



**Ricardo Rabello de Castro**

**Estudo experimental da distribuição de  
temperatura e fuligem em chamas laminares**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Luís Fernando Figueira da Silva

Rio de Janeiro  
novembro de 2018

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, Tania e Newton, pelo apoio moral e intelectual.  
Agradeço aos meus irmãos Gustavo, Vitória e Catarina.  
Agradeço aos meus colegas de laboratório Alain, Gabriela, Letícia, e Suzane.  
Agradeço especialmente ao meu orientador Luís Fernando pelo aprendizado, experiência e paciência .

## **Resumo**

### **Estudo experimental da distribuição de temperatura e fuligem em chamas laminares**

Este trabalho tem como objetivo realizar a medição experimental da fração volumétrica de fuligem e do campo de temperatura de uma chama laminar. O método de pirometria duas cores é utilizado no levantamento do campo de temperatura, enquanto o método de extinção é utilizado na determinação da fração volumétrica de fuligem. O projeto envolve a reconstrução e adaptação do queimador de tipo Gülder, utilizado anteriormente em trabalhos do Laboratório de Combustão da PUC-RIO.

### **Palavras-chave**

Chama laminar; Extinção; Fuligem; pirometria Duas cores;

## **Abstract**

### **Experimental study of the distribution of temperature and soot in laminar flames**

This work aims to measure experimentally the soot volume fraction and the temperature field on a laminar flame. The two-colour pyrometry method is used to obtain the temperature field and the extinction method provides the soot volume fraction data. The project involves the reconstruction and adaptation of the Gülder burner, used in previous works of the Combustion Laboratory of PUC-RIO.

## **Keywords**

Laminar flame; Extinction; Soot; Two-colour thermometry;

## Sumário

1	Introdução	8
2	Metodologia e Materiais	11
2.1	Métodos experimentais para medição de fuligem	11
2.2	Pirometria de duas cores	14
2.3	Experimento	16
3	Resultados	26
3.1	Condições de escoamento	26
3.2	Fração volumétrica de fuligem	27
3.3	Temperatura da fuligem	31
4	Conclusão e perspectivas	34
4.1	Conclusão e contribuições	34
4.2	Perspectivas	34
5	Apêndice A	37

## Lista de figuras

1.1	Matriz energética Brasileira em 2015 [3].	8
1.2	Limite de emissão de material particulado imposto pelo padrão europeu de emissões (EURO) [2].	9
2.1	Representação esquemática da extinção laser.	11
2.2	Esquema do balanço energético de um aglomerado de partículas de fuligem [7].	13
2.3	Perfil de emissão integrado de uma chama axisimétrica, (a) perfil horizontal e (b) discretização da seção transversal chama, retirado de [7].	15
2.4	Bancada experimental vista de topo: 1 Queimador / 2 Monitor de energia nº1 / 3 Laser / 4 Monitor de energia nº2.	16
2.5	Bancada experimental, vista lateral.	17
2.6	Elevador do conjunto óptico: 1 elevador / 2 Monitor de energia nº1 / 3 Laser.	18
2.7	Esquema da montagem experimental de extinção laser.	18
2.8	Vista em corte do queimador utilizado no experimento	20
2.9	Vista explodida do queimador: 1 Luva de PVC; 2 Espuma; 3 Tela de aço; 4 Esferas de cerâmica.	21
2.10	Esquema dos medidores de vazão	22
2.11	Comparação do campo de temperatura da fuligem antes e depois da modificação no código.	25
3.1	Regimes de funcionamento testados	26
3.2	Percurso óptico ( $L$ ) em função da altura da chama para os três regimes.	28
3.3	Fração volumétrica de fuligem no regime A.	29
3.4	Fração volumétrica de fuligem no regime B.	29
3.5	Fração volumétrica de fuligem no regime C.	30
3.6	Resultado de fração volumétrica de fuligem de Cruz [7], obtido com incandescência induzida por laser.	31
3.7	Campo de temperatura da fuligem no regime A.	32
3.8	Campo de temperatura da fuligem no regime B.	32
3.9	Campo de temperatura da fuligem no regime C.	33
5.1	Controlador de vazão mássica Omega FMA5400.	37
5.2	Foto da interface Arduino.	38
5.3	Esquema do circuito Arduino sem LCD	39
5.4	Código utilizado no controlador, adaptado de Espindola [5]	40

## Lista de tabelas

2.1	Índices de refração por comprimento de onda [6].	13
3.1	Regimes de funcionamento testados.	27
3.2	Condições de escoamento	27

# 1

## Introdução

Há muitos motivos para se estudar a formação de fuligem em processos de combustão. A combustão está na base da matriz energética de muitos países, especialmente daqueles que não possuem abundância de fontes de energia renováveis.

Na figura 1.1 podemos observar a matriz energética brasileira no ano de 2015. Dela extraímos algumas informações importantes:

- Quase 80% da energia consumida no Brasil está associada à combustão.
- Todos os combustíveis mencionados possuem carbono e, portanto, sua combustão pode produzir fuligem.

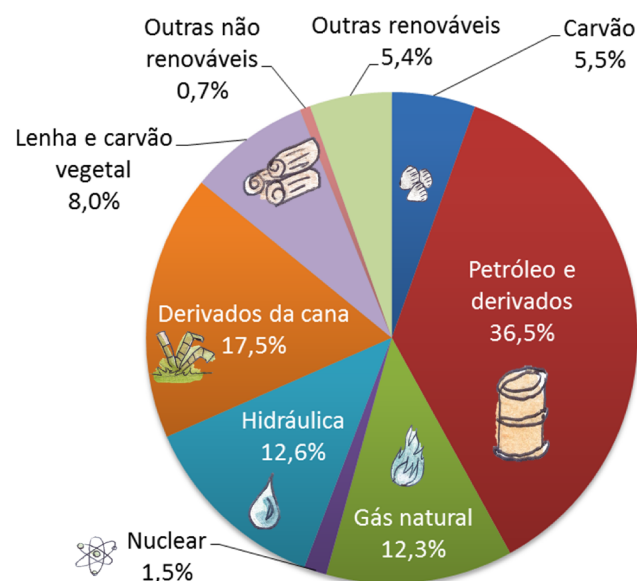


Figura 1.1: Matriz energética Brasileira em 2015 [3].

A fuligem pertence a um grupo de poluentes chamado Material Particulado (MP). O MP pode ser definido como um corpo sólido de tamanho suficientemente pequeno para que ele se mantenha suspenso na atmosfera [1]. O MP pode ter origem orgânica (fuligem) ou inorgânica (poeira).

O material particulado é classificado segundo o diâmetro da partícula. Partículas com diâmetro menor que  $10\ \mu\text{m}$  são partículas consideradas inaláveis e estão associadas a riscos à saúde, como doenças cardiovasculares. Um aumento de  $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de  $MP_{2.5}$  (com diâmetro inferior a  $2.5\ \mu\text{m}$ ) está associado a um aumento de 11% na incidência de doenças coronárias



[4]. Em geral o MP mais fino é originado em processos de combustão traz um risco maior para saúde que outros tipos de MP.

No Japão, foi realizado um estudo com o objetivo de analisar a eficácia de uma política de redução de emissão de poluentes de veículos a diesel. Do momento da introdução da medida em 2003 até a realização do estudo em 2012, a concentração de MP foi reduzida em 44%. No tocante ao número de mortes relacionadas a doenças cardiovasculares em Tokyo e Osaka (onde não havia esse controle de emissões até 2009), o estudo mostrou que houve uma queda de 11% no número de mortes, essencialmente devido a uma redução de 10% no número de mortes por doença arterial coronariana [4].

Na figura 1.2 podemos ver a evolução das exigências do padrão EURO de emissões para veículos a diesel. Fica claro que nos últimos anos não foi possível reduzir as emissões de MP. A determinação da fração volumétrica de fuligem é portanto um assunto atual. Assim, novas políticas de redução de emissão de material particulado introduzem um desafio que necessitará uma maior compreensão do processo de formação de fuligem.

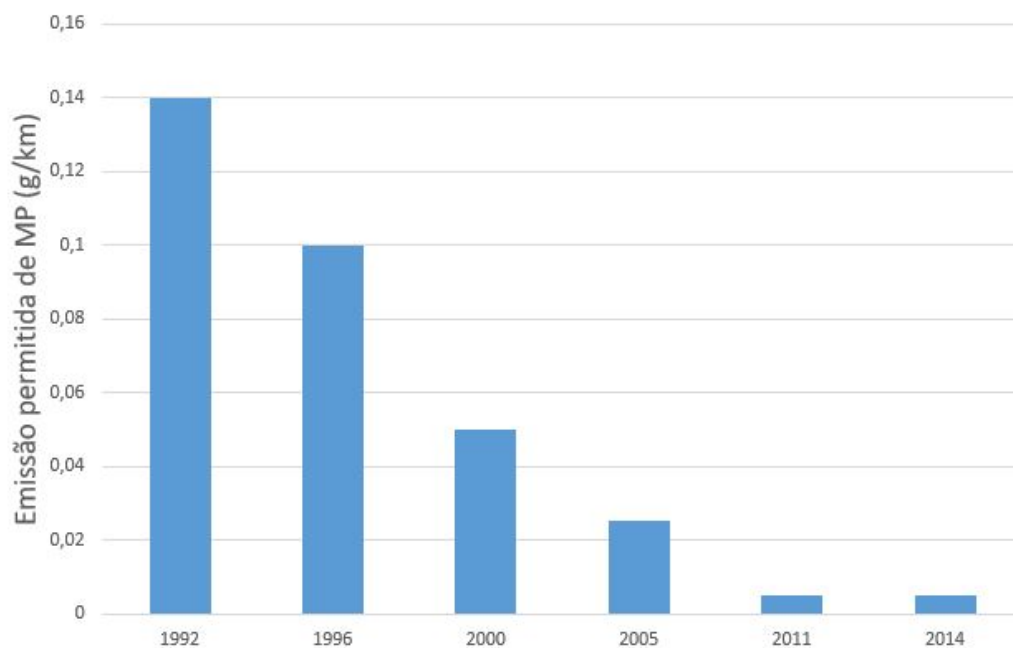


Figura 1.2: Limite de emissão de material particulado imposto pelo padrão europeu de emissões (EURO) [2].

