

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA EMISSÃO DE FULIGEM A PARTIR DE CHAMAS PRODUZIDAS POR  
DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

por

Fernando Sakuragi Krueger

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012

ESTUDO DA EMISSÃO DE FULIGEM A PARTIR DE CHAMAS PRODUZIDAS POR  
DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

por

Fernando Sakuragi Krueger

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Porto Alegre, 20 dezembro de 2012

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Renê e Irene, por me apoiarem sempre, desde a escolha do curso até a conclusão do mesmo e que me recepcionaram sempre com um sorriso de boas vindas a cada volta para casa.

À minha irmã, Fabiana, que me trouxe motivação em momentos de hesitação, quando precisava de alguém para desabafar.

Agradeço à minha namorada, Vanessa, por ter sempre a palavra certa em ocasiões difíceis.

Ao meu orientador, Nattan, que soube passar seus conhecimentos com maestria, dedicação e principalmente paciência.

*“You can’t build a reputation on what you are going to do.”*

*Henry Ford*

KRUEGER, F.S. **Estudo da emissão de fuligem a partir de chamas de difusão produzidas por diferentes combustíveis**. 2012. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

A emissão de fuligem tem sido foco de muitos estudos devido às aplicações na indústria e aos efeitos nocivos causados ao meio ambiente. A presença de fuligem é de fundamental importância para a transferência de calor em caldeiras e câmaras de combustão, contribuindo significativamente para o aumento da eficiência. Em controvérsia, a fuligem inalada pode causar danos ao sistema respiratório e até mesmo câncer. Além disso, outro ponto relevante é a contribuição para o efeito estufa. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é analisar a emissão de fuligem em chamas laminares de difusão. Para tanto, foi construído uma bancada experimental para implementar a técnica de incandescência induzida por laser. Esta técnica fornece informações instantâneas, em tempo real e de forma não-intrusiva sobre a fração de volume de fuligem. As medições foram calibradas e validadas comparando métodos e resultados de trabalhos disponíveis na literatura. A emissão de fuligem produzida por diferentes combustíveis, metano, GN e GLP, foi analisada a partir de chamas de 50 e 80 mm de altura visível estabilizadas em um queimador representativo de condições industriais. Os resultados servem de base para otimização de sistemas de combustão, visando o aumento da eficiência energética e o controle de emissão de poluentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** (Fuligem, Extinção de Luz, Incandescência Induzida por Laser)

KRUEGER, F.S. **Study of soot emission from stabilized laminar diffusion flames produced by different fuels.** 2012. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

The soot emission has been the focus of many studies due to applications in industry and the prejudicial effects caused to the environment. The presence of soot is of fundamental importance to the heat transfer in boilers and combustion chambers, contributing significantly to increased efficiency. In controversy, the inhaled soot may cause respiratory system damage and even cancer. Moreover, another important point is the contribution to the greenhouse effect. Therefore, the aim of this work is to analyze the soot emission in representative laminar diffusion flames. An experimental setup was constructed to implement the technique of laser-induced incandescence. This technique provides instant information, in real time and in a non-intrusive about soot volume fraction. The measurements were calibrated and validated using methods and results of studies available in the literature. It was analyzed the soot emission produced by different fuels, methane, natural gas and LPG, from laminar diffusion flames on an burner representative of industrial conditions. The results will contribute to the basis for combustion systems optimization, aiming to increase the efficiency and control of soot emissions.

**KEYWORDS:** Soot, Light Extinction, Laser Induced Incandescence.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. EVOLUÇÃO DA TÉCNICA EXPERIMENTAL LII.....	2
2.2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL .....	4
2.3. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO .....	5
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	5
3. METODOLOGIA .....	6
3.1. O QUEIMADOR.....	6
3.2. CHAMAS.....	6
3.3. BANCADA EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO.....	7
3.3.1. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	8
3.3.2. SISTEMA DE DETECÇÃO .....	8
3.3.3. TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ.....	8
3.4. SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	9
3.4.1. SISTEMA DE EXCITAÇÃO .....	9
3.4.2. SISTEMA DE DETECÇÃO .....	10
3.4.3. A TÉCNICA LII.....	10
3.5. ANÁLISE DAS INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES.....	10
3.5.1. INCERTEZAS NAS MEDIDAS DE EXTINÇÃO .....	10
3.5.2. INCERTEZAS NAS MEDIDAS DE LII.....	10
4. RESULTADOS .....	11
4.1. CALIBRAÇÃO.....	11
4.2. MEDIDAS DE $f\nu$ COM LII.....	12
4.2.1. DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	13
5. CONCLUSÃO .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
ANEXO I.....	16
ANEXO II .....	16
APÊNDICE I.....	17
APÊNDICE II .....	18
APÊNDICE III .....	18
APÊNDICE IV .....	19
APÊNDICE V .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

A combustão como fonte de energia tem sido utilizada pelo homem há milênios, porém a emissão de poluentes só ganhou destaque no cenário mundial a partir do início da década de 70. Seus efeitos no meio ambiente estão ligados a problemas de ordem política, social e econômica. Soluções envolvendo combustíveis alternativos têm sido cada vez mais procuradas, como o caso de uma das maiores empresas de energia da China que está desenvolvendo e promovendo a produção de combustíveis renováveis para uso na aviação a partir da biomassa, ajudando a reduzir o CO<sub>2</sub> na aviação. Um estudo realizado pela empresa de auditoria e consultoria, Grant Thornton, em 2012, mostra que um em cada quatro executivos no mundo está usando ou considerando usar combustíveis alternativos nos veículos de suas empresas, visando com isso à redução de custos e uma melhor imagem da empresa no que tange a consciência ambiental. Mais recentemente, a Petrobrás firmou parceria com a Fundação de Apoio Científico e Tecnológico do Tocantins (FAPTO), que apoia os projetos de pesquisa desenvolvidos na Universidade Federal do Tocantins, para desenvolver estudos na área de produção de combustíveis alternativos a partir de resíduos da indústria de petróleo e agroresíduos. Esta iniciativa visa à melhoria tanto ambiental quanto energética a partir da destinação adequada de agroresíduos, da introdução de novas tecnologias e o uso de combustíveis alternativos que não contribuem para a intensificação do efeito estufa segundo Parreira, 2012.

A poluição atmosférica está fortemente associada à emissão de fuligem, que é formada principalmente por aglomerados de carbono devido à queima incompleta no processo de combustão para geração de energia pelas indústrias e veículos automotivos. Geraque, 2009 aponta que estudos realizados indicam que a redução da fuligem pode eliminar um terço do aquecimento global líquido e em um tempo duas vezes mais rápido do que a redução do gás carbônico. Estas partículas sólidas são da ordem de micrômetros, que ao serem inaladas podem se acumular no sistema respiratório, principalmente nos pulmões, onde permanecem por toda a vida. O acúmulo de partículas pode acarretar uma lesão pulmonar conhecida por antracose e em grandes quantidades, causar fibrose pulmonar ou até mesmo câncer de pulmão.

Em contrapartida, a fuligem é um meio participante importante na radiação térmica, podendo trazer um aumento da eficiência térmica dos queimadores industriais, implementando a transferência de calor das chamas para as paredes de câmaras de combustão e de caldeiras, pois emite e absorve radiação em todos os comprimentos de onda conforme Barreta, 2010. Assim, o interesse em medir as emissões de fuligem está associado pela importância do entendimento dos processos de produção de fuligem em chamas. Segundo Wainner, 1999, isto pode ajudar a compreender, e então controlar, os elementos básicos da combustão de hidrocarbonetos.

Há diversas técnicas capazes de medir as propriedades da fuligem, cada qual com suas limitações. As técnicas ópticas, geralmente utilizando laser, têm se mostrado a melhor alternativa considerando que apresentam resultados com alta precisão, resolução espacial e temporal. Além disso, são não-intrusivas e de simples aplicação. Assim sendo, este estudo foca no uso de duas destas técnicas. As medidas pontuais na chama são feitas utilizando a técnica de Incandescência Induzida por Laser (LII) e a calibração das medições que são realizadas a partir dos resultados globais de concentração de fuligem, empregando a técnica de Extinção de Luz, a fim de obter medidas quantitativas, isto é, resultados de fração de volume de fuligem em valores absolutos, em partes por milhão (ppm).

Neste trabalho, são consideradas duas chamas de difusão laminares de 50 e 80 mm de altura visível com simetria axial, as quais são produzidas a partir do uso do metano (CH<sub>4</sub>), do gás natural (GN) e do gás liquefeito de petróleo (GLP) em um queimador modelo Burke-Schumann. Este queimador estabiliza chamas em configuração de jato livre, as quais são representativas de equipamentos industriais. Os resultados experimentais das medidas de



fração de volume de fuligem são de grande importância para a validação de modelos de combustão e para o desenvolvimento de projetos de sistemas de combustão que influenciam diretamente na determinação da eficiência dos queimadores.

