

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Obtenção da velocidade laminar de chama do gás natural, propano e etanol em combustão com oxigênio  
Bolsista: Rafael Vaz de Sousa Verdelli  
Orientador(a): Wladimyr Mattos da Costa Dourado  
Período a que se refere o relatório: Fevereiro de 2018 a Julho de 2018

### Resumo

Ao longo dos cinco meses em questão houve um processo de experimentação, adaptação e inúmeros testes em laboratório com diversas montagens da parte instrumental do experimento. A metodologia aplicada para obtenção da velocidade de chama laminar adiabática e seus parâmetros correlacionados foi testada e avaliada, juntamente com instalação de circuito eletrônico, sensores, módulos para medição e registro de temperatura de arrefecimento do equipamento e desenvolvimento de algoritmo para processamento das imagens obtidas.

Palavras-chave: Velocidade laminar de chama adiabática; Combustão; Metano Ar; Metano O<sub>2</sub>; Queimador McKenna

### 1. Introdução

A obtenção e análise da velocidade de chama adiabática constitui um fator essencial na validação e otimização de mecanismos de cinética química, sendo temperatura, pressão, razão de equivalência e combustível os principais pontos que afetam essa medida ao se utilizar o queimador de chama plana. O emprego desse tipo de queimador na validação se dá pela praticidade de utilização do aparelho.

A velocidade de chama adiabática (SL) é definida como a velocidade com que a onda de deflagração se move em relação à mistura reagente na direção normal à superfície da onda (Glassman e Yetter, 2008; Poinso e Veynante, 2005).

Segundo Francisco Jr. (2014), a chama plana pode ser obtida com queimador de placa porosa de diâmetro reduzido para passagem de combustível e comburente, onde ela irá se estabilizar sobre o equipamento após o período necessário para entrar em regime estacionário em relação a um referencial inercial, obtendo-se a velocidade da chama plana equivalente à velocidade média do escoamento.

O estudo será desenvolvido com metano, propano e etanol inicialmente em mistura com ar para validação dos métodos e comparação com dados disponíveis em literatura. Após a comprovação de resultados satisfatórios, os testes serão realizados em mistura com O<sub>2</sub> para servir de suporte em outras pesquisas do departamento.

## **2. Materiais e Métodos**

As atividades trabalhadas no período em questão incluem:

- Instalação do circuito eletrônico com microcontrolador junto com sensores e módulos para registro das temperaturas do sistema de arrefecimento.
- Diversos testes em laboratório com variadas montagens para conjuntos de fonte de iluminação e ajustes para realizar o método Shadow Graph.
- Elaboração de algoritmo em software Octave para tratamento da imagem obtida através do método Shadow Graph.
- Obtenção de dados da temperatura do sistema de arrefecimento e da vazão de água em todos os testes.

### **2.1 Circuito eletrônico com microcontrolador programado**

A temperatura de entrada e saída do sistema de arrefecimento para o queimador é necessária para os cálculos considerando a chama plana adiabática. Para o registro desses dados foi desenvolvido um circuito eletrônico em conjunto com placa Arduino Mega e microcontrolador Atmega2560, demonstrada na figura 1.