Estudos sobre a formação de fuligem já foram feitos por Cruz [7] e Mergulhão, Cacella e Nascimento [10]. Nosso objetivo é repetir os experimentos

fazendo algumas melhorias ao queimador para trabalhar com vazões maiores de combustível.

O objetivo deste trabalho é caracterizar uma montagem experimental de extinção laser capaz de medir a fração volumétrica de fuligem tomando como padrão o queimador de Gülder. O queimador escolhido já foi objeto de estudo de diversos pesquisadores e, portanto, existem muitos artigos publicados com resultados de fração volumétrica de fuligem para este queimador. Paralelamente, serão realizados experimentos de pirometria duas-cores de forma a levantar o campo de temperatura da fuligem na chama.

O manuscrito está dividido em três partes. Primeiro descrevemos as técnicas existentes, a metodologia e os materiais empregados neste trabalho. Em seguida apresentamos os resultados obtidos e os comparamos aos resultados obtidos em outros experimentos. Finalmente, propomos mudanças na metodologia e em outras abordagens que poderiam melhorar os resultados.

## 2

### Metodologia e Materiais

Neste capítulo iremos descrever as técnicas empregadas em estudos de chamas laminares. E, em seguida, apresentaremos os procedimentos e materiais empregados na obtenção dos resultados encontrados.

#### 2.1

#### Métodos experimentais para medição de fuligem

##### 2.1.1

##### Extinção da luz (LE)

O objetivo do método de extinção é determinar a fração volumétrica de fuligem em diferentes pontos de uma chama. O método de extinção consiste, essencialmente, em passar um feixe laser por uma chama medindo sua energia antes e depois a energia do feixe. A extinção corresponde a soma da energia do feixe absorvida pelas partículas de fuligem da energia espalhada [6]. A razão entre a intensidade do feixe antes e depois da chama pode então ser associada à fração volumétrica de fuligem.

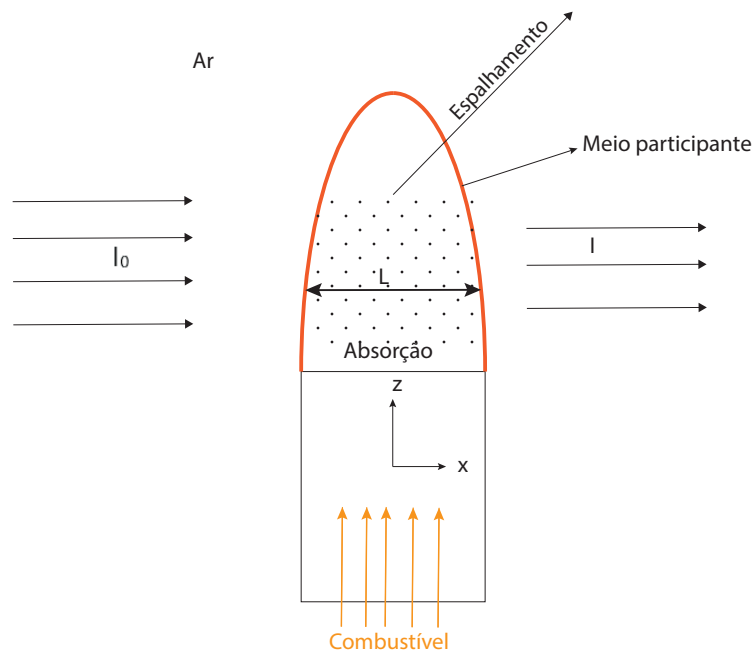


Figura 2.1: Representação esquemática da extinção laser.

Na figura 2.1 o fenômeno de extinção está representado para o caso de uma chama laminar. A chama é um meio participante, significando que ela emite, absorve e espalha energia luminosa.

A principal da vantagem da extinção é a simplicidade da montagem experimental. São necessários apenas dois monitores de energia e um laser, que pode ser de potência relativamente baixa.

Os principais problemas que devem ser contornados na técnica de extinção laser são o desvio laser (*beam steering*) e a determinação do índice de refração complexo, que só pode ser determinado experimentalmente. Zhao e Landommatos [6] fazem uma revisão das técnicas de estudo de fuligem e temperatura de chama. Eles fornecem os valores do índice de refração para diferentes comprimentos de onda e sugerem a hipótese de que a contribuição do espalhamento na extinção pode ser desconsiderada. A equação fundamental da extinção é dada por:

$$I = I_0 \exp \left( \int_0^L K_{ext} dx \right), \quad (2-1)$$

onde  $I_0$  é a intensidade luminosa antes do meio fuliginoso,  $I$  a intensidade após a extinção,  $L$  o percurso óptico (espessura da chama por exemplo) e  $K_{ext}$  o fator de extinção. A razão  $\tau = I/I_0$  é chamada de transmitância do meio participante.

$$K_{ext} = \frac{\pi}{4} C_n \int_0^\infty Q_{ext} D^2 N(D) dD, \quad (2-2)$$

onde  $Q_{ext}$  é a eficiência de extinção de uma partícula,  $D$  o diâmetro da partícula,  $N(D)$  a distribuição do diâmetro da partícula e  $C_n$  a densidade numérica de partículas de fuligem.

A eficiência de extinção  $Q_{ext}$  é a soma de  $Q_{abs}$  e  $Q_{scat}$  (absorção e extinção respectivamente). Onde:

$$Q_{scat} = \frac{8}{3} x^4 \operatorname{Re} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right), \quad (2-3)$$

$$Q_{abs} = 4x \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right), \quad (2-4)$$

onde  $m$  é o índice de refração da fuligem e  $x = \pi D/\lambda$ . Na maioria dos casos, o diâmetro  $D$  da fuligem é menor que 70 nm. Supondo um comprimento de feixe laser de 532 nm, temos  $x < 0,41$ . Substituindo o valor de  $x$  e  $m$  (dado na tabela 2.1) nas equações 2-3 e 2-4 temos  $\frac{Q_{scat}}{Q_{abs}} = 0,090$ .

Podemos então escrever a fração volumétrica de fuligem da seguinte forma:

$$f_v = \frac{\lambda}{6\pi L \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right). \quad (2-5)$$

A maior incerteza na determinação da fração volumétrica de fuligem por extinção é escolha do índice de refração. Zhao e Landommatos [6] fornece a tabela 2.1 de índices de refração reproduzida abaixo onde podemos observar a grande variação do índice de refração com o comprimento de onda utilizado.

Tabela 2.1: Índices de refração por comprimento de onda [6].

Comprimento de Onda	Índice de refração
$\lambda(nm)$	$m = n - ik$
337	$1,48 - i0,77$
532	$1,75 - i0,61$
633	$1,80 - i0,58$
810	$1,85 - i0,57$
1064	$1,91 - i0,59$

### 2.1.2

#### Incandescência induzida por laser (LII)

A técnica de LII é uma técnica mais complexa do que a de extinção, pois envolve mecanismos físicos mais sofisticados e menos compreendidos. A técnica consiste em aquecer as partículas de fuligem com um pulso laser de alta energia de maneira a elevar a temperatura até 3,800 K. A fuligem, nessa temperatura elevada, se comporta como um corpo cinza emitindo radiação de banda larga [7].

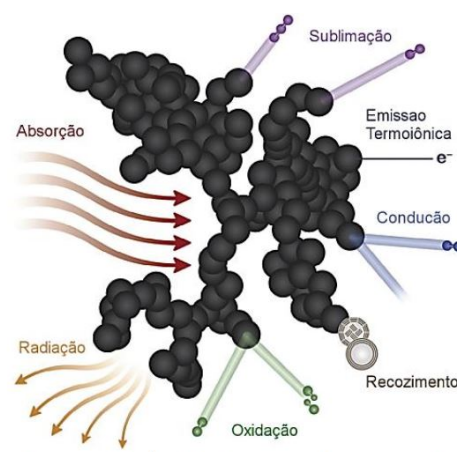


Figura 2.2: Esquema do balanço energético de um aglomerado de partículas de fuligem [7].

O processo de aquecimento e resfriamento de uma partícula de fuligem pode ser descrito pela equação diferencial abaixo.

$$\rho_s c_s \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{dT}{dt} = \dot{E}_{abs} + \dot{E}_{rad} + \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{sub} + \dot{E}_{ox} + \dot{E}_{rec} + \dot{E}_{ter}, \quad (2-6)$$

onde os termos  $\dot{E}$  são as potências de absorção, radiação, condução, sublimação, oxidação, recozimento e emissão termoiônica respectivamente.

A técnica de LII permite quantificar parâmetros que a técnica de extinção não permite. Por exemplo, na técnica de LII, podemos associar a velocidade de decaimento do sinal de incandescência da fuligem ao tamanho das partículas [6].

Além da maior complexidade, quando comparada a da técnica de extinção, a técnica de LII pode ser considerada como intrusiva, pois parte das partículas de fuligem serão sublimadas afetando assim o resultado de fração volumétrica.