O trabalho está subdividido em cinco capítulos, sendo o primeiro este, a Introdução, passando para a revisão bibliográfica onde é abordada a evolução da técnica LII. O capítulo três é reservado à metodologia, onde estão descritos os procedimentos usados para a obtenção dos resultados obtidos pelo emprego das técnicas ópticas de diagnóstico laser em combustão, extinção de luz e LII. No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos com ambas as técnicas e por último, o capítulo cinco, com as conclusões, avaliando os resultados adquiridos ao longo do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Incandescência Induzida por Laser é uma técnica relativamente nova que tem o objetivo de medir a fração de volume de fuligem e o diâmetro médio do material particulado. Por ser um procedimento conceitualmente simples e de implementação experimental fácil, a técnica LII têm sido amplamente utilizada em pesquisas, as quais são citadas neste capítulo que está subdividido em três partes. A primeira apresenta uma pesquisa, em ordem cronológica, do avanço da técnica LII. A segunda parte trata da abordagem experimental, onde são indicados os equipamentos necessários para a aplicação de LII e a evolução de seus componentes, desde a criação da técnica até a atualidade. Por último, na terceira seção, são mencionados os métodos de calibração existentes, etapa esta, que envolve uma parte importante do trabalho no que diz respeito à confiabilidade dos resultados.

### 2.1. EVOLUÇÃO DA TÉCNICA EXPERIMENTAL LII

A técnica, na qual um laser pulsado aquece a fuligem até a incandescência, oferece resultados rápidos da fração de volume de fuligem com alta resolução espacial e temporal, além de realizar medidas não intrusivas e em tempo real [Vander Wal et alii, 1994].

Eckbreth et alii, 1977, mostraram que o equilíbrio da energia absorvida dentro da partícula ocorre rapidamente na escala de tempo do pulso do laser, mas o aquecimento do meio envolvente da partícula ocorre em uma longa escala de tempo. A partícula de fuligem absorve luz laser e alcança temperaturas bem acima da temperatura da chama, aproximadamente 4000 K, durante o pulso do laser. Em consequência disso, a fuligem emite radiação semelhante à de um corpo negro, obedecendo à Lei de Planck.

Melton et alii, 1984, realizaram o primeiro estudo a explorar relação entre o sinal LII e a fração do volume de fuligem. Devido à transferência de energia radioativa, condutiva e evaporativa, a partícula de fuligem diminui sua temperatura e há um decaimento do sinal LII. A troca de energia das partículas de fuligem com o ambiente foi descrita em um balanço de energia, Eq. 2.1, sendo a base para a definição do tamanho do material particulado por meio do LII. Há portanto, uma relação entre o decaimento do sinal LII e o diâmetro médio da fuligem irradiada, logo, quanto maior o tamanho da partícula, menor o tempo de resfriamento, vide Anexo I. Um diagrama esquemático, mostrado na Figura 2.1, ajuda a entender o balanço de energia.

$$q_{\text{absorção}} = q_{\text{vaporização}} + q_{\text{condução}} + q_{\text{radiação}} + q_{\text{aquecimento da partícula}} \quad (2.1)$$

Os termos da equação acima são respectivamente: (i) absorção de energia do laser, (ii) energia gasta para a vaporização da partícula, (iii) transferência de calor por condução para o meio, (iv) transferência de calor por radiação e (v) energia de aquecimento interno da partícula.

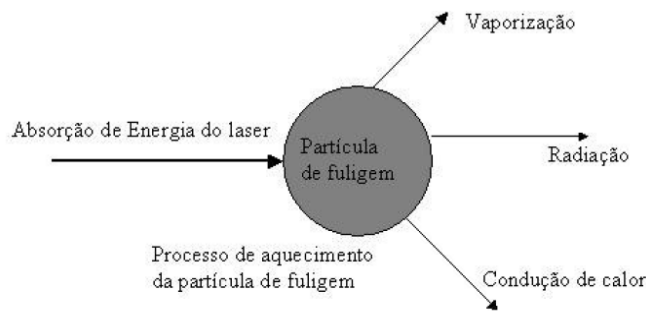


Figura 2.1: Processo de perda de energia pela partícula de fuligem.

A partir do balanço de energia relacionado à partícula de fuligem e da hipótese simplificativa de que todas as partículas de fuligem possuem o mesmo diâmetro, chega-se a expressão da fração do volume de fuligem,  $f_v$ , Eq. 2.2. Na equação,  $N$  é o número de concentração,  $n_p$  é o número médio de partículas primárias por agregado e  $d_p$  o diâmetro da partícula primária de fuligem.

$$f_v = N \frac{\pi n_p d_p^3}{6} \quad (2.2)$$

Após estudar partículas aquecidas por laser no limite da potência do laser e a máxima temperatura que pode alcançar foi estabelecida uma proporção entre o diâmetro da partícula primária de fuligem e o sinal LII,  $S_{LII} \propto N_p d_p^x$ . Nesta relação  $x$  é definido por  $x = 3 + 0,154/\lambda_{det}$ , sendo  $\lambda_{det}$  o comprimento de onda detectado e  $N_p$  a concentração de partícula primária. Notou-se que a densidade de energia do laser a partir de  $0,2 \text{ J/cm}^2$  começa a vaporizar a partícula, estabelecendo uma relação fraca do sinal com a densidade de energia após este ponto.

Santoro et alli, 1995, investigaram a possibilidade da técnica LII 2D para obter medidas planares instantâneas da fração de volume de fuligem em sistemas de combustão em chamas laminares de difusão, turbulentas e em gotas. Experimentos comprovaram a eficácia da técnica LII 2D em determinar  $f_v$  de chamas laminares de difusão, mostrando boa concordância entre os resultados LII e por extinção de luz laser, apresentando uma pequena dispersão entre os resultados, de 5% a 10%, provavelmente devido aos efeitos do tamanho da partícula. Para chamas de difusão turbulentas e em gotas, mostrou-se que o método fornece medidas quantitativas instantâneas e de alta resolução espacial para a fração de volume de fuligem.

Schraml et alli, 2000, mostraram que a maior perda de energia depois do pulso do laser é devido à vaporização, seguido da transferência de calor por condução. Já a perda de energia por radiação é insignificante quando comparada com as outras duas trocas de calor.

Witze et alli, 2004, realizaram testes de emissão de particulados, através da técnica de LII aplicada diretamente na saída do escapamento de um VW Jetta, movido a Diesel, em condições reais de operação, isto é, andando em ruas e estradas. As medidas de integração do sinal de LII foram calibradas através da comparação das medidas em unidades de massa, realizadas com a técnica de gravimetria em regime permanente. Desta forma, os autores demonstraram a possibilidade de medir a emissão de particulados por motores a combustão com o veículo em movimento em condições reais. A média de emissão de particulados durante o período de teste possibilita a realização de uma análise para minimizar o consumo de combustível, mantendo uma taxa de emissão de particulados semelhante ao que se verifica com o veículo parado. Além disso, provaram que este é um procedimento confiável para validação da conformidade com os limites de emissão estipulados pela legislação.

Boiarciuc et alli, 2004, utilizaram simultaneamente a técnica LII resolvida no tempo (TIRE LII) e no espaço (2D LII) para determinar o tamanho da partícula e a fração de volume de fuligem. Este método de quantificar a fração do volume da fuligem foi aplicado em uma chama

difusiva em pressão atmosférica. Os resultados foram comparados com outra técnica, pirometria duas-cores, obtendo valores compatíveis em um tempo relativamente menor.

Fengshan Liu et alli, 2005, comprovaram que a temperatura de partículas primárias maiores tem um decaimento mais lento que as de tamanho menor devido à uma menor razão da área da superfície por volume do particulado. Foi verificado também que no regime de sublimação a temperatura aumenta consideravelmente com o aumento do diâmetro da partícula primária, Anexo I.

Bougie et alli, 2006, caracterizaram o tamanho do particulado no interior de um motor Diesel, tipo Heavy-Duty, em diferentes cargas de trabalho utilizando a técnica LII. As medidas de distribuição de tamanho das partículas primárias foram medidas em dois pontos dentro da câmara de combustão em função do ângulo de manivela do motor. Naquele trabalho, foi verificado também que o tamanho médio das partículas é maior nos primeiros estágios do ciclo de combustão, seguido por uma diminuição durante o decorrer do processo de combustão.

Choi et alli, 2010, estudaram as características da formação de fuligem em combustíveis substitutos da gasolina em chamas não pré-misturadas em configuração contra-corrente. Para tanto, foram utilizadas três misturas binárias a partir de n-eptano, iso-octano e tolueno. Os resultados obtidos permitem notar que o tolueno tem o papel dominante na formação da fuligem. Simulações numéricas apresentaram resultados similares aos obtidos experimentalmente.

