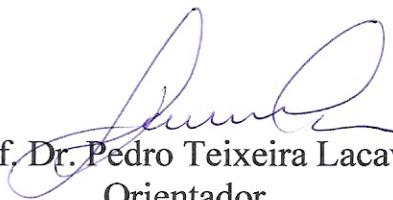


Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia.

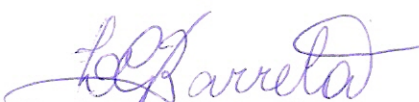
Fernando Lima de Oliveira

**PRESENÇA DE FULIGEM EM CHAMAS NÃO
PRÉ-MISTURADAS COM EXCITAÇÃO ACÚSTICA**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava
Orientador



Prof. Dr. Luís Gilberto Barreta
Co-orientador

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA

Oliveira, Fernando Lima

Presença de Fuligem em Chamas não Pré-misturadas com Excitação Acústica / Fernando Lima de Oliveira

São José dos Campos, 2007.

97f.

Tese de mestrado – Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Aerodinâmica, Propulsão e Energia – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. Orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava. Co-orientador: Prof. Dr. Luís Gilberto Barreta.

1. Combustão Pulsante. 2. Chamas Não pré-misturadas. 3. Sinal de Fuligem. 4. Pressão Acústica. 5. Queimador. I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Mecânica e Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Oliveira, Fernando Lima. **Presença de Fuligem em Chamas não Pré-misturadas com Excitação Acústica**. 2007. 97f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fernando Lima de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO: Presença de Fuligem em Chamas não Pré-misturadas com Excitação Acústica.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2007

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Fernando Lima de Oliveira
Rua Seriemas, 72, S. J. Campos - SP.
CEP: 12227-710

PRESENÇA DE FULIGEM EM CHAMAS NÃO PRÉ-MISTURADAS COM EXCITAÇÃO ACÚSTICA.

Fernando Lima de Oliveira

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ézio Castejon Garcia	Presidente - ITA
Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava	Orientador - ITA
Prof. Dr. Luís Gilberto Barreta	Co-orientador - IEAv
Prof. Dr. Amílcar Porto Pimenta	ITA
Prof. Dr. Cristiane Aparecida Martins Andraus	ITA
Prof. Dr. Celso Argachoy	MWM INTERNATIONAL - Motores

ITA

Dedico este trabalho aos meus pais Francisco Oliveira (in memoriam) e Filomena Oliveira, por terem sempre me ensinado a vencer os desafios que a vida nos reserva, aos meus irmãos pelo apoio e incentivo que sempre me deram, e especialmente à minha amada esposa Lia Raquel por sua compreensão, estímulo e confiança que muito contribuiu para a minha motivação nos momentos de desafios e dificuldades.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, o Todo Poderoso, e dono da vida, que me revestiu de graça, saúde, força, sabedoria e vontade para a realização deste curso e conclusão deste trabalho.

À minha família: esposa, meus pais e irmãos, e ao meu cunhado Emídio um agradecimento muito especial. Eles sempre foram um estímulo constante, e uma ajuda valiosa e concreta ao longo de todos estes anos.

Ao meu orientador Prof. Pedro Teixeira Lacava vão meus sinceros agradecimentos e admiração pela competência profissional, agradeço-o pelo seu constante apoio em diversos momentos deste curso, pela orientação, pela sua presteza e sua muita paciência em todas as circunstancias que estive me acompanhando.

Ao meu co-orientador Prof. Luís Gilberto Barreta por me receber muito bem no IEAV e pelo seu apoio e sua grande e constante disponibilidade que sempre me concedeu durante a realização e análises dos testes experimentais.

Agradeço à pesquisadora Esther Sbampato por toda colaboração, esclarecimentos e ajuda prestada durante os testes experimentais.

Aos pesquisadores Cláudio, Demerval e Leila por suas ajudas, cooperações e pelos materiais fornecidos como parte necessária para a escrita deste trabalho.

Aos meus grandes amigos Juciel e Dener pela suas sinceras amizades de longos tempos, por suas valiosas ajudas que me forneceram em muitas circunstâncias, pelo auxílio e discussões na superação de diversas dúvidas e problemas.

Aos Professores do ITA, pelas valiosas discussões experimentais, esclarecimentos técnicos e pelas disciplinas imprescindíveis para meu trabalho.

Aos caros colegas da sala de pós-graduação pelo companheirismo, pelas festas de aniversário tornando o ambiente de trabalho mais alegre e animador. Também meus agradecimentos ao colega Rafael pela sua grande ajuda que me foi fornecida neste trabalho.

À FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão, na pessoa do Diretor Presidente Prof^o Sofiane Labidi e de toda a sua equipe, por toda colaboração e pelo apoio financeiro que me foi concedida por esta instituição, possibilitando-me a realização deste curso, a minha formação e a realização deste trabalho.

Ao ITA e ao IEAv pelas excelentes infra-estrutura e por todos os suportes técnicos que foram concedidos durante a realização dos trabalhos e das atividades do curso e deste trabalho.

A todos que direta e indiretamente colaboraram para a realização deste curso.

*Os passos de um homem bom são confirmados pelo Senhor,
e deleita-se no seu caminho. Deleita-te no Senhor
e Ele satisfará os desejos do teu coração. Entrega os teus
caminhos ao Senhor confia nEle e Ele tudo fará.*

Rei Davi.

Resumo

A combustão pulsante tem despertado interesse nas pesquisas atuais devido a indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como economia de combustível, redução na formação de poluentes, aumento na taxa de transferência de calor por convecção e investimento reduzido, em comparação com outras novas tecnologias de combustão. Um estudo experimental foi conduzido com o objetivo de investigar os efeitos da combustão com a presença de oscilações acústicas na formação de fuligem em uma chama difusiva laminar de jato livre. O queimador de escala laboratorial operou com gás liquefeito e petróleo (GLP) com e sem oscilação, para as mesmas situações de entrada. O escoamento de combustível foi excitado acusticamente, antes da saída do queimador, por um alto-falante estrategicamente posicionado. Os experimentos foram conduzidos para uma vazão de 0.14 g/s de GLP. Para quantificar a presença de fuligem foi utilizada a técnica de incandescência induzida por laser. Os resultados indicam que em alguns casos, a combinação de frequência e amplitude de oscilação na chama reduz a presença de fuligem praticamente à zero.

Abstract

The pulsating combustion process has won interest in current research due to indications that its application in energy generation can offer several advantages, such as: fuel economy, reduced pollutants formation, increased rate of convective heat transfer and reduced investment, when compared with others new combustion technologies. An experimental study has been conducted with the objective of investigating the effects of combustion driven by acoustic oscillations in the soot formation in a jet free diffusion flame. The laboratorial scale burner operated with liquefied petroleum gas (LPG) in both oscillatory and non oscillatory conditions, under the same input conditions. The fuel flow was excited acoustically, before the burner exit, by a speaker strategically positioned. The experiments were conducted for the LPG flow of 0.14 g/s. To quantify the soot presence the incandescence induced by laser was utilized. The results show combinations of frequency and amplitude of oscillation which the presence of soot is close to zero.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xiv
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO	15
2 COMBUSTÃO PULSANTE E FORMAÇÃO DE FULIGEM	18
2.1 Aspectos Gerais sobre Chamas.....	18
2.2 Fuligem.....	22
2.2.1 Definições sobre fuligem.....	23
2.2.2 Processo da formação de fuligem.....	25
2.2.3 Controle da fuligem e poluentes em processos de combustão.....	28
2.3 Combustão Pulsante.....	32
2.4 Método LII para detecção de fuligem formada na combustão.....	38
3 Descrição do Experimento	43
3.1 Montagem experimental.....	43
3.1.1 Queimador Pulsante.....	45
3.1.2 Linhas de alimentação do combustível	48
3.1.3 Calibração do Rotâmetro.....	50
3.1.4 Sistema de atuação acústica e medidas de frequência e amplitude.....	53
3.1.4.1 Calibração do transdutor de pressão e amplificador de carga.....	54
3.1.5 Sistema de aquisição de dados.....	57
3.1.5.1 Laser de CO ₂	57
3.1.5.2 Monocromador Spex 1872.....	58
3.1.5.3 Osciloscópio.....	59
3.1.6 Normalização dos dados finais da concentração de fuligem.....	59
3.2 Descrição dos Testes Preliminares.....	61

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Análise do Conjunto Queimador – Sistema de Atuação Acústica.....	65
4.2 Emissão de fuligem.....	68
5 CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
APÊNDICE.....	89
A. Gráficos comparativos do Sinal de fuligem em função da Pressão Acústica.....	89
B. Tabelas do Sinal de fuligem em função da Pressão Acústica.....	93

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema de uma chama difusiva.....	21
Figura 2.2 Estrutura interna típica de uma partícula de fuligem.....	26
Figura 2.3 Emissão de poluentes em função da razão ar / combustível.....	30
Figura 3.1 Montagem Experimental.....	44
Figura 3.2 Esquema Geral dos Aparatos Experimentais.....	44
Figura 3.3 Queimador utilizado.....	45
Figura 3.4 Imagem do queimador e alto-falante com seus detalhes de acoplamento.....	46
Figura 3.5 Queimador com detalhes internos.....	47
Figura 3.6 Queimador com os detalhes externos.....	47
Figura 3.7 Esquema das linhas de alimentação do queimador.....	49
Figura 3.8 Curva de calibração do rotâmetro de GLP.....	52
Figura 3.9 Esquema do sistema de atuação e leitura da pressão acústica.....	53
Figura 3.10 Curva de Calibração do transdutor T ₃ em relação à frequência.....	55
Figura 3.11 Curva de calibrações dos transdutores de pressão em termos de amplitude.....	56
Figura 3.12 Resposta da pressão acústica em função do sinal de entrada.....	64
Figura 4.1 Perfil da Pressão Acústica em função da Frequência para 10 V.....	66
Figura 4.2 Resposta de atuação acústica em função do aumento o sinal de entrada.....	67
Figura 4.3 Fotografia da chama sem oscilação acústica.....	69
Figura 4.4 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 250 Hz.....	70
Figura 4.5 Imagens fotográficas para a frequência de 250 Hz.....	71
Figura 4.6 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 450 Hz.....	73
Figura 4.7 Imagens fotográficas para a frequência de 450 Hz.....	73
Figura 4.8 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 500 Hz.....	74
Figura 4.9 Imagens fotográficas para a frequência de 500 Hz.....	75

Figura 4.10 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 650 Hz.....	76
Figura 4.11 Imagens fotográficas para a frequência de 650 Hz.....	77
Figura 4.12 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 800 Hz.....	78
Figura 4.13 Imagens fotográficas para a frequência de 800 Hz.....	78

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Características das partículas poluentes.....	23
Tabela 3.1 Composição do GLP.....	48
Tabela 3.2 Resultados do procedimento de calibração do Rotâmetro.....	51
Tabela 3.3 Amostragem dos dados de normalização da concentração de fuligem baseados na energia do laser para 250 Hz.....	60
Tabela 3.4 Valores dos sinais de entrada e das frequências pré-determinadas.....	61
Tabela 3.5 Resultados das pressões acústica em resposta ao sistema de atuação.....	63

Lista de Abreviaturas

GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LIF	Fluorescência Induzida por Laser
LII	Incandescência Induzida por Laser
EA	Escala do Rotâmetro
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
UHC	Hidrocarbonetos não queimados
T ₃	Transdutor utilizado
T ₆	Transdutor de referência

1 Introdução

Atualmente as empresas estão em constante busca do aumento da produtividade para a sua permanência no mercado. Em contrapartida, devido à crise energética e as leis ambientais vigentes, as exigências do mercado para o alcance dessa produtividade estão diretamente ligadas à necessidade do baixo consumo de energia e à baixa emissão de poluentes. Diante desta realidade, a indústria, tem priorizado a busca de novas tecnologias para seus processos, visto que as técnicas convencionais muitas vezes não possibilitam atender a estas novas necessidades.

Hoje, como aproximadamente 80% da energia primária gerada no mundo é proveniente da combustão, o número de problemas como conseqüências desta técnica vem crescendo demasiadamente.

Os processos de combustão, além de serem essenciais para a geração de energia elétrica, também são fundamentais para o transporte, indústria e várias outras atividades. Contudo, as reações de combustão destes processos são as principais fontes de emissão de poluentes, tais como CO, NO_x, SO_x, compostos orgânicos voláteis e material particulado (Richter *et al.*, 2000). Desta forma, a preocupação dos pesquisadores na redução destes problemas tem desencadeado o desenvolvimento e melhorias nas técnicas de combustão.

Neste cenário, uma tecnologia que vem ganhando interesse nas pesquisas atuais como uma promissora técnica de combustão, devido à possibilidade de menor emissão de poluentes, com maior eficiência térmica e, em alguns casos, maior eficiência do processo, é a combustão pulsante.

Atualmente, a combustão pulsante destaca-se no meio científico devido às grandes vantagens que apresenta em relação à combustão convencional, ou seja, sem oscilação acústica. As principais vantagens apresentadas pela combustão pulsante são: economia de combustível, formação reduzida de poluentes, aumento nas taxas de transferência de calor por convecção e investimento de capital reduzido para a sua implementação.

Mesmo diante destas vantagens mencionadas, o uso desta tecnologia ainda é principiante em equipamentos comerciais, talvez pelo fato desta apresentar algumas características negativas como o elevado nível de ruído, dificuldade para o controle das amplitudes de pressão e relatos do aumento de formação de óxidos de nitrogênio (Dubey *et al.*, 1997). Contudo, a presença do campo acústico intensifica a mistura entre o combustível e o ar, o que é extremamente favorável à redução de monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e fuligem.

Para a implementação prática desta tecnologia, ainda se necessita de uma melhor atenção sobre os fenômenos envolvidos durante a combustão com campo acústico. Neste caso, um melhor conhecimento sobre os processos físicos e químicos da combustão pulsante poderá contribuir de maneira significativa tanto para o avanço de sua aplicação, como para sua melhor eficiência.

O objetivo do presente trabalho é investigar experimentalmente como a presença de um campo acústico em uma chama não pré-misturada de gás liquefeito de petróleo (GLP) altera a presença de fuligem. Para isso recorreu-se à técnica de incandescência induzida por laser.

A escolha de uma chama não pré-misturada foi devida a esse tipo de chama ser mais sensível à presença de um campo acústico, apresentando consideráveis mudanças em sua estrutura, conforme trabalhos já realizados por Ferreira (2001) e Bastos (2002).

Além desse capítulo de introdução, o presente trabalho ainda apresenta quatro capítulos. O segundo capítulo versa sobre conceitos fundamentais sobre chamas, formação de poluentes e sobre o método da incandescência induzida por laser. No terceiro capítulo é apresentada uma descrição detalhada dos equipamentos e dos instrumentos utilizados; também mostra os procedimentos utilizados durante a pesquisa. No quarto capítulo, são apresentados os resultados e comentários dos experimentos. Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

De modo geral, as metas da presente dissertação foram as seguintes:

- a) Caracterizar as faixas de amplitude e frequência onde se obtém as máximas amplitudes de pressão no queimador mantendo a chama ancorada.
- b) Verificar como a excitação acústica interfere na combustão, no comportamento da chama e especificamente na formação de fuligem quando se variavam as características acústicas, ou seja, frequência e amplitude.

2 Combustão Pulsante e Formação de Fuligem

No presente capítulo serão discutidos de forma sucinta alguns aspectos gerais sobre chamas, fuligem, combustão pulsante e sobre o método de incandescência induzido por laser, aqui utilizado para o diagnóstico da presença de fuligem na chama.

2.1 Aspectos Gerais sobre Chamas

A humanidade tem utilizado diversos tipos de fontes de energia através dos tempos, porém, a combustão representa a maior parte da energia primária utilizada por esta.

Pode-se definir a combustão como uma reação química exotérmica a partir da oxidação de um combustível. Esta reação normalmente ocorre em temperaturas relativamente elevadas e produz calor suficiente para manter a própria reação. O processo de combustão pode envolver todas as fases da matéria, ou seja, sólidos, líquidos e gases, tendo assim suas largas e variadas aplicações (Strahle, 1993).

As chamas que se manifestam em um processo de combustão são conseqüências da forma de mistura dos seus reagentes. Assim, elas podem ser definidas como sendo a situação de combustão onde os reagentes, combustíveis e oxidantes, são misturados e que reagindo de forma rápida liberam energia térmica e energia luminosa. A luminosidade que em determinada condição aparece na chama é devido à presença de partículas de carbono incandescente e também da presença de radicais, tais como: CH, C₂, etc. (Chomiak, 1990).

Apesar de sempre terem sido assunto de vários estudos e pesquisas, o conhecimento detalhado dos fenômenos que ocorrem em uma chama representa um grande desafio, uma vez que existem inúmeros processos químicos e físicos acontecendo concomitantemente.

Segundo Gaydon (1970) as chamas podem ser classificadas de forma geral como:

- a) chamas deflagração, que se caracterizam por serem produzidas ao longo de tubos ou vasos fechados, tendo como principais aplicações o estudo de motores de combustão interna;
- b) chamas estacionárias, são aquelas que apresentam maior interesse industrial, seja como fonte de aquecimento ou de outros propósitos, além de ser motivos de inúmeros estudos acadêmicos. As chamas estacionárias podem ser subdividas em dois grandes grupos: as chamas pré-misturadas e as chamas difusivas (ou não pré-misturadas).

Nas chamas pré-misturadas o combustível e o oxidante se misturam previamente, antes da zona de reação. O exemplo clássico deste tipo de chama é a formada pelo bico de Bunsen. Neste caso, os gases pré-misturados ascendem pelo tubo do queimador em uma velocidade superior à velocidade de queima da mistura, mantendo, assim, uma chama estacionária na extremidade daquele.

A estabilidade de uma chama pré-misturada está intimamente relacionada com variáveis como composição da mistura de queima, escoamento dos gases dessa mistura e geometria do queimador. Para misturas de combustível com ar ou oxigênio, há certos limites de composição dentro dos quais a propagação da chama pode ocorrer e fora destes intervalos, não é possível obter-se uma chama estável. Além da composição, a estabilidade da chama é função da velocidade de escoamento dos gases de alimentação (Gaydon, 1970).

As chamas difusivas têm como principal característica o fato da queima de combustível acontecer na medida em que este entra em contato com o oxidante, em geral o ar atmosférico. Em pequenas escalas, os processos de combustão são governados pela própria

taxa de interdifusão combustível/comburente; porém, em sistemas maiores, como fornalhas, a mistura ocorre predominantemente devido à turbulência e outros movimentos dos gases.

Do ponto de vista prático, para dispositivos que fazem uso da energia térmica liberada pelas reações de combustão, as chamas difusivas encontram muito mais aplicações do que as chamas pré-misturadas. Para as finalidades industriais, a grande maioria dos projetos de queimadores envolve chamas difusivas, em razão da maior taxa de transferência de calor por radiação, segurança, facilidade de projeto e controle do processo (Lacava, 2002).

As chamas difusivas podem ser geradas a partir de um jato livre circular de um combustível gasoso em um ambiente oxidante. O combustível escoia ao longo do eixo axial e difunde radialmente do centro do jato para frente de chama. Essa região é denominada de região interna à chama. Por outro lado, o oxidante difunde radialmente no sentido contrário, ou seja, do ambiente em direção à frente de chama. Neste caso, a superfície da chama será definida quando o combustível e o oxidante se encontrarem em proporção estequiométrica. O lado do oxidante é denominado região externa à chama. Os produtos que se formam durante a combustão se difundem em ambas as direções, ou seja, se direcionam tanto para a região interna quanto para a externa. Outro ponto a destacar é que as reações químicas ocorrem em uma região muito estreita e a zona de alta temperatura ocorre numa região anular até que o topo da chama seja atingido ($x = L$, definido como comprimento da chama) (Lacava, 2002). A Figura 2.1 apresenta os detalhes de uma chama difusiva gerada a partir de um jato circular.

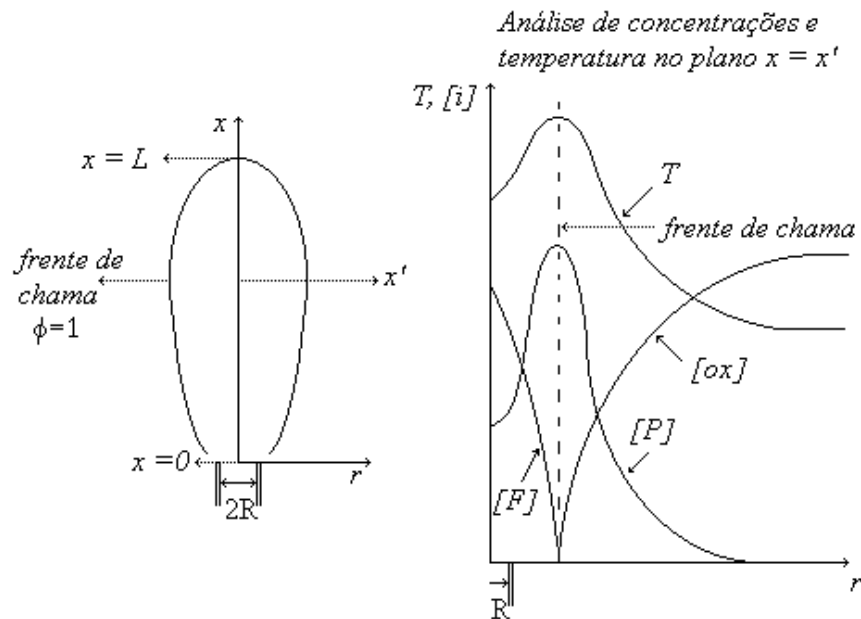


Figura 2.1 Esquema de uma chama difusiva, onde $[F]$, $[Ox]$ e $[P]$ são as concentrações do combustível, do oxidante e dos produtos, respectivamente, e T a temperatura. (Lacava, 2002).

Devido à deficiência de oxidante na região interna das chamas difusivas, elas se apresentam como aquelas que mais produzem fuligem. A intensa presença de fuligem pode ser claramente observada através da sua luminosidade amarelada, que é uma característica particular deste tipo de chama. Inicialmente, na saída do jato, a chama apresenta uma coloração azulada, porém, em razão da velocidade do jato ser relativamente alto, o ar é carregado para frente de chama favorecendo a sua mistura com o combustível, evitando zonas de combustão com temperatura elevada e deficiência local de oxidante, fatores que facilitam a formação de fuligem.

Vale comentar que dependendo do combustível utilizado a formação de fuligem numa queima difusiva poderá ter valores bem reduzidos. Exemplos desta situação podem ser vistos nas queimas do metano e do gás natural. A menor formação de fuligem nesses casos pode ser atribuída à intensa difusão de moléculas no envelope da chama, praticamente eliminando as

condições para a pirólise das moléculas de CH_4 e, conseqüentemente, a formação de micro-partículas de carbono (Gitman, 1986).

2.2 Fuligem

A formação de partículas de fuligem durante os processos de combustão tem sido intensamente estudada devida as suas implicações ambientais, danos à saúde e por sua influência no desempenho dos dispositivos que utilizam a combustão como fonte de energia.