## 2.2

### Pirometria de duas cores

Um dos parâmetros mais importantes na caracterização de uma chama é a temperatura. Quando a chama é suficientemente fuliginosa a técnica de pirometria de duas cores permite determinar sua temperatura. A chama é um meio participante. Isso significa que ela emite, absorve e espalha a luz. No caso da pirometria, estudos [9] mostraram que a absorção e espalhamento da luz emitida pela chama pode ser desprezada. A técnica consiste em obter duas imagens da chama, cada uma através de um filtro passa-banda de comprimento de onda diferente (por exemplo  $\lambda_1 = 650 \text{ nm}$  e  $\lambda_2 = 880 \text{ nm}$ ). O perfil de emissão da fuligem é associado perfil de emissão de um corpo cinza e, dessa forma, é possível associar a cada comprimento de onda uma potência emissiva. A potência emissiva do corpo negro é [6],

$$E_{b,\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]}, \quad (2-7)$$

onde  $E_{b,\lambda}$  é a potência emissiva monocromática ( $W.m^{-3}$ ),  $\lambda$  o comprimento de onda ( $\mu m$ ),  $T$  a temperatura (K) e  $C_1$  e  $C_2$  a primeira e segunda constantes de Planck respectivamente. A emissão monocromática da fuligem pode ser escrita como:

$$J_\lambda(T) = \epsilon_\lambda E_{b,\lambda}(T). \quad (2-8)$$

Empregamos a hipótese de que  $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$  [7]. Essa hipótese é válida se  $\lambda T < 3000 \text{ } [\mu m K]$ , ou seja, para uma chama de etileno com temperatura de combustão adiabática de 2500 K o maior comprimento de onda que pode ser utilizado é 1140 nm. Escrevendo a equação 2-8 para dois valores de  $\lambda$  podemos colocar a temperatura em evidência:

$$T = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{\ln \left[ \frac{J_{\lambda_1}}{J_{\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right]}. \quad (2-9)$$

Reescrevendo com a equação 2-9 :

$$T = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{\ln \left[ \frac{E_{b,\lambda_1}}{E_{b,\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right]}. \quad (2-10)$$

A câmera registra a emissão monocromática da chama, integrada ao longo do caminho óptico como é mostrado na figura 2.3. Isso acontece porque a chama, sendo um meio participante, absorve e emite luz ao longo da sua espessura. Isso significa que, se não fizermos a deconvolução, os valores de temperatura serão distorcidos. A figura 2.3 mostra exatamente esse fenômeno.

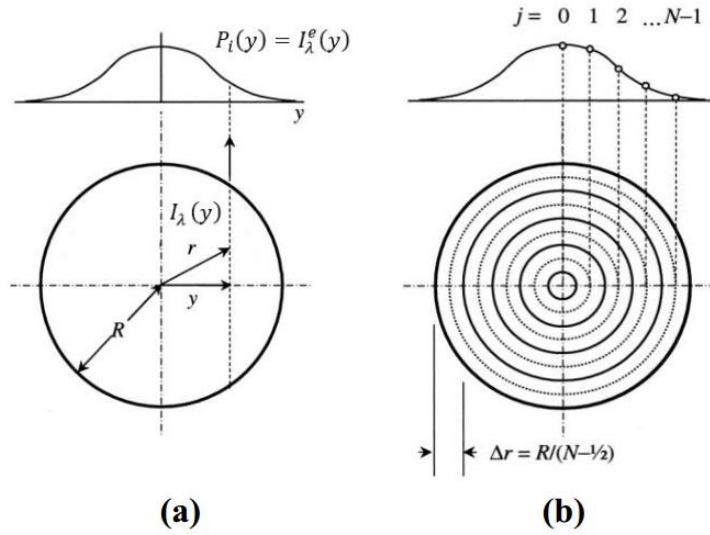


Figura 2.3: Perfil de emissão integrado de uma chama axisimétrica, (a) perfil horizontal e (b) discretização da seção transversal chama, retirado de [7].

O algoritmo de deconvolução de baseia na inversão de Abel ou "Onion-Peeling". Esse procedimento consiste em montar uma matriz que associa a intensidade de radiação espectral aos valores de potência emissiva [7].

## 2.3 Experimento

### 2.3.1 Montagem experimental

A bancada experimental consiste em um conjunto óptico, composto por um laser e dois monitores de energia, e o queimador. O conjunto óptico é montado em um elevador, como é mostrado na figura 2.6, que permite posicionar o feixe laser com precisão.



Figura 2.4: Bancada experimental vista de topo: 1 Queimador / 2 Monitor de energia nº1 / 3 Laser / 4 Monitor de energia nº2.

Na figura 2.4 podemos ver o conjunto óptico visto de cima, com o queimador posicionado.



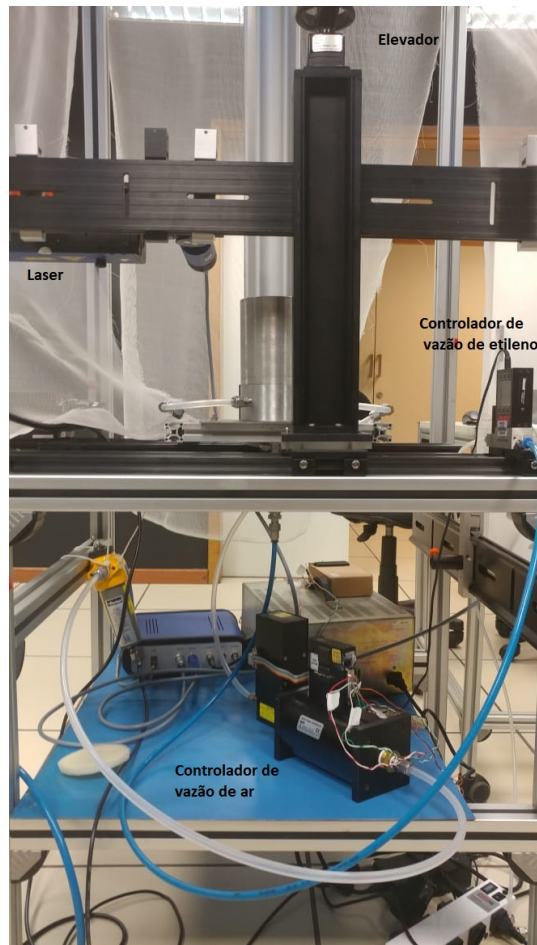


Figura 2.5: Bancada experimental, vista lateral.

Os equipamentos auxiliares (medidores de vazão, filtros, fontes etc) podem ser vistos na figura 2.5.

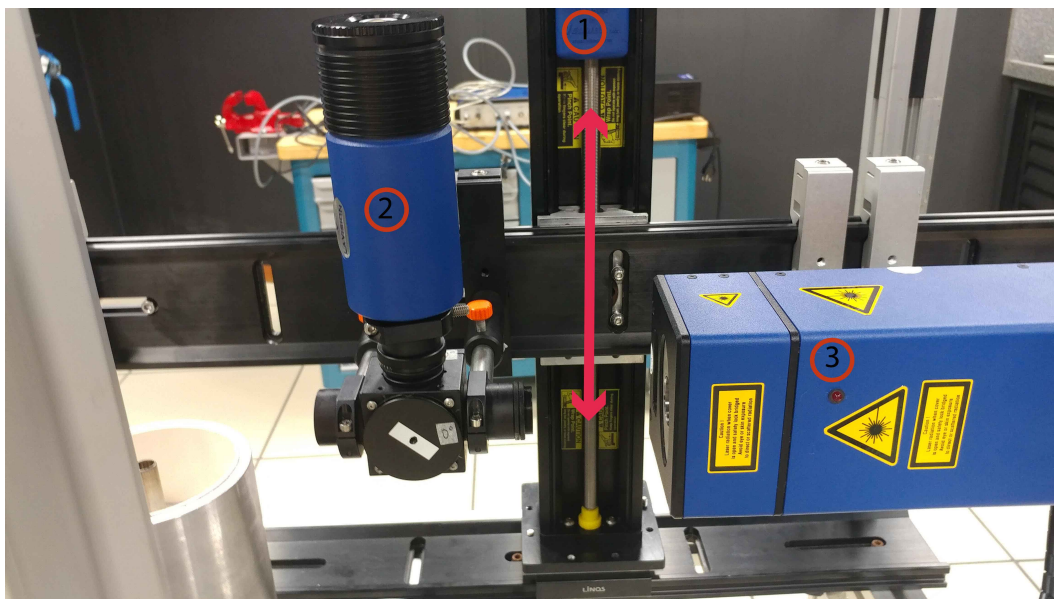


Figura 2.6: Elevador do conjunto óptico: 1 elevador / 2 Monitor de energia nº1 / 3 Laser.

Na figura 2.6 vemos o mecanismo de elevação do conjunto óptico que permite a leitura da altura de medição diretamente no elevador.

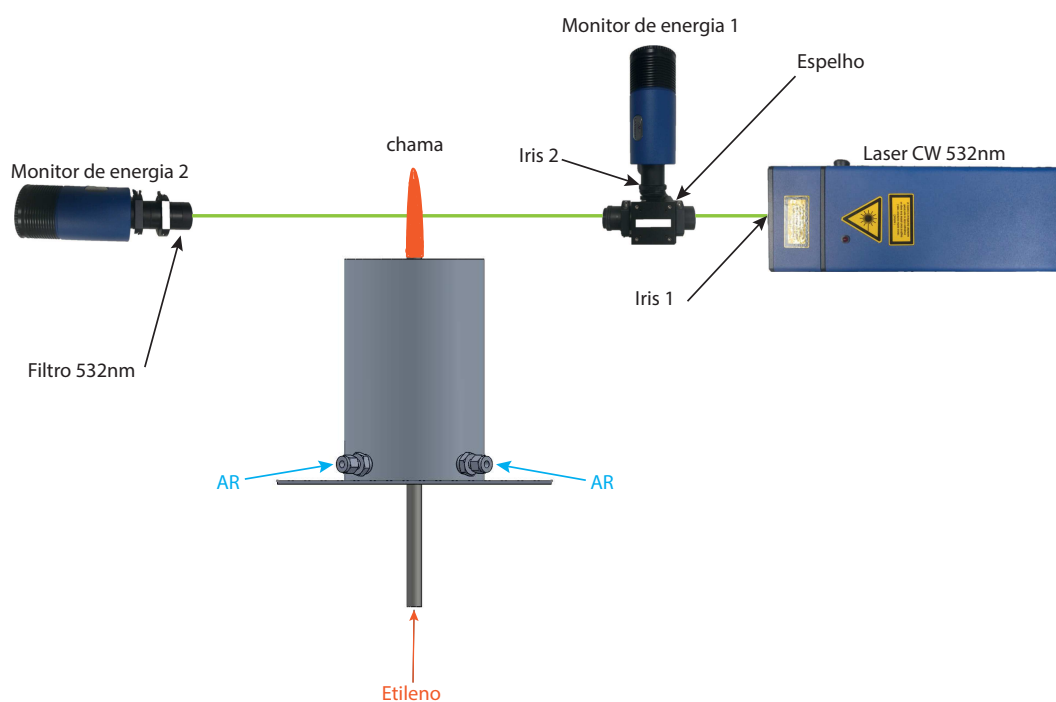


Figura 2.7: Esquema da montagem experimental de extinção laser.