Lemaire et alli, 2010, analisaram o efeito causado pela adição de etanol na gasolina sobre a formação de fuligem em chamas turbulentas de sprays. Um queimador foi especialmente desenvolvido para estabilizar as chamas em condições hidrodinâmicas idênticas perante as misturas de gasolina com 10, 20 e 30% em volume de etanol. Os resultados obtidos a partir das misturas mostram que a oxidação das partículas de fuligem ocorre mais rapidamente conforme a adição de etanol no combustível. A adição de 10% do volume de etanol reduz em 25% a formação de fuligem, atingindo uma redução de 80% para uma concentração de 30% de etanol.

## 2.2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Esta seção mostra a evolução dos ensaios experimentais dos principais pesquisadores, os quais serviram para elaborar o presente trabalho.

Wainner e Seitzman, 1999, realizaram o diagnóstico da fuligem de chamas e em escoamentos de exaustores utilizando a técnica LII. As medidas de concentração de fuligem foram realizadas em uma dimensão. A fonte de luz para induzir a incandescência da fuligem foi um laser Nd:YAG (1064 nm) e o sistema de detecção foi um tubo fotomultiplicador de 20 ns de tempo de captura com filtros de banda de 650 e 430 nm. A fração de volume de fuligem foi medida em diferentes distâncias em relação à saída do exaustor. O decaimento da intensidade do sinal de incandescência em relação ao tempo permitiu estimar o diâmetro das partículas de fuligem. Os resultados foram comparados com uma simulação numérica dos experimentos, a qual permitiu calibrar a técnica utilizada para calcular as dimensões do material particulado.

Vander Wal et alli, 1999, utilizaram o laser Nd:YAG pulsado a 30 Hz com comprimento de onda fundamental de 1064 nm e densidade de energia de 0,25 J/cm<sup>2</sup>. Os sinais LII foram transmitidos por meio de uma fibra óptica de quartzo para um monocromador equipado com um tubo fotomultiplicador (PMT) como detector. Sinais do PMT resolvidos no tempo foram registrados por meio de um osciloscópio digital de 500 MHz. Para o experimento, foram escolhidos os comprimentos de onda de 300 e 600 nm para obter o sinal LII, pois nestas faixas há pouca interferência da luminosidade da chama e fluorescência da fuligem.

Boiarciuc et al., 2004, utilizaram como fonte de excitação um laser Nd:YAG operando a 10 Hz e com energia máxima por pulso de 400 mJ em um comprimento de onda fundamental de 1064 nm. O feixe do laser foi expandido por uma lente cilíndrica e então filtrado por meio de uma fenda, a fim de obter um plano de laser de seção retangular e um perfil de energia

uniforme. Após passar pela chama, a média de energia do laser foi registrada por um medidor de energia luminosa. A dimensão da seção transversal do plano de laser na superfície da chama foi medida com um fotodiodo em uma superfície de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Para registrar a evolução no tempo do sinal LII para dois comprimentos de onda, 650 e 405 nm, foi utilizado dois fotomultiplicadores Hamamatsu 7710-11 e uma câmera ICCD para o sinal LII 2D, vide Anexo II.

Hayashi et al., 2011, estudaram, numérica e experimentalmente, os efeitos do tamanho da gota de combustível sobre a formação de fuligem em chamas laminares formadas a partir de um spray contra-corrente. A fonte de luz é o segundo harmônico de um laser Nd:YAG (532 nm), com duração de 8 ns e energia 0,53 J/cm<sup>2</sup>. Este feixe passa por um sistema de lentes que forma um plano de luz de 0,5 mm de espessura e 25 mm de altura. A incandescência da fuligem que passa por um filtro óptico passa banda, centrado em 400 nm, foi capturada por uma câmera CMOS de alta taxa de captura acoplada a um intensificador de imagens da marca Hamamatsu. As medidas foram realizadas utilizando a técnica LII resolvida no tempo, em duas dimensões. Os resultados mostram que as dimensões das gotas de combustível influenciam diretamente na área de formação de fuligem. Desta forma, o tamanho das partículas de fuligem tende a aumentar nas regiões fora da zona de formação de fuligem.

Trabalhos mais atuais abordam a propensão de produção de fuligem em chamas utilizando o biodiesel, como o caso do Tran et alli, 2012, que usaram o LII e o método de extinção de luz para demonstrar quantitativamente a propensão de formação de fuligem. Oliveira, 2012, por sua vez, utilizou o biodiesel para o desenvolvimento e aplicação de um queimador laminar confluyente em alta pressão.

### 2.3. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

A calibração é um passo importante para o ajuste do sistema de medição. Existem diferentes parâmetros para se fazer a calibração do sinal LII, a saber: (i) gravimetria, (ii) extinção de luz, (iii) diferentes janelas temporais ou espectrais e (iv) tamanho da partícula.

A calibração do sinal LII pode ser feita utilizando a técnica de extinção de luz laser em uma linha de visada. Nesta técnica, a luz laser atravessa a chama em uma determinada posição e a intensidade da luz transmitida é inversamente proporcional a exponencial da fração de volume de fuligem segundo Choi et alli, 1995. Assim sendo, conhecendo-se o coeficiente de extinção da fuligem produzida por determinados combustíveis e o comprimento de onda utilizado nas medições [Willians, 2006] é possível obter valores absolutos de fração de volume de fuligem. Neste método de calibração, os resultados globais medidos em certas regiões das chamas são comparados com o sinal, integrado, obtido a partir de medidas pontuais de LII segundo Wainner, 1999. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Santoro, 1983.

### 2.4. CONSIDERAÇÕES

Os trabalhos citados apresentam resultados que indicam a viabilidade da medição da concentração de fuligem e do diâmetro do particulado utilizando a técnica LII. Nota-se um avanço dos equipamentos e técnicas empregadas nos experimentos citados na seção 2.2. De Vander Wal, 1994, até Hayashi, 2011, foram 17 anos de evolução da técnica LII. A fundamentação teórica consolida os resultados obtidos pelos trabalhos anteriores.

A comparação de modelos teóricos com os resultados experimentais possibilita a validação dos modelos de formação de fuligem e permitirá avaliar o efeito dos modelos de radiação em meio participante quanto às previsões de formação de fuligem. Estudos numéricos foram realizados paralelamente aos trabalhos experimentais presentes na literatura, os quais abordaram chamas de difusão, empregando modelos de formação de fuligem e modelos espectrais para a radiação térmica, conforme Mossi et alli, 2010.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo é reservado para o detalhamento da bancada experimental utilizada para a medição de fuligem, na qual são descritos os instrumentos que compõem a bancada experimental utilizada para a implementação da calibração da técnica LII a partir dos resultados de extinção de luz. Esta técnica, frequentemente utilizada por trabalhos da literatura para a calibração dos resultados de LII, foi escolhida neste trabalho por ter os equipamentos necessários disponíveis nos laboratórios do DEMEC.

#### 3.1. O QUEIMADOR

O estudo é realizado em chamas laminares de difusão seguindo a configuração proposta por Burke-Schumann [Burke et al., 1928], na qual se utiliza um queimador com dois tubos concêntricos, garantindo uma chama laminar axissimétrica. A chama de difusão consiste na separação inicial dos reagentes, com a combustão ocorrendo apenas na região onde o combustível se mistura com o comburente. A figura 3.1 mostra o desenho esquemático com as dimensões dos tubos concêntricos do queimador.

O queimador é formado por um tubo modular com duas câmaras separadas por uma tela de malha fina e um tubo interno, de 4,7 mm de diâmetro, pela saída de gás combustível. A câmara do tubo, com 45 mm de diâmetro, é preenchida com esferas de vidro com diâmetro médio de 1,8 mm, a fim de se obter uma uniforme distribuição da velocidade do ar.

A medição das vazões de alimentação de combustível e de ar é feita com o auxílio de dois medidores de vazão, os rotâmetros, localizados na base do queimador. O rotâmetro de ar, marca AppliTech, possui escala de 15-160 slpm e incerteza de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. O rotâmetro de combustível, marca ASA, possui escala de 0,15–1,4 slpm e com precisão de  $\pm 5\%$  do fundo de escala.

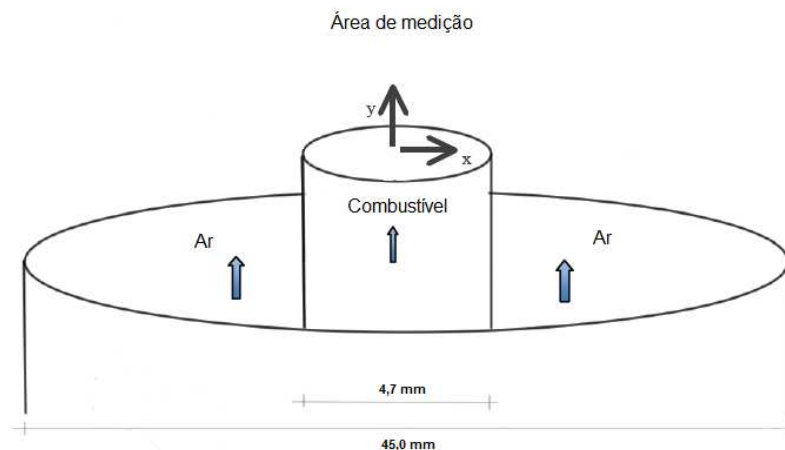


Figura 3.1: Representação dos tubos concêntricos do queimador.