As principais fontes de emissão de fuligem são os motores de combustão interna a gasolina e óleo diesel, as caldeiras, fornos industriais, e outros dispositivos os quais são alimentadas com óleos constituídos de hidrocarbonetos de grande massa molecular.

Dentre estas fontes, destacam-se os motores do ciclo Diesel, por serem as unidades de geração de potência de maior aplicação no transporte comercial do mundo, devido a sua significativa vantagem em relação ao consumo de combustível, elevada confiabilidade, e grande durabilidade. Os poluentes mais críticos produzidos por motores Diesel são o material particulado e os óxidos de nitrogênio, devido a dificuldade em reduzi-los simultaneamente sem deteriorar o desempenho do motor (Argachoy, 2004).

A presença de partículas de fuligem em um sistema de combustão altera suas características de radiação e influencia os aspectos energéticos globais da reação. Do ponto de vista termodinâmico, a formação de fuligem representa uma perda de energia associada à combustão incompleta. Do ponto de vista ambiental, a emissão de fuligem representa grande parte do total de material particulado presente na atmosfera dos grandes centros urbanos, estando fortemente associado a doenças respiratórias e mortalidades.

Conhecendo-se mais sobre o processo de formação de fuligem ou de outro poluente, pode-se, portanto, contribuir de maneira significativa para o controle de sua formação, redução dos impactos ambientais, como também melhorar a eficiência dos equipamentos em operação.

2.2.1 Definições sobre Fuligem

Denomina-se fuligem as partículas formadas nas regiões da frente de chama cujo tamanho é inferior a $0,1\mu\text{m}$. A sua formação está associada às reações de craqueamento dos hidrocarbonetos, ou seja, complexas reações em fase gasosa que geram núcleos condensados sólidos. Essas reações competem com o mecanismo de oxidação dos hidrocarbonetos, ocorrendo com maior frequência em situações de combustão rica em combustível e elevada temperatura. (Williams, 1976).

Na tabela 2.1 são apresentadas algumas características físicas de particulados formados na queima de hidrocarbonetos.

Tabela 2.1 Características das partículas (Williams, 1976).

Tamanho	Velocidade de deposição	Características do movimento
$< 0,1\ \mu\text{m}$	$4.10^{-5}\ \text{cm.s}^{-1}$ a $0,1\ \mu\text{m}$	Movimentos aleatórios, similares ao de moléculas de gás (fuligem).
$0,1 - 20\ \mu\text{m}$	$4.10^{-3}\ \text{cm.s}^{-1}$ a $1\ \mu\text{m}$	Partículas seguem o movimento do gás na qual se encontram.
$> 20\ \mu\text{m}$	$30\ \text{cm.s}^{-1}$ a $100\ \mu\text{m}$	Partículas depositam-se facilmente.

As partículas de fuligem são formadas principalmente na zona primária de chamas difusivas, onde, em geral, a combustão ocorre com falta de oxigênio. No entanto, sua formação pode ocorrer em qualquer região da chama, desde que não haja uma adequada mistura entre os reagentes. A maior parte da fuligem produzida na região primária pode ser consumida na região secundária (região de reação onde já há uma maior concentração de oxigênio) se a temperatura for suficientemente alta. Assim, do ponto de vista de emissão de fuligem, a chama pode ser dividida em duas regiões distintas: a região primária que governa a taxa de produção, e a região secundária que determina a taxa de consumo (Lefebvre, 1983). Portanto, a presença de fuligem nos produtos de combustão depende do balanço entre essas duas regiões.

Apesar das reações de formação de fuligem ocorrerem na fase gasosa, ela é observada com maior intensidade em chamas de combustível líquido, principalmente pela maior dificuldade de mistura entre o combustível vaporizado e o oxigênio (Chigier, 1981). Em qualquer plano através de uma chama difusiva, há sempre uma extensa variação da razão de equivalência, desde muito rica até muito pobre. Em razão disso, sempre haverá regiões de combustão rica com temperatura elevada, favorecendo a formação de fuligem nesse tipo de chama (Glassman, 1996). Já para as chamas pré-misturadas, por causa da distribuição mais uniforme da razão de equivalência, a formação de fuligem só acontecerá se os reagentes estiverem em proporções com falta de oxigênio. Portanto, a fuligem pode se formar tanto em chamas difusivas com regiões ricas em combustível, como também em chamas pré-misturadas ricas em combustíveis (Strehlow, 1984).

A maior preocupação com a formação e emissão de fuligem ocorre devida os seus efeitos nocivos ao meio ambiente e aos próprios processos que utilizam a combustão. As menores partículas destes poluentes são retidas nas vias respiratórias superiores pelo aparelho mucociliar humano, penetram profundamente no pulmão e depositam-se nos alvéolos. A

fuligem é composta de partículas suficientemente pequenas para penetrar nos alvéolos pulmonares carregando consigo todas as substâncias adsorvidas em sua superfície. Além de danos a saúde (problemas respiratórios), a fuligem aumenta a taxa de reações químicas atmosféricas, diminui a visibilidade e altera os níveis de radiação solar que atingem o solo.

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) são considerados os precursores da formação de fuligem. Eles se formam durante a pirólise ou pela combustão incompleta de materiais contendo carbono e hidrogênio. O controle da quantidade e a caracterização dos HPA's são de grande importância no âmbito do controle dos efeitos da poluição atmosférica sendo que sua formação é dependente de fatores, tais como o tipo de combustível e das condições de queima (Richter, 2000).

2.2.2 Processo da formação de fuligem

Vários modelos matemáticos com objetivos de conhecer ou monitorar os fenômenos e os processos que ocorrem durante a formação de fuligem foram desenvolvidos e aprimorados. Porém, estes modelos ainda não conseguiram estabelecer com exatidão todos os detalhes necessários para uma melhor compreensão destes fenômenos (Durigon, 2002).

Em geral, a fuligem presente nas chamas consiste de agregados de condensados sólidos com diâmetros médios de 20 a 50 nm. Esses condensados sólidos são formados por estruturas hexagonais formadas a partir de carbono e hidrogênio (C_xH_y , com $x \gg y$) (Richter, 2000). A Figura 2.2 mostra a estrutura de como os condensados de carbono formam as partículas de fuligem. Camadas de carbono compõem-se na forma de prateleiras que, empilhadas, assume uma formação do tipo estrutura cristalina. Os conjuntos de formações

cristalinas são aglomerados dando origem às partículas de fuligem. Cada partícula de fuligem é formada por uma quantidade da ordem de 10^3 estruturas cristalinas, sendo que cada estrutura é formada por duas a três prateleiras de carbono.

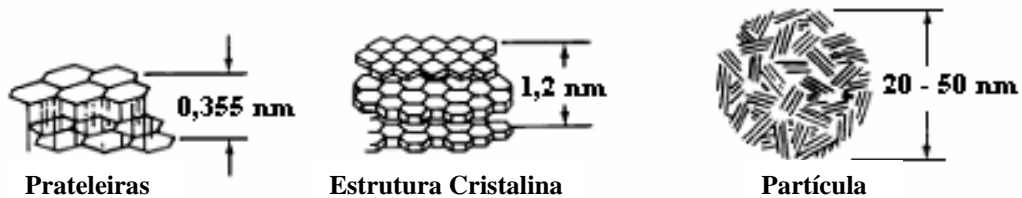


Figura 2.2 Composição do carbono na formação das partículas de fuligem (Chomiak, 1990).

Como os mecanismos de formação de fuligem ainda não estão estabelecidos, há uma grande dificuldade de compreender como as espécies moleculares primárias se aglomeram e como elas crescem até às partículas primárias de fuligem de 20-50 nm de diâmetro, e isto em tempos da ordem de milissegundos.

Pode-se também descrever conceitualmente um modelo da vida de uma partícula de fuligem durante a combustão. Os modelos baseados em cinética química são os mais utilizados para descrever a sua formação, pois, ele enumera as transformações das substâncias intermediárias envolvidas nas diferentes fases do processo de formação da fuligem. Fazendo uso deste modelo, Glassman (1996) apresenta de forma global as etapas da formação de fuligem, que são:

1. formação de espécies precursoras;
2. nucleação ou início da partícula;
3. coagulação e aumento da superfície;
4. oxidação da partícula.

O início do processo de formação de fuligem é caracterizado por um período de indução correspondente a uma alta energia de ativação, cujo valor é próximo à energia de ativação para a pirólise (ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor) de hidrocarbonetos a altas temperaturas. Para as chamas difusivas a formação de fuligem ocorre entre a zona interna da chama e a linha de centro do jato, onde a temperatura está na faixa entre 1300 e 1600K (Santoro *et al.*, 1987).

A primeira etapa, formação dos precursores, é formada pelos compostos termicamente estáveis, mas extremamente reativos, como, por exemplo, os HPA's (Chomiak, 1990). Acredita-se que os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos sejam intermediários importantes entre a molécula original de combustível e o início da formação dos primeiros núcleos de fuligem. Os HPA's podem ser considerados como uma partícula de fuligem primária (Appel *et al.*, 2000). A etapa da formação dos precursores é a principal e mais complexa das etapas, e, além disso, ela determina principalmente a velocidade, a quantidade e a composição das partículas de fuligem formadas (Durigon *et al.*, 2002).

Na etapa da nucleação, as grandes quantidades de precursores da fuligem são convertidas de moléculas para particulados, ou para a formação das espécies embrionárias (primeiros núcleos). Esta conversão acontece quando pesadas moléculas de HPA's iniciam a formação de minúsculas partículas de fuligem com massas moleculares de tamanhos variáveis e diâmetro aproximado de 1,5 nm (Richter, 2000).

Na terceira etapa, coagulação, ocorre aumento da superfície ou aglomeração das partículas, quando se inicia uma colisão entre as partículas (primeiros núcleos) já existentes; neste caso, o processo de crescimento da massa aumenta significativamente o tamanho das partículas e, por outro lado, diminui o seu número, sem, contudo, alterar a massa total de fuligem presente.

Na última etapa, a oxidação, a fuligem formada nas etapas anteriores pode ser reduzida se essas ficarem expostas a temperaturas elevadas e com presença de oxidante. Em chamas difusivas normalmente essa situação ocorre em posições superiores da chama. A oxidação da fuligem leva em geral a formação do CO e do CO₂ (Richter, 2000).

A redução da quantidade de fuligem na chama depende da velocidade da reação de oxidação. Fenimore e Jones (citado por Cludi, 2003) relataram que a concentração de radicais OH é um dos fatores determinantes para aumentar a velocidade da reação de oxidação. A geração de radicais OH pela presença de compostos hidroxilados, resulta na ação destes radicais sobre as moléculas precursoras da fuligem, os HPA's, oxidando-os e reduzindo a sua presença no mecanismo de formação de particulados.

Conforme já mencionado, o início da formação da fuligem depende do tipo de combustível queimado, sendo que diferentes hidrocarbonetos apresentam diferentes tendências à formação de fuligem. Em geral os hidrocarbonetos aromáticos são os que se apresenta com uma maior tendência, enquanto os hidrocarbonetos parafínicos são os que apresentam menores tendências à formação de fuligem (Strehlow, 1984).

2.2.3 Controle da Fuligem e Poluentes em Processos de Combustão

Os processos de combustão sempre foram a base do desenvolvimento tecnológico desde o início da humanidade até os dias de hoje. Porém, percebe-se que a demanda de energia gerada pela queima dos combustíveis fósseis em instalações móveis e estacionárias ainda é alta, o que é um fato preocupante, principalmente porque se parte deste combustível

não for consumido ocorrerá a formação de fuligem e outros poluentes, acarretando em considerável perda de energia e problemas ambientais.

Nos processos de combustão o ideal seria que a queima do combustível ocorresse de forma completa, o que produziria somente H_2O e CO_2 . Porém, isto não acontece, pois durante a combustão o que de fato ocorre é uma intensa liberação para a atmosfera de gases altamente tóxicos, como óxidos de enxofre e de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos não inteiramente oxidados, além da fuligem.

Basicamente, o controle da emissão de poluentes é realizado de três maneiras (Lefebvre, 1983).

- a) Retirando compostos do combustível que sejam precursores de poluentes, como o enxofre;
- b) modificando o processo de combustão para evitar a formação de poluentes;
- c) tratando os gases de exaustão.

Destes três métodos relacionados acima de combate às emissões, a maneira menos dispendiosa para redução das emissões é através da modificação do processo de combustão. Isso pode ser feito através do controle, entre outras coisas, da razão de equivalência, da condição de injeção dos reagentes, do processo de mistura no interior dos dispositivos, ou através do melhoramento da mistura por meio de atuadores externos, como, por exemplo, a combustão pulsante. No entanto, essa adequação não é uma tarefa simples, visto que existem diferenças na natureza dos mecanismos reacionais de formação dos poluentes (Lefebvre, 1983).

Os mecanismos de formação de poluentes estão relacionados entre si e com o mecanismo de oxidação do hidrocarboneto, ou outro combustível qualquer. Desta forma, a alteração das características de combustão com o propósito de reduzir a emissão de um determinado poluente poder ser catastrófica em relação à emissão de outro, ou outros, poluentes. Como exemplo, a Figura 2.3 apresenta o comportamento qualitativo das emissões de NO_x , CO e UHC (hidrocarbonetos não queimados, na língua inglesa “unburned hydrocarbons”). Nota-se que se a razão de equivalência for deslocada para os extremos rico ou pobre para reduzir a emissão de NO_x , causarão um acentuado aumento nas emissões de CO e UHC.

Desta forma o combate às emissões de poluentes não deve ser realizado de forma independente, ou seja, o combate às emissões deve levar em conta o conjunto de poluentes, não apenas focar em um deles.

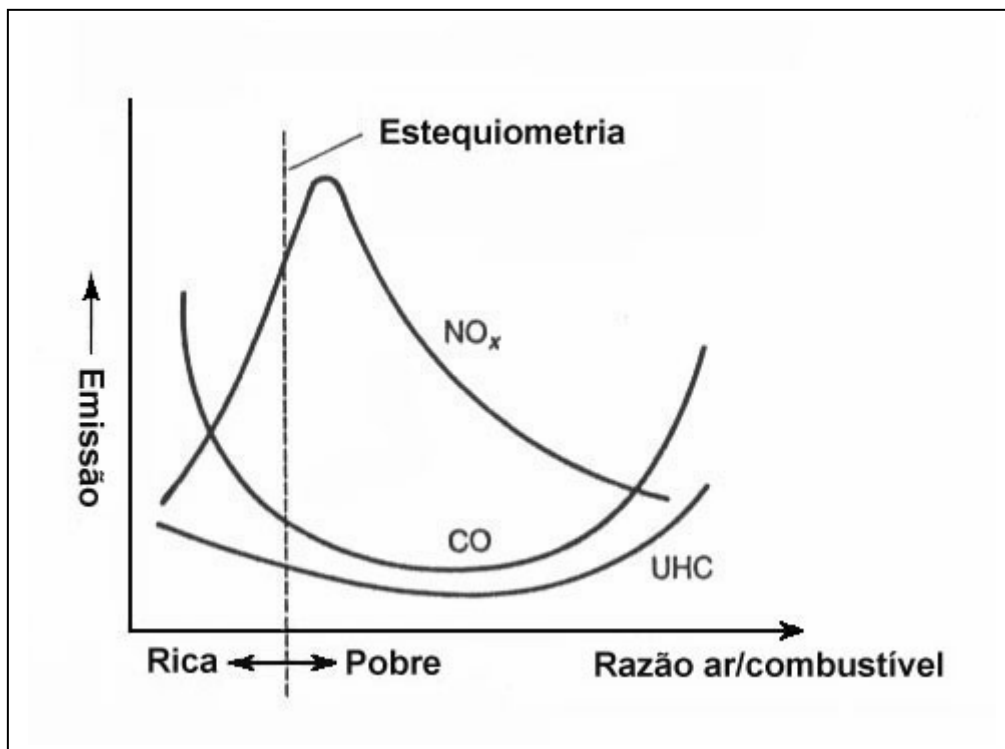


Figura 2.3 Emissão de poluentes em função da razão ar / combustível (Lefebvre, 1983).

Os hidrocarbonetos não queimados (UHC) são definidos como hidrocarbonetos de menor peso molecular, e são oriundos de parte do combustível em fase gasosa ou na forma de gotículas (combustíveis líquidos), bem como os produtos da degradação térmica que são descarregados para atmosfera sem sofrer oxidação completa (Lefebvre, 1983).

Normalmente, sua emissão está associada com a capacidade de mistura entre o combustível e oxidante e o tempo de residência da câmara. Seu comportamento e atitudes tomadas para o controle da sua emissão são próximos aos tomados com relação às emissões do CO.

Conforme já mencionado, o controle de emissão de poluentes através da atuação no processo de combustão deve ser feito com critério; caso contrário, o efeito pode ser inverso ao que se deseja. Dentro desse contexto, a atuação no processo de combustão impondo um campo acústico levará à intensificação do processo de mistura do combustível com o oxidante, o que é benéfico para redução dos poluentes decorrente de oxidação parcial do combustível.

A presença de oscilações acústicas no processo de combustão acaba sendo responsável por melhorar a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante pelo fato da oscilação criar intensas zonas de turbulência na região de chama. Como a formação de fuligem e de outros poluentes está relacionada com a taxa de mistura local entre o combustível e o oxidante, espera-se uma menor emissão destes poluentes.

Contudo, dependendo da razão de equivalência global da combustão, poderá ocorrer um aumento da emissão do NO_x . Segundo Ferreira (2005), para chamas parcialmente pré-misturadas de GLP em queima confinada próximo a razão de equivalência estequiométrica, a presença de um campo acústico aumenta a emissão de NO_x , enquanto reduz a emissão do CO e a presença de fuligem na chama.

2.3 Combustão Pulsante

Denomina-se combustão pulsante o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado (pressão, temperatura, etc), que descrevem as condições na zona de queima, ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com o tempo (Zinn, 1986). Tem-se que nos processos convencionais de combustão não existe uma correlação entre as flutuações existentes em um determinado ponto da câmara de combustão e outro ponto, a não ser com a da própria turbulência inerente ao escoamento; já a combustão pulsante apresenta uma estrutura coerente (Libby e Williams, 1994).

A combustão pulsante se apresenta como uma área de pesquisa e desenvolvimento promissora, pois pode ser encarada como uma ferramenta na geração de energia térmica que oferece algumas vantagens sobre o processo de combustão convencional. Devido à maior taxa de mistura entre o combustível e o oxidante a combustão torna-se mais eficiente e, conseqüentemente, há uma redução na quantidade de combustível utilizado. Em adição, ainda há diminuição nas emissões de poluentes gasosos de oxidação parcial e particulados, aumenta a transferência de calor convectiva no combustor e há necessidade de um menor investimento de capital para esse processo, se comparado a outras tecnologias inovadoras (Carvalho *et al.*, 1987).

Por outro lado, dependendo das aplicações, as oscilações acústicas também podem ser desvantajosas. A combustão pulsante pode ser um problema inerente ou benefício potencial para sistemas como fornos, turbinas a gás, pós-queimadores e motores foguetes. Quando oscilação é inerente, geralmente apresenta problemas; essa instabilidade indesejada pode reduzir a eficiência térmica e alterar o desempenho do equipamento. Mas quando utilizada de

forma coerente, os benefícios poderão ser maiores, por exemplo, maior desempenho do sistema (Dubey *et al.*, 1997). Um exemplo de problemas inerentes a serem evitados são as instabilidades acústicas percebidas em motores foguetes.

O primeiro exemplo de combustão pulsante foi realizado em 1777 por Byron Higgins (citado por Zinn, 1986), que no seu relato usou uma chama musical. Esta era uma chama ancorada em um queimador de hidrogênio instalado dentro de um tubo vertical, que por sua vez gerava um som de considerável amplitude devido à excitação do modo acústico fundamental ou de um de seus harmônicos. No entanto, foi percebido que a geração do som sempre dependia de algumas características inerentes ao sistema, tais como: as características do queimador, da chama e do tubo.

Existem combustores construídos em que o próprio processo de combustão é o responsável pelo surgimento das oscilações acústicas, como é o caso dos combustores tipo tubo de Rijke e de Bosscha e Riess (Zinn, 1986). Rijke provocou oscilações termoacústicas posicionando uma tela metálica aquecida na metade inferior de um tubo aberto mantido na vertical (Rayleigh, 1945).

Já para projetos convencionais de câmaras de combustão é necessário um atuador externo para induzir as oscilações, como por exemplo, o uso de alto-falantes estrategicamente posicionados. Os atuadores externos também podem ser acoplados em câmaras onde a própria chama induz as oscilações, com intuito de amplificar ou atenuar o sinal, visto que esse tipo de câmara não permite grandes variações de amplitude e frequência (Botura, 1998). Mesmo em combustores desenhados para geração de instabilidades acústicas, estas ocorrem apenas em algumas circunstâncias, o que restringe o intervalo operacional do dispositivo.

Embora este fenômeno já fosse conhecido desde o século XVIII, as primeiras tentativas concretas para se chegar a informações mais precisas da combustão pulsante só

ocorreram a partir do século XX (Stodola e Loewenstein, 1927) devido às influências de desenvolvimento prévio do motor de combustão interna. Porém, a combustão pulsante teve suas primeiras aplicações na área de propulsão do motor aspirado e na geração de potência por turbinas a gás.

Em trabalhos de pesquisas realizados por Hanby em 1968, os avanços desta área da combustão pulsante tiveram evidências e conclusões mais precisas. Este, utilizando um modelo quase estacionário, demonstrou que a presença de oscilações aumenta os coeficientes convectivos de transferência de calor e promove elevada eficiência térmica. A partir destes estudos chegou-se à conclusão, que a combustão pulsante proporciona a construção de dispositivos de tamanhos reduzidos, pois para a transmissão de uma mesma quantidade de energia térmica os dispositivos pulsados necessitam de superfícies menores do que os não pulsados.

Carvalho *et al.* (1987) compararam as diferenças entre a combustão pulsante e a não pulsante na queima de carvão em um combustor tipo tubo de Rijke e concluíram que as pulsações aumentam não só a taxa de reação entre combustível e oxidante, como também a transferência convectiva de calor dos gases quentes para a parede do combustor, sendo que ainda verificou-se uma baixa emissão de particulados. Como inconveniente, houve acúmulo de matéria inerte, o que depois de certo tempo levava ao colapso as oscilações e ao arraste das partículas de carvão parcialmente queimadas, tornando o combustor menos eficiente. Além disso, provocava a formação de canais preferenciais de escoamento de ar devido à fusão das cinzas, sendo estes canais os responsáveis pela mistura heterogênea entre combustível e oxidante no processo de combustão.

McManus *et al.* (1990) reportaram um decréscimo de 40% na concentração de NO_x no seu experimento, onde um queimador pré-misturado trabalhava em condições pobres

enquanto era excitado através de ondas senoidais num intervalo de 35 a 400 Hz. O nível de turbulência causado pela excitação acústica propiciou condições de mistura que reduziram o tempo de permanência do escoamento nas regiões de alta temperatura, promovendo assim a diminuição da formação deste poluente.