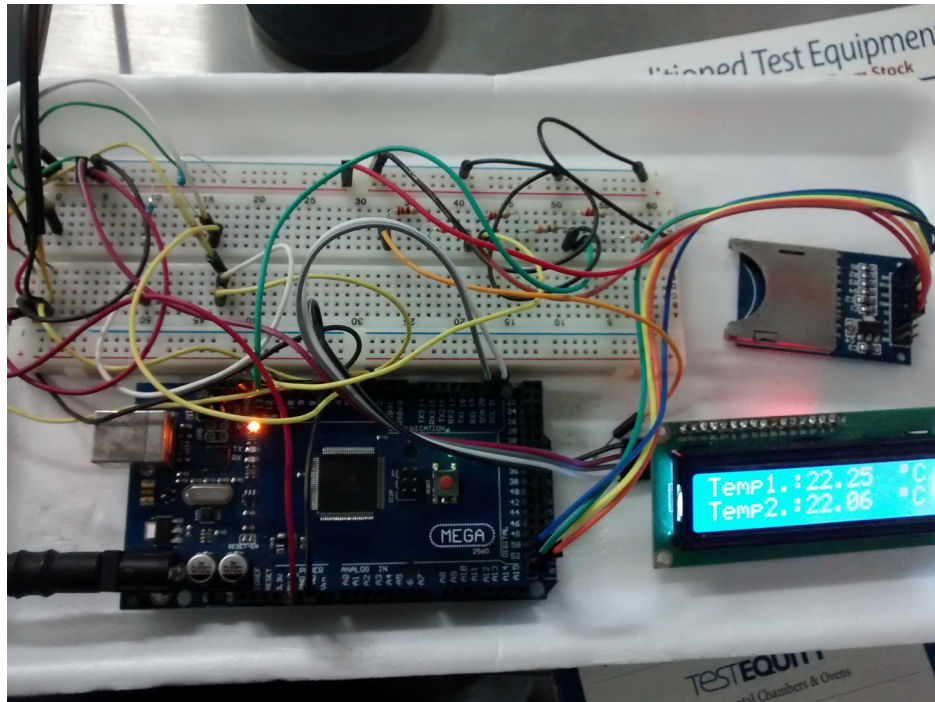


Figura 1: Circuito eletrônico com Arduino

O circuito foi desenvolvido em protoboard para testes e adaptações até a versão final, sendo posteriormente refeito em placa de circuito impresso com conexões modulares. O conjunto consiste de:

- Circuito eletrônico projetado em protoboard com resistores e jumpers de conexão
- Placa Arduino Mega de desenvolvimento e controle
- Shield para cartão SD
- Visor LCD 16x2 para temperatura
- 2 sensores DS18B20 à prova de água com precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
- Fonte de alimentação externa

O sistema foi desenvolvido para trabalhar com dois sensores de temperatura (entrada e saída de arrefecimento) conectados em mesmo pino de sinal da placa, onde os dados são registrados e gravados em cartão SD no formato txt e demonstrados em tempo real no visor LCD para verificação. A linguagem C foi utilizada para programação da rotina de execução

do Arduino através do código desenvolvido e devidamente apresentado no relatório anterior. O mesmo foi omitido no momento por limitação do número de páginas no documento.

Atualmente o sistema funciona corretamente e disponibiliza os dados no seguinte formato:

Temp C: 24.44 Min : 999.00 Max : 24.50

Temp D: 33.63 Min : 999.00 Max : 33.69

A leitura em “Temp C” e “Temp D” correspondem a temperatura de entrada e saída do sistema de arrefecimento, respectivamente, tomadas a cada 2 segundos. As temperaturas máximas são utilizadas apenas como controle de segurança, enquanto a mínima por enquanto não é utilizada (999 é o valor inicial definido em código). Há outra versão do código com alteração para o fornecimento dos dados formatado em comma-separated values (.CSV) para leitura em software de planilha eletrônica como Microsoft Excel e Libre Office Calc, servindo como padrão para futura automação de tratamento dos dados coletados para facilitar análises dos próximos ensaios.

## 2.2 Tratamento digital de imagem com método Shadow Graph e testes em laboratório

O método Shadow Graph foi utilizado para obtenção das imagens de chama, consistindo na projeção da sombra da chama em um painel e registro em foto.

Este método é realizado através da análise da sombra de um meio não homogêneo. Devido às heterogeneidades presentes no meio a ser estudado, a luz que atravessa o meio sofre uma mudança de direção, possibilitando a visualização dessas heterogeneidades em uma simples sombra. (FRANCISCO JR., 2014)

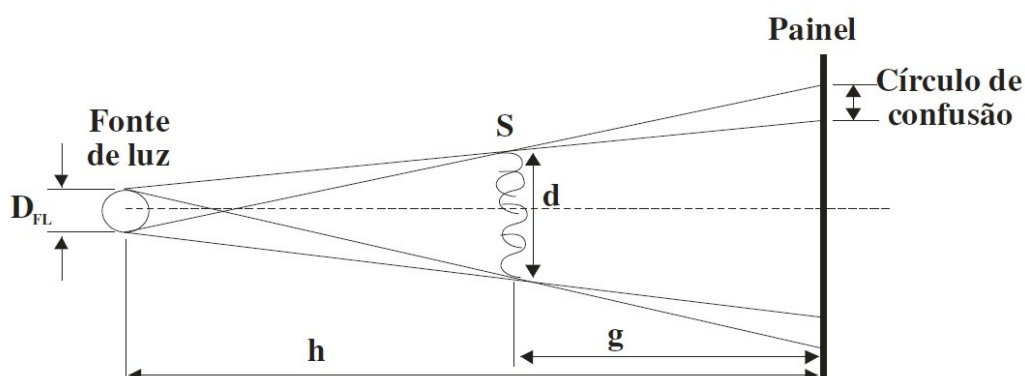


Figura 2 : Demonstração do método Shadow Graph (FRANCISCO JR., 2014)

O sistema de iluminação com LED de alto brilho (400 lúmens) foi utilizado na primeira instalação e montagem do conjunto experimental, apresentando inicialmente um resultado aparentemente satisfatório para a aplicação. Os problemas encontrados na prática criaram a necessidade de adaptações e ajustes, demonstrados nos resultados. A câmera fotográfica utilizada é uma Sony Alpha NEX F3 em conjunto com lente Minolta MD Rokkor X 45mm F/2.