#### 3.2. CHAMAS

São consideradas para o estudo duas chamas de difusão, laminares, com alturas visíveis de 50 mm (chama 1) e 80 mm (chama 2). A configuração das chamas apresenta simetria axial. Estas foram obtidas a partir do uso dos combustíveis, metano, GN e de GLP, em um queimador Burke-Schumann. O queimador, mostrado na figura 3.1, estabiliza chamas em configuração de jato livre, as quais são representativas de equipamentos industriais.

A tabela 3.1 apresenta valores da configuração das chamas, as quais são o objeto de estudo do presente trabalho, identificados na tabela por *TCC*. Estas chamas também foram abordadas em estudos disponíveis na literatura [Vander Wal, 1999, Shaddix, 1996, Williams, 2007, Cristian, 2012]. Na tabela, o comprimento da chama é denotado por  $h$ , a vazão volumétrica de combustível é  $V_c$  e do ar é  $V_{ar}$ . A velocidade do jato de combustível é representado por  $U_c$ , a velocidade do escoamento de ar anular por  $U_{ar}$ , o coeficiente de extinção  $K_e$ , e  $\lambda$  como sendo o comprimento de onda.

Tabela 3.1 – Valores de configuração da chama para diferente trabalhos.

Trabalho	$h$ (mm)	$V_c$ (l/min)	$V_{ar}$ (l/min)	$U_c$ (m/s)	$U_{ar}$ (m/s)	$K_e$	$\lambda$ (nm)	Combustível
TCC	50	0,15	12	0,14	0,10	7,8	514,5	Gás Natural
	80	0,20	20	0,19	0,10	7,8	514,5	Gás Natural
	50	0,15	12	0,14	0,10	7,8	514,5	Metano
	80	0,20	12	0,19	0,10	7,8	514,5	Metano
Cristian	46	0,15	-	0,14	0,16	-	-	Metano
	76	0,3	-	0,28	0,16	-	-	Metano
Williams	84	0,44	350	0,82	3,53	6,4	635	Metano
Shaddix	79	0,44	9,6	0,78	0,79	6,5	632,8	Metano
Vander Wall	50	0,35	42,3	0,07	0,07	-	600	Metano

A figura 3.2 mostra as chamas de 50 mm e 80 mm de altura visível, respectivamente. Estas chamas foram obtidas a partir do uso alternado de combustíveis, primeiro o metano, em seguida o GN e depois o GLP, nas quais foram realizadas medidas de extinção de luz, a fim de calibrar os resultados obtidos a partir do emprego da técnica LII.

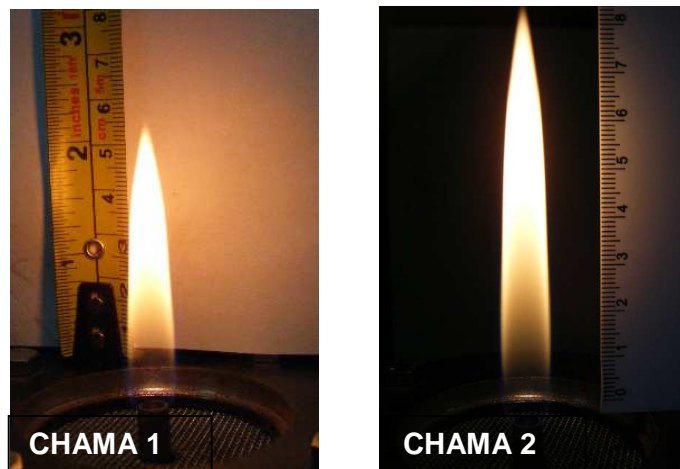


Figura 3.2: Chama de 50 mm (Chama 1) à esquerda; e 80 mm (Chama 2) à direita.

### 3.3. BANCADA EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO

Para a calibração é utilizado o método de extinção de luz que requer equipamentos de emissão de luz e captura do sinal óptico, conforme mostrado no Apêndice IV esta bancada é constituída de um sistema de iluminação, um sistema de detecção e um sistema de processamento, a fim de realizar medições na chama estabilizada no queimador, no qual chamas laminares foram estudadas previamente por Cristian, 2012. Os detalhes da montagem experimental, mostrada na figura 3.3, são apresentados nas seções a seguir.

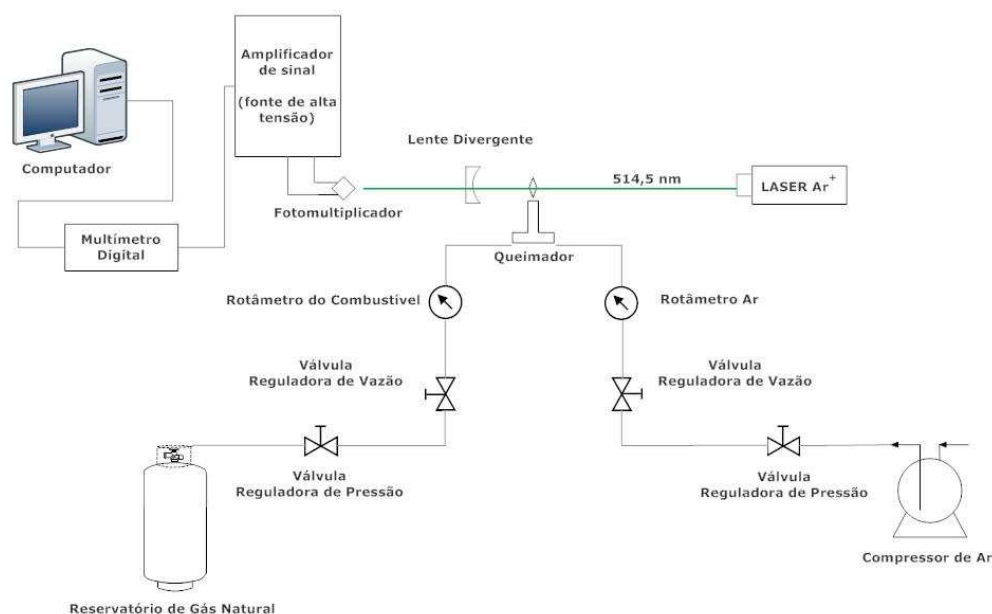


Figura 3.3: Diagrama esquemático da bancada experimental para extinção de luz.

### 3.3.1. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Para a emissão de luz na chama de difusão laminar em estudo foi utilizado um laser contínuo de íon de argônio ( $\text{Ar}^+$ ) da marca Spectra-Physics, modelo Stabilite 2016, com comprimento de onda de 514,5 nm e potência utilizada de 2 W, vide Apêndice I. O feixe de luz foi transmitido através de uma fibra óptica que permite melhor manuseio do equipamento.

### 3.3.2. SISTEMA DE DETECÇÃO

Para o sistema de detecção foi utilizado um tubo fotomultiplicador da marca Hamamatsu, modelo 931A, com eficiência quântica de aproximadamente 16 % para o comprimento de onda de 514,5 nm com incerteza de 2% e eficiência quântica máxima de 40% em 210 nm, vide apêndice I. Este detector deve ser alimentado por 1 kV através de uma fonte de alta-tensão para amplificar o sinal LII capturado e filtro óptico passa-baixa para evitar a região do espectro visível, diminuindo assim o ruído causado pela luminosidade da chama. O tubo fotomultiplicador foi ligado a um multímetro digital da marca Agilent de incerteza 1% que faz a aquisição de dados por meio do software HP BenchLink Data Logger, vide apêndice II.

Com auxílio de um alvo de calibração, vide Apêndice II, o qual possui pontos espaçados 1 mm de distância entre si foi possível estabelecer uma relação entre o tamanho real do objeto e o produzido na imagem. Considerando a configuração utilizada neste trabalho, a aresta de cada pixel da imagem mede 170  $\mu\text{m}$ . Este tipo de calibração permite determinar o comprimento e largura de uma chama por meio de comparação da imagem do objeto.

### 3.3.3. TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ

Neste trabalho, optou-se por utilizar a técnica de extinção de luz para realizar a calibração das medidas de fração de volume de fuligem, isto é, as medidas em (mV) são transformadas em (ppm) a partir do ajuste dos resultados de fração de volume de fuligem e a intensidade do sinal de LII, gerando assim resultados quantitativos e absolutos da fuligem.