Saito *et al.* (1998) analisando os efeitos da frequência de oscilação e o nível de pressão sonora de um campo acústico em chamas difusivas de acetileno, para eliminação de fuligem, chegaram a três importantes conclusões: a) observou-se que para uma certa combinação de valores, para a região com escoamento laminar, a eliminação de fuligem foi menor do que 50%, enquanto que para as regiões de escoamento turbulento, a eficiência foi maior do que 90%; b) a temperatura da chama para combustão com excitação acústica foi maior do que para a condição sem excitação; c) a excitação acústica melhorou a mistura gás combustível e do ar circulante, neste caso, a alta temperatura de chama causou a re-oxidação das partículas de fuligem.

O efeito do campo acústico sobre a estrutura da chama e ainda sobre a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante foi estudado em chamas pré-misturadas de GLP com ar, pulsadas acusticamente com alto falante (Lacava *et al.*, 1999). Através de imagens obtidas por câmeras CCD e tratamento tomográfico, pôde-se verificar que o campo acústico modificou fortemente a estrutura da chama, e conseqüentemente os processos físicos e químicos que ali se desenvolveram.

Yoshida *et al.* (2001) utilizando uma chama difusiva turbulenta na presença de um campo acústico, observou que sob as condições de ressonância, a transição de escoamento laminar para turbulento é intensificada, e que conseqüentemente, a intensidade turbulenta do escoamento aumenta notadamente.

Ferreira (2001) estudou a influencia da atuação acústica sobre chamas parcialmente pré-misturadas e confinadas de GLP com ar para certas razões de equivalências. A atuação acústica foi feita através de um alto falante posicionado no canal interno, ou seja, somente no fluxo de pré-mistura. A análise de gases mostrou que a presença do campo acústico afeta mais intensamente as chamas onde a quantidade de ar pré-misturado com o combustível apresenta-se em proporções menores. Os resultados também mostraram que com a presença do campo acústico, houve melhora na taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, o que acarretou a redução da emissão de CO e da presença de fuligem.

O trabalho realizado por Bastos *et al.* (2002) em chamas difusivas pulsantes livres usando GLP mostrou que para determinadas combinações de frequências e amplitude, a combustão pulsante altera sensivelmente a aparência da chama, transformando-a de amarela em azul, o que denota uma melhor mistura entre combustível e oxidante e diminui as emissões de fuligem. Nesta condição a chama apresenta uma estrutura típica de chamas turbulentas. Também foi verificado que o aumento de temperatura na região de mistura provocada pela excitação acústica aumentou consideravelmente a emissão de NO_x.

Através da queima de uma chama difusiva pulsada de gás natural e ar, Rocha (2002) mostrou a eficiência das pulsações acústicas em um processo de combustão, mediante a comparação entre os poluentes emitidos com e sem atuação acústica. A meta principal foi obter condições de operação adequadas, onde se obtivessem baixas emissões de produtos de combustão parcial, como o CO, aliado à redução das emissões de NO_x. Os resultados mostraram que em condições estequiométricas sem pulsação, a concentração de CO foi bastante acentuada, e que a atuação acústica influiu de maneira positiva na redução desse poluente. Quanto às emissões de NO_x, no caso de atuação acústica, os resultados ocorreram exatamente como esperado, ou seja, houve um aumento deste poluente.

Flügel (2006) investigou a influência de um campo acústico na formação de poluentes da queima de um spray de álcool em um injetor centrífugo. No seu relato mostrou que a combustão em condições pulsantes modificou a estrutura da chama e melhorou a mistura ar e combustível, resultando na redução da formação de poluentes. Também se pôde perceber que em determinadas condições de trabalho foi possível reduzir ao mesmo tempo a concentração de NO_x e CO. Percebeu-se ainda que houve uma redução da emissão de NO_x quando se intensificou a zona de recirculação a jusante do queimador, pois, o campo acústico, além de melhorar a mistura entre ar/combustível, também favorece o aumento da taxa de evaporação das gotas de combustível.

Martins *et al.* (2006), analisando a queima pulsante e não pulsante de GLP em um tubo de Rijke, com injeção de amônia como elemento dopante, mostrou que a combustão pulsante foi mais eficiente do que a não pulsante, pois houve menor formação de CO para o caso pulsante. Entretanto, as emissões de NO_x com e sem injeção de amônia, usada para simular a emissão de NO proveniente do combustível nitrogenado, foram maiores que na combustão não pulsante. Constatou-se ainda que, com aumento da vazão de GLP, para as mesmas razões de equivalência, existiu aumento da amplitude de pressão e da frequência de oscilação. A injeção de amônia não influenciou parâmetros como amplitude, frequência e temperatura.

Por fim, devido aos resultados relevantes que a combustão pulsante tem fornecido, diversas pesquisas nesta área têm surgido, com o intuito de melhor entendimento dos fenômenos e futuras implementações práticas. Devido ao seu potencial, a combustão pulsante poderá permitir muitas vantagens, tais como: maior aproveitamento de energia dos processos de combustão, além de considerável redução nas emissões de poluentes.

2.4 Utilização do método LII para detecção da presença de fuligem em chamas.

Geralmente, os estudos realizados em chamas produzidas pela combustão de diversos hidrocarbonetos em queimadores abertos à diferentes proporções de combustível/comburente, têm sido conduzidos de duas formas separadas: com ênfase nos aspectos físicos e dinâmicos, ou com maior enfoque nos aspectos químicos e reacionais das chamas produzidas por hidrocarbonetos (Oostendorp *et al.*, 1991).

Nos estudos de dinâmica das chamas, o maior objetivo tem sido a determinação da velocidade de propagação da chama, a pressão desenvolvida durante o processo de combustão e a estrutura da chama (laminar ou turbulenta). Nos estudos químicos, os principais objetivos tem sido a determinação da energia térmica de combustão, a distribuição de temperatura nas diversas regiões da chama e a identificação e distribuição espacial das espécies responsáveis pelos diversos processos e produtos resultantes da combustão (Marques, 1996).

Nos estudos químicos nas chamas produzidas em queimadores abertos, têm sido aplicadas técnicas de amostragem, classificadas como técnicas intrusivas e técnicas não intrusivas (Vander Wal *et al.*, 1996).

As técnicas intrusivas, são aplicadas envolvendo a extração física de material. Como exemplos dessas técnicas pode-se relacionar a cromatografia gasosa, a espectrometria de massa, entre outras. Nessas técnicas a amostragem é realizada por uma microsonda que retira pequenas amostras de diferentes regiões da chama. Porém, esse tipo de amostragem pode afetar a medida de concentração das espécies através da perturbação da chama pela sonda ou das reações que ocorrem dentro da sonda. Por outro lado, as técnicas não intrusivas, como absorção utilizando laser de diodo, fluorescência induzida por laser (LIF - *Laser Induced Fluorescence*) e incandescência induzida por laser (LII - *Laser Induced Incandescence*),

tem sido amplamente aplicada para a determinação da concentração de espécies intermediárias como OH, CH, C₂, NO e outras.

As técnicas de absorção e LIF utilizam o laser como sonda e apesar de não serem intrusivas fornecem informações de forma mais precisa somente das espécies formadas no estado eletrônico fundamental (Marques, 2000). A técnica de absorção por laser é aplicável para a determinação da concentração em vários pontos da chama, mas não possui resolução temporal. Além disto, o espalhamento da luz pelas partículas sólidas requer correções que necessitam do conhecimento prévio da distribuição do tamanho das partículas na chama (Vander Wal *et al.*, 1997).

Dentre os métodos que são utilizados para determinar a concentração de fuligem ou a fração de volume de fuligem, o método da incandescência induzida por laser, que se baseia na interação da radiação do laser com as partículas de fuligem geradas durante a combustão, tem se destacado como um dos mais recomendáveis para este tipo de medida. A sua utilização e a sua eficiência neste ramo de pesquisa têm sido confirmadas por vários autores (Vander Wal, 1997; Choi *et al.*, 1998).

O método da LII se baseia na interação da radiação do laser com as partículas de fuligem geradas durante a combustão. A incandescência nas partículas de fuligem ocorre quando a absorção da radiação do laser para densidades de potência iguais ou maiores que 1×10^7 W/cm² provoca um aquecimento das partículas fuliginosas para próximo de sua temperatura de vaporização (tipicamente 4000K). Nesta temperatura, as partículas sólidas emitem uma radiação (incandescência) que se aproxima da emissão de um corpo negro. A intensidade da radiação emitida, de acordo com modelos teóricos e confirmada experimentalmente, é linearmente proporcional à concentração da fuligem.

Durante o fenômeno o equilíbrio da energia absorvida dentro da partícula ocorre rapidamente na escala de tempo do pulso de laser (isto é, nanossegundos), mas o aquecimento médio que envolve a partícula ocorre numa escala de tempo mais longa (por exemplo, microssegundos). Os estudos empíricos mostram que a melhor medida de concentração de fuligem é obtida detectando o sinal durante e de modo imediato após a excitação do pulso de laser. Durante este período de tempo, as diferentes taxas de esfriamento associadas com diferentes tamanhos de partículas primárias têm menos efeito na temperatura da partícula e, conseqüentemente no sinal da LII. (Vander Wal, 1997; Quay *et al.*, 1994).

Subseqüentemente ao pulso do laser, a temperatura gradualmente diminui devido às perdas de calor por convecção. Segundo Vander Wal *et al.* (1999) uma outra propriedade da partícula de fuligem que pode afetar o processo de esfriamento é o grau de conectividade da partícula primária. O grau de conectividade é o maior pico da região do crescimento da fuligem. Aumentar a conectividade da partícula primária aumentaria o tamanho efetivo da partícula primária, diminuindo assim a sua taxa de esfriamento.

Lasers com largura temporal maior que nanossegundos, como por exemplo, laser de CO₂ (largura de pulso da ordem de 1 microssegundo - com metade da energia concentrada nos primeiros 50 nanossegudos) também pode ser usado para determinar fuligem porém não se aplica para os cálculos de tamanho e forma das partículas.

Através da LII, utilizando um laser pulsado de CO₂, Barreta *et al.* (2000) determinaram a distribuição de fuligem formada na combustão entre o GLP e oxigênio, em várias razões de equivalência. O sinal foi medido varrendo a posição horizontal e transversal da chama em diferentes alturas. Os resultados concluíram que a quantidade de fuligem é maior no centro da chama e que também este valor aumenta de sua parte inferior para a parte superior. Segundo os autores este resultado era esperado, pois visualmente a parte inferior da

chama estava azulada enquanto que a parte superior avermelhada. Conseqüentemente, nas chamas de mistura GLP/Oxigênio, rica em oxigênio não foi observado sinal de incandescência indicando assim ausência de fuligem nestas condições.

Pode-se atribuir a grande utilização do método LII pelo fato de apresentar várias vantagens sobre os demais métodos. Algumas destas vantagens são:

a) Podem ser utilizados diversos tipos de lasers, desde que os mesmos tenham alta potência (Vander Wal, 1997);

b) O método pode ser usado para as medidas de variação temporal e espacial da concentração, tanto em sistemas de regimes estacionários, presentes em chamas laminares, bem como em condições em que há variação rápida de concentração (Cignoli *et al.*, 1994; Ni *et al.*, 1995). A medida das variações quantitativas com altas resoluções espacial e temporal da concentração de fuligem na chama, aliada à medida de outros parâmetros, como a temperatura e concentrações de produtos intermediários, permite a obtenção de dados que explicam o mecanismo da formação desta matéria;

c) As variações de morfologia das partículas não influem nas medidas;

d) A medida da variação da intensidade da incandescência em função do tempo (Schraml *et al.*, 2000) e do comprimento de onda da radiação (Mewes e Seitzman, 1997), fornecem dados para a determinação da distribuição do tamanho das partículas, etc.

Apesar destas vantagens mencionadas, o sinal de incandescência induzida por laser também pode apresentar certas limitações quando se deseja quantificar a fração de volume e o tamanho das partículas. Esta limitação ocorre devido à calibração depender de alguns parâmetros operacionais, tais como: intensidade do laser, comprimento de onda, e parâmetros

de pulso, tempo de resolução e condições da chama no qual afetam o resfriamento das partículas (McManus, 1997).

Diante dos resultados teóricos e experimentais, está evidente que o LII, apresenta-se como um dos métodos mais recomendáveis para se medir a fração de volume de fuligem, pois a amostragem com os demais métodos alternativo além de carecerem de elevadas resoluções temporal e espacial, requererem sondas intrusivas, que perturbam o processo de combustão. A técnica LII oferece elevadas resoluções temporal e espacial, podendo ser usada até mesmo, para medidas multidimensionais (Shaddix, 1994).

Além de sua aplicação a sistemas estáveis, como as chamas laminares difusivas de jato de gás, pode-se também adaptar o método em condições ideais para se medir concentrações de fuligem nos fenômenos em rápidas escalas de tempo desprovida de simetria espacial, assim como o processo de combustão turbulenta (Shaddix, 1994).

3 Descrição do Experimento

O presente capítulo descreve a montagem experimental e os procedimentos para avaliar a presença de fuligem em uma chama difusiva laminar submetida a um campo acústico. Os experimentos foram realizados em um queimador livre, ou seja, não confinado em uma câmara de combustão. O combustível utilizado foi o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A atuação acústica foi feita por um alto falante estrategicamente posicionado no queimador, cujos detalhes são apresentados nas próximas seções. Para entender como o campo acústico afeta a estrutura da chama, e conseqüentemente, a redução da emissão de fuligem, utilizou-se o método de incandescência induzida por laser.

As primeiras seções deste capítulo apresentam um esquema geral dos arranjos experimentais e uma breve descrição do sistema de funcionamento de alguns desses equipamentos. Inicialmente foi descrito todo o sistema dos aparatos experimentais, tais como queimador pulsante, sistema de alimentação, sistema de atuação acústica e o sistema de aquisição de dados. Na segunda parte alguns comentários foram feitos a respeito dos procedimentos experimentais e da metodologia adotada durante a execução dos experimentos.

3.1 Montagem experimental

O experimento foi realizado no Instituto de Estudos Avançados – IEAv e constitui-se dos seguintes aparatos: queimador de GLP; sistema de aquisição de dados: laser (CO_2) para produzir incandescência, monocromador e fotomultiplicadora; equipamentos de atuação acústica: gerador de função, amplificador de pressão, transdutor de pressão; além dos instrumentos de operação, painel de rotâmetros, cilindro de GLP e demais acessórios, por exemplo, as lentes ópticas de colimação e de detecção.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam uma fotografia e um esquema da montagem, respectivamente.

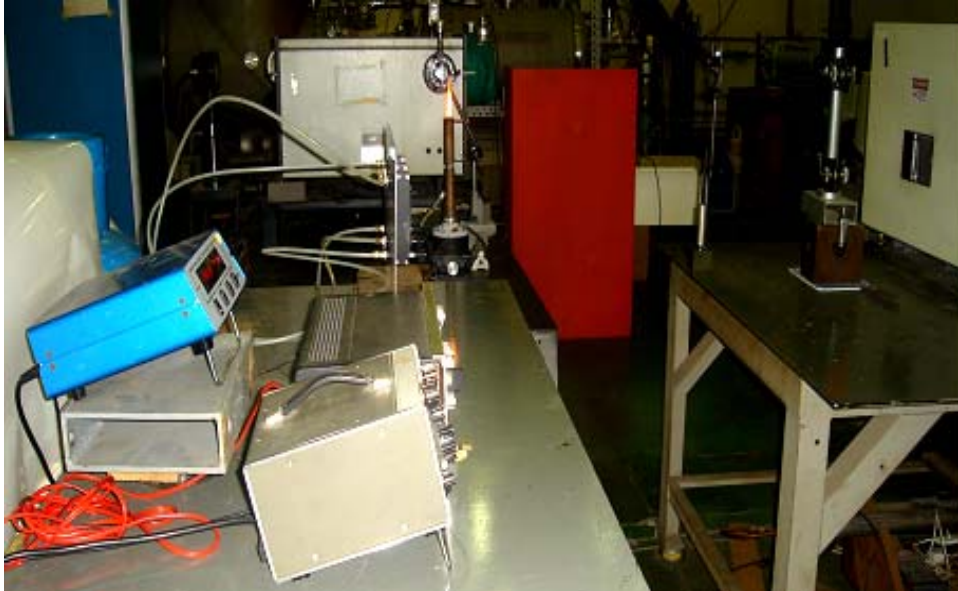


Figura 3.1 Montagem Experimental

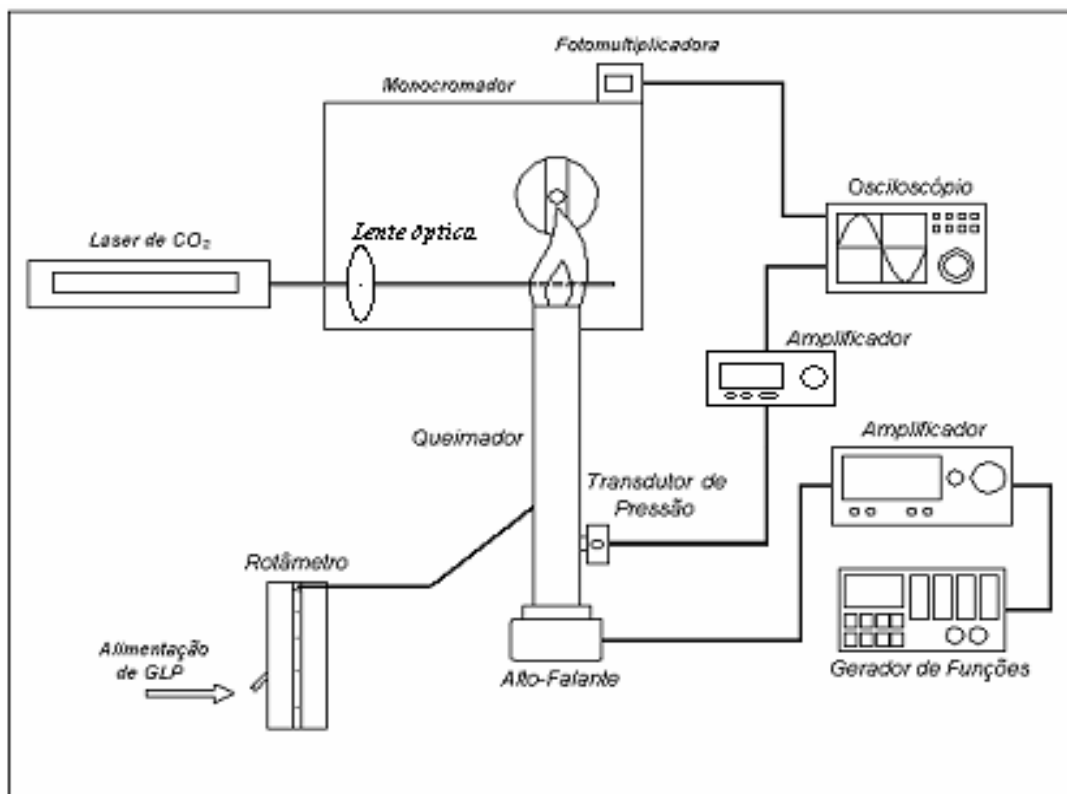


Figura 3.2 Esquema Geral dos Aparatos Experimentais

3.1.1 Queimador

O queimador, cujo modelo é mostrado na Figura 3.3, foi o mesmo utilizado por Bastos (2002). Este possui uma configuração simples onde o combustível injetado escoava através da região central do jato em direção à frente de chama, sendo que na sua face superior está posicionado um disco para ancorar a chama próximo à saída do queimador. A chama foi excitada acusticamente através de um atuador externo, no presente caso um alto-falante, que foi estrategicamente posicionado na base do canal de escoamento do combustível. O corpo do queimador é acoplado no alto-falante por meio de rosca interna existente na face inferior deste. Para melhor compreensão a Figura 3.4, mostra a imagem do queimador e do alto-falante separadamente.



Figura 3.3 Queimador utilizado



Figura 3.4 Imagem do queimador e alto-falante desacoplados.

O queimador possui comprimento de 320 mm e o canal por onde escoo o gás combustível possui diâmetro interno de 17 mm. Na saída do canal de injeção de combustível está posicionado o disco ancorador de chama de 11,5 mm de diâmetro. A Figura 3.5 mostra os detalhes internos para uma melhor compreensão do queimador.

O combustível é injetado através de um pequeno orifício localizado na parte inferior do corpo do queimador, conduzindo o combustível até à saída. O escoamento de combustível sofre influência direta da excitação imposta pelo queimador.

Um transdutor de pressão piezelétrico foi posicionado no duto de escoamento do combustível, três centímetros acima do alto-falante, cuja medida serviu como referência para se estabelecer as condições de oscilação. Durante os experimentos o queimador foi fixado em um suporte com mobilidade nas direções ortogonais x , y e z , o qual permite fazer uma varredura em diferentes alturas ao longo da chama. A Figura 3.6 mostra o queimador com os detalhes externos.

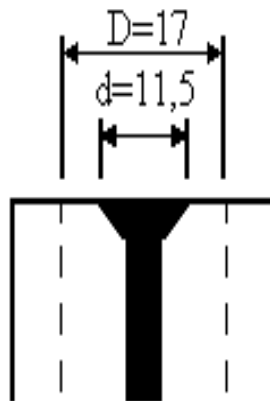


Figura 3.5 Esquema do detalhe interno do queimador (Bastos 2002).

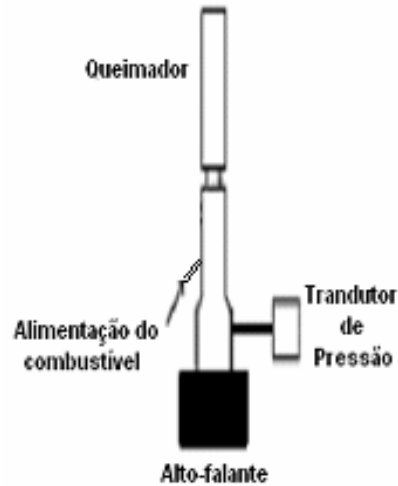


Figura 3.6 Queimador com seus detalhes externos

Para coleta e apresentação dos resultados foram escolhidas quatro diferentes posições longitudinais da chama, as quais são: 0, 3, 6 e 10 cm, sendo esta última, a altura máxima que o mobilizador atuava. É importante observar que embora se tenha escolhida a posição 0 cm (face de saída do queimador) a sua presença nos gráficos de análise de formação de fuligem não é apresentada, pois, para todas as condições de trabalho, esta posição sempre apresentava a ausência total de fuligem.

3.1.2 Linha de alimentação do combustível

Conforme mencionado anteriormente o combustível utilizado foi o gás liquefeito de petróleo (GLP). O comburente utilizado é o próprio ar atmosférico. As características destas duas misturas e outras informações relevantes são especificadas a seguir.