Na figura 2.7 os diferentes componentes estão identificados. A função de cada componente está descrita abaixo, suas especificações serão detalhadas mais adiante.

- Laser CW 532nm: Laser de estado sólido que emite um feixe de comprimento de onda igual a 532 nm (cor verde).
- Iris 1: Controla o diâmetro do feixe laser (ajustada para 2mm).
- Espelho: Espelho a 45° que reflete 9% da energia do feixe laser em direção ao monitor de energia 1 e deixa passar os outros 91%.
- Iris 2: Controla a intensidade no monitor de energia 1.
- Monitor de energia 1: Recebe o sinal de laser antes de ser atenuado pela chama ( $I$ ).
- Filtro 532nm : Deixa passar somente o comprimento de onda do laser (532 nm). diminuindo assim a interferência de outras fontes de luz (como a chama).
- Monitor de energia 2 : Mede o sinal do laser após ser atenuado pela chama ( $I_0$ ).

### 2.3.2

#### O queimador Gülder

O queimador Gülder é um queimador laminar desenvolvido por Ömer L. Gülder em 1993 [8], para o estudo da influência da diluição do etileno com um gás inerte (Nitrogênio) na formação de fuligem.

O queimador utilizado neste trabalho foi o mesmo do trabalho de Cruz [7]. Quando foram feitos os testes nesse queimador ([7] e [10]) o laboratório não era equipado com compressores capazes de sustentar a de ar vazão utilizada em experimentos de outros pesquisadores. Com o intuito de diminuir as perdas de carga e facilitar o uso de vazões maiores algumas adaptações foram feitas no queimador. Entre elas podemos citar a remoção do material poroso cerâmico e o aumento do diâmetro das conexões de ar de 1/4" para 3/8". As modificações foram feitas iterativamente de modo a obter uma chama cada vez mais estável e menos suscetível a perturbações no ambiente. O aumento da vazão de ar, e conseqüentemente da velocidade do escoamento, permite a estabilização de chamas mais longas (com vazões maiores de combustível). Isso ocorre pois o escoamento de ar forma uma cortina que impede que o movimento do ar da sala interfiram na chama.

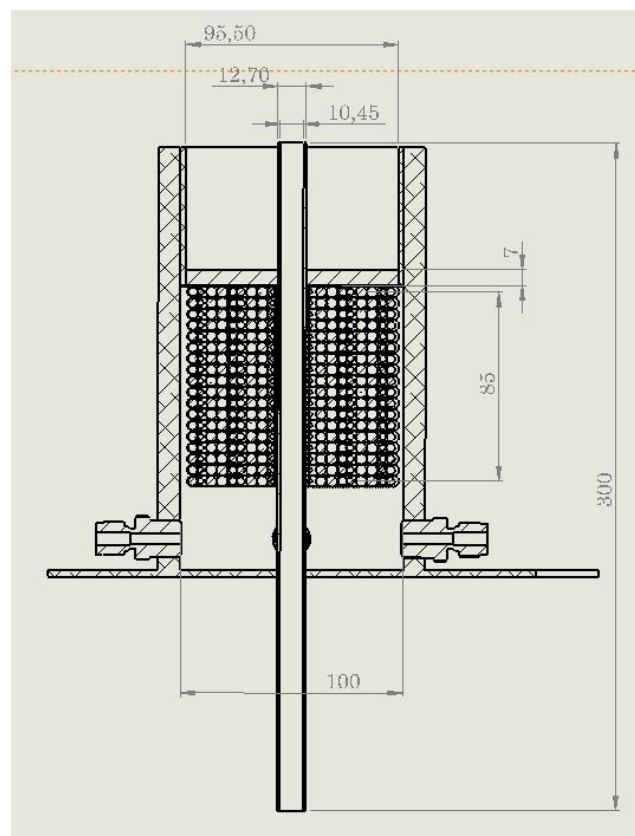


Figura 2.8: Vista em corte do queimador utilizado no experimento

A figura 2.8 é uma vista em corte do queimador com suas dimensões. O diâmetro externo do tubo de combustível é de 12,70 mm e o interno é de 10,45 mm. A luva de PVC reduz o diâmetro do bocal de 100 mm para 95,50 mm. O comprimento do tubo central de combustível é necessário para garantir que o escoamento esteja hidrodinamicamente desenvolvido na saída. O ar entra por 4 conexões de 3/8" na parte inferior do queimador.

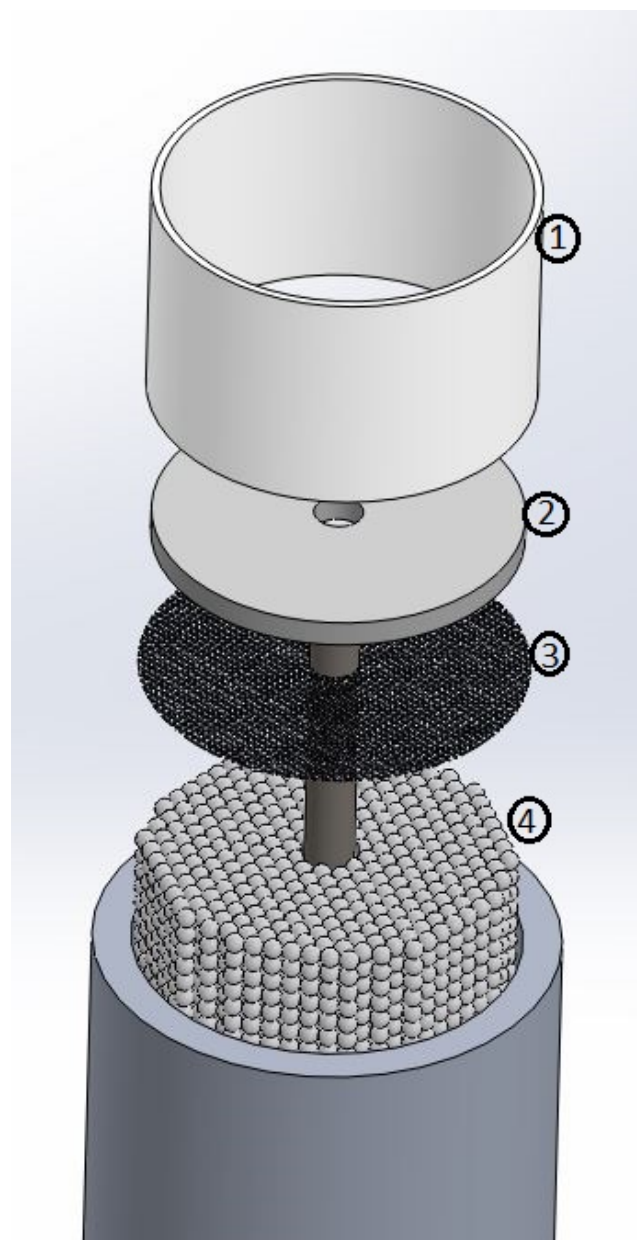


Figura 2.9: Vista explodida do queimador: 1 Luva de PVC; 2 Espuma; 3 Tela de aço; 4 Esferas de cerâmica.

Na figura 2.9 podemos observar o queimador em vista explodida. A luva de PVC juntamente com a tela são adicionadas de modo a manter as esferas dentro do queimador. A luva de PVC reduz o diâmetro da saída de ar em 5 mm e, para compensar essa redução, a vazão de ar foi ajustada de forma a manter a velocidade do escoamento igual ao experimento original. Foram realizados testes sem a espuma, mas tornou-se evidente a necessidade de um meio mais denso para homogenizar o escoamento.

### 2.3.3

#### Medição de vazão

São necessários dois controladores de vazão para o queimador Gülder. Na figura 2.10 está representado o esquema de medição de vazão utilizado nos experimentos. O controlador de vazão utilizado para o etileno é o MC-500SCCM-D/5M da fabricante Alicat, com fundo de escala de 500 SCCM ( $\text{cm}^3/\text{min}$  na condição padrão). Esse controlador possui um display integrado que permite o controle da vazão sem a necessidade de uma interface remota.

O controlador de vazão utilizado no controle da vazão de ar é o FMA5400 da fabricante OMEGA, com fundo de escala de 1000 SLPM ( $\text{L}/\text{min}$  na condição padrão). Para permitir a utilização deste controlador foi projetado um dispositivo de interface, cujos detalhes estão descritos no Apêndice A.

Ambos os medidores fazem uso do mesmo princípio de funcionamento. Uma pequena parte do escoamento é desviada para um tubo capilar onde a vazão é medida por queda de pressão. Nas condições de operação padrão do queimador a incertezas são  $\pm 15 \text{ SLPM}$  para o ar e  $\pm 2,55 \text{ SCCM}$  para o etileno.'