A medição de  $f_v$  por extinção de luz considera que o tamanho da partícula é bem menor que o comprimento de onda utilizado para iluminação. Este método mede a quantidade

de luz incidente,  $I_0$ , e transmitida,  $I$ , de uma chama contendo partículas de fuligem. A lei de Beer-Lambert-Bourgue aplicada à extinção de luz segue a seguinte relação,

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\frac{x f_v K_e}{\lambda}\right), \quad (3.1)$$

onde  $K_e$  corresponde ao coeficiente de extinção da fuligem,  $x$  à espessura da chama atravessada pela luz laser e  $\lambda$  ao comprimento de onda da luz do laser.

As medidas foram realizadas a cada 10 mm a jusante da saída do queimador, com uma taxa de captura de 10 Hz, tendo sido adquiridas 300 medidas a fim de alcançar um nível de confiança estatístico de 95%.

O procedimento de medida foi realizado utilizando os componentes descritos anteriormente, conforme a montagem experimental, mostrado na figura 3.3. A chama foi posicionada entre a fonte de iluminação e o detector. O valor da intensidade inicial,  $I_0$ , da luz laser foi adquirido com o feixe de luz laser incidindo diretamente no detector, porém, com a presença de chama a fim de se manter constante o nível de ruído gerado pela luminosidade da chama. Em seguida, foram registradas medidas com o laser atravessando a chama e incidindo no detector,  $I$ , em alturas a cada 10 mm a jusante da superfície do queimador. Estas medidas foram capturadas pelo multímetro digital e, então, foi feita uma análise das intensidades de luz com a fração de volume de fuligem. Como a medida de extinção considera a caminho percorrido pela luz através da chama deve-se conhecer a espessura da chama na altura de medição e o volume total de fuligem naquela posição. Para tanto, a imagem da chama foi analisada para corrigir a porcentagem de volume da chama onde há presença de fuligem, visando obter o valor de  $f_v$  médio na região de medição.

### 3.4. SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a realização das medidas de fração de volume de fuligem a partir da técnica LII foram necessários a utilização de um sistema de excitação, um sistema de detecção do sinal e um sistema de processamento, vide Apêndice V, com a finalidade da obtenção do sinal LII. A figura 3.4 ilustra a montagem experimental para a aplicação da técnica LII.



Figura 3.4: Desenho esquemático da bancada experimental para aplicar LII.

#### 3.4.1. SISTEMA DE EXCITAÇÃO

As partículas de fuligem são excitadas por meio de um laser de íon de Neodímio Nd:YAG da marca New Wave Research pulsado a uma cadência de 30 Hz, comprimento de onda de 532 nm e 33 mJ de energia e tempo de duração do pulso de 5 ns, vide Apêndice III.



### 3.4.2. SISTEMA DE DETECÇÃO

Foi utilizado o fotomultiplicador Hamamatsu, anteriormente usado para a técnica de extinção de luz. Este fotodetector foi acoplado a um osciloscópio digital da marca Tektronix modelo TDS 210, com frequências de 60 MHz de captura e 1 GS/s de amostragem, vide Apêndice III.

### 3.4.3. A TÉCNICA LII

Para realizar medidas pontuais nas chamas, isto é, com resolução espacial em uma chama laminar de difusão, foi escolhida a técnica LII. Este método é de fácil implementação e conceitualmente simples. A luz do laser passa por uma lente convergente para ter o foco ajustado, que por sua vez incide na chama atingindo as partículas de fuligem e assim elevando sua temperatura até a incandescência. O fotomultiplicador é posicionado perpendicularmente ao feixe de luz do laser. Uma lente convergente é utilizada com a finalidade de aumentar a captura do sinal. O sinal de incandescência é amplificado e então é registrado no osciloscópio digital para posteriormente ser processado e calibrado com os resultados adquiridos com a técnica de extinção de luz, a fim de obter resultados quantitativos, uma vez que o LII fornece apenas resultados qualitativos.

## 3.5. ANÁLISE DAS INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES

A incerteza nas medições desempenha um papel importante na caracterização dos resultados, pois é uma ferramenta que indica quantitativamente a qualidade dos resultados obtidos, ou seja, o nível de confiabilidade destes. A seção tem a finalidade de apresentar as incertezas nas técnicas utilizadas no presente trabalho.

Para este cálculo é empregado o método de Kline-McClintock que determina a incerteza calculando as tolerâncias sobre essas medições, segundo a equação 3.2.

$$u_{Total} = \pm [\sum_{i=1}^n (u_i)^2]^{1/2} \quad (3.2)$$

### 3.5.1. INCERTEZAS NAS MEDIDAS DE EXTINÇÃO

A incerteza total,  $u_{EXT}$ , das medidas de fração de volume de fuligem, referente à técnica de extinção de luz, foi calculada considerando a propagação das incertezas a partir da contribuição de cada grandeza envolvida no método de medição. Neste caso, foram utilizadas: a incerteza na medida da intensidade de luz laser,  $u_1$ , a incerteza na determinação do valor do coeficiente de extinção de luz da fuligem,  $u_{Ke}$ , a incerteza no comprimento de onda da luz laser,  $u_\lambda$ , e também a incerteza na medida do caminho óptico percorrido pelo feixe de luz através da chama,  $u_x$ , conforme mostrado nas equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$u_{EXT} = \pm [(u_1)^2 + (u_{Ke})^2 + (u_\lambda)^2 + (u_x)^2 +]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$u_{EXT} = \pm [(0,06)^2 + (0,08)^2 + (0,02)^2 + (0,015)^2 +]^{1/2} = \pm 10,3 \% \quad (3.4)$$

### 3.5.2. INCERTEZAS NAS MEDIDAS DE LII

A incerteza nas medições com LII são estimados a partir do desvio dos valores em relação aos resultados obtidos a partir da aplicação da técnica de extinção de luz, utilizada para calibrar os resultados de LII. Para determinar esta incerteza foram comparados os resultados obtidos com as chamas de metano, sendo que a discrepância encontrada é de 8% para a chama 1 e de 6% para a chama 2.

## 4. RESULTADOS

Este capítulo está dividido em duas seções, a primeira apresenta os resultados da técnica extinção de luz, a qual foi utilizada para a calibração dos dados do sinal LII. A segunda seção mostra os resultados do LII comparados com extinção de luz para chamas produzidas a partir de diferentes combustíveis.

### 4.1. CALIBRAÇÃO

Os resultados de fração de volume de fuligem adquiridos por meio do método da extinção de luz foram comparados com outros trabalhos encontrados na literatura. Os resultados para a chama de 50 mm de comprimento foram comparados ao trabalho realizado por Vander Wal et alii, 1999, que utilizou como combustível o metano e os resultados foram calibrados com a técnica TEM. O trabalho de Shaddix et alii, 1996, foi utilizado para aferir os resultados da chama de 80 mm, o qual também utilizou metano como combustível e calibrou por extinção de luz. Além disso, foram obtidos resultados para chamas 1 e 2 utilizando o GN e o GLP como combustível. Estes resultados, envolvendo a fração de volume de fuligem médio em função da posição longitudinal das chamas são apresentados na figura 4.1 que mostra o gráfico comparativo.

Os triângulos verdes correspondem às medidas de extinção de luz realizadas no laboratório para o metano. Os quadrados pretos são valores encontrados na literatura para o gás metano para chamas de 50 mm [Vander Wal, 1999] e 80 mm [Shaddix, 1996].

Os resultados de fração de volume de fuligem, obtidos a cada 10 mm de altura, a partir das medidas de extinção de luz exibem uma distribuição esperada quanto à produção local e a oxidação pela chama. Logo a jusante da saída do jato central as partículas estão concentradas na vizinhança da região de ar anular onde a mistura é rica em combustível. A fuligem formada nesta região sobre um crescimento ao longo da direção longitudinal da chama, a qual apresenta os valores máximos de fração de volume de fuligem nas alturas 30 e 60 mm, para as chamas de 50 e 80 mm, respectivamente. A partir deste ponto há uma diminuição no valor medido de fração de volume de fuligem, devido à oxidação dos aglomerados de partículas.