O GLP é constituído por hidrocarbonetos produzidos no início da destilação do petróleo e também durante o processamento do gás natural. Dependendo da origem e dos processos de tratamento a que foram submetidos, podem apresentar variações na sua composição. Para o GLP proveniente do petróleo, os hidrocarbonetos que aparecem em maiores proporções são os compostos de três átomos de carbono (propano e propeno) e de quatro carbonos (butano e buteno) (Petrobrás, 2006).

Assumiu-se aqui, como composição do gás aquela apresentada por Ferreira (1997). A tabela 3.1 cita algumas das características específicas da sua composição.

Tabela 3.1 Composição do GLP (Ferreira, 1997).

Componentes	Composição real (% massa)	Composição adotada (% massa)	Massa molecular g/gmol	Entalpia de formação (Kcal/gmol)
Metano (CH₄)	0,25	0,25	16,04	-17,89
Propino (C₃H₅)	4,06	4,09	40,06	44,32
Propeno (C₃H₆)	26,65	26,82	42,08	4,88
Propano (C₃H₈)	23,29	23,44	44,1	-24,82
1-buteno (C₄H₈)	0,01	0,01	56,11	-0,03
Isobuteno (C₄H₈)	2,57	2,59	56,11	-4,04
Cis 2-buteno (C₄H₈)	8,82	8,88	56,11	1,67
Isobutano (C₄H₁₀)	14,03	14,12	58,12	-36,92
N-butano (C₄H₁₀)	9,33	9,39	58,12	-30,15
Isonpentano (C₅H₁₂)	10,1	10,17	72,15	-36,92
N-pentano (C₅H₁₂)	0,24	0,24	72,15	-36,67
Não identificados	0,65	0		
Mistura			49,02	

Como o GLP é uma mistura de hidrocarbonetos, pode-se adotá-lo como composto de fórmula molecular média C_xH_y . Assim, a sua composição média adotada foi $C_{3,425}H_{7,824}$, possuindo uma massa molecular média de 49,02 g/gmol.

Durante o experimento o GLP utilizado foi proveniente de um cilindro pressurizado de massa líquida de 45 kg. A vazão foi medida por meio de um rotâmetro. Apesar da simplicidade do sistema de alimentação, para se garantir maior segurança e controle da vazão, além da válvula do próprio cilindro, o conjunto possuía também uma válvula reguladora do tipo abre/fecha, no qual permitia o fechamento do escoamento do gás mediante qualquer risco. O esquema da linha de combustível é apresentado na Figura 3.7.

Para medida e controle da vazão de combustível foi utilizado um rotâmetro (GLP: Cole-Parner FM 012-10). Este rotâmetro foi calibrado através da técnica de deslocamento de bolha, usando assim, um calibrador primário (Teledyne HBM-1A), também conhecido por “bolhometro”. Este procedimento está detalhado no próximo item do texto.

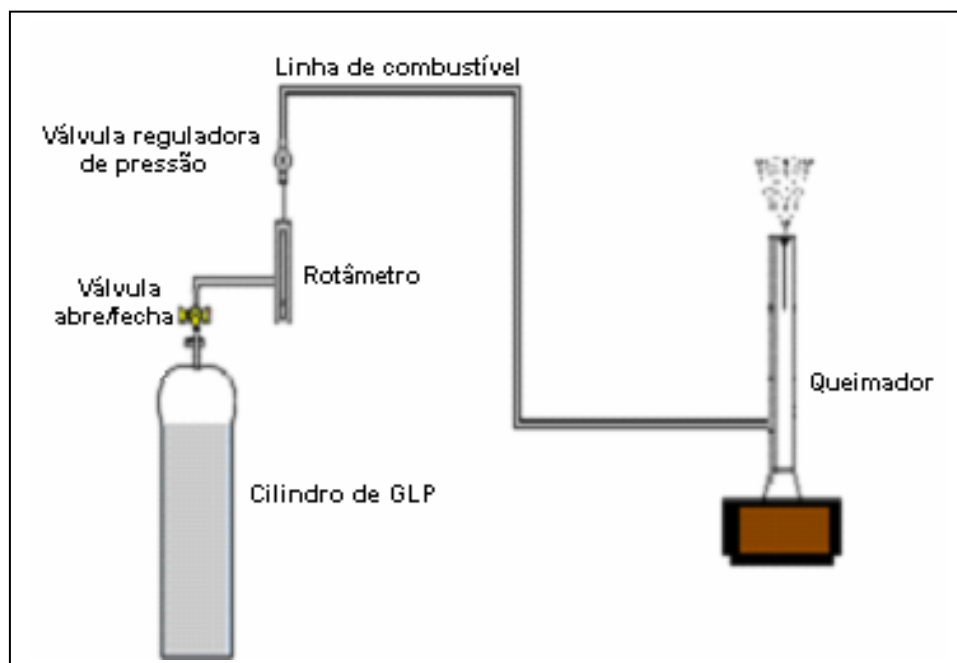


Figura 3.7 Linha de alimentação do queimador

3.1.3 Calibração do Rotâmetro

Conforme já mencionado, para a medida e controle da vazão de combustível, foi primeiramente efetuada a calibração do rotâmetro. Este procedimento consistiu simplesmente em colocar água e sabão em um recipiente, com o objetivo de gerar bolhas pela passagem do gás que se quer medir. Com isso, foi possível determinar o tempo de deslocamento da bolha através de um cilindro de vidro graduado – no caso de volume de 1000 ml – em diversos valores da escala do rotâmetro.

Os procedimentos adotados para a calibração do rotâmetro foram realizados para todas as principais escalas de aferições do rotâmetro, que são: 5, 10,15, 20,25,30 e 40.

Para a calibração, se estabeleceu um limite mínimo e máximo no cilindro graduado, correspondendo ao início e final da medida de calibração. Devido à pressão do gás, isso permitia que a bolha escoasse entre os limites pré-estabelecidos para que então se pudessem medir os intervalos de tempo dentro daquela faixa de percurso da bolha, no interior do cilindro. Os limites pré-estabelecidos para as medidas foram entre as marcações de 200 e 900 ml, diminuindo assim, os erros envolvidos com a descarga inicial do gás.

Para efeito de avaliação, dando assim, maior precisão e segurança à calibração, as medições dos tempos de escoamentos para cada vazão do rotâmetro foram repetidas três vezes. Todos os resultados deste procedimento estão apresentados na Tabela 3.2, contendo ainda o tempo de escoamento, a média dos tempos e os valores de vazão na qual cada um corresponde em unidade de ml/min.

Tabela 3.2 Resultados do procedimento de calibração do Rotâmetro

Rotâmetro: RT 014 - 96						
Vol. do cilindro (ml)	Escala de aferição (EA)	Tempos de Escoamento(s)			Tempo médio(s)	Vazão Volumétrica (ml/min)
		T1	T2	T3		
1000	5	64,3	64,3	64,7	64,4	931,2
1000	10	34,6	34,1	34,0	34,2	1752,7
1000	15	25,0	25,9	25,0	25,3	2371,5
1000	20	19,0	19,2	19,0	19,1	3146,9
1000	25	15,1	15,0	15,2	15,1	3973,5
1000	30	11,2	11,4	11,4	11,3	5294,1
1000	40	9,0	9,4	9,5	9,3	6451,6

De acordo com a tabela acima, a última coluna apresenta os valores reais de vazão volumétrica do combustível, depois de feita as aferições e transformações necessárias. Por exemplo, o valor da escala de aferição (EA - 25) correspondeu a uma vazão volumétrica de 3973,5 ml/min.

A vazão volumétrica de 3973,5 ml/min, transformado em vazão mássica equivale ao valor de 0,14 g/s. Este valor é o que foi utilizado para a realização dos testes experimentais. Para obtenção da vazão mássica de GLP, as transformações foram realizadas utilizando os dados da composição e da massa molecular fornecidos por Ferreira (1997).

A escolha deste valor, 0,14 g/s, foi estabelecida em primeiro lugar com base nos resultados dos testes preliminares (descrito nas seções seguintes) para a estabilidade da chama dentro de determinadas faixas de trabalho de acordo com as características dos equipamentos. Outro fator determinante para esta escolha, foi o fato que a chama com esta vazão, possui uma altura suficiente que permitisse realizar as análises desejadas.

A Figura 3.8 apresenta o perfil de vazão do combustível em função da escala do rotâmetro. Neste gráfico, plotou-se também uma curva, polinômio de quarta ordem, que mostra a equação de correção da vazão de combustível. Para a determinação desta curva utilizou-se o programa computacional “OriginPro Version 7.5” e o polinômio que representa a curva é dada pela equação 3.1.

$$y = -596,43 + 420,81 \cdot X - 28,09 \cdot X^2 + 1,08 \cdot X^3 - 0,01 \cdot X^4 \quad , \quad (3.1)$$

onde o y representa vazão volumétrica do combustível e X a escala de leitura do rotâmetro.

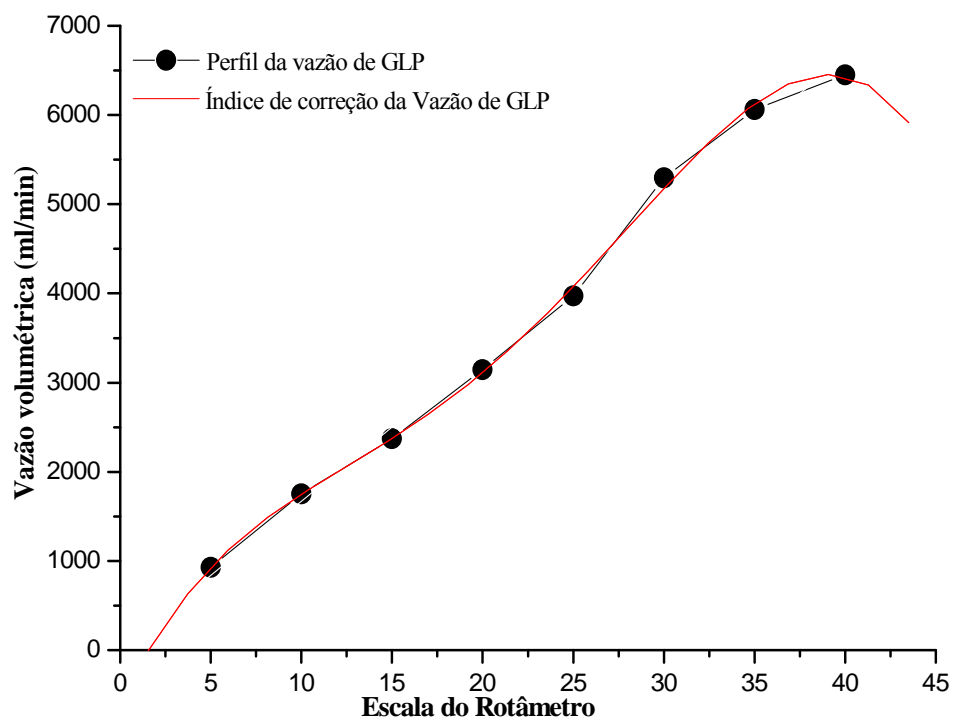


Figura 3.8 Curva de calibração do rotâmetro de GLP

3.1.4 Sistema de atuação acústica e medidas de frequência e amplitude

O sistema de atuação acústica e medidas de frequência e amplitude deram-se do seguinte modo: o sinal elétrico senoidal é obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP 3310A, que atribui a frequência desejada ao alto-falante. Em seqüência, a amplitude do sinal é ajustada no amplificador Proximity, modelo 750AP (100/300W), antes de chegar no alto-falante DF - 250, com potência de 50W e Impedância de 16 Ohms.

No canal do queimador está posicionado um transdutor de pressão piezelétrico Kistler 7261, faixa de 0-10 bar, que estabelece a equivalência do sinal de pressão acústica e sinal elétrico. O sinal de tensão do transdutor passa por um amplificador de carga Kistler 5006 e é lido em um osciloscópio Tektronix 7934. Paralelamente, estes dados são enviados para o sistema de aquisição de dados. A figura 3.9 abaixo mostra o sistema dos equipamentos de atuação acústica, amplificador e o gerador de funções.

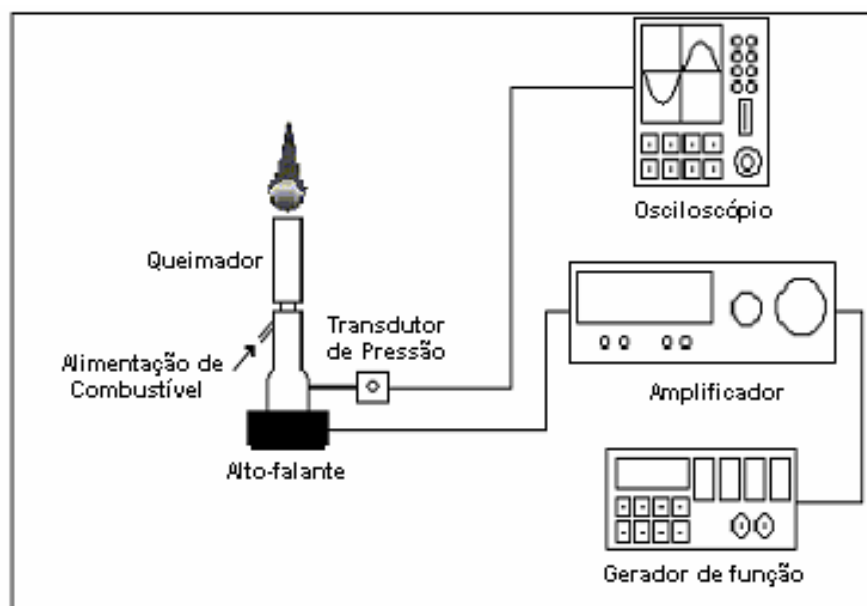


Figura 3.9 Esquema do sistema de atuação e leitura da pressão acústica

3.1.4.1 Calibração do Transdutor de Pressão e Amplificador de Carga

Para ajuste dos valores obtidos no uso do transdutor de pressão, foram realizadas algumas medidas de correções no intuito de se garantir maior precisão nos resultados. Para tanto, a correção desses dados foram baseados em métodos adotados a partir do modelo de calibração realizado por Flügel (2006), o qual apresenta uma descrição completa dos dispositivos e dos procedimentos adotados. Em seu trabalho foram escolhidos aleatoriamente, três conjuntos de transdutores e amplificadores de carga, dentre eles, o que foi utilizado neste experimento, denominado de T₃.

De acordo com o seu trabalho, a sensibilidade de cada transdutor foi ajustada no amplificador de carga de acordo com a indicação do fabricante. Estes conjuntos de transdutores foram montados em um calibrador e avaliados, depois de comparado com o conjunto de referência, o transdutor T₆, o qual serviu como padrão de calibração para os demais transdutores. Após a calibração constatou-se que não houve problemas nos transdutores de pressão, porque quando estes foram testados em conjunto com o amplificador de referência não foram percebidos desvios consideráveis. As apresentações dos resultados de calibração relatadas a seguir foram em relação à frequência e amplitude.

Na calibração do conjunto em relação à frequência, os resultados encontrados estão plotados na Figura 3.10 Os resultados indicaram que as medidas de frequência tiveram uma clara concordância com as obtidas em relação à do conjunto de referência.

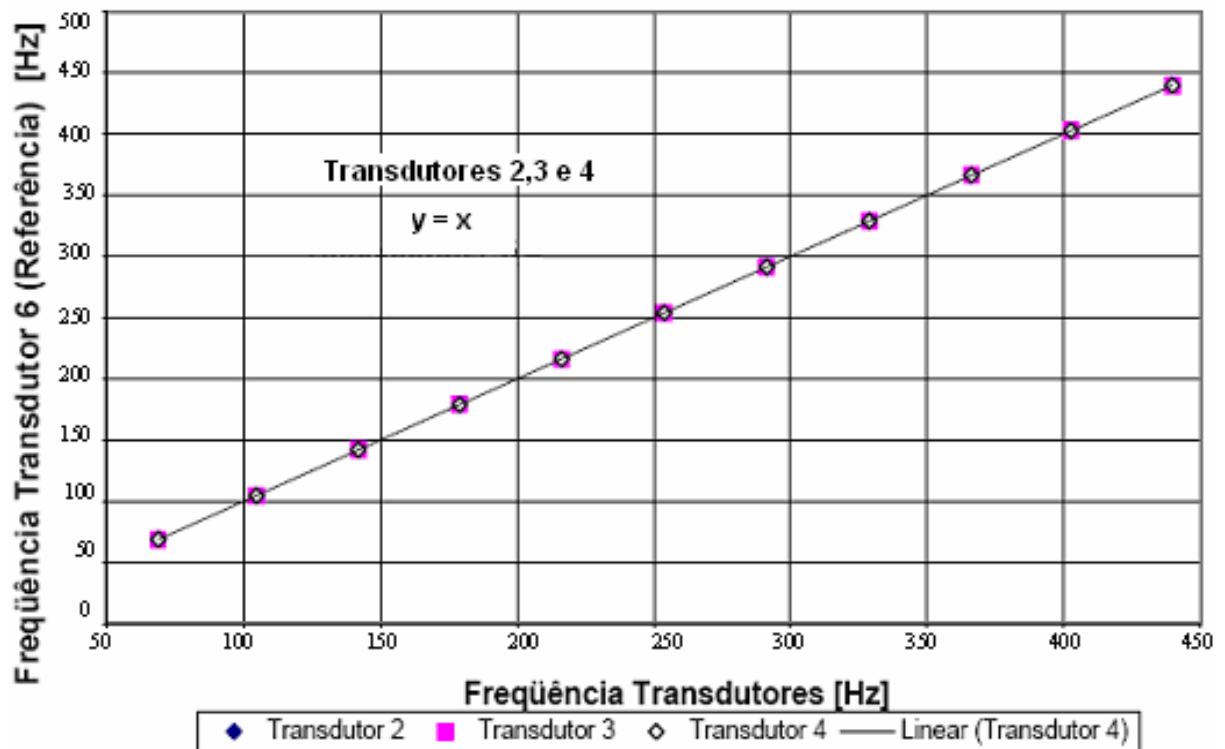


Figura 3.10 Calibração do transdutor T_3 em relação à frequência (Flügel, 2006)

Quanto às amplitudes, a Figura 3.11 mostra os resultados obtidos quando se selecionou na escala de 2 mbar/V. Nesta escala observou-se que alguns dos amplificadores estavam desajustados, fazendo com que fossem realizadas as correções de calibração. A mesma calibração também serviu para as demais escalas de 1, 5 e 10 mbar/V.

Como neste trabalho se utilizou o transdutor T_3 , a Figura 3.11 apresenta a equação que foi usada para fazer a correção dos dados obtidos da pressão do transdutor no queimador. A equação (3.2) representa esta correção.

$$Y = 0,9825.X - 0,0019 \quad , \quad (3.2)$$

onde X representa a amplitude de referência T_6 , e Y o resultado da calibração para amplitude do transdutor T_3 .

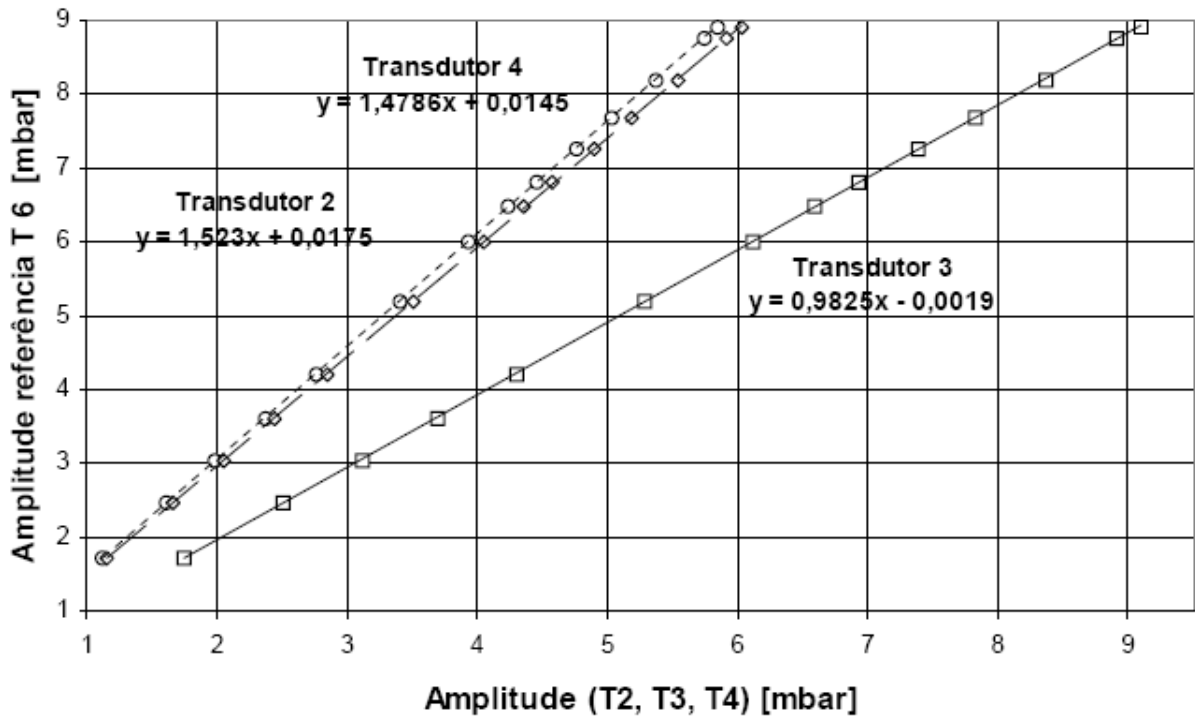


Figura 3.11 Resultado das calibrações dos transdutores de pressão em termos de amplitude Flügel (2006)

Na conclusão de seu trabalho, Flügel (2006) relatou que os procedimentos de calibração nos transdutores evidenciaram que os mesmos estavam em boas condições de uso. Porém os amplificadores de carga estavam desregulados de modo que os conjuntos constituídos do transdutor, amplificador e cabos precisaram ser ajustados frente ao conjunto de referência.

Neste trabalho, utilizou-se a equação descrita anteriormente para realizar as correções dos dados obtidos de pressão acústica gerados pelo sinal do transdutor. Depois que os dados foram corrigidos verificou-se que houve pouca diferença dos dados originais, chegando somente a diferenças da ordem de no máximo 1,5%. Esses dados, já com as devidas correções, estão expostos a seguir na Tabela 3.5.

3.1.5 Sistema de aquisição de dados.

Este sistema é formado pelos equipamentos que detectam a concentração de fuligem durante a queima do combustível. Faz parte deste sistema o monocromador, fotomultiplicadora e o osciloscópio, além dos equipamentos auxiliares, como: a fonte, medidor de pressão e as lentes ópticas. O Laser de CO₂ embora não seja um equipamento de aquisição de dados, é, no entanto listado neste conjunto, sendo que o mesmo é utilizado somente para gerar o sinal de incandescência para posteriormente ser lida pelo sistema. O conjunto em funcionamento permite a realização de coleta do sinal de fuligem na chama.