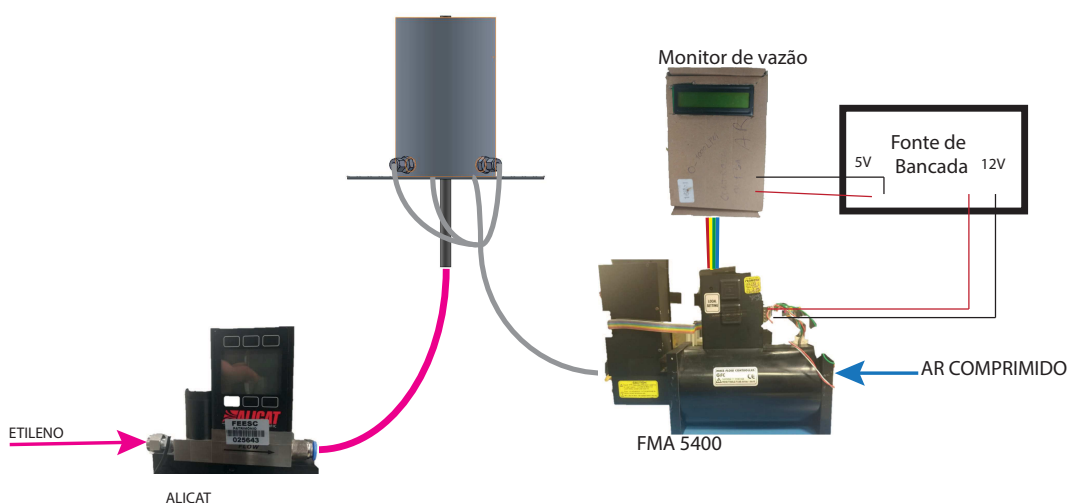


Figura 2.10: Esquema dos medidores de vazão

### 2.3.4

#### Medição de extinção

A técnica de extinção necessita essencialmente de uma fonte luminosa e dois monitores de energia. O Laser utilizado foi o DPSS-0,5W-CW (DPSS: *Diode Pumped Solid State*) da fabricante *LaVision*. Esse laser é chamado de laser de diodo e emite um feixe cujo comprimento de onda é de 532 nm (cor verde). A potência nominal é de 0,5 W. Os monitores de energia também são do modelo V8.4 da marca *LaVision*. A aquisição de dados e ca-

libração dos monitores de energia é feita através do software Davis versão 9.0 com o projeto de tipo *SootMaster*.

#### **Calibração:**

- Valores de ganho e tempo de integração são escolhidos e os valores dos monitores de energia são zerados sem a presença da chama e do laser (são empregados: tempo de integração de  $1300\ \mu s$  e ganho baixo).
- Laser é ligado e o alinhamento do feixe com o centro do queimador e os monitores de energia é realizado.
- A primeira iris é ajustada de forma a se obter um feixe de diâmetro suficientemente pequeno, sem todavia perder muita energia do feixe (é utilizado: 2 mm). Isso é importante, pois se trabalharmos com uma energia muito baixa, a luminosidade própria da chama afeta a leitura do segundo monitor de energia.
- A segunda iris é ajustada para que o valor no primeiro monitor de energia esteja dentro da faixa de medição (1500 a 2000 *counts*) e próximo ao valor no segundo monitor (foi empregado: 1 mm).
- É efetuada uma calibração de extinção com o laser ligado e sem a chama. O software então passa a reportar o valor de transmitância que, quando a chama estiver apagada, deve estar próximo de 1.
- O elevador é ajustado até ponto de medição mais baixo da chama que servirá de referência ( $h = 0\ mm$ ).

#### **Medição e processamento:**

- São realizadas medidas de 5 em 5 mm, na direção vertical, até o feixe laser passar fora da chama. Para cada altura são realizadas 100 medições (de forma a reduzir o erro de tipo A);
- Os valores de transmissividade são exportados para arquivos de formato im7;
- Um código Matlab é programado de modo a ler os dados exportados e calcular, a partir das imagens da chama, o percurso óptico para cada altura.

### 2.3.5

#### Medição de temperatura

Na pirometria duas cores é utilizada uma câmera CCD *Imager Instense* da fabricante *LaVision* com resolução  $1376 \times 1040$  e taxa de aquisição de 10 Hz. Na frente da câmera foi colocada uma roda de filtros com um filtro passa-banda de 650 nm e outro de 880 nm da marca Edmund Optics (transmitância: 0,85 FWHM: 10 nm). Novamente utilizamos os software Davis versão 8.4 no projeto *SootMaster*.

#### Procedimento experimental:

- O foco da câmera é ajustado de forma a obter uma imagem nítida no plano da chama.
- Uma placa de calibração é posicionada no queimador no plano da chama;
- O assistente de calibração é utilizado para que o software possa associar um pixel a uma distância real na chama;
- A placa de calibração é retirada e a chama pode ser acesa;
- Para cada regime de funcionamento são gravadas imagens sem filtro, com o filtro de 650 nm e com o filtro de 880 nm;
- São gravadas 100 imagens por vez.

#### Processamento:

O processamento é feito por um código Matlab adaptado do trabalho de Cruz [7]. Esse código pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Leitura dos arquivos provenientes do software DaVis para os dois comprimentos de onda.
- Seleção da área de interesse e cálculo do eixo de simetria da chama;
- Deconvolução do sinal de intensidade;
- Cálculo do campo de temperaturas da fuligem;
- Apresentação dos resultados graficamente.

No código original utilizado por Cruz [7], as imagens da distribuição de temperatura geradas possuem uma região na base da chama de alta temperatura. Nessa região não há fuligem, portanto a temperatura mostrada deveria ser nula. Essa leitura, incorreta, ocorre porque o valor de intensidade de um comprimento de onda diminui mais rápido que a intensidade de outro comprimento de onda. Para evitar esse problema uma adaptação foi feita no código. Esta adaptação consiste em eliminar as regiões onde o produto das intensidades  $J_{\lambda_1} \cdot J_{\lambda_2}$  é inferior a um patamar pré-determinado. Este patamar



foi definido como 10% da média do produto das intensidades  $J_{\lambda_1}$  e  $J_{\lambda_2}$ . Na figura 2.11 podemos observar o resultado da modificação do código no campo de temperatura da fuligem, comparando a utilidade desta.

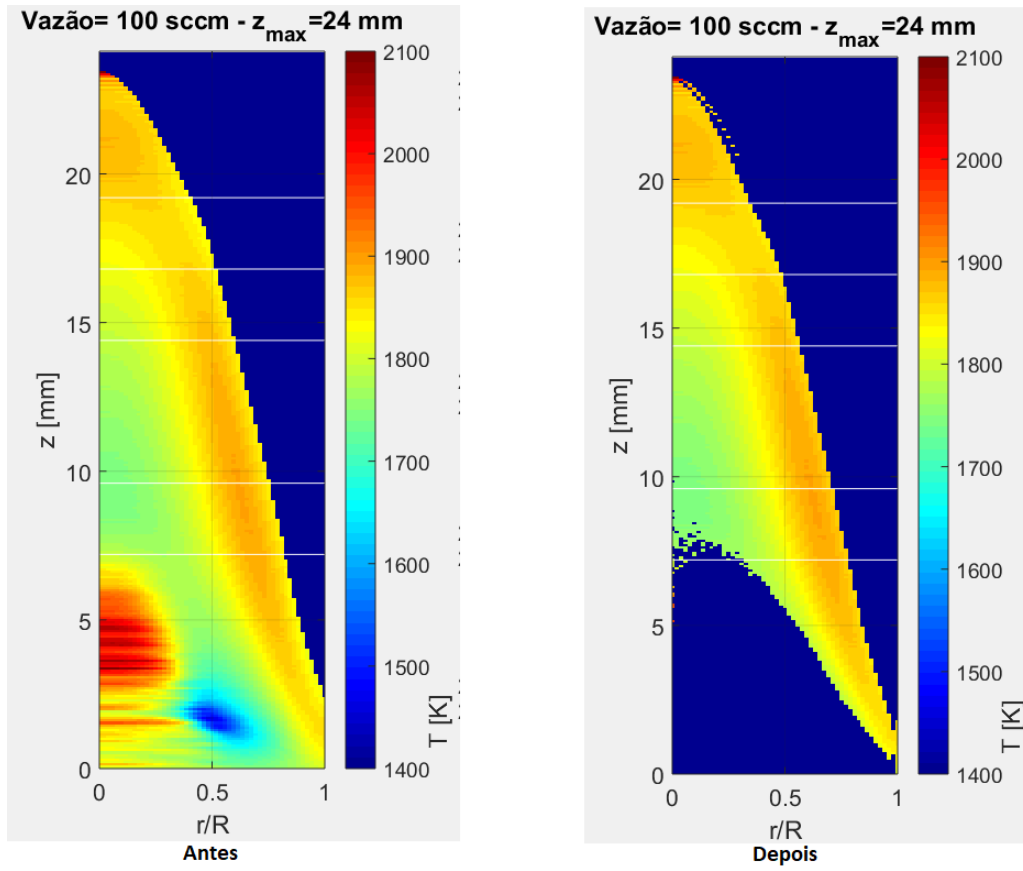


Figura 2.11: Comparação do campo de temperatura da fuligem antes e depois da modificação no código.

## 3

### Resultados

Neste capítulo são apresentados as condições de escoamentos testadas, em seguida, discutidos e os resultados obtidos para distribuição volumétrica de fuligem e temperatura da fuligem.

#### 3.1

##### Condições de escoamento

O queimador Gülder é alimentado por dois escoamentos: um de etileno e um de ar. Os três regimes de funcionamento foram escolhidos da seguinte forma:

- O regime A corresponde a uma condição estável testada por Cruz [7].
- O regime B corresponde a condição padrão estudada por Gülder [8].
- O regime C corresponde a uma condição onde há fuligem visível escapando na ponta da chama (*Smoke Point*).

Na figura 3.1, podemos observar fotografias da chama nos três regimes de funcionamento. Como é mostrado na tabela 3.2 a altura da chama ( $h_f$ ) é diretamente relacionada a vazão de combustível.