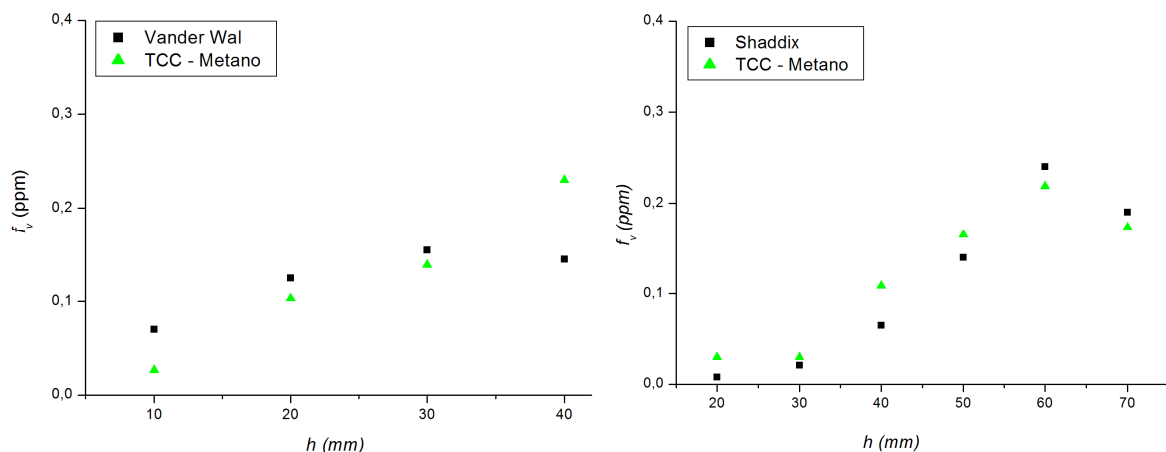


Figura 4.1: Fração de volume de fuligem para a chama de 50 mm de comprimento (à esquerda) e para a chama de 80 mm de comprimento (à direita).

A comparação entre os resultados obtidos para a chama de metano estudadas neste trabalho com a literatura, para as chamas 1 e 2, apresenta discrepância entre as medidas ao longo da chama, no máximo de 20%, que verificam o nível de confiança das medidas realizadas com a técnica de extinção de luz. Note-se que, nas medidas em 10 mm para a

chama 1 e na chama 2 possuem grande desvio entre os resultados medidos se comparados com a literatura. Isto ocorre pelo fato da relação sinal sob ruído ser mais baixa nesta região. Por outro lado, o resultado em 40 mm na chama 1 mostrou um grande desvio em comparação com a literatura, cerca de 30%, devido à instabilidade na região superior da chama.

#### 4.2. MEDIDAS DE $f_v$ COM LII

Os resultados de fração de volume de fuligem obtidos com LII para o combustível GLP. Estes resultados foram calibrados com os adquiridos pela técnica de extinção de luz, obtendo resultados quantitativos para  $f_v$  do combustível GLP, uma vez que o método LII fornece apenas dados qualitativos. Após calibrado, os resultados para o LII foram comparados com os resultados obtidos pela extinção de luz para os combustíveis metano e GN, vide figura 4.2.

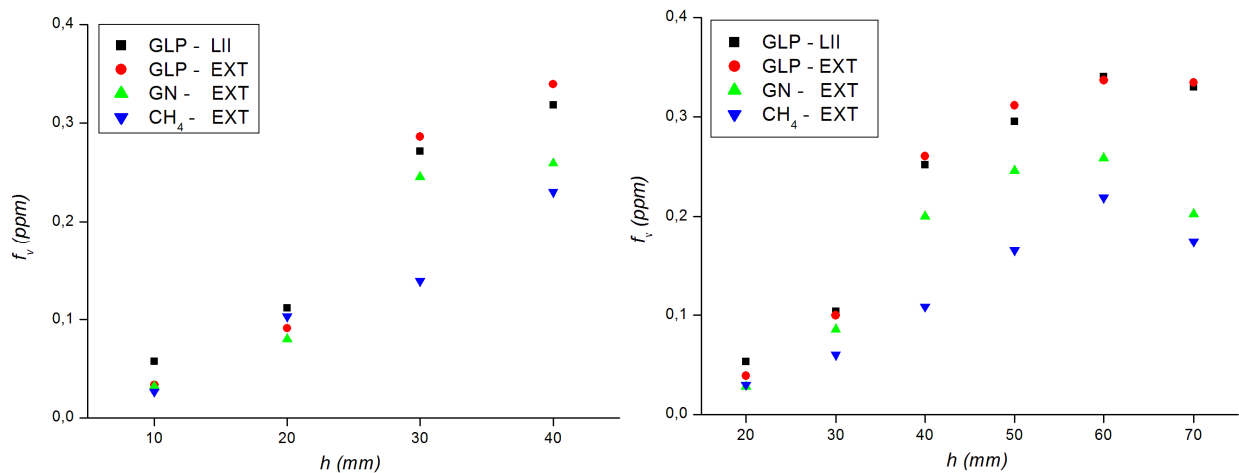


Figura 4.2: Fração de volume de fuligem para a chama de 50 mm de comprimento (à esquerda) e para a chama de 80 mm de comprimento (à direita) para LII.

Nos gráficos acima, os quadrados pretos mostram a quantidade da fração de volume de fuligem para o combustível GLP, medidas utilizando LII, ao longo da direção longitudinal das chamas de 50 mm e 80 mm. Os pontos vermelhos indicam as medidas de  $f_v$  para GLP a cada 10 mm a jusante da superfície do queimador por meio da técnica de extinção de luz, as quais foram utilizadas para a calibração do LII. Os triângulos verdes e azuis são as  $f_v$  para os combustíveis metano e GN, respectivamente.

Os resultados obtidos com LII para o GLP mostraram comportamento muito similar com os resultados adquiridos por extinção de luz para os combustíveis GLP, GN e CH<sub>4</sub>. O combustível GLP apresentou maiores frações de volume de fuligem, seguido do metano e GN. Os resultados de metano apresentam valores de cerca de 50% menores que os valores medidos na chama de GN, os quais mostraram valores cerca de 50% menores que aqueles obtidos na chama de GLP, para ambas as chamas.

Logo acima do jato de combustível, entre 10 e 20 mm, a fração de volume de fuligem também se encontra baixa, apresentando um valor máximo nas posições 40 e 60 mm para as chamas 1 e 2, respectivamente. A partir destas alturas nota-se um decaimento dos valores de  $f_v$ . Este comportamento é devido à oxidação dos aglomerados de partículas, conforme descrito por Wainner, 1999. Esta variação da  $f_v$  ao longo da altura da chama pode ser observada de forma mais clara na figura 4.3, a qual mostra a cada 10 mm a  $f_v$  para uma chama de GN de altura de 80 mm de altura.

A figura 4.3 permite notar que existe uma relação de proporcionalidade entre a fração de volume de fuligem e a incandescência, pois a luminosidade é decorrente da presença de fuligem, logo quanto mais fuligem maior a luminosidade.

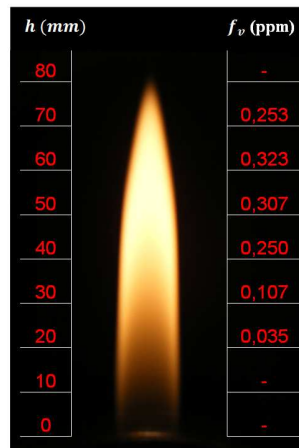


Figura 4.3: Fração de volume de fuligem para a chama de 80 mm com gás natural.

A partir da figura anterior é possível criar um perfil tridimensional da  $f_v$  ao longo da espessura (eixo  $x$ ) e altura da chama (eixo  $h$ ), sendo a intensidade de radiação da chama o eixo  $f_v$  para a chama de GN, conforme mostrado na figura 4.4. As imagens corroboram com o comportamento dos resultados de  $f_v$  obtidos pelas medidas realizadas com extinção e LII.

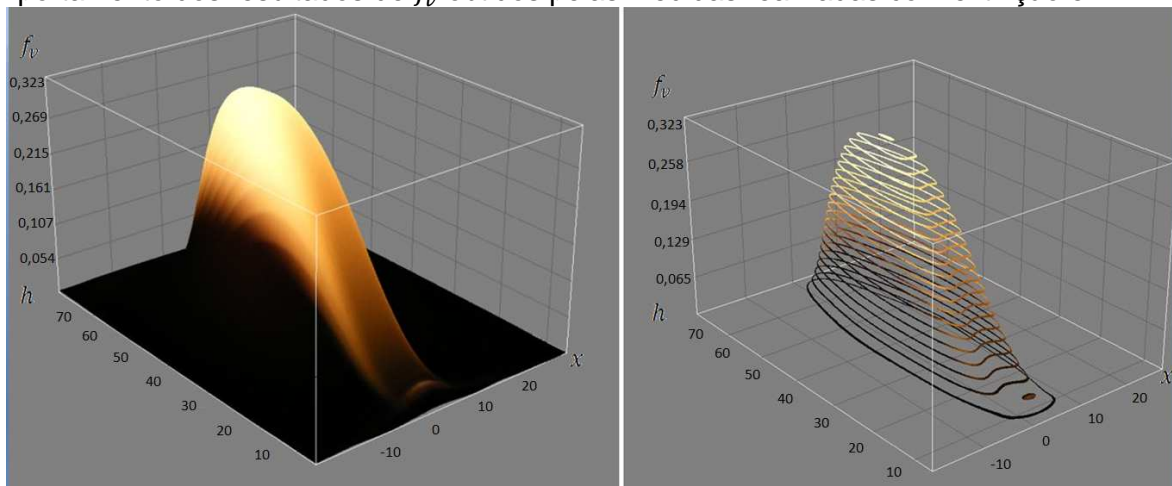


Figura 4.4: Perfil de intensidade de radiação (à esquerda) e; isolinhas de  $f_v$  (à direita).