3.1.5.1 Laser de CO₂

Os Lasers do CO₂, tanto do ponto de vista industrial quanto científico, é um dos mais importante dos lasers de gás. Este laser pode fornecer potências contínuas que vão desde a fração de watt nas aplicações científicas até dezenas de quilowatts no processamento de materiais, com rendimentos notáveis (até 30%). O laser de CO₂ também pode fornecer pulsos intensos muito rápidos de alguns mJ até alguns kJ para aplicações em pesquisa de fusão nuclear controlada. Existem vários tipos e modelos destes lasers tendo em comum o meio ativo, porém diferenciando-se profundamente quanto à estrutura interna e, sobretudo quanto às características funcionais (Cartens, 1995).

Para este experimento utilizou-se o laser de CO₂ pulsado, Tachisto, modelo 550, sintonizável de 9,2 a 10,7 μm , refrigerado a água. A taxa de repetição do laser é da ordem de 60 pulsos/minuto. O feixe de saída é colimado por uma lente de sal (BaF₂). O equipamento em pleno funcionamento trabalha com uma tensão de descarga de aproximadamente 26 kV.

O sinal da energia do laser foi medido através de um monitor de energia de marca Gentec e modelo PRJ-M. A leitura de energia é em mJ, sendo que cada leitura (ver Tabela 3.3) é uma média de 10 pontos

Para as medidas de concentração de fuligem, o feixe de laser é focalizado em uma pequena região da chama e o sinal da incandescência é medido pelo sistema de detecção. Mudando a altura da chama, pode-se mapear o sinal da incandescência, que é proporcional à concentração de fuligem na mesma.

3.1.5.2 Monocromador Spex 1872

O monocromador é considerado como o sistema de filtragem de sinal. Utilizou-se o da marca Spex, modelo 1872 de 0,5m de caminho óptico. A coleta da radiação foi feita utilizando-se uma lente de quartzo de diâmetro (\varnothing) = 2 ”, sendo que a imagem da chama investigada é projetada diretamente na fenda de entrada do monocromador. Para todas as condições de trabalho as fendas do monocromador foram fixadas em 500 μ m, a fim de manter uma uniformidade dos dados coletados.

A luz proveniente das partículas contidas na chama (fuligem) que sofreram incandescência induzida pelo laser é focalizada pela lente na entrada do monocromador e são detectadas por uma fotomultiplicadora instalada na saída do mesmo (Figura 3.2). A fotomultiplicadora é constituída de um tubo fotomultiplicador Hamamatsu R977 trabalhando sob uma tensão de 750V, sendo que o sinal fornecido por ela é monitorado pelo osciloscópio para processamento do mesmo. O comprimento de onda selecionado para efetuar a leitura da incandescência foi 460 nm, que é uma região espectral que não sofre interferência dos radicais CH e C₂ fortemente presente na queima de GLP e que emitem próximo desta região.

3.1.5.3 Osciloscópio

Neste trabalho o osciloscópio utilizado foi equipado com um módulo 7D20 da marca Tektronics. Este arranjo destinou-se ao registro da amplitude de sinal de incandescência. Seu valor de amplitude é dado em V, e dependendo da faixa de valores a que se deseja adquirir, a sua escala pode variar de 10 mV em até 5 V.

Os resultados aqui apresentados são uma média dos dados obtidos para cada combinações de excitação acústica estudada. Tem-se que cada leitura dos dados (por exemplo, pressão acústica e sinal de fuligem) fornecidos pelo osciloscópio, e aqui impressos, é uma medida de várias leituras, ou seja, a pressão acústica é uma média de 32 medidas, enquanto que, para o sinal de fuligem cada leitura é uma média de 64 medições. Além disso, cada leitura foi repetida duas vezes.

É importante comentar que os valores da pressão acústica, Tabela 3.5, que são fornecidos em mV posteriormente foram transformados em mbar.

3.1.6 Normalização dos dados finais da concentração de fuligem

Durante a aquisição dos dados experimentais a energia do laser de CO₂ sempre decaía com o passar do tempo. Em função disto, todos os valores de fuligem obtidos nas diversas condições de trabalho tiveram que ser normalizados.

Apesar de sua simplicidade, fez-se aqui uma breve descrição do seu procedimento, utilizando neste caso uma determinada condição de atuação, ou seja, frequência de 250 Hz e pressão acústica 2,9 mbar. A Tabela 3.3 apresenta estes resultados. A tabela é composta consecutivamente pelas seguintes colunas: frequência (neste caso 250 Hz), posição do laser na

chama, número amostras (1ª e 2ª amostra) para cada posição, sinal de fuligem sem normalização, sinal de fuligem normalizado e os valores da energia do laser.

A normalização consistiu no seguinte: tomou-se a energia de maior valor (coluna da energia) e dividiu-a por todos os demais valores desta mesma coluna. Em seguida, cada um desses resultados é multiplicado pelos dados correspondentes a cada valor de fuligem na coluna de condição não normalizados. Esta operação resulta então nos valores normalizados.

Tabela 3.3 Amostragem dos dados de normalização do sinal de fuligem baseados na energia do laser para frequência de 250 Hz e pressão acústica 2,9 mbar.

Fq (Hz)	Posição (cm)	Pressão Acústica: 2,9 mbar			Energia (mJ)
		Amostras	S / Normalização (mV)	Normalizados (mV)	
250	0	-	0	0	180
	3	1ª	776	825,1	174
		2ª	800	850,6	174
	6	1ª	750	867	160
		2ª	840	971	160
	10	1ª	900	900	185
		2ª	845	845	185

O mesmo procedimento foi adotado para a normalização dos valores de fuligem para as demais condições de trabalho, ou seja, para 250 Hz, 450 Hz, 500 Hz, 650 Hz e 800 Hz, sendo que esses resultados estão expostos no apêndice B. Nas mesmas tabelas, para cada região da chama estudada, também estão inclusos os dados da segunda repetição (2ª amostra) do experimento. Os gráficos e imagens dos resultados e discussões apresentados no capítulo seguinte referem-se aos dados da primeira amostra.

3.2 Descrição dos Testes Preliminares

Para se escolher quais seriam as condições de atuações acústica que seriam feitos os ensaios de verificação da presença de fuligem, primeiramente foram realizados ensaios sobre o comportamento acústico do queimador, ou seja, suas frequências de ressonância, pois nessas condições de atuação podem-se atingir amplitudes mais altas e intensificar os efeitos do campo acústico sobre a chama. Desta forma, para esta primeira etapa, no intervalo de 10 a 800 Hz, optou-se pela escolha das frequências da Tabela 3.4.

Para cada frequência escolhida aplicaram-se os sinais de entrada de 2 V, 4 V, 6 V, 8 V e 10 V no alto-falante, sendo que 10 V é o limite suportado por este. Tem-se que cada sinal de entrada corresponde a uma determinada amplitude do sistema.

Tabela 3.4 Valores dos sinais de entrada e das frequências pré-determinadas.

Sinal de entrada (V)	2 – 4 – 6 – 8 – 10
Frequências (Hz)	10 – 75 – 150 – 200 – 250 – 350 – 450 – 500 – 575 – 650 – 700 – 800

As escolhas destas frequências não tiveram um critério rigoroso, basearam-se tão somente, na percepção visual no momento em que ocorria uma mudança na estrutura da chama e na redução da pluma de fuligem, que era observada quando se alterava a combinação de alguns valores entre o amplificador e o gerador, ou seja, aquelas combinações em que se observava uma resposta mais acentuada do conjunto, quando as condições de oscilações eram impostas.

Embora se tenha feito experimentos com frequências acima de 800 Hz, por exemplo, 900, 1000 e 1200 Hz, as escolhas das frequências para continuação dos testes foram somente até 800Hz, pois a partir deste valor, as frequências não mais apresentaram nenhuma influência na estrutura da chama. Este mesmo fenômeno, embora em condições de trabalhos diferentes, foi também observado no trabalho de Bastos (2002), que usando este mesmo queimador constatou que para as frequências acima de 700 Hz, o aumento da amplitude pouco afetava a estrutura da chama, pois a mesma voltava a apresentar características semelhantes às condições sem oscilação.

A segunda etapa do procedimento teve o objetivo de determinar as pressões acústicas, neste caso, utilizando o transdutor de pressão no corpo do queimador. Como referência foram utilizadas aquelas combinações de valores (frequência e sinal de entrada da Tabelas 3.4) anteriormente estabelecidas.

Em seguida, com o conjunto em funcionamento, verificaram-se para cada combinação de atuação, quais eram os valores gerados pelo transdutor, os quais eram lidos diretamente pelo osciloscópio. Em todos os casos foi-se gradativamente amplificando o sinal do alto-falante combinando cada um de seus valores com um dos valores de frequência, até que a tensão máxima fosse atingida.

Esta etapa, particularmente teve o objetivo de verificar como o escoamento do conjunto alto-falante – queimador responde à imposição de um campo acústico, ou seja, estes resultados permitiram analisar como a pressão acústica se comportou ao longo da câmara do queimador em relação às amplitudes e frequências, impostas no conjunto.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados da resposta do sistema de atuação acústica no queimador. Na primeira coluna estão todas as frequências utilizadas, na segunda os sinais de entrada no alto-falante e na terceira coluna as pressões acústicas fornecidas pelo transdutor.

Tabela 3.5 Resultados da pressão em função das frequências e sinais de entrada aplicados ao queimador.

Fq (Hz)	Sinal de entrada (V)	Pressão Acústica (mBar)	Fq (Hz)	Sinal de entrada (V)	Pressão Acústica (mBar)
10	2	0,5	450	2	4,9
	4	0,5		4	10,3
	6	0,5		6	14,7
	8	0,5		8	20,6
	10	0,5		10	24,6
75	2	0,7	500	2	7,9
	4	1,0		4	16,7
	6	1,3		6	23,1
	8	1,5		8	28,5
	10	2,0		10	34,9
150	2	1,0	575	2	14,7
	4	3,4		4	10,3
	6	4,9		6	12,3
	8	6,9		8	16,2
	10	7,9		10	16,7
200	2	2,9	650	2	9,8
	4	4,9		4	18,2
	6	6,9		6	25,5
	8	8,1		8	32,9
	10	8,1		10	38,8
250	2	2,9	700	2	8,3
	4	5,4		4	14,7
	6	7,9		6	21,1
	8	9,8		8	27,5
	10	11,3		10	30,9
350	2	2,6	800	2	2,9
	4	5,5		4	5,9
	6	7,4		6	8,3
	8	9,6		8	10,3
	10	11,2		10	11,6

A Figura 3.12 apresenta as curvas das pressões acústicas em função dos sinais de entrada na medida em que se alterava o valor da frequência.

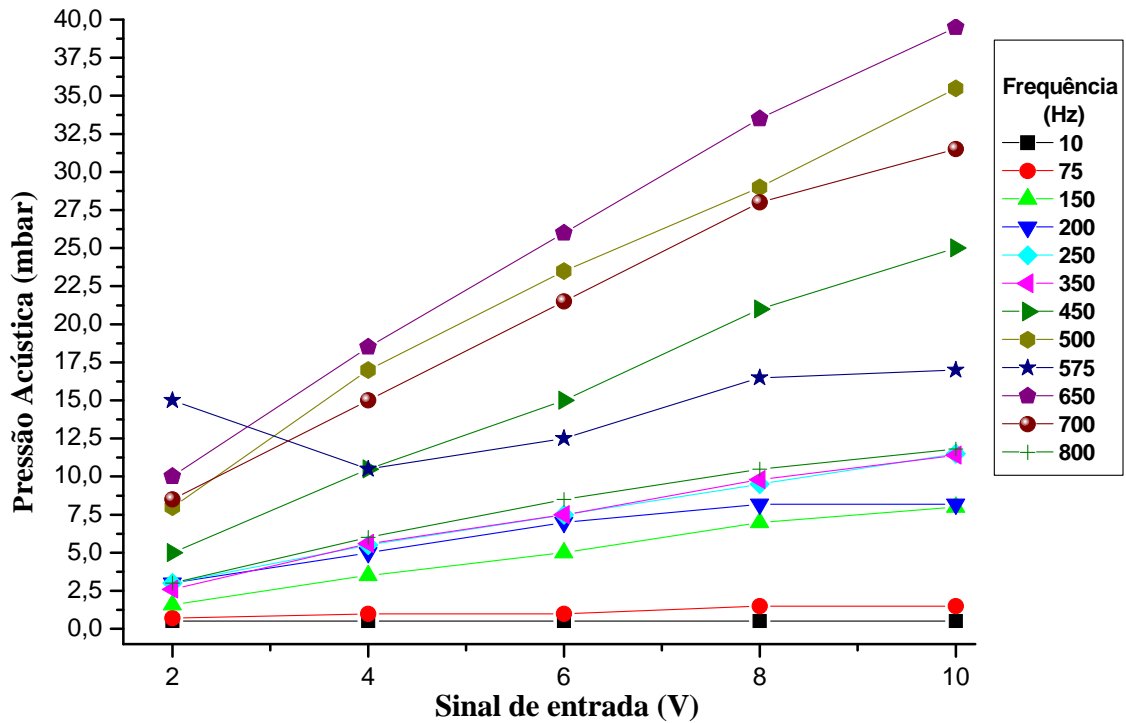


Figura 3.12 Resposta da pressão acústica em função do sinal de entrada

De acordo com a figura acima, percebe-se de forma mais clara que tanto o aumento da frequência como o aumento dos sinais de entrada foi favorável para o aumento da pressão acústica. Porém percebe-se que para algumas frequências de baixos valores há pouca resposta do sistema. Além disso, conforme mencionado anteriormente verifica-se que para frequências a partir de 800Hz começa haver uma redução acentuada da pressão acústica, significando que a excitação acústica passou a diminuir, ou a não ter mais influência considerável no sistema.

4 Resultados e Discussões

Neste presente capítulo descreve-se e comenta-se sobre o conjunto de resultados relevantes obtidos durante o estudo, pesquisas e testes laboratoriais para concretização do presente trabalho.

Na descrição dos resultados o capítulo foi dividido em duas seções: A seção 4.1 apresenta como o escoamento no queimador respondeu quando as condições de oscilação eram impostas. Ainda nesta seção se discute a escolha das condições de frequência e os resultados das pressões acústica que foram utilizadas para estudo das emissões de fuligem. A seção 4.2 apresenta os resultados para presença de fuligem e os comentários pertinentes.

Todos os resultados foram apresentados na forma de gráficos e imagens fotográficas das chamas, obtidas com uma câmera convencional, apresentada para facilitar o entendimento dos comentários. A escala dos gráficos foi padronizada de modo a facilitarem as suas comparações.

4.1 Análise Acústica do Conjunto Queimador – Sistema de Atuação

A análise do queimador e sistema de atuação acústica referem-se aos resultados que foram obtidos sobre a resposta que a pressão acústica apresenta em função da frequência imposta na atuação.

Conforme mencionado anteriormente, inicialmente foram feitas as escolhas das frequências de excitação nas quais se obteve maior resposta favorável para a redução de fuligem apenas observando a mudança na estrutura da chama. Para estas frequências

escolhidas, amplificou-se o sinal no alto-falante até que a tensão máxima suportada por este fosse atingida, 10V, para então se medir os valores de pressão acústica no escoamento de combustível para aquelas condições de atuação.

A Figura 4.1 mostra o comportamento da pressão acústica fornecida pelo transdutor no queimador em função da frequência de oscilação, quando foi imposta o máximo sinal de entrada, 10V.

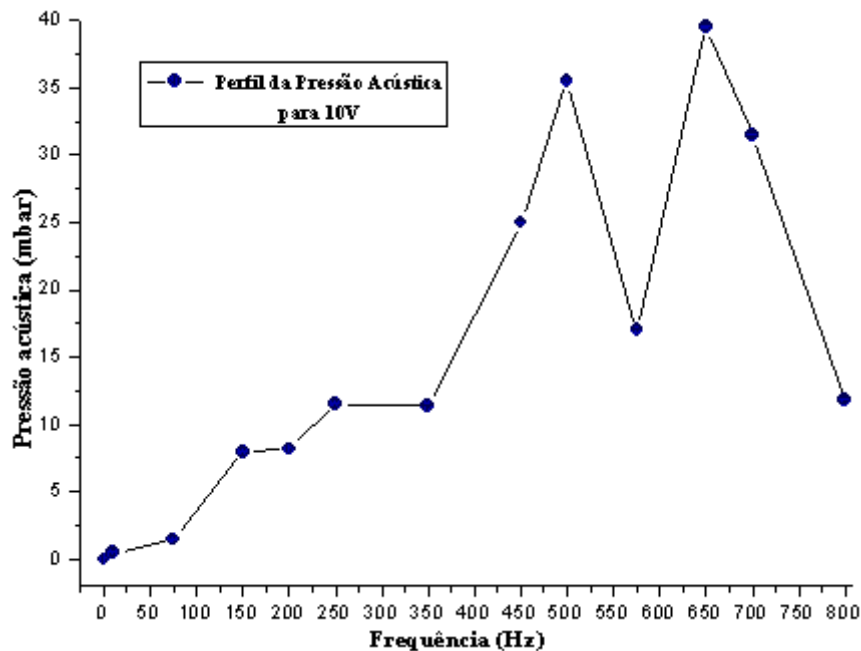


Figura 4.1 Perfil da Pressão Acústica em função da Frequência para tensão no alto-falante de 10 V.

Além de mostrar os resultados para a condição limite de 10 V, a Figura 4.2 mostra como se comportou a pressão acústica para tensões menores. Nota-se pela figura, que as frequências de 500 Hz e 650Hz correspondem às frequências naturais do sistema.

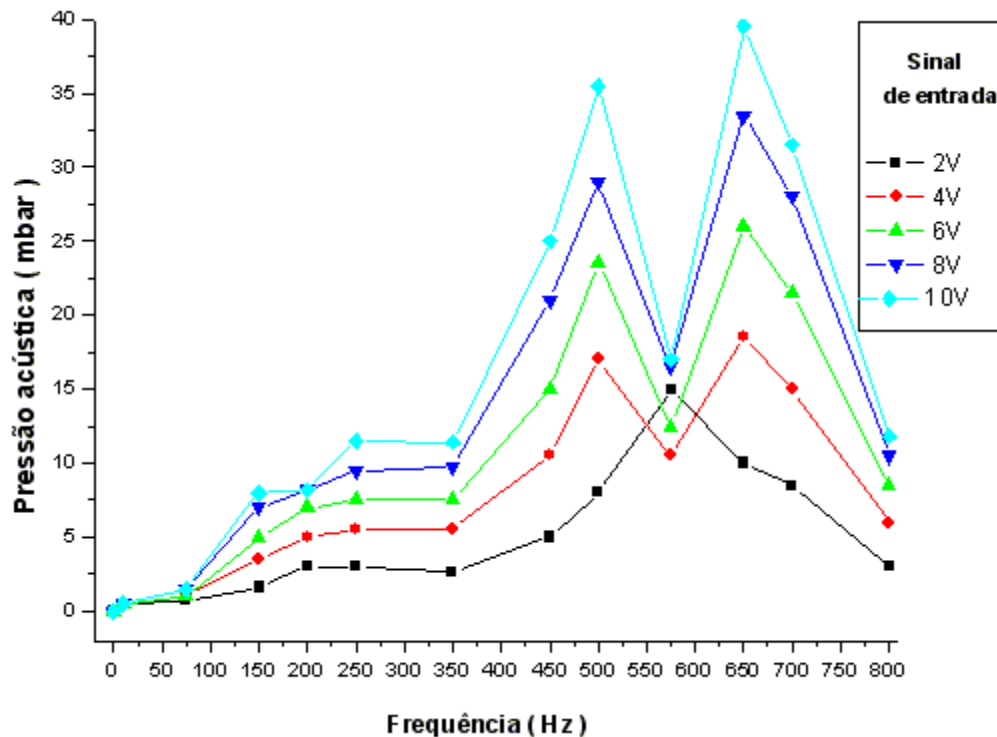


Figura 4.2 Resposta da atuação acústica em função do aumento do sinal de entrada.

De acordo com as Figuras 4.1 e 4.2, e também pela Tabela 3.5 pode-se perceber que existem algumas frequências que as suas influências no escoamento são bem discretas, o que poderá também causar pouca influência na redução de fuligem. Neste caso, escolheram-se somente algumas frequências para se realizar as análises do sinal de fuligem em função da pressão acústica. As frequências escolhidas foram as seguintes: 250 Hz, 450 Hz, 500 Hz, 650 Hz e 800 Hz.

Para 250 Hz o limite de atuação (10 V) foi de 11,3 mbar e em 450 Hz foi de 24,6 mbar. Já para as frequências ressonantes de 500 Hz e 650 Hz a pressão acústica máxima alcançou 34,9 mbar e 38,8 mbar, respectivamente. Para a frequência de 800 Hz, o valor máximo de pressão alcançada foi de 11,6 mbar.

4.2 Emissão de Fuligem

O sinal de fuligem ou de incandescência foi obtido na região central da chama em três diferentes alturas a partir da saída do queimador: 3 cm, 6 cm e 10 cm, para as condições com e sem oscilação. É importante comentar que apesar de terem sido feitos experimentos para se confirmar ou não a presença de alguma fuligem na posição 0 cm (posição que se localiza na saída do queimador), a sua presença nos gráficos foi omitida, pois, para todas as condições de ensaio esta posição sempre apresentou ausência total de fuligem.

A região central de uma chama difusiva, embora não seja a região de maior concentração de fuligem, é, porém, uma das regiões de maiores dificuldades para se eliminá-la, devido à dificuldade da penetração do oxigênio para oxidação do combustível e, conseqüentemente, inibição da formação de fuligem, ou mesmo para oxidar a fuligem formada. Rocha (2006) mostrou que as oscilações acústicas introduzem oxigênio para o lado interno do jato de combustível; contudo, na região central a sua concentração ainda é muito baixa. Desta forma, a linha de centro do jato de combustível é uma importante região para se estudar a supressão de fuligem pela oscilação acústica.

A Figura 4.3 apresenta a imagem da chama não confinada queimando GLP para a condição sem atuação acústica. Conforme se percebe, a chama possui uma intensa luminosidade, característica que é peculiar das chamas laminares com alta presença de fuligem.

Como apresentado nos próximos gráficos, para o caso sem oscilação (frequência igual a zero), a presença de fuligem aumenta ao longo do eixo central entre 3 cm e 10 cm, indicando que a região de investigação é uma zona de formação de fuligem para o caso sem excitação acústica.