A utilização da plataforma de processamento Octave, substituindo o software MATLAB planejado inicialmente, ocorreu por oferecer todas as ferramentas necessárias ao tratamento de dados e imagens, fácil utilização e principalmente por ser gratuito, conferindo mais autonomia para as pesquisas. O algoritmo desenvolvido consiste em carregar a imagem obtida para uma variável, realizar a conversão para escala de cinza junto com a criação de mapa de cores apropriado, analisar o intervalo de interesse nas coordenadas da imagem e plotar o gráfico de intensidade dos pixels.

O modelo de código generalizado e resumido é representado abaixo:

```
(1) nome_variavel = imread('endereco_imagem');  
(2) nome_variavel_cinza = rgb2gray(nome_variavel);  
(3) figure;  
(4) colormap(gray(256));  
(5) imagesc(nome_variavel_cinza);  
(6) title('descricao');  
(7) figure;  
(8) plot(nome_variavel_cinza(x,y));  
(9) title('descricao');
```

Linha (1) carrega a imagem original para uma variável determinada; (2) transforma a imagem original em escala de cinza e a carrega em uma nova variável determinada; (3) abre uma tela de exibição gráfica; (4) gera um mapa de cores apropriado para escala em cinza; (5) abre a

imagem transformada com visualização graduada nos eixos; (6) cria título descritivo para a imagem carregada; (7) figure abre uma próxima tela de exibição; (8) plota o gráfico representando a intensidade de pixels, sendo x e y os intervalos de linhas e colunas da região de interesse determinada; (9) cria título descritivo para o gráfico gerado.

### 3. Resultados

Foram testados diversas montagens em laboratório para se obter as imagens da chama no modelo adequado ao Shadow Graph. Inicialmente foi utilizada uma câmera compacta Sony Cyber-shot em conjunto com o LED, mas apesar da facilidade de ajuste com zoom variável as imagens ficaram escuras pela limitação de abertura de diafragma. A substituição pela câmera Sony Alpha NEX-F3 tipo mirrorless em conjunto com lente Minolta MD Rokkor X 45mm F/2 com ajuste manual de foco demonstrou o melhor resultado de imagem:

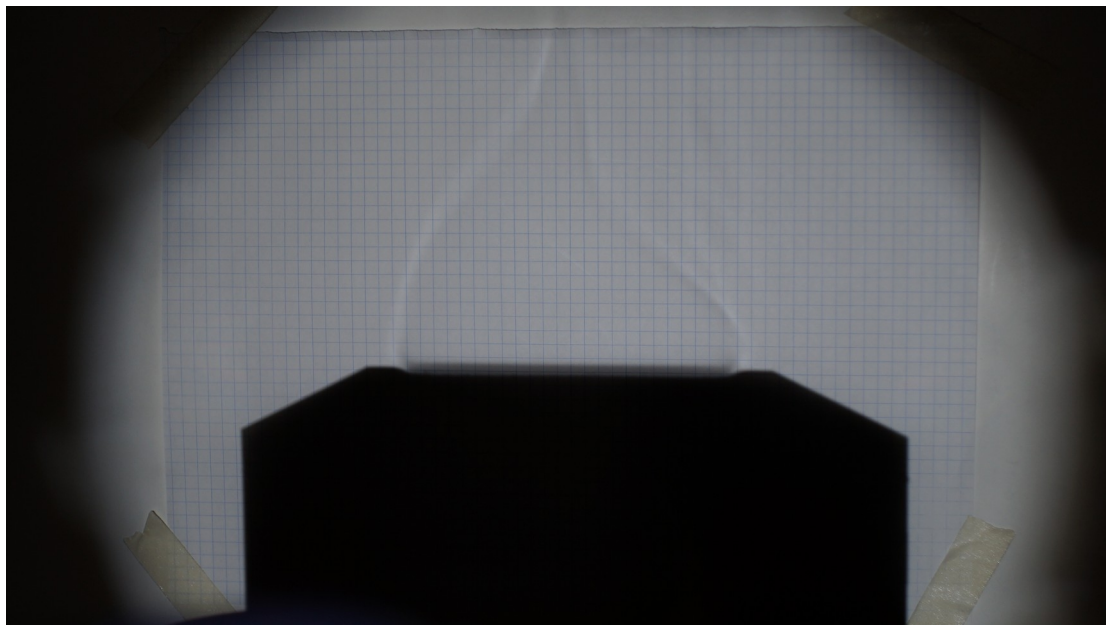


Figura 3: imagem registrada em conjunto com sistema de LED, dissipador e tripé.

Após o processamento em Octave com transformação em escala de cinza e criação de gráfico na área de interesse definida para esse caso (linha 1600, colunas 1800:3160) foi obtido o resultado a seguir.