#### 4.2.1. DIFICULDADES ENCONTRADAS

No decorrer do trabalho foram encontradas dificuldades que resultaram em imprecisão em algumas etapas do experimento. A instabilidade da chama no momento da medição interferiu para a obtenção de valores mais confiáveis, pois a posição na extremidade superior da chama variava com o tempo. As medidas pontuais se tornaram imprecisas devido à falta de um sistema de controle de vazão de combustível, pois a chama também variava de altura. A variação na intensidade do laser foi outra causa de grandes incertezas de medição, pois a fonte de alimentação do laser não era perfeitamente estável, tornando a energia do feixe de luz variável. A falta de um filtro óptico adequado acabava por capturar a luminosidade da chama, produzindo assim, baixos valores de relação sinal e ruído. Isto contribuiu para as grandes discrepâncias encontradas entre os resultados das medidas principalmente na base da chama, 10 e 20 mm a jusante da superfície do queimador, e os resultados da literatura. A forte presença de poeira no laboratório foi outro motivo para a variação da intensidade do laser, pois como o feixe de luz laser sofre interferência no caminho óptico a intensidade medida é diferente da emitida, resultando em incertezas nas medidas.

## 5. CONCLUSÃO

A técnica LII para determinação da fração de volume de fuligem calibrada por extinção mostrou resultados coerentes com os disponíveis na literatura, tanto nos valores quanto no comportamento.

A curva da  $f_v$  em função da altura da chama por meio da técnica LII para o combustível GLP mostrou comportamento muito similar aos resultados da  $f_v$  encontrados pela extinção de luz. Isto mostra a compatibilidade entre os métodos, possibilitando a partir de então realizar medidas pontuais com o LII para diferentes combustíveis e não apenas para o GLP.

As medidas realizadas com LII não foram realizadas nas chamas dos outros combustíveis, metano e GN, devido à indisponibilidade do laser pulsado no local onde se encontravam esses gases e vice-versa.

A proposta de medir  $f_v$  em outros combustíveis alternativos além do metano, como encontrado na literatura, foi alcançada, validando a aplicação da técnica LII, uma vez que as  $f_v$  mostraram comportamento semelhante ao do GLP.

A partir de ensaios realizados para os combustíveis  $\text{CH}_4$ , GLP e GN é possível concluir que, o GLP, dentre os combustíveis analisados, é o que possui maior quantidade de fração de volume de fuligem, seguido do GN e  $\text{CH}_4$ , ou seja, possui uma maior emissão de fuligem.

Para a realização dos experimentos descritos neste trabalho foram investidos cerca de apenas 250 reais e utilizados componentes encontrados nos laboratórios do DEMEC. Considerando estes aspectos somados às dificuldades como a presença de poeira, instabilidade da chama e inexistência de filtros ópticos adequados os resultados obtidos apresentaram incertezas relativamente baixas para ambas as técnicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barreta L. G. e SBAMPATO M. E.; **“Imaging of Laser-Induced Fluorescence in an Ethanol Atmospheric Flame”**, XXX Encontro Nac. de Física da Matéria Condensada, 2007.

Boiarciuc A., Foucher F., Moreau B., Pajot O. and Mounaïm–Rousselle, C.; **“Simultaneous Spatial and Temporal Resolved Laser-Induced Incandescence to Study the Soot Particles Formation”**, Ph.D. Thesis, University of Orléans, FRANCE, 2004.

Burke S.P. and Schumann T.E.W., **Difusion Flames**, Combustion Simposium, vol. 20, Nº10, pp 998-1004, 1928.

Choi M. Y., Mulholland G. W., Hamins A., Kashiwagi T.; **“Comparison of the Soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Techniques”**, Combustion and Flame, vol. 102:161-169, 1995.

Choi B.C., Choi S.K., Chung S.H.; **“Soot formation Characteristics of Gasoline Surrogate Fuels in Counterflow Diffusion Flames”**, Proceedings of the Combustion Institute 33:609–616, 2010.

Eckbreth A. C.; **“Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics”**, J. Appl. Phys. 48, 4473–4483, 1977.

Fengshan L., Barry J.S., Snelling D.R., Smallwood G.J.; **“Effects of primary soot particle size distribution on the temperature of soot particles heated by a nanosecond pulsed laser in an atmospheric laminar diffusion flame”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, 777–788, 2006.

Geraque E.; **“Fuligem corresponde por terço do aquecimento global”**, Folha de São Paulo, 2009.

Hayashi J., Watanabe H., Kurose R., Akamatsu F.; **“Effects of Fuel Droplet Size on Soot Formation in Spray Flames Formed in a Laminar Counterflow”**, Comb. and Fl., 2011.

Lemaire R., Therssen E., Desgroux P.; **“Effect of Ethanol Addition in Gasoline and Gasoline–Surrogate on Soot Formation in Turbulent Spray Flames”**, Fuel 89:3952, 2010.

Melton L.A.; **“Soot Diagnostics Based on Laser Heating”**, App. Opt. 23, 2201, 1984.

Mossi, A. C., Barve, V. V., Galarça, MM, Vielmo, H. A., França, F H R, Ezekoye, O.; **“Spectral Gas Absorption Coefficient Model Effects on Radiative Source Term in a 2D Axisymmetric Diffusion Flame”**, Proceedings of the International Heat Transfer Conference. Washington, DC, USA : ASME, vol. 1, pp 1-10, 2010.

Oliveira M.H.A.; **“Development and application of a laminar coflow burner for combustion studies at high pressure”**, Eindhoven University Press, 2012.

Parreira D.; **“Fapto e Petrobras fomentam pesquisas na área de produção de combustíveis alternativos”**, Fundação de Apoio a Pesquisa do Tocantins, 2012.

Schraml, S., Dankers, S., Bader, K., Will, S., Leiperz, A.; **“Soot Temperature Measurements and Implications for Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE LII)”**, Combustion and Flame, 120:439-450, 2000.

Shaddix C. e Smyth K.C.; **“Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames”**, Combustion and Flame, vol. 107, 418-452, 1996.

Tran M.K., Dunn-Rankin D., Pham T.K.; **“Characterizing sooting propensity in biofuel–diesel flames”**, Combustion and Flame, vol. 159, 2181–2191, 2012.

Vander Wal R. L., Weiland K.J.; **“Laser-induced incandescence: Development and characterization towards a measurement of soot-volume fraction”**, Appl. Phys., 445, 1994.

Vander Wal R. L., Ticich T. M., Stephens B.; **“Can Soot Primary Particle Size be Determined Using Laser-Induced Incandescence?”**, Comb. and Flame, 116:291–296, 1999.

Wainner R. T. e Seitzman J. M.; **“Soot Diagnostics using LII in Flames and Exhaust Flows”**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.

Williams T.C., Shaddix C.R., Jensen K.A., Suo-Anttila J.M.; **“Measurement of the dimensionless extinction coefficient of soot within laminar diffusion flames”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, 1616–1630, 2007.

Witze, P. O., Shimpi S.A., Durrett R.P., Farrell L.A.; **“Time-Resolved Laser-Induced Incandescence Measurements for the EPA Heavy-Duty Federal Test Procedure”**, Sixth Int. Symp. Diag. and Mod. of Comb. in Int. Eng, 2004.

## ANEXO I

Fengshan et al., 2005, mostrou que o sinal LII pode ser utilizado para determinar o tamanho da partícula primária, pois para diferentes diâmetros são exibidos diferentes decaimentos de temperatura. Porém, para temperaturas em diferentes locais da chama, a taxa de resfriamento da partícula é alterada, logo o sinal óptico também será alterado.

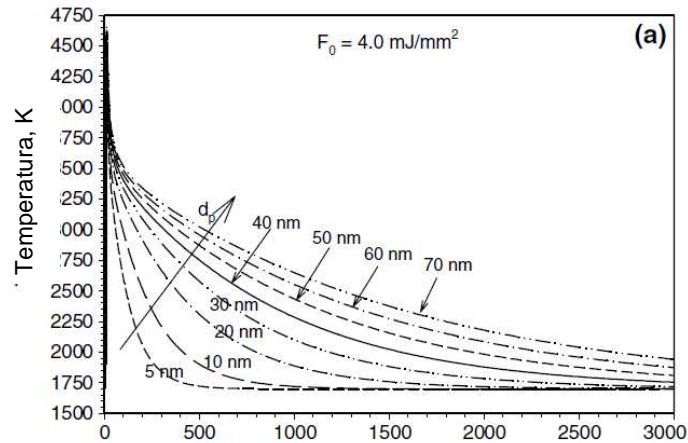


Figura I: Gráfico da influência do tamanho da partícula, Fengshan et ali, 2005.