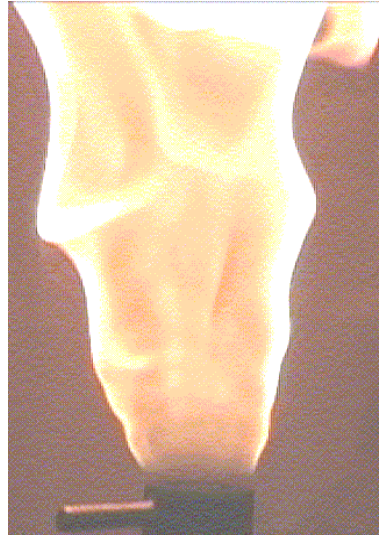


Figura 4.3 Fotografia da chama sem oscilação acústica

A Figura 4.4 apresenta o sinal de fuligem em função da amplitude de oscilação para a frequência de 250 Hz. Comparando com a situação sem oscilação (pressão acústica igual a zero), observa-se que há uma tendência média de redução de presença de fuligem para todas as posições analisadas quando o campo acústico é intensificado. Introduzindo o campo acústico, a presença de fuligem nas regiões de 6 cm e 10 cm foi praticamente a mesma. Isto indica que nesta região da chama não há aumento de formação de fuligem. Para o presente caso, a máxima pressão acústica alcançada foi de 11,3 mbar, sendo que para esta pressão a redução do sinal de fuligem para as alturas de 3 cm e 10 cm foi de 410 mV e 480 mV, respectivamente.

Ainda na Figura 4.4 nota-se que existem condições em que o sinal de fuligem apresentou aumento; isto pode ser observado na posição de 10 cm no intervalo entre 2,9 mbar e 5,4 mbar em que o sinal que era de 900 mV passou para 1076 mV. O mesmo comportamento também ocorreu para as posições de 3 e 6 cm; indicando que não é um erro experimental, mas uma mudança na estrutura da chama observada em instantes e posições diferentes. A complexa interação entre a estrutura da chama pulsada e o mecanismo reacional de formação da fuligem leva a esse comportamento. Contudo, a condição experimental

proposta para o presente trabalho não permite uma investigação com o nível de detalhe exigido para uma explicação conclusiva.

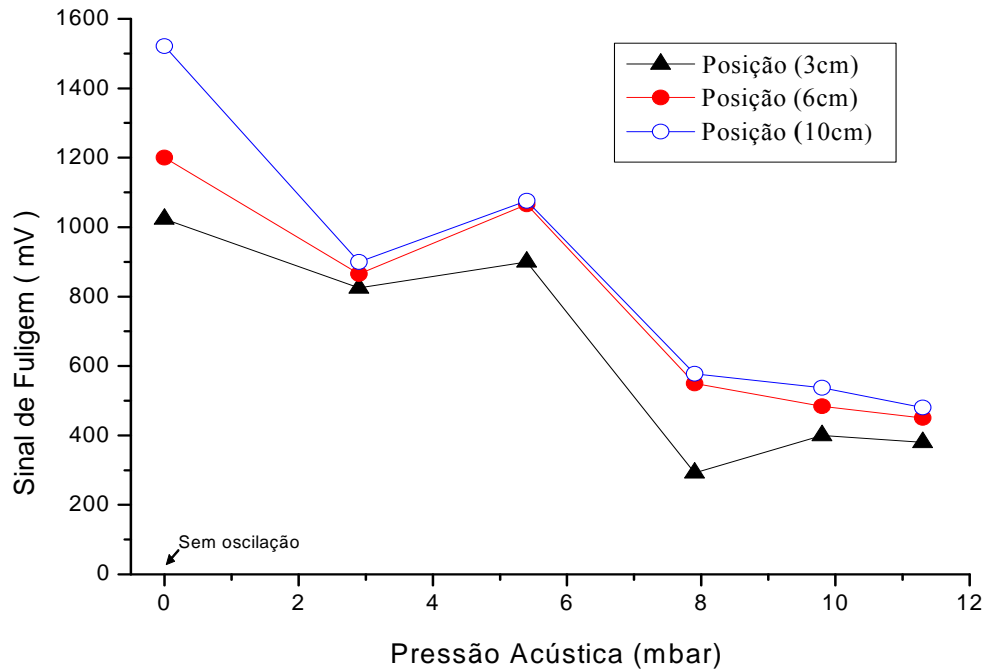


Figura 4.4 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 250 Hz.

Apesar de em alguns instantes ocorrer um aumento da presença da fuligem com o aumento da pressão acústica, fato que também ocorreu para outras frequências, na seqüência, se a pressão acústica era aumentada, o sinal de fuligem voltava a diminuir.

De uma maneira geral, a aplicação de um campo acústico, mesmo com baixa amplitude, reduz a presença de fuligem na região central da chama em relação à situação sem atuação. Além disso, o comportamento médio das curvas indica que o aumento da amplitude reduz a fuligem.

A Figura 4.5 apresenta algumas fotografias da chama para frequência de 250 Hz com crescentes amplitudes de pressão acústica. Nota-se que a medida que aumenta-se a pressão

acústica a chama inicialmente difusiva e laminar tende a se tornar gradativamente mais turbulenta, na região mais próxima ao queimador, onde a chama apresenta formato mais delgado.

Também nas proximidades da base do queimador surge uma região azulada que se intensifica com o aumento da pressão acústica. Essa característica é decorrente do ar atmosférico ser carregado para essa região (*air entrainment*) criando uma condição de combustão pré-misturada. Segundo Rocha (2006), a presença do campo acústico em uma chama difusiva intensifica a quantidade de oxigênio na região interna do jato devido ao incremento do efeito *air entrainment*, e onde isso acontece, o comportamento da chama passa a ser de uma chama pré-mistura com oxidante em excesso.

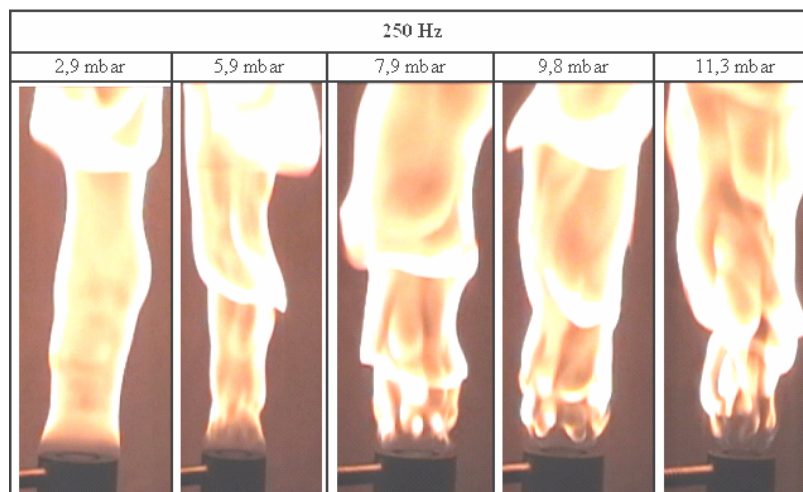


Figura 4.5 Imagens fotográficas para a frequência de 250 Hz.

Para o caso de uma chama difusiva a sua transformação de laminar para turbulenta está relacionada com o número de Reynolds do jato de combustível. Por exemplo, considerando um combustível gasoso cujo jato emerge de um orifício circular de diâmetro d_j em uma atmosfera estagnada de ar. Quando a velocidade do jato aumenta, as características da chama mudam. Para os jatos de baixa velocidade a taxa de mistura com ar estagnado é

baixa e a chama é longa e suave (laminar). O comprimento da chama laminar aumenta quase que linearmente com a velocidade do jato até um ponto onde a chama começa a se tornar turbulenta. Deste ponto, o comprimento da chama diminui devido ao rápido processo de mistura turbulenta. Na região de completo desenvolvimento turbulento, o aumento do número de Reynolds praticamente não afeta mais o comprimento da chama, sendo que a justificativa para esse fato é que nessa região o aumento da taxa de mistura entre combustível e oxidante é aproximadamente proporcional ao número de Reynolds (Turns, 1996).

Para o presente caso, a velocidade média da chama não muda, sendo que a transição de laminar para turbulenta ocorre em função da flutuação acústica da velocidade, ou velocidade acústica, que dependendo das condições de excitação, pode suplantar a velocidade média do escoamento, conforme observado por Flügel (2006). Além disso, Mallinson *et al.* (2001) observaram para um jato de gás sem reação química, submetido a pulsações e emergindo de um orifício, que tanto a velocidade média, como a sua flutuação acústica, decaem à medida que o jato se distancia da saída do orifício. Transpondo essa observação para o presente caso, à medida que o jato de gás se distancia do queimador o escoamento sofre uma desaceleração, com isso as flutuações reduzem e sua influência sobre a estrutura da combustão diminui.

Para a frequência de 450 Hz, Figura 4.6, os resultados são qualitativamente semelhantes aos de 250 Hz. No entanto, para todas as condições de pressão acústica, a redução da presença de fuligem foi bem menor do que para 250 Hz, apesar das maiores amplitudes alcançadas. A Figura 4.7 também mostra que a presença do campo acústico nesse caso modificou bem menos a estrutura da chama do que para 250 Hz. Isso é um indicativo de que apenas aumentar a amplitude em uma dada frequência não seja suficiente para se alcançar modificações consideráveis na estrutura da chama. Segundo Flügel (2006), o que determina modificações na estrutura de combustão é como a frequência e a amplitude irão influenciar o

deslocamento acústico, sendo que as maiores modificações acabam por acontecer quando o sentido do escoamento se reverte. Para o presente caso não foi possível fazer esse tipo de análise.

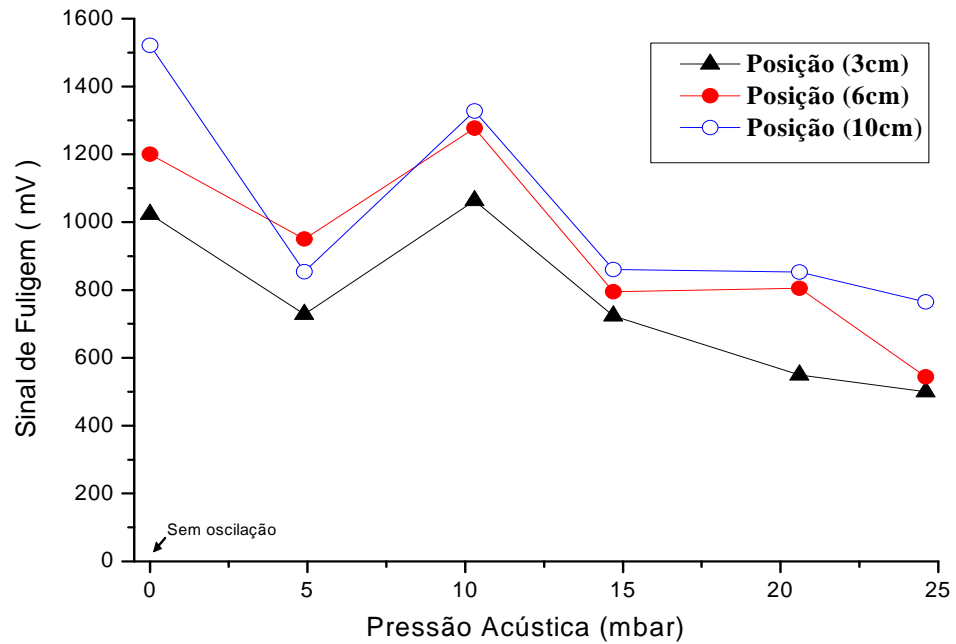


Figura 4.6 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 450 Hz.

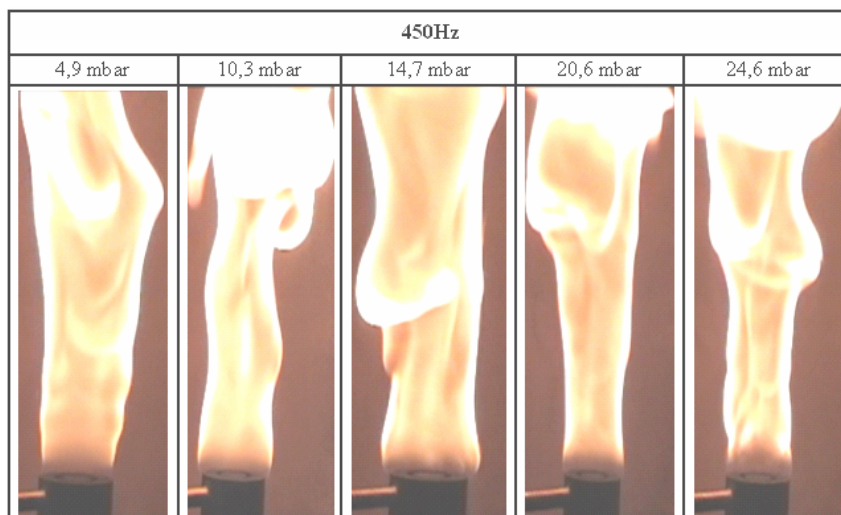


Figura 4.7 Imagens fotográficas para a frequência de 450 Hz.

Ainda na Figura 4.6, comparando os resultados da condição sem atuação com o de maior atuação, ou seja, pressão acústica de 24,6 mbar, tem-se: redução de 1023 mV para 500 mV na posição de 3 cm, redução de 1200 mV para 544,5 mV na posição 6cm, e redução de 1521 mV para 765,8 mV para a posição de 10 cm. Apesar do sinal ter reduzido abaixo da metade, estes valores são superiores quando a máxima amplitude possível foi aplicada a 250 Hz.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram o sinal da fuligem e as imagens da chama, respectivamente, para frequência de 500 Hz. Nota-se pelas imagens da Figura 4.9, que as oscilações modificaram a chama de forma mais próxima ao que aconteceu com a frequência de 250 Hz. Novamente houve formação de uma região de *air entrainment* na base do queimador e redução de fuligem acentuada para as maiores amplitudes, conforme Figura 4.8.

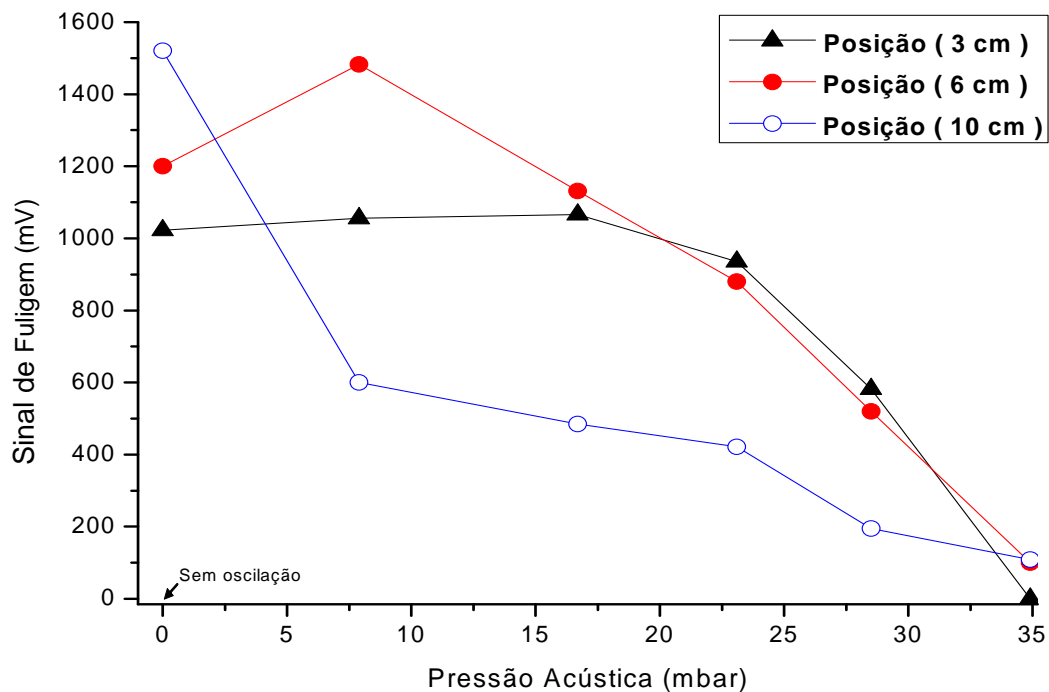


Figura 4.8 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 500 Hz.

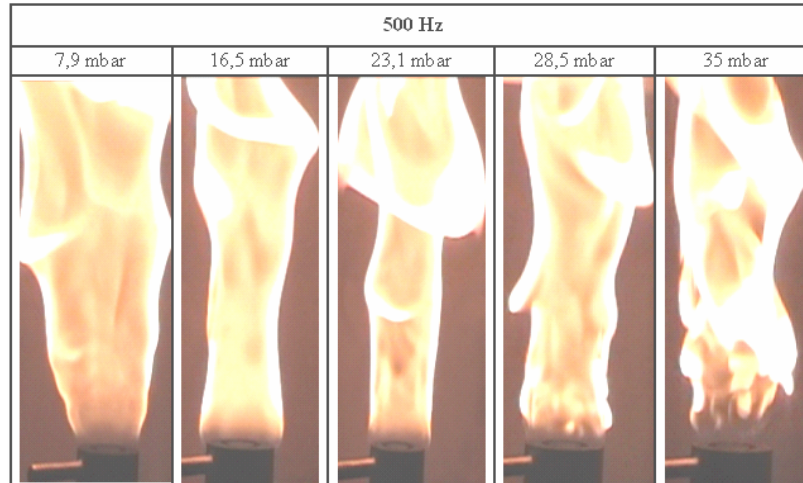


Figura 4.9 Imagens fotográficas para a frequência de 500 Hz.

No caso de 500 Hz, que é uma frequência de ressonância, um comportamento particular é observado para supressão da fuligem na Figura 4.8. Neste caso a máxima pressão acústica para 10 V aplicado ao alto-falante foi 35 mbar. Até 15mbar a região entre 3 e 6 cm permanece como uma zona de formação de fuligem, o sinal da fuligem cresce entre esses dois pontos. Acima de 15 mbar praticamente não há mais formação de fuligem entre 3 e 6 cm e uma boa parte da fuligem formada é oxidada entre 6cm e 10cm. Em 35 mbar o sinal de fuligem é baixo para qualquer das três posições.

Apesar do bom resultado para a combinação 500 Hz e 35 mbar para reduzir a fuligem na região central da chama, a Figura 4.9 mostra que o aspecto geral desta ainda apresenta coloração amarela, o que denota a presença de fuligem entre a linha de centro da chama e sua zona de reação. Santoro *et al.* (1987) mostraram que a maior concentração da fuligem em uma chama difusiva ocorre entre a zona de combustão e linha de centro do jato de combustível. Assim, apesar da maior penetração de ar carregado pela presença das oscilações, este não foi suficiente para supressão completa da fuligem nessa região da chama.

Para a frequência de 650 Hz percebe-se que tanto as curvas da Figura 4.10 como as imagens da Figura 4.11 possuem comportamentos bem diferenciados dos demais casos. Entre

as condições estudadas, os resultados mostram que esta condição foi a que apresentou melhor resposta para a redução de fuligem nas chamas estudadas.

Em geral, observa-se que em todas as regiões da chama há uma redução acentuada do sinal de fuligem. Apesar disso, nota-se que para as curvas de 3 cm e 6 cm, entre as pressões de 10 e 18 mbar, a chama apresenta um sensível crescimento na formação de fuligem. Porém, na medida em que a pressão acústica aumenta, os sinais de fuligem desta curva também apresentam sucessivas reduções até à pressão de 33 mbar, quando então neste ponto o sinal de fuligem chega a zero. Entre as regiões de 6 cm e 10 cm há também uma zona de sucessivas reduções do sinal de fuligem, porém, especificamente para a posição de 10 cm esta redução ocorre de forma mais acentuada, indicando que nesta zona não há mais a presença de fuligem, ou então que foi totalmente consumida.

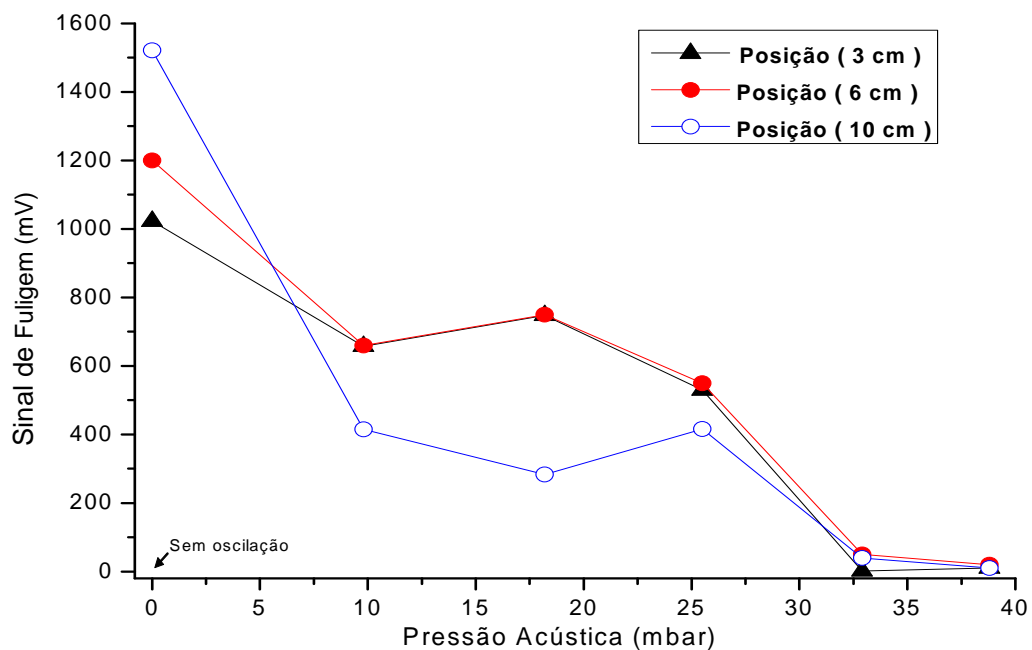


Figura 4.10 Sinal de fuligem em função a pressão acústica para frequência de 650 Hz.

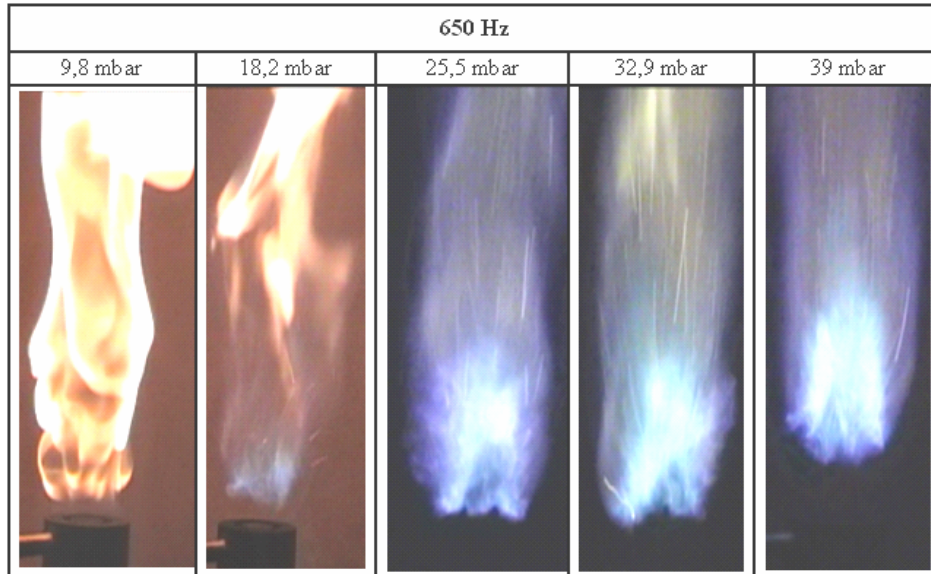


Figura 4.11 Imagens fotográficas para a frequência de 650 Hz.

