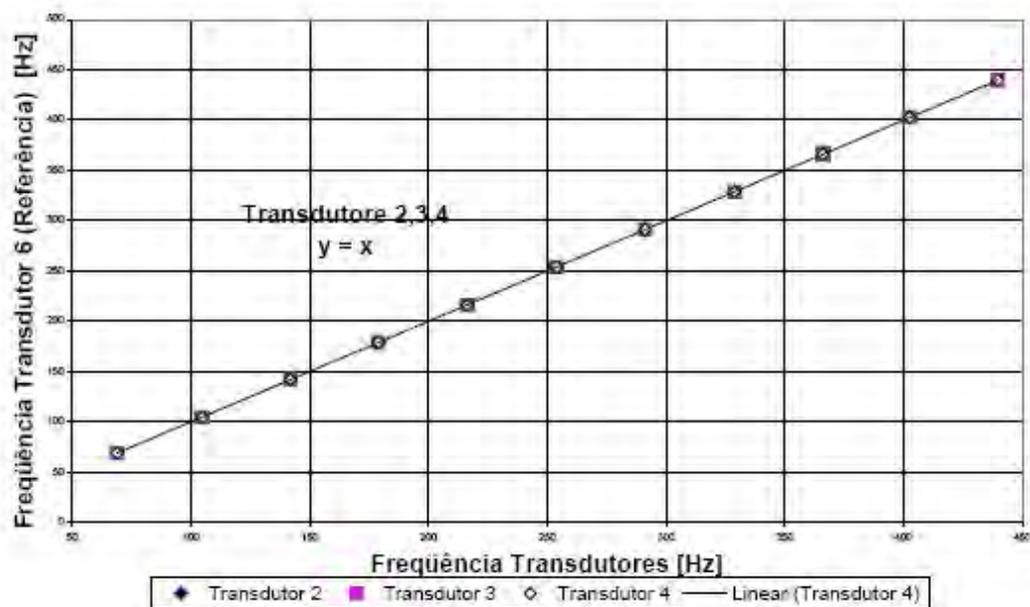


Figura III.2 - Resultados da calibração dos transdutores de pressão em termos de frequência (FONTE: Flügel, 2006).

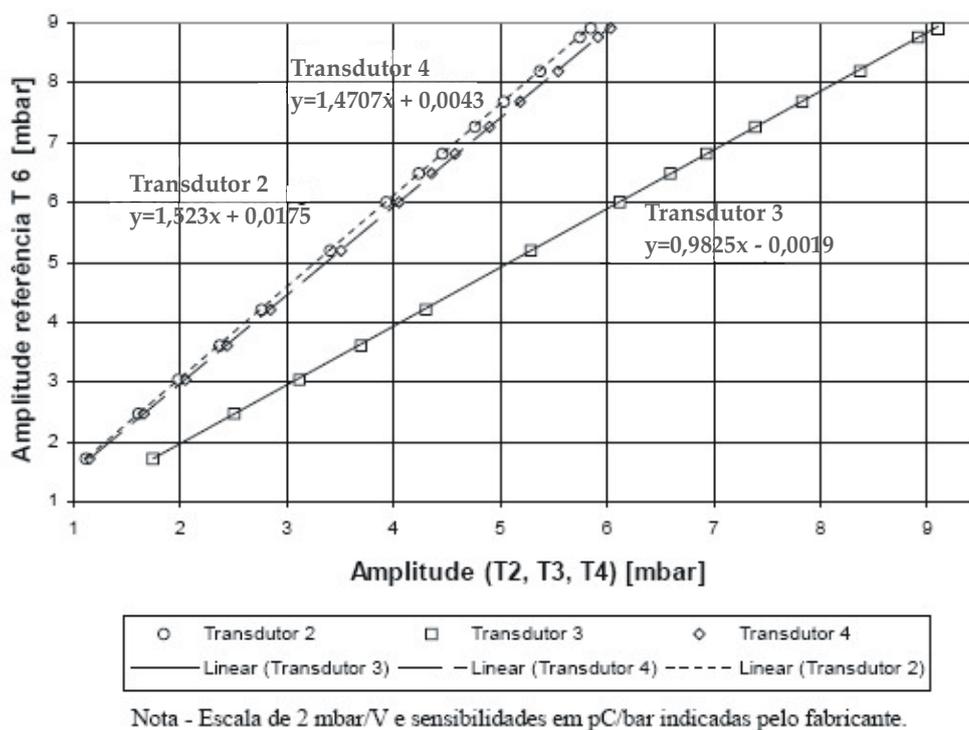


Figura III.3 - Resultados da calibração dos transdutores de pressão em termos de amplitude (FONTE: Flügel, 2006).

Flügel (2006) concluiu que os transdutores de pressão piezoelétricos estavam em boas condições de uso, o que não se pôde dizer a respeito dos amplificadores de carga, os quais necessitaram de ajuste nos seus resultados, tendo sido utilizada neste trabalho o transdutor 4 com sua respectiva equação de correção dos resultados obtidos.