## ANEXO II

A figura II mostra a montagem esquemática do experimento de Boiarciuc et al., 2004, juntamente com seus resultados gráficos para a distribuição de energia e para a imagem 2D da chama a partir do LII.

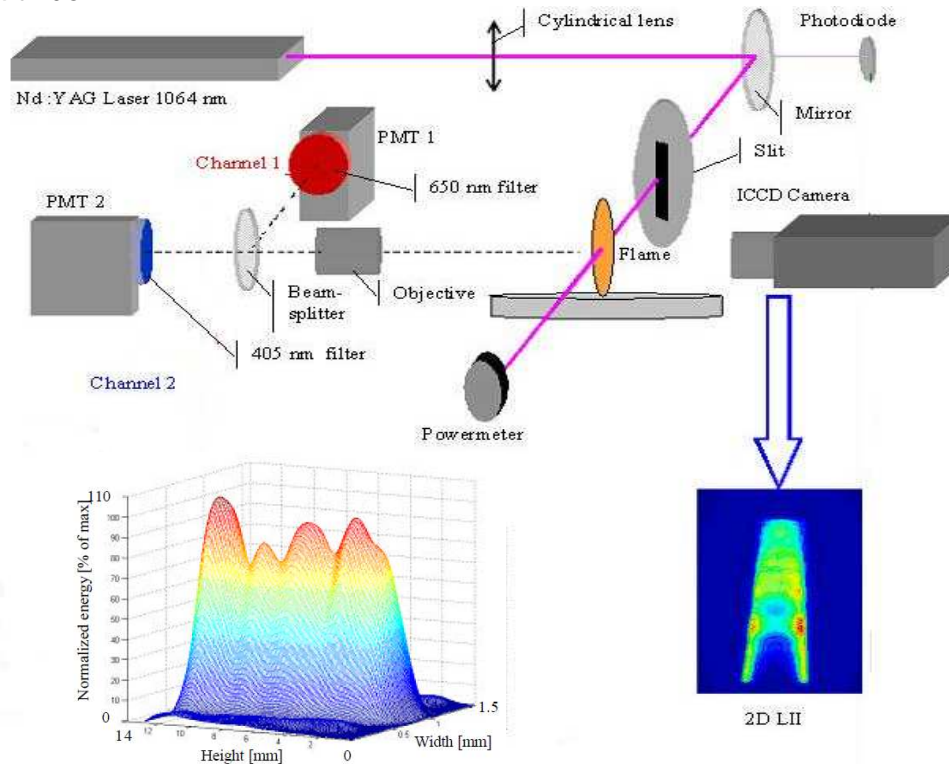


Figura II: Montagem esquemática do experimento [Boiarciuc et al., 2004].

APÊNDICE I

Sistema de iluminação para a técnica de extinção de luz, mostrado na figura IV, onde são ilustrados o laser de íon de argônio e os componentes.



Figura III: Laser de íon de argônio da marca Spectra-Physics.

O sistema de detecção de radiação é mostrado nas figuras IV e V, que ilustram os equipamentos utilizados para o sistema de detecção por extinção de luz, um fotomultiplicador da marca Hamamatsu e um multímetro digital da marca Agilent, que faz a aquisição de dados por meio do software HP BenchLink Data Logger.

- FEATURES**
- Wide Spectral Response  
R3788 ..... 185 nm to 750 nm  
R4332 ..... 160 nm to 750 nm
  - High Cathode Sensitivity  
Luminous ..... 120  $\mu$ A/lm Typ.  
Radiant at 420 nm ..... 90 mA/W Typ.  
Quantum Efficiency at 210 nm ..... 40 % Typ. (R4332)
  - High Anode Sensitivity (at 1000 V)  
Luminous ..... 1200 A/lm Typ.  
Radiant at 420 nm .....  $9.0 \times 10^5$  A/W Typ.
- APPLICATIONS**
- Fluorescence Spectrophotometers
  - Emission Spectrophotometers
  - Atomic Absorption Spectrophotometers

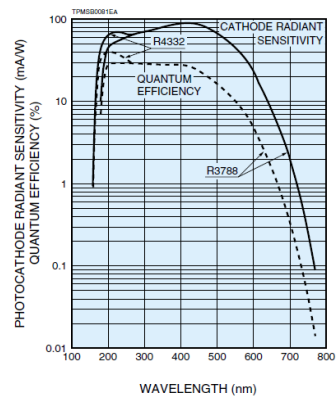


Figura IV: Fotomultiplicador Hamamatsu.



Figura V: Multímetro digital Agilent.



## APÊNDICE II

A figura VI mostra o alvo de calibração usado para determinar as dimensões da chama a partir de uma distância padrão de 1 mm entre pontos.



Figura VI: Alvo de calibração junto ao queimador.

## APÊNDICE III

As partículas de fuligem são excitadas por meio de um laser de íon de Neodímio Nd: YAG da marca New Wave Research pulsado a 30 Hz, comprimento de onda fundamental de 532 nm e 33 mJ de energia. A figura VII mostra o laser utilizado para o experimento.



Figura VII: Laser Nd: YAG utilizado para a excitação das partículas de fuligem.

Foi utilizado um osciloscópio digital da marca Tektronix modelo TDS 210, com frequência de 60 MHz e 1 GS/s para realização das medidas. A figura VIII ilustra o osciloscópio usado no experimento.



Figura VIII: Osciloscópio digital Tektronix TDS 210.

## APÊNDICE IV

A figura IX ilustra os instrumentos usados na bancada experimental construída para a calibração.

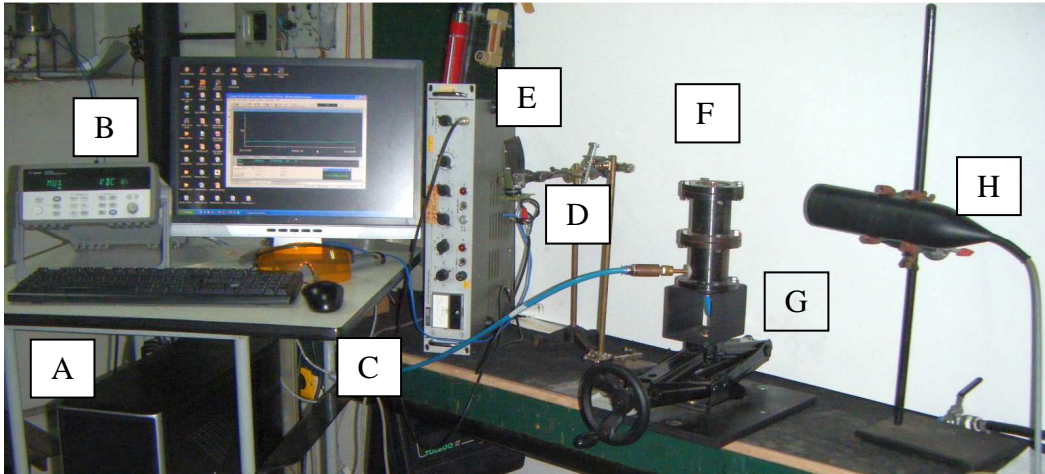


Figura IX: Bancada experimental para realização da técnica de extinção de luz, onde:  
 A) Computador, B) Multímetro, C) Amplificador de sinal (fonte de alta tensão),  
 D) Fotomultiplicador com filtro óptico passa-baixa, E) Rotômetros, F) Lente divergente,  
 G) Queimador com mesa de posicionamento, H) Fibra óptica para direcionar o feixe laser.

## APÊNDICE V

A figura X mostra os equipamentos utilizados para aplicar a técnica LII.

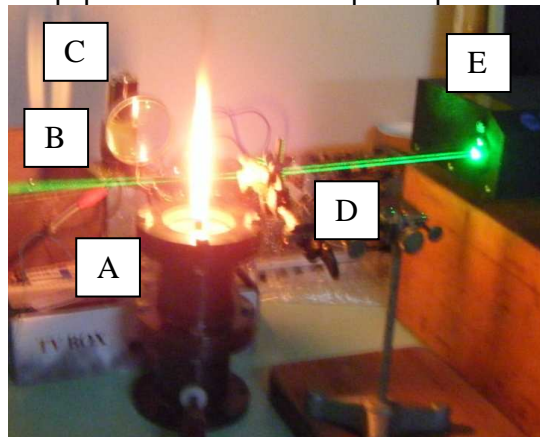


Figura X: Sistema de medição para a técnica LII, onde: A) Queimador, B) Lente divergente, C) Fotomultiplicador, D) Lente convergente, E) Laser.