As imagens da Figura 4.11 mostram que para a frequência de 650 Hz à medida que a amplitude de oscilação aumenta, a estrutura da chama passa a assemelhar-se com a de uma chama pré-misturada. A coloração mais fortemente azulada a partir de 25,5 mbar também denota que a redução da fuligem ocorre não somente na linha central do jato, mas por toda a chama. Contudo, também se nota que o aumento da amplitude impõe um descolamento da chama ou flutuação (“lift” na língua inglesa). Em função da estrutura de pré-mistura e da possibilidade de que as flutuações de velocidade atinjam valores superiores ao da velocidade média de injeção do combustível, a chama se estabiliza mais a jusante do queimador, onde há equilíbrio entre a velocidade média do escoamento e sua flutuação com a velocidade da chama.

Para a frequência de 800 Hz, Figuras 4.12 e 4.13, o maior valor da pressão acústica alcançada quando se aplicava ao alto falante a máxima tensão, 10 V, foi de 11,6 mbar. Os resultados apresentados mostraram que o campo acústico não foi eficiente para reduzir a presença da fuligem e em alguns casos o sinal da fuligem aumentou.

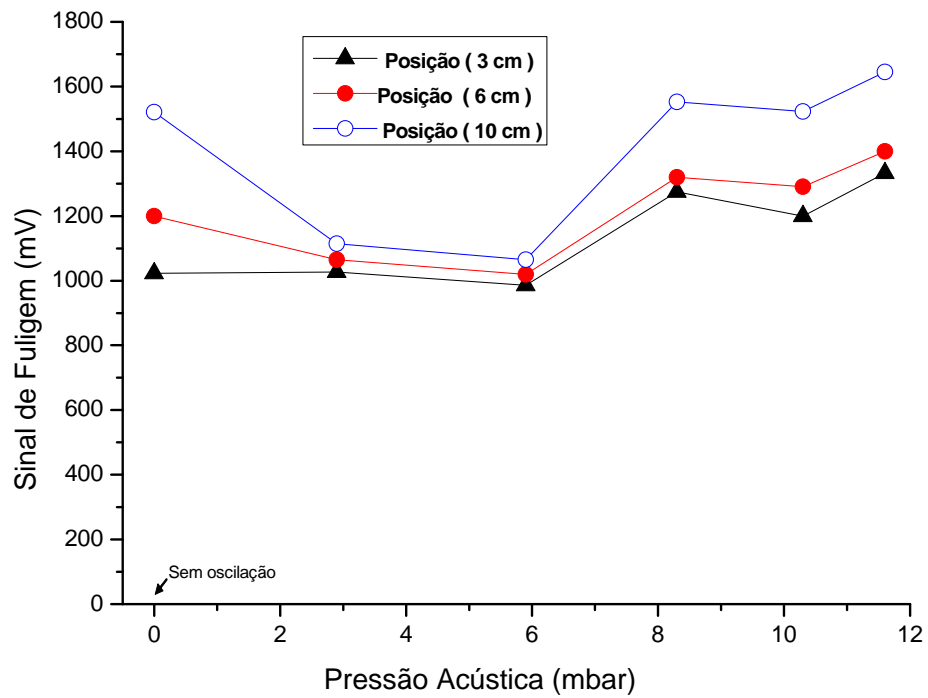


Figura 4.12 Sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 800 Hz

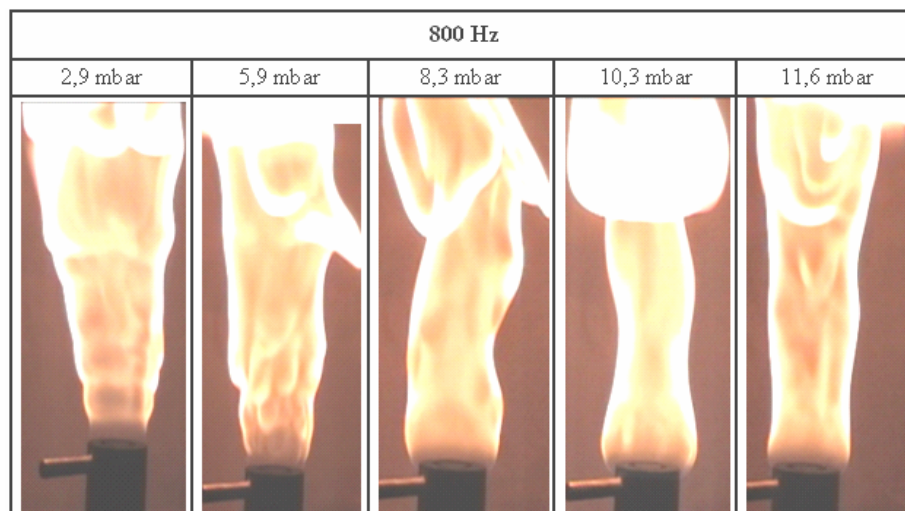


Figura 4.13 Imagens fotográficas para a frequência de 800 Hz.

Os bons resultados para supressão de fuligem nas frequências ressonantes e o péssimo resultado para frequências maiores, por exemplo, 800 Hz, podem estar relacionadas com o

deslocamento da onda acústica as jusantes do queimador. Flügel (2006) investigou experimentalmente a influência do deslocamento das ondas acústicas na combustão de álcool em spray excitada acusticamente. Naquele experimento, o alto-falante excitava o escoamento do ar de combustão. No caso da frequência de ressonância, baseando-se nos cálculos de deslocamento, uma partícula que segue o escoamento passa através de uma posição fixa próxima do queimador mais de duas vezes e tal efeito se intensifica quando a pressão acústica aumenta. Contudo, para frequências maiores que 700 Hz, o deslocamento acústico é discreto, e nenhuma modificação na composição dos gases de combustão foi observada, principalmente nos gases de oxidação parcial CO e hidrocarbonetos não queimados.

Em adição, Rocha *et al.* (2006) mostraram que a excitação acústica em chamas difusivas nas frequências de ressonância introduz grandes quantidades de ar no lado do combustível da chama, comportando-se como uma chama parcialmente pré-misturada. Assim, baseando-se nas considerações de Flügel (2006) e Rocha *et al.* (2006), para o presente experimento é possível imaginar que para as frequências ressonantes, maiores deslocamentos acústicos são atingidos e taxa de mistura entre os reagentes aumenta. Então, a maior presença de oxigênio na região de formação de fuligem cria uma competição entre oxidação de combustível e formação de fuligem, o que é favorável à oxidação do combustível devido às reações mais rápidas, logo menos fuligem é observada nessa região. Além disso, para redução de fuligem o aumento da concentração de oxigênio acelera a sua oxidação.

Resultados semelhantes aos aqui encontrados também foram observados no trabalho de Ferreira (2001), em que através de tomografia da chama em um queimador pulsante notou que para frequências acima de 900 Hz para chamas de GLP predominantemente difusivas e próximas à condição estequiométrica, a presença de um campo acústico pouco alterava a geometria da chama. Rocha (2002), através de um experimento com um queimador pulsante

de gás natural em ambiente confinado, percebeu que quando as frequências estavam em torno de 1230 Hz não havia mais alteração significativa no processo de combustão.

Delabroy *et al.*, (1996) estudando a redução de poluentes através da queima do GLP em chamas difusiva com excitação acústica externa variando a frequência entre 0 a 2000 Hz, concluiu que os resultados para alterações na composição dos gases de combustão somente ocorrem entre 100 e 700 Hz, sendo que as alterações mais significativas ocorreram entre 150 e 300 Hz. Para as demais frequências não foi identificada alteração da composição dos gases em relação à condição sem oscilação.

Basicamente, os resultados aqui apresentados mostram que a frequência de oscilação imposta ao escoamento de gás combustível terá papel fundamental sobre como se dará o comportamento das flutuações no escoamento que emerge do queimador, visto que a frequência tem responsabilidade sobre o deslocamento acústico a jusante do queimador. A amplitude tem responsabilidade sobre o total de ar carregado para região de combustão, sendo que a tendência média, com algumas exceções, é de redução da fuligem com o aumento desta.

Para efeito de comparação e confirmação dos dados coletados neste experimento, os testes foram repetidos mais uma vez para cada condição de excitação acústica e em cada região da chama. Sendo assim, no apêndice A estão inclusos as figuras comparativas desta segunda coleta de dados do sinal de fuligem em função do aumento da pressão acústica para cada frequência utilizada; sendo que, os dados da primeira e segunda amostra estão inclusos nas tabelas no apêndice B.

5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos do campo acústico na redução de fuligem numa chama não pré-misturada durante a queima do GLP com ar ambiente.

Fez-se aqui uma comparação entre os sinais de fuligem obtidos com e sem atuação acústica, quando eram alteradas as condições de excitação, ou seja, a frequência e as pressões acústicas. A meta principal foi à obtenção de combinações de frequência e amplitudes de oscilação que minimizem a emissão de fuligem. Recorreu-se à técnica não intrusiva de incandescência induzida por laser para avaliar a presença de fuligem na chama.

Basicamente, a partir dos resultados experimentais, concluiu-se que:

- a) A presença de um campo acústico pode mudar a estrutura de uma chama difusiva laminar criando na região de alta formação de fuligem condições favoráveis para reduzir sua formação e aumentar a taxa de oxidação da fuligem formada. Para o caso da chama não excitada acusticamente, 3 cm acima da saída do queimador permanece como sendo uma região de formação de fuligem na linha central do jato de combustível; contudo, quando a excitação de 650 Hz e 39 mbar é imposta, praticamente zero de sinal de fuligem foi detectado a 10 cm acima do queimador.
- b) A redução da formação e a oxidação da fuligem são intensificadas, em média, quando a pressão acústica aumenta. Assim, como a resposta acústica é melhor para as frequências ressonantes, então maiores valores para pressão acústica puderam ser obtidos até o limite de tensão imposto ao alto-falante (10 V) e, como consequência, bons resultados para supressão de fuligem foram alcançados para as frequências ressonantes de 500 Hz e 650 Hz.

c) Para as frequências mais altas, por exemplo, 800 Hz, a presença de um campo acústico não foi eficiente para reduzir a presença de fuligem. Esse resultado está de acordo com os trabalhos realizados por outros autores (como: Flügel, 2006, Rocha *et al.* (2002)), que também observaram a pequena influência de maiores frequências de oscilação na dinâmica de combustão, principalmente como consequência do fraco deslocamento da onda acústica à jusante do queimador.

O presente trabalho mostrou que a presença do campo acústico pode ser utilizada como uma ferramenta de controle e, até mesmo, supressão da presença de fuligem em processos de combustão. Contudo, a complexa interação entre as modificações físicas do escoamento reativo com os mecanismos de formação e oxidação da fuligem precisa ser mais bem compreendida para que essa técnica possa ser utilizada no total de sua potencialidade. Assim, as recomendações para trabalhos futuros seguem essa linha de raciocínio, conforme a lista que segue.

✓ Para esta mesma configuração de queimador fazer a análise de concentração de fuligem com vazões mássicas diferentes e em outras posições axiais e radiais; com isso seria possível um mapeamento mais completo da presença da fuligem na chama.

✓ Comparar radialmente o perfil da presença de fuligem, temperatura, concentração de oxigênio, e radicais dos hidrocarbonetos de combustão (C_2 e CH , OH) para melhor entendimento da interferência do campo acústico na interação entre os mecanismos de formação e oxidação de fuligem com o mecanismo de combustão do combustível.

✓ Avaliação objetiva do consumo de combustível em função da excitação acústica.

✓ Para entender como a frequência e amplitude de oscilação afetam o deslocamento da onda acústica após a saída do queimador, recomenda-se utilizar técnicas de velocimetria a laser para se determinar o campo de velocidade.

✓ Utilizando sondas de mínima perturbação do escoamento, levantar o perfil radial e axial da presença de oxigênio no lado interno do jato de combustível, como no trabalho de Rocha *et al.* (2006).

✓ Utilizar configurações de queimadores que apresenta um comportamento acústico melhor definido do que o aqui utilizado, como tubo de $\frac{1}{2}$ onda (ambas extremidades abertas) ou tubo de $\frac{1}{4}$ de onda (uma extremidade fechada e outra aberta). Com isso seria possível associar melhor o comportamento acústico do queimador com as modificações no processo de combustão.

✓ Outra proposta seria utilizar essa mesma configuração para analisar a distribuição de emissão de gases poluentes, por exemplo: CO, SO_x, NO_x através da variação das amplitudes e frequências de oscilação. Desta forma, seria possível determinar em que condições de atuação acústica ocorrem as melhores taxas de mistura e minimização da emissão destes poluentes.

Por fim, é certo que para a ampla utilização dessa técnica ainda se faz necessário muitos desenvolvimentos científicos e tecnológicos para que então se tenha um melhor entendimento dos diversos fenômenos relacionados com a combustão pulsante. Sendo assim, apesar deste referido trabalho não ser uma discussão final sobre a combustão pulsante neste ou em outros tipos de queimadores, acredita-se que por meio dos resultados aqui obtidos, através da utilização do método de Incandescência Induzida por Laser, esta pesquisa se torne uma fonte para maior entendimento de como a combustão pulsante pode ser usada para eliminar ou reduzir a presença de fuligem nos processos de combustão.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

PETROBRÁS. **Propriedades e Características do Gás Liquefeito de Petróleo.** [online].< www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf> Out. 2006

ANDREWS, G, E.; PHYLAKTOU, H.; Gas Explosions in Long Closed Vesseis. **Combustion Science and Technology**, v. 77, p. 27-39, 1991.

APPEL, J.; BOCKHORN, H.; FRENKLACH, M.; Kinetic Modeling of Soot Formation with Detailed Chemistry and Physics: Laminar Premixed Flames of C₂ Hydrocarbons. **Combustion and Flame**, v.121, p.122-136, 2000.

ARGACHOY, C. **Modelo Fenomenológico da Emissão de Material Particulado em Motores Diesel de Injeção Direta.** 223p. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

BARRETA, L. G., SBAMPATO, M. E., TOLEDO, A. O., OLIVEIRA, A. C., SANTOS, A. M. **Uso da Incandescência Induzida por Lasers na determinação da concentração de fuligem formada na combustão.** São José dos Campos, DC: IEAv, 2002.

BASTOS, V.H.; LACAVALA, P. T.; FERREIRA, M. A.; CARVALHO Jr., J. A. Características de Chamas pulsantes Difusivas Livres. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 2002, Cachoeira Paulista. **Proceedings of the ENCIT 2002**, Caxambu – MG: ENCITE, 2002.

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

CALCOTE, H. F. Mechanism of Soot Nucleation in Flames. **Combustion and Flame**, v. 42, p.215, 1981.

CARVALHO JR., J.A.; MILLER, N.; DANIEL B.R.; ZINN B.T. Combustion characteristics of unpulverized coal under pulsating and non pulsating conditions. **Fuel**, v. 66, n. 1, p. 4-8, 1987.

CARVALHO, J.; LACAVALA, P. T.; **Emissões em processos de combustão**, Editora Unesp, 1ª Ed. São Paulo – Brasil, 2003.

CARTENS, J.P. **Introdução de Novas Técnicas Industriais com a Utilização de Laser's.** 144p. 1995. Dissertação (Mestrado em Química Industrial) – Unisanta: Universidade Santa Cecília, Santos.

CHOI, M. Y.; JENSEN, K. A. Calibration and correction of laser-induced incandescence for soot volume fraction measurements. **Combustion and Flame**, v.112, p.485, 1998.

CHIGIER, N. *Energy, Combustion and Environment*. New York: McGraw-Hill, 1981.

CHOMIAK, J. **Combustion, a Studying Teory, Fact and Application**. Monteraux: Gordon and Reach Science Publishers, 1990.

CIGNOLI, F.; BENECCHI, S.; ZIZAK, G. Time-delayed detection of laser-induced incandescence for the two-dimensional visualization of soot in flames. **Applied Optics**. v.33, p. 5778, 1994.

CLUDI, C. Z. **HPA Adsorvido e Morfologia de Materiais Particulados Resultantes de Processos de Combustão**. 120f. 2003.Dissertação (Mestrado em Física-Química) – UNICAMP, Campinas.

DELABROY, O.; LACAS F.; POINSOT, T.; CANDEL, S.; HOFFMANN, T.; HERMANN, J.; GLEIS S.; VORTMEYER, D. A study of NO_x reduction by acoustic excitation in a liquid fueled burner. **Combustion Science and Techology**, v. 119, n. 1-6, 397-408, 1996.

DUBEY, R.K., BLACK, D.L., MCQUAY, M.Q., AND CARVALHO J.A., “The Effect of an Acoustic Field on the Burning of a Hydrogen-stabilized Ethanol Spray Flame in a Propane-fired Rijke-tube Combustor”. **Combustion and Flame**, Vol. 110, pp. 25-38, 1997.

DURIGON A.; KRIOUKOV, V. G.; COSTA, V. J. *Modelagem Matemática da Formação de Fuligem em Mecanismos de Reações com Poliacetilenos*. Lages, DC: UNIPLAC, 2002.

FERREIRA, DANIEL SILVA ; LACAVALA, P. T. ; FERREIRA, MARCO AURÉLIO; CARVALHO JR., J A . The Influence of the Flame Structure on the Combustion Oscillations in a Cylindrical Chamber. In: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference / 27th AIAA Aeroacoustics Conference, 2006, Cambridge. **Proceeding of12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference / 27th AIAA Aeroacoustics Conference**, 2006.

FERREIRA, D. S. **Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes**. 165 f. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.

FERREIRA, M.A. **Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.

FENIMORE C.P.; JONES, G.W.; **J. Physic Chemistry**. 1967, 593p.

FLÜGEL, A. D. **Investigação Experimental da Influencia do Campo Acústico na Queima de Spray**. 177f. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

GAYDON, A. G.; WOLFHARD, H. G. **Flames: Their Structure, Radiation and Temperature**. 3^a ed., Londres: Chapman and Hall Sons, 1970.

GITMAN, G. Pyretron, a Variable Gas/Oxygen/Air Combustion System. **Proceedings of Industrial Combustion Technology Symposium**, Chicago, Il, p.p. 171-178, 1986.

GLASSMAN, I., “Combustion”. 2^a ed. Academic Press, Inc., London, 1987.

GLASSMAN, I. Combustion. 3.ed. New York: Academic Press Inc., 1996.

LACAVA, P. T. Elementos de combustão, P. 109, São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2002.

LACAVA, P.T.; FERREIRA, D.S.; CARVALHO JR., J.A.; CALDEIRAS PIRES, A. Efeito da frequência e amplitude de oscilação no formato de chamas pré- misturadas pulsadas. [CDROM]. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 15., Águas de Lindóia, nov. 1999. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM, 1999.

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

LIBBY, P.A.; WILLIAMS, F.A. **Turbulent Reacting Flows**. Academic Press, New York, 1994.

LOPES, W. A. ANDRADE, J. B. **Química Nova**. 1996, 497p.

LOVETT, J. A.; TURNS, S. R. The structure of pulsed turbulent no premixed jet flames. **Combustion Science and Technology**, Reading, v. 94, n. 1-6, p. 193-217, 1993.

MARQUES, C. S. T. **Cinética de Reação de Radicais em Chamas de C₂H₂/O₂ produzidas em câmaras fechadas**. 149f. 2000. Tese (Doutorada em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MARQUES, C. S. T. **Distribuição de Espécies Luminescentes em Chamas Explosivas de C_2H_2/O_2** . 120f. 1996. Tese (Dissertação em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MARTINS, C. A., CARVALHO, JR, J. A., VERAS, C. A. G., FERREIRA, M. A., LACAVALA, P. T. Experimental Measurements of the NO_x and CO Concentrations Operating in Oscillatory and Non-oscillatory Burning Conditions. **Fuel**, v. 85, n. 1, p. 84-93, 2006.

MALLINSON, S.G., REIZES J.A, HONG, G. “An Experimental and Numerical Study of Synthetic Jet Flow”. **The Aeronautical Journal**, v.105(1043), p. 41-49, 2001.

MCMANUS, K. R.; VANDSBURGER, U.; BOWMAN, C.T. Combustor performance enhancement through direct shear layer excitation. **Combustion and Flame**, New York, v.82, n. 1, p. 75-92, oct. 1990.

MEWES, B.; SEITZMAN, J. M. Soot volume fraction and particle size measurements with laser-induced incandescence. **Applied Optics**, v. 36, p.709, 1997.

NI, T.; PINSON, J. A.; GUPTA, S.; SANTORO, R. J. Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence. **Applied Optics**, v.34, p.7083, 1995.

QUAY, B.; LEET. W.; NI, T.; SANTORO, R.J. Spatially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using Laser Induced Incandescence. **Combustion and Flame**, v. 79, p. 384–392, 1994.

RAYLEIGH, J. W.S. A Theory of Sound. New York: Dover, 1945, v.2.

RICHTER, H.; HOWARD J.B.; Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot—a review of chemical reaction pathways. **Progress in Energy and Combustion Science**, V. 26, p. 565 – 608, 2000.

ROCHA, A. M. A. **Análise experimental em chamas difusivas pulsadas de gás natural**. 118f. 2002. Dissertação (Mestrado em Propulsão e Combustão)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ROCHA A. M. CARVALHO JR. J. A. LACAVALA P. T. Application of Pulsating Combustion in the Delft Jet Diffusion Flame Burner. Brandbrief TU Delft 2006: 13(1): p. 22-25.

SAITO, M.; SATO, M.; NISHIMURA, A. Soot Suppression by Acoustic Oscillated Combustion. **Fuel**, v.77, p. 973-978, 1998.

SANTORO, R. J., YEH, T. T., AND SEMERJIAN, H. G., **Combustion Science Technology**, 53, 89, 1987.

SHADDIX, C. R.; HARRINGTON, J. E.; SMYTH, D. C. Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane e Air Diffusion Flame. **Combustion and Flame**, v.99, p.723, 1994.

SCHRAML, S.; DANDERS, S.; BADER, K.; Will, S.; LEIPERTZ, A. Soot temperature measurements and implications for time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII). **Combustion and Flame**, v. 120, p. 439, 2000.

STODOLA, A.; LOEWENSTEIN, L. C. **Steam and gas turbines**: with a supplement on the prospects of the thermal prime mover. New York: McGraw-Hill, 1927. v.1.

STRAHLE, W.C. **An Introduction to Combustion**. Atlanta, Gordon and Breach Publishers, 1993.

STREHLOW, R. A. **Combustion Fundamentals**. New York, NY: McGraw-Hill, 1984.