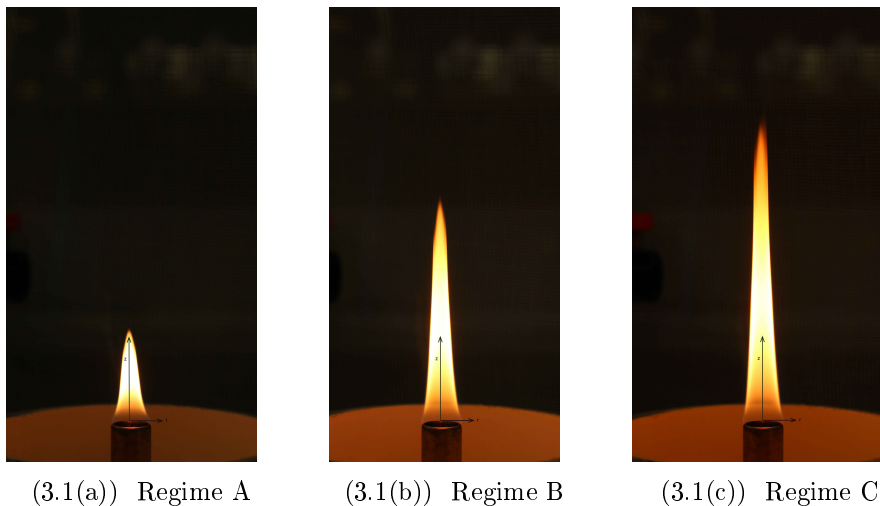


Figura 3.1: Regimes de funcionamento testados

Na tabela 3.1, os três regimes de funcionamento testados são apresentados. Podemos verificar que em todos os casos a riqueza global  $\Phi_{global}$  é muito pequena, o que significa que a chama é sempre hiperventilada.

Tabela 3.1: Regimes de funcionamento testados.

Regime	Vazão de etileno (SCCM)	Vazão de ar (SLPM)	$\dot{m}_f$ (g/min)	$\dot{m}_{ox}$ (g/min)	$\Phi_{global}$
A	100	260	0,12	336	0,0055
B	194	260	0,24	336	0,0106
C	250	260	0,31	336	0,0136

Na tabela 3.2, podemos observar as velocidades e o número de Reynolds dos dois escoamentos para cada regime. Fica evidente que ambos os escoamentos são laminares.

Tabela 3.2: Condições de escoamento

Regime	$u_f$ (cm/s)	$u_o$ (cm/s)	$Re_f$	$Re_o$	hf (mm)
A	0,97	15,2	13,8	869	31,5
B	1,88	15,2	26,9	869	62
C	2,43	15,2	34,7	869	85

### 3.2

#### Fração volumétrica de fuligem

Na figura 3.2 está representado o percurso óptico,  $L$  (eq. 2-5), em função da altura na chama para cada um dos três regimes. O percurso óptico é determinado por um código Matlab que determina os pixels que estão acima de um certo limiar de luminosidade.

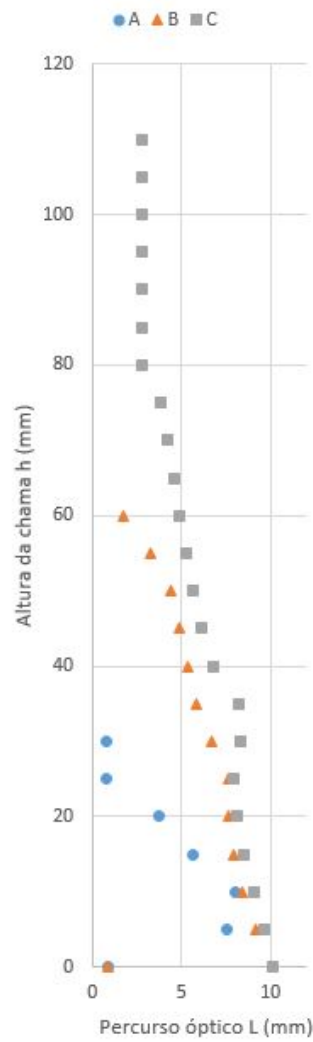


Figura 3.2: Percurso óptico ( $L$ ) em função da altura da chama para os três regimes.

O índice de refração utilizado na equação 2-5 é retirado da tabela 2.1 para o comprimento de onda de 532 nm. Nas figuras 3.3 3.4 e 3.5 podemos observar a fração volumétrica de fuligem (em ppm) ao longo de cada altura da chama. Foi utilizada a mesma escala para os três regimes de forma a possibilitar comparação direta. As barras de erro na figuras abaixo foram calculadas a partir do desvio padrão entre as medidas de transmissividade (Erro de tipo A). Os valores de erro são grandes nas extremidades da chama devido ao pequeno percurso óptico que amplifica a sensibilidade ao valor de transmissividade.

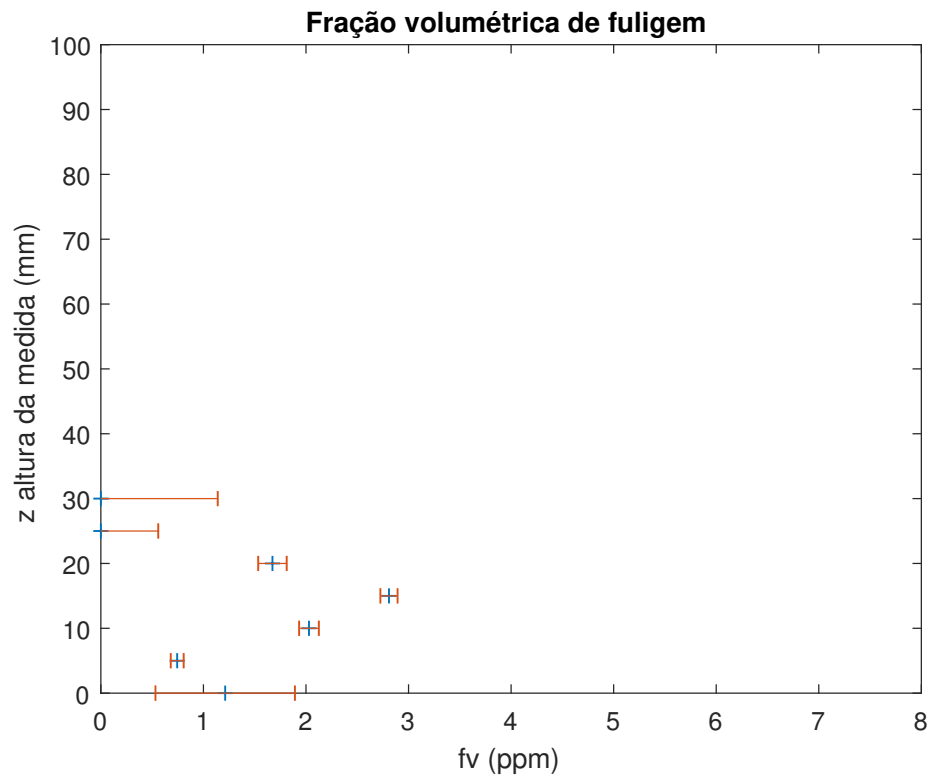


Figura 3.3: Fração volumétrica de fuligem no regime A.

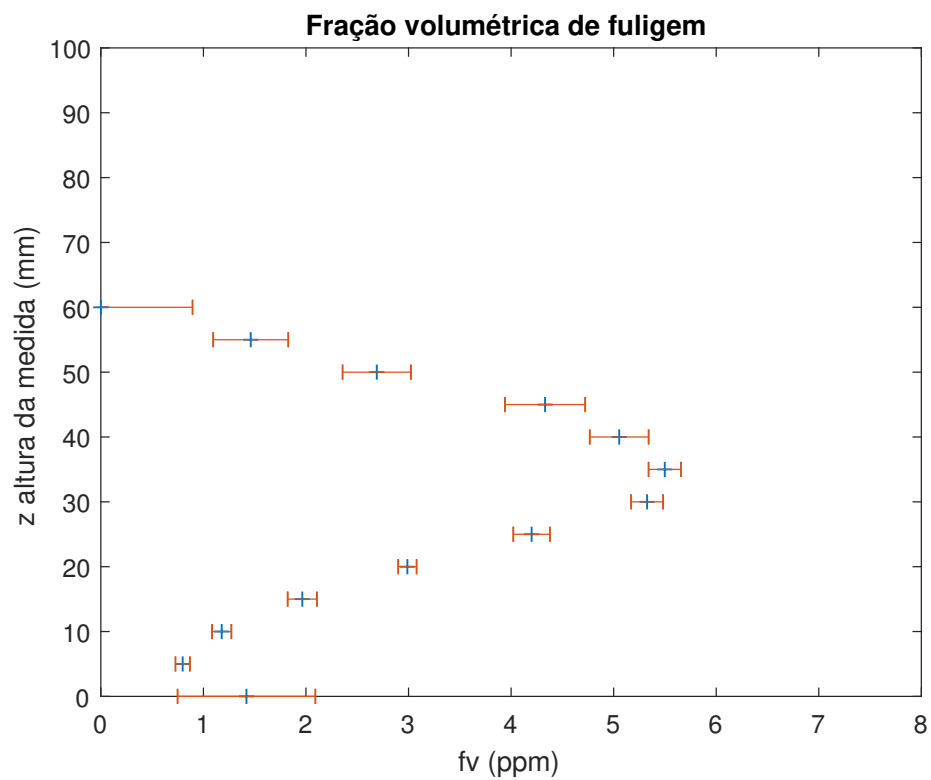


Figura 3.4: Fração volumétrica de fuligem no regime B.