URNS, S.R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**, McGraw-Hill, 1996.

VANDER WAL, R. L.; ZHOU, Z.; CHOI, M. Y. Laser-induced incandescence calibration via gravimetric sampling. **Combustion and Flame**, v.105, p.462, 1996.

VANDER WAL, R. L. **Laser -induced incandescence measures soot and smoke**. *Combustion and Flame*, p.99, Nov. 1997.

VANDER WAL, R. L., TICICH T. M., STEPHENS, A. B. Can Soot Primary Particle Size be Determined Using Laser Induced Incandescence? **Combustion and Flame**, v.116, p.291, 1999.

WILLIAMS, A. Fundamentals of oil combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 2, n. 3, p. 167-179, 1976.

YOSHIDA, H.; KODA, M.; OOISHI, Y.; KOBAYASHI, K. P.; SAITO, M. Super-mixing combustion enhanced by resonance between micro-shear layer and acoustic excitation. **Heat and Fluid Flow**. V. 22, p.3 72-379, 2001.

ZINN, B.T. Pulsating combustion. In: Weinberg, F.J., ed. **Advanced combustion methods**. London: Academic Press, 1986. p. 113-181.

Apêndice A

Figuras comparativas de uma segunda amostra dos dados de concentração de fuligem.

Nas Figuras A.1 a A.5 estão inclusos as curvas comparativas de uma segunda coleta de dados do sinal de fuligem em função do aumento da pressão acústica para cada frequência utilizada. As frequências utilizadas foram: 250 Hz, 450 Hz, 500 Hz, 650 Hz e 800 Hz.

Nas figuras a seguir, os três primeiros símbolos (símbolos preenchidos) correspondem aos resultados da primeira amostra (discutidos no capítulo quatro) e os três últimos são correspondentes aos da segunda amostra.

Como nos casos discutidos em capítulos anteriores, o sinal de fuligem foi obtido com o laser direcionado na região central da chama em três diferentes posições a partir da saída do queimador: 3 cm, 6 cm e 10 cm, para as condições com e sem oscilação.

No geral, as comparações mostram que os resultados que definem o comportamento do sinal de fuligem foram semelhantes com os da primeira análise. Sendo que maiores diferenças ocorreram para a condição sem excitação acústica.

Conforme se observa na Figura A.1, o sinal de fuligem referente à condição sem oscilação, foram maiores em relação a primeira medição, por exemplo, para a posição de 3 cm o sinal que foi de 1023 mV passou para 1085 mV. Para as posições de 6 e 10 cm as diferenças se deram numa escala bem maior, ou seja, para a posição de 6 cm, o sinal que era de 1200 mV passou a 1600 mV, enquanto de 10 cm passou de 1521 mV para 1927 mV.

Para as condições com atuação acústica, percebe-se de maneira geral, que os sinais de fuligem gerados nesta segunda coleta de dados seguem comportamentos semelhantes aos da primeira amostra.

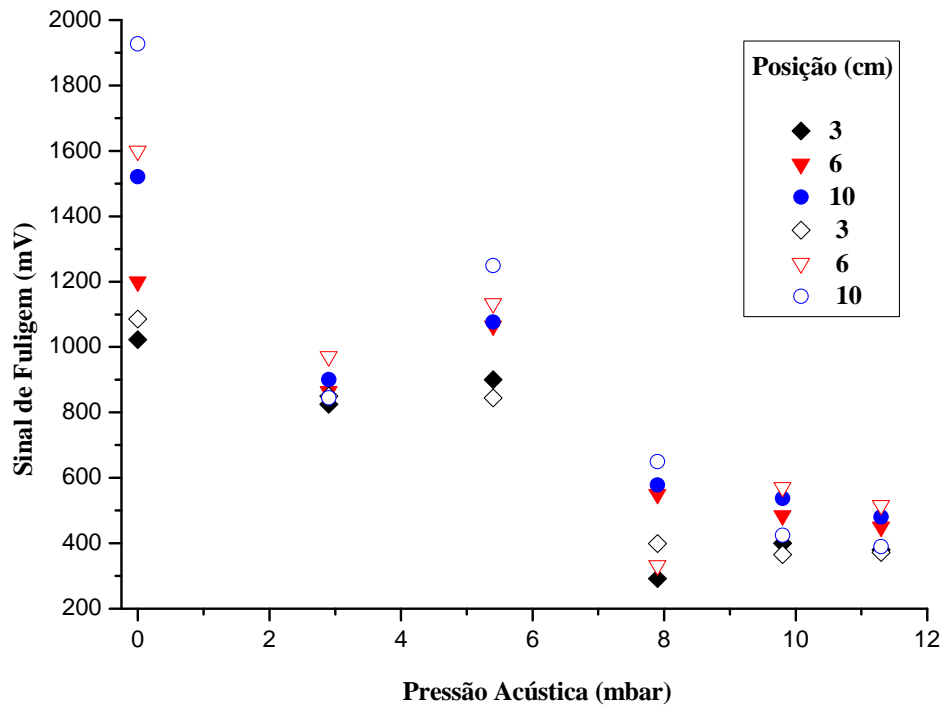


Figura A.1 Comparação do sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 250 Hz

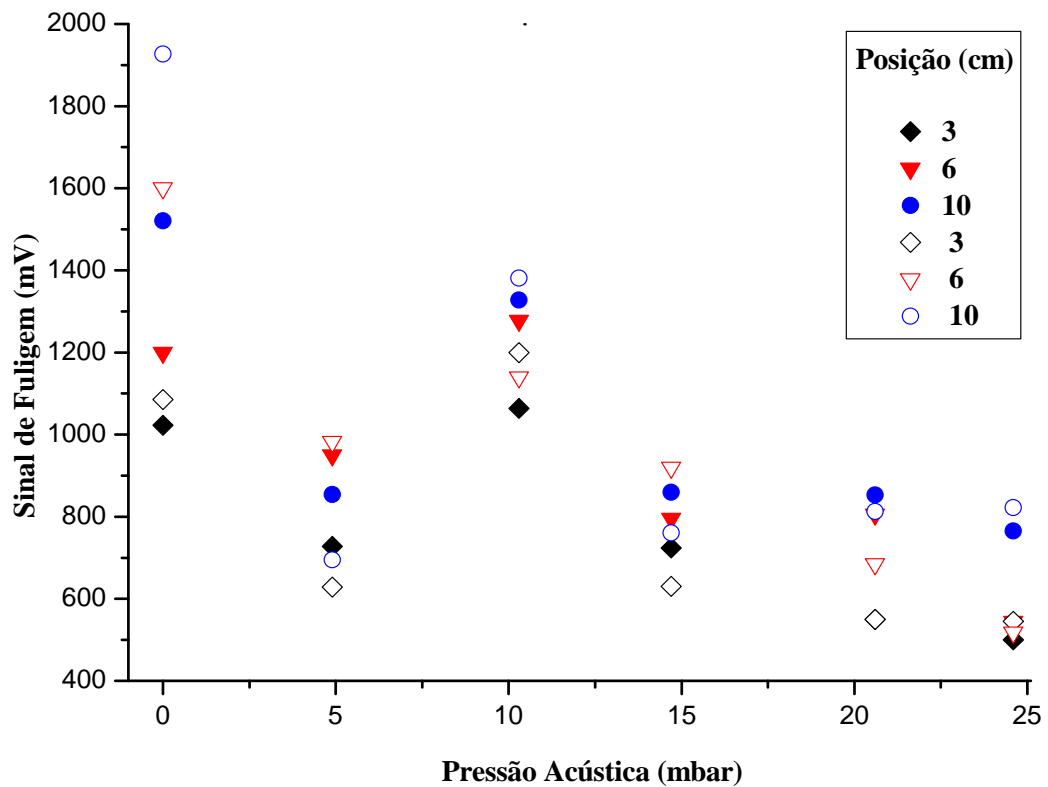


Figura A.2 Comparação do sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 450 Hz.

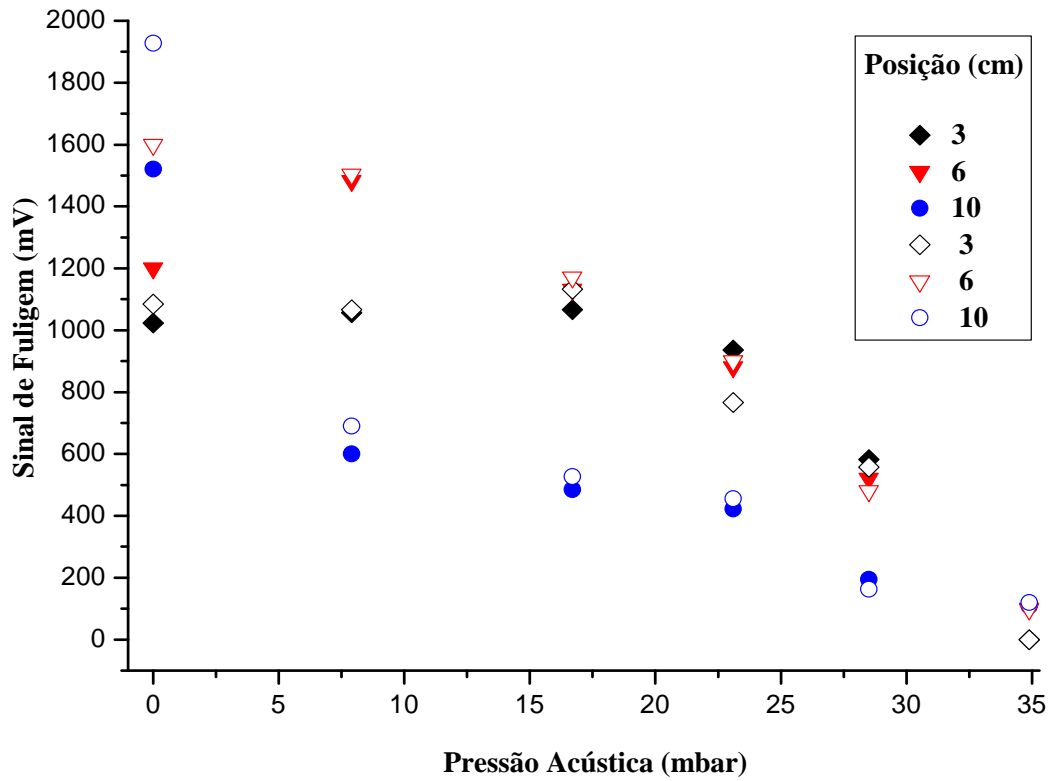


Figura A.3 Comparação do sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 500 Hz.

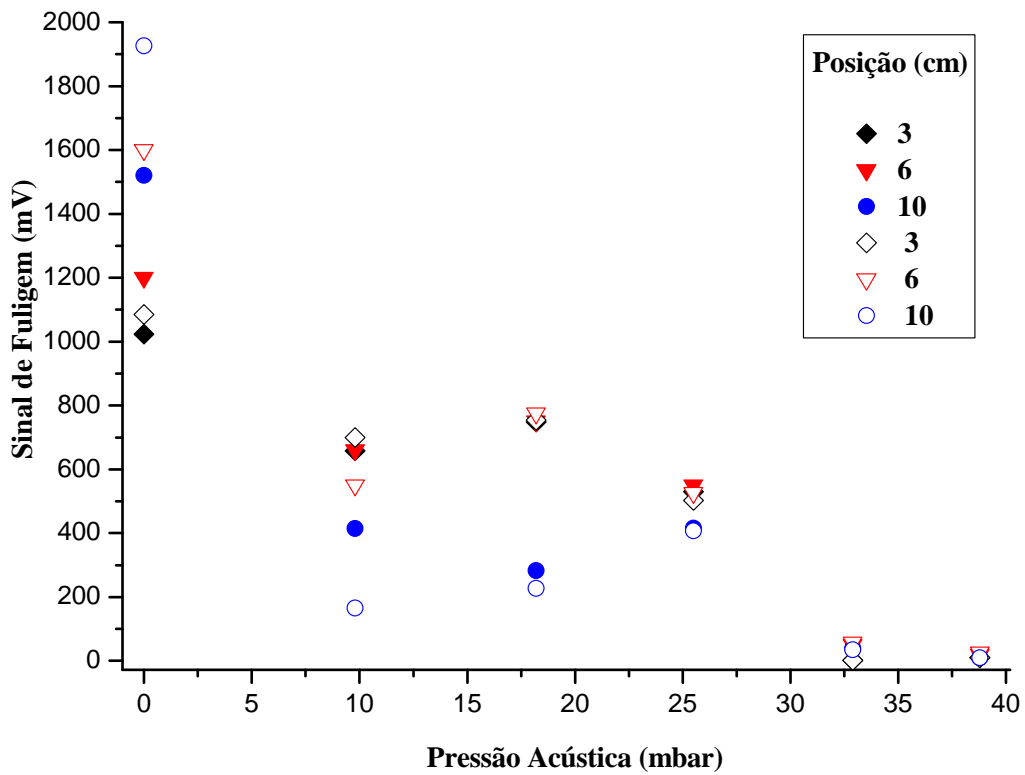


Figura A.4 Comparação do sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 650 Hz.

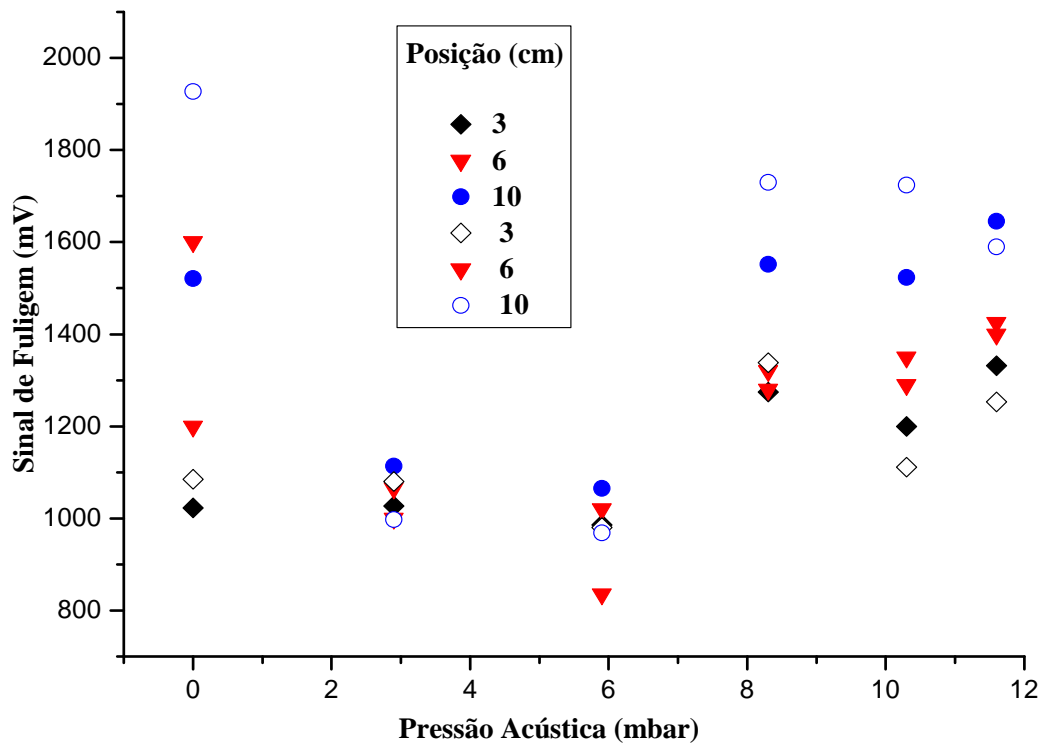


Figura A.5 Comparação do sinal de fuligem em função da pressão acústica para frequência de 800 Hz.

Apêndice B

Dados referentes ao Sinal de fuligem em função da Pressão Acústica

Frequência de 250 Hz

Posição (cm)	Pressão Acústica: 2,9 mbar		Energia (mJ)	Posição (cm)	Pressão Acústica: 5,4 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)			S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	180	0	0	193	
3	776	825,1	174	900	900	204	
	800	850,6	174	845	845	204	
6	750	867	160	940	1065	180	
	840	971	160	1000	1133	180	
10	900	900	185	960	1076	182	
	845	845	185	1115	1250	182	
Posição (cm)	Pressão Acústica: 7,9 mbar		Energia (mJ)	Posição (cm)	Pressão Acústica: 9,8 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)			S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	185	0		190	
3	300	301,6	185	400	400	200	
	410	412	185	365	365	200	
6	496	549,1	168	424	484,6	175	
	300	332,1	168	500	571,4	175	
10	578	578	186	500	537,6	186	
	650	650	186	395	424,7	186	
Posição (cm)	Pressão Acústica: 11,3 mbar		Energia (mJ)				
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)					
0	0	0	178				
3	408	410	178				
	400	402	178				
6	440	450,1	175				
	505	516,5	175				
10	480	480	179				
	390	390	179				

Frequência de 450 Hz

Posição (cm)	Pressão Acústica: 4,9 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 10 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	179	0	0	178
3	696	728,6	171	1064	1064	187
	600	628,1	171	1200	1200	187
6	870	949	164	1120	1277,1	164
	900	981	164	1000	1140,2	164
10	854	854	179	1250	1328,1	176
	695	695	179	1300	1381,3	176
Posição (cm)	Pressão Acústica: 15 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 21 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	179	0		180
3	712	723,9	179	550	550	185
	620	630,4	179	550	550	185
6	740	792,2	170	705	805,1	162
	860	920,7	170	600	685,2	162
10	860	860	182	840	853,8	182
	760	760	182	800	813,2	182
Posição (cm)	Pressão Acústica: 25 mbar		Energia (mJ)			
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)				
0	0	0	180			
3	500	500	178			
	545	545	178			
6	520	544,5	170			
	495	518,3	170			
10	740	765,8	172			
	795	822,7	172			

Frequência de 500 Hz

Posição (cm)	Pressão Acústica: 7,9 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 17 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	172	0	0	173
3	1000	1056,2	178	1050	1066,4	192
	1010	1066,7	178	1115	1132,4	192
6	1460	1483,7	185	1160	1160	200
	1480	1504	185	1200	1200	200
10	600	600	188	460	527	185
	690	690	188	500	540	185
Posição (cm)	Pressão Acústica: 23 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 29 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	172	0	0	170
3	856	936,7	191	500	581,9	177
	700	766	191	480	558,6	177
6	880	880	209	520	520	206
	900	900	209	480	480	206
10	380	422,4	188	180	195,2	190
	410	455,8	188	150	162,6	190
Posição (cm)	Pressão Acústica: 35 mbar		Energia (mJ)			
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)				
0	0	0	174			
3	0	0	186			
	0	0	186			
6	100	100	203			
	98	98	203			
10	100	109,1	186			
	110	120,1	186			

Frequência de 650 Hz

Posição (cm)	Pressão Acústica: 9,8 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 18 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	186	0	0	184
3	620	658,1	179	720	748,8	175
	660	700,6	179	725	754	175
6	660	660	190	750	750	182
	550	550	190	775	775	182
10	350	415,6	160	280	283,1	180
	140	166,3	160	225	227,5	180
Posição (cm)	Pressão Acústica: 26 mbar		Energia (mJ)	Pressão Acústica: 33 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)		S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	186	0	0	186
3	528	530,9	181	2	2,01	177
	500	502,9	181	2	2,01	177
6	550	550	182	50	50	178
	526	526	182	58	58	178
10	400	416	175	40	40,2	177
	393	408,7	175	35	35,2	177
Posição (cm)	Pressão Acústica: 39 mbar		Energia (mJ)			
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)				
0	0	0	185			
3	10	10,2	174			
	10	10,2	174			
6	20	20,8	170			
	25	26	170			
10	10	10	177			
	10	10	177			

Frequência de 800 Hz

Posição (cm)	Pressão Acústica: 2,9 mbar		Energia (mJ)	Posição (cm)	Pressão Acústica: 5,9 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)			S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	176	0	0	179	
3	800	1027,8	158	780	986,5	170	
	845	1085,7	158	775	980,1	170	
6	1065	1065	203	1020	1020	215	
	1000	1000	203	835	835	215	
10	950	1114,7	173	868	1066,4	175	
	850	997,4	173	789	969,3	175	
Posição (cm)	Pressão Acústica: 8,3 mbar		Energia (mJ)	Posição (cm)	Pressão Acústica: 10,3 mbar		Energia (mJ)
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)			S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)	
0	0	0	180	0	0	179	
3	1100	1274,3	183	1080	1200	180	
	1155	1338	183	1000	1111,1	180	
6	1320	1320	212	1290	1290	200	
	1280	1280	212	1350	1350	200	
10	1274	1552,2	174	1325	1523	174	
	1420	1730,1	174	1500	1724,1	174	
Posição (cm)	Pressão Acústica: 11,6 mbar		Energia (mJ)				
	S / Normalizar (mV)	Normalizados (mV)					
0	0	0	180				
3	1220	1332,1	185				
	1148	1253,5	185				
6	1400	1400	202				
	1425	1425	202				
10	1400	1644,2	172				
	1356	1592,5	172				

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TM</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">13 de julho de 2007</p>	3. DOCUMENTO N° <p style="text-align: center;">CTA/ITA-IEA/TM-002/2007</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">97</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: <p style="text-align: center;">Presença de fuligem em chamas não pré-misturadas com excitação acústica</p>			
6. AUTOR(ES): <p style="text-align: center;">Fernando Lima de Oliveira</p>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p style="text-align: center;">Instuto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica – ITA/IEA</p>			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p style="text-align: center;">Combustão Pulsante. Chamas Não pré-misturadas. Sinal de Fuligem. Pressão Acústica. Queimador</p>			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p style="text-align: center;">Química da combustão; Fuligem; Chamas; Excitação acústica; Queimadores; Engenharia mecânica; Engenharia química</p>			
10. APRESENTAÇÃO: <p style="text-align: center;">X Nacional Internacional</p> <p>ITA, São José dos Campos, 2007, 97 páginas.</p>			
11. RESUMO: <p style="text-align: center;">A combustão pulsante tem despertado interesse nas pesquisas atuais devido a indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como economia de combustível, redução na formação de poluentes, aumento na taxa de transferência de calor por convecção e investimento reduzido, em comparação com outras novas tecnologias de combustão. Um estudo experimental foi conduzido com o objetivo de investigar os efeitos da combustão com a presença de oscilações acústicas na formação de fuligem em uma chama difusiva laminar de jato livre. O queimador de escala laboratorial operou com gás liquefeito e petróleo (GLP) com e sem oscilação, para as mesmas situações de entrada. O escoamento de combustível foi excitado acusticamente, antes da saída do queimador, por um alto-falante estrategicamente posicionado. Os experimentos foram conduzidos para uma vazão de 0.14 g/s de GLP. Para quantificar a presença de fuligem foi utilizada a técnica de incandescência induzida por laser. Os resultados indicam que em alguns casos, a combinação de frequência e amplitude de oscilação na chama reduz a presença de fuligem praticamente à zero.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;">(X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO</p>			

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)