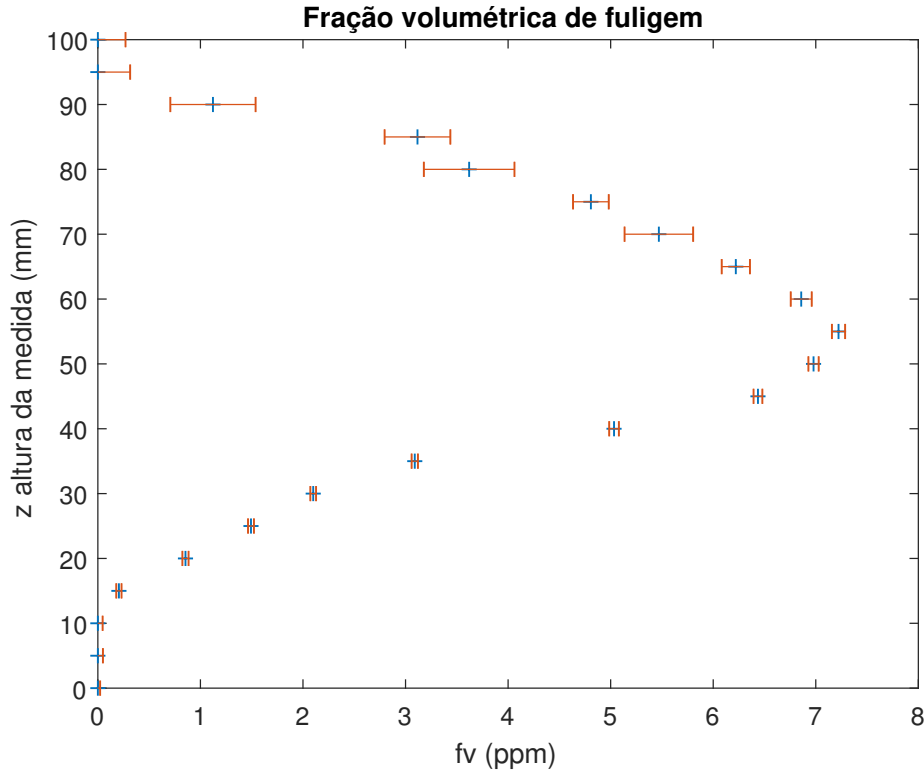


Figura 3.5: Fração volumétrica de fuligem no regime C.

- Na figura 3.3 a fração volumétrica de fuligem máxima é 2,8 ppm e ocorre na altura  $z = 15 \text{ mm}$  ou  $z = 0,63z_{max}$ .
- Na figura 3.4 a fração volumétrica de fuligem máxima é 5,5 ppm e ocorre na altura  $z = 35 \text{ mm}$  ou  $z = 0,57z_{max}$ .
- Na figura 3.5 a fração volumétrica de fuligem máxima é 7,2 ppm e ocorre na altura  $z = 55 \text{ mm}$  ou  $z = 0,65z_{max}$ .

Analisando os resultados vemos que o máximo de fração volumétrica de fuligem ocorre em média em  $z = 0,62z_{max}$ . Este resultado está bem próximo dos valores encontrado por Cruz [7]. Podemos também comparar as frações volumétricas de fuligem dos regimes A e B que também foram testados por Cruz [7].

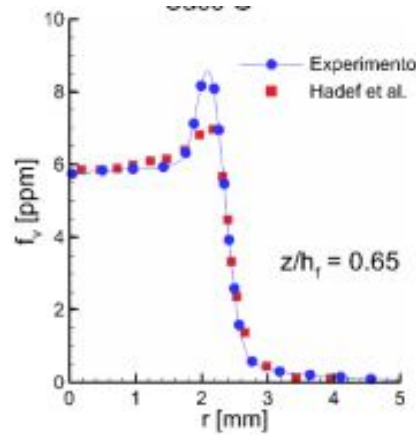


Figura 3.6: Resultado de fração volumétrica de fuligem de Cruz [7], obtido com incandescência induzida por laser.

Na figura 3.6 estão os resultados de fração volumétrica de fuligem de Cruz em um regime de funcionamento comparável ao regime B deste trabalho. A média do perfil radial entre  $r = 0$  e  $r = 1$  (área correspondente ao diâmetro do feixe que nós utilizamos) é de 6 ppm. Este valor não está muito distante dos 5,1 ppm encontrados na figura 3.4 para a altura equivalente ( $z = 40 \text{ mm}$ ).

### 3.3

#### Temperatura da fuligem

Utilizando a técnica de pirometria descrita na seção 2.2, o campo de temperatura da fuligem foi levantado para os três regimes. Nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9 estão divididas em três partes, da esquerda para a direita:

- O campo de temperatura da fuligem em cores.
- 5 cortes horizontais do campo de temperatura acima.
- A posição radial da maior intensidade luminosa.

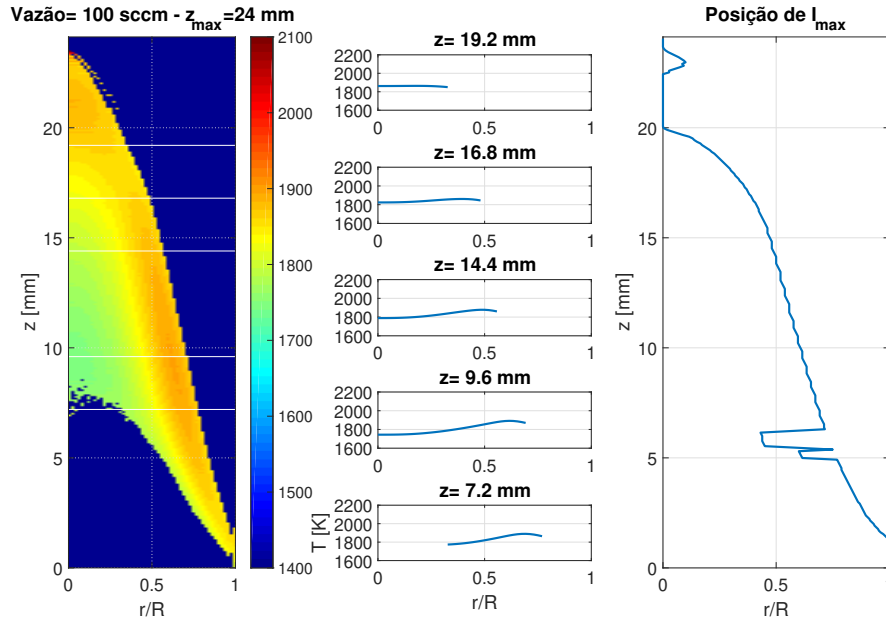


Figura 3.7: Campo de temperatura da fuligem no regime A.

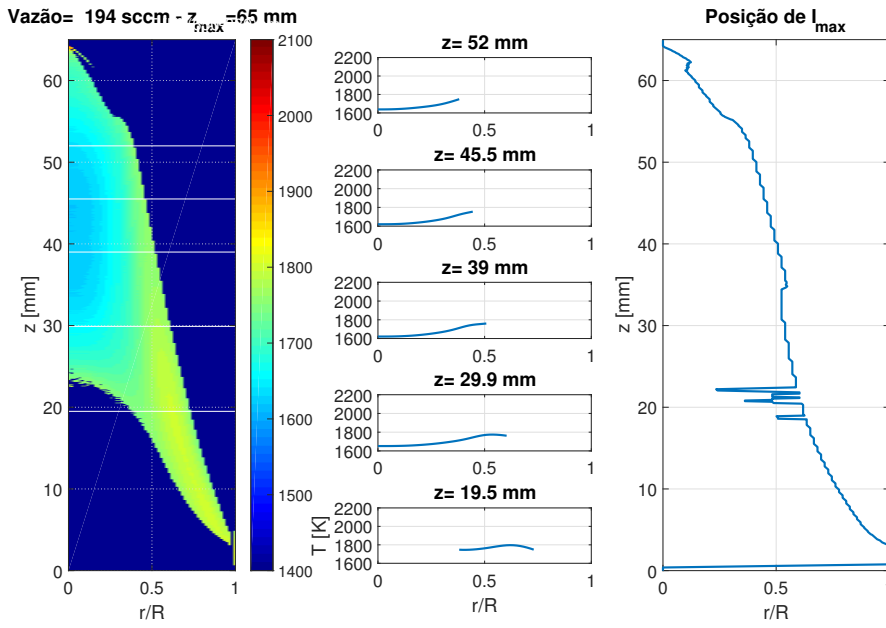


Figura 3.8: Campo de temperatura da fuligem no regime B.



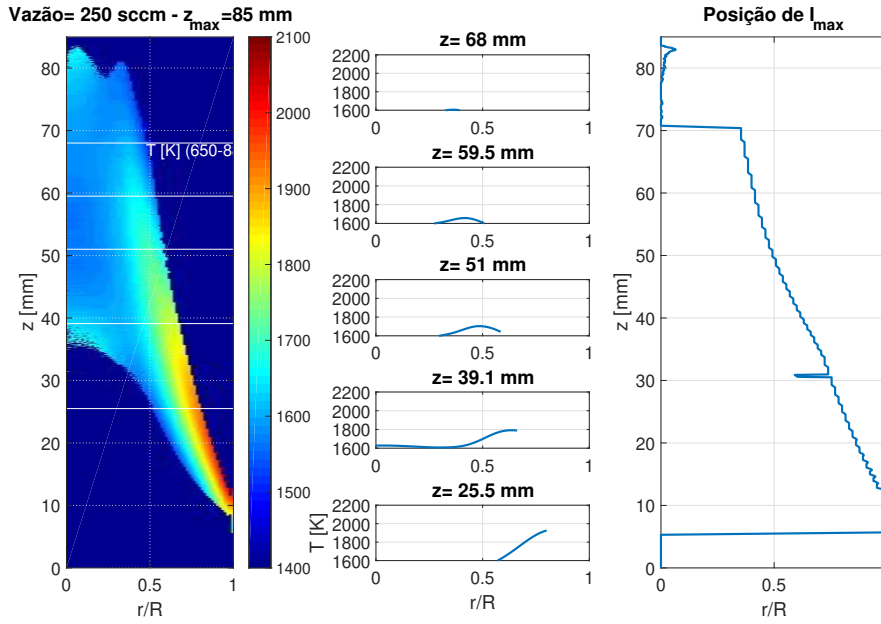


Figura 3.9: Campo de temperatura da fuligem no regime C.

Analisando as imagens das figuras 3.7, 3.8 e 3.9, podemos constatar que:

- As temperaturas da fuligem variam entre 1600 e 2100K, em todos os casos.
- A região de temperaturas mais altas tende a se concentrar na extremidade inferior da chama à medida em que a vazão de combustível aumenta.
- A temperatura tende a ser maior na borda externa da região de medição.
- Nas figura 3.9 podemos observar *soot wings* na parte superior da chama. Isso indica que parte da fuligem está escapando sem ser oxidada.
- De forma geral, as temperaturas são menores nos regimes de vazão maior.

A diminuição da temperatura nos regimes B e C pode ser explicada pela maior concentração de fuligem nesses regimes, o que aumenta a perda de energia da chama por radiação. Essa hipótese foi comprovada por Jerez [11].

## 4

### Conclusão e perspectivas

Neste trabalho resultados foram apresentados na determinação da concentração e temperatura da fuligem presente em chamas laminares em três regimes de vazão diferentes.

#### 4.1

##### Conclusão e contribuições

Como principal contribuição deste trabalho podemos destacar a montagem da bancada do queimador Gülder com adaptações e melhorias que permitiram vazões de ar maiores. Além disso, a técnica de extinção foi recuperada e produziu resultados para a fração volumétrica de fuligem em três regimes de vazão diferentes. Simultaneamente, a técnica de pirometria 2 cores foi revitalizada e produziu resultados de temperatura para dois regimes de vazão que ainda não haviam sido testados anteriormente no laboratório. Em resumo foram revitalizados um experimento e duas técnicas que não haviam sido empregadas até então no novo laboratório de combustão da PUC-RIO .

#### 4.2

##### Perspectivas

Em trabalhos futuros algumas linhas de desenvolvimento podem ser seguidas:

- Utilização da técnica de PLIF na determinação da distribuição do radical OH da região oxidante da chama.
- Revisitar os experimentos de PLIF-PAH (Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos precursores da fuligem) para regimes de vazão que não puderam ser testados por Cruz [7].
- Estudo do efeito da diluição do etileno com dióxido de carbono com o intuito de representar os gases combustíveis provenientes do pré-sal.

## Referências Bibliográficas

- [1] POLUENTES. Cetesb. Disponível em: [http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar\\_saude.asp](http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp). Acesso em: 20 de set. de 2018
- [2] EU: CARS AND LIGHT TRUCKS. Dieselnet. Disponível em: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>. Acesso em: 25 de out. de 2018
- [3] MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA. EPE. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 25 de out. de 2018
- [4] BOURDREL,T. et al. Cardiovascular effects of air pollution. **Archives of Cardiovascular Disease**, v. 110, p. 634-642, 2017.
- [5] ESPINDOLA, P.R . et al. Unidade de controle de baixo custo de um MFC utilizando um microcontrolador. **Revista Brasileira de Física e Tecnologia Aplicada**, Ponta Grossa, v. 4, n. 2, p. 1-11, dez. 2017.
- [6] ZHAO H.; LANDOMMATOS N., Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines,**Progress in Energy and Combustion Science**. v. 24. p. 221-255, 1998.
- [7] CRUZ J.J. **Estudo Experimental da distribuição de fuligem e de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em chamas laminares não pré-misturadas de etileno e de ar**, Tese (Doutorado em Engenharia mecânica)- Departamento de engenharia mecânica, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2018.
- [8] GÜLDER O.L.; SNELLING D.R., Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames , **Combustion and Flame**, v.92, p. 115-124, 1993
- [9] DAUN, K. J. et al. Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization.**Applied Optics**, v. 45, n. 19, p. 4638- 4646, 2006.

- [10] MERGULHÃO C.; CACELLA N.; NASCIMENTO S. **Estudo Experimental da Formação de Fuligem em Chamas Laminares de Hidrocarbonetos e Ar**, Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia química)- Departamento de engenharia mecânica, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2016.
- [11] JEREZ A. et. al. Measurements and modeling of PAH soot precursors in coflow ethylene/air laminar diffusion flames, **Fuel**, v.236, p. 452-460, 2019.

## 5

### Apêndice A

#### Display Arduíno para o controlador de vazão mássica Omega

O controlador de vazão Omega FMA5400, mostrado na figura 5.1, é o único disponível no laboratório capaz de medir as altas vazões de ar do queimador Gülder (da ordem de 284 SLPM).



Figura 5.1: Controlador de vazão mássica Omega FMA5400.

Contudo, o modelo do laboratório não possui display integrado. Por isto, foi necessário desenvolver um dispositivo Arduíno capaz de ler o sinal de tensão proveniente do controlador, converter esse valor para a vazão correspondente pela calibração e retornar uma tensão para o controlador correspondente a vazão desejada. O circuito elétrico e o código Arduíno foi adaptado da referencia [5].

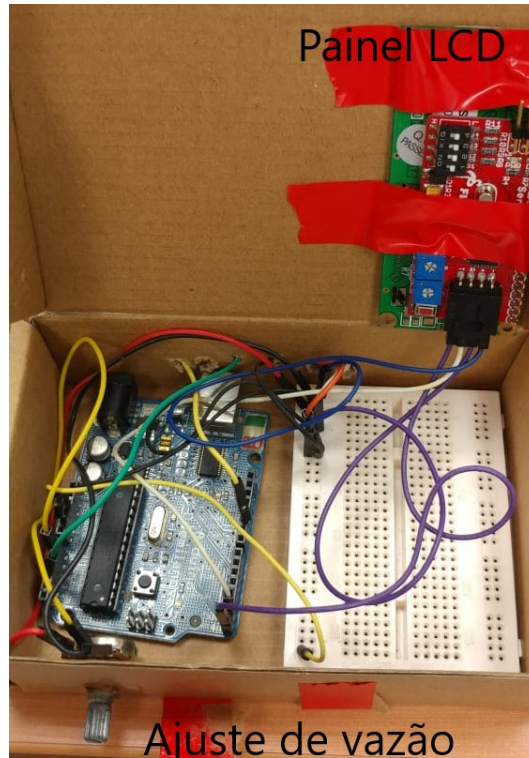


Figura 5.2: Foto da interface Arduino.

O circuito consiste de um potenciômetro que é alimentado com uma tensão de 5V e retorna para o Arduino uma tensão que varia entre 0 e 5 V, onde 5 V corresponde ao fundo de escala do controlador (1000 LPM) e 0 V corresponde a vazão nula.

O valor de tensão no potenciômetro é lido no pino A0 do Arduino e convertido para um valor digital de 10 bits. Esse valor é convertido em uma vazão em litros por minuto segundo a equação abaixo:

$$\dot{V} = K_f v_d / 1023, \quad (5-1)$$

onde  $K_f$  é o fator de correção do gás que está sendo utilizado (1000 no caso do ar). Esse valor é em seguida mostrado no LCD como "SP" e em seguida o pino 10 do Arduino é energizado com um sinal PWM com *Duty cycle* equivalente a vazão desejada. Analogamente o sinal de tensão proveniente do controlador é lido no pino A2 e é mostrado no LCD como FL.

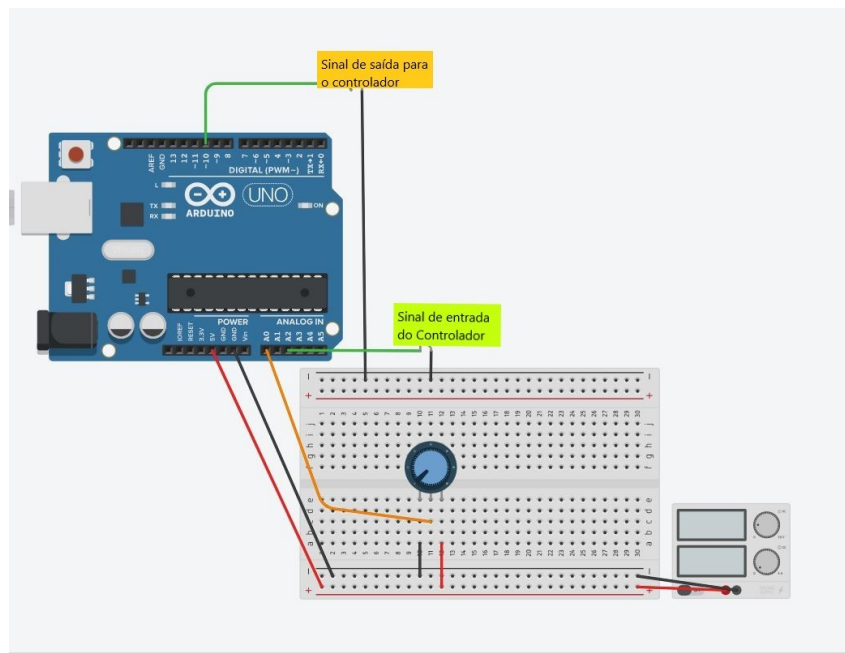


Figura 5.3: Esquema do circuito Arduino sem LCD

```

|
double potvall;
double sptl;
double flowl;
double factorgasl;
int pushbtl;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  factorgasl=1.00*1000;
}

void loop() {
  potvall=analogRead(A0);
  sptl=potvall*factorgasl/1024;
  Serial.print("$CLEAR\r\n");
  Serial.print("$GO 1 1\r\n");
  Serial.print("$PRINT SP \r\n");
  Serial.print("$GO 1 4\r\n");
  Serial.print("$PRINT ");
  Serial.print(sptl);
  Serial.print(" \r\n");
  Serial.print("$CURSOR 1 1\r\n");
  analogWrite(10,potvall/4);

  flowl=analogRead(A2)*factorgasl/1023;

  Serial.print("$GO 2 1\r\n");
  Serial.print("$PRINT FL \r\n");
  Serial.print("$GO 2 4\r\n");
  Serial.print("$PRINT ");
  Serial.print(flowl);
  Serial.print(" \r\n");
  Serial.print("$CURSOR 1 1\r\n");

  delay(500);
}

```

Figura 5.4: Código utilizado no controlador, adaptado de Espindola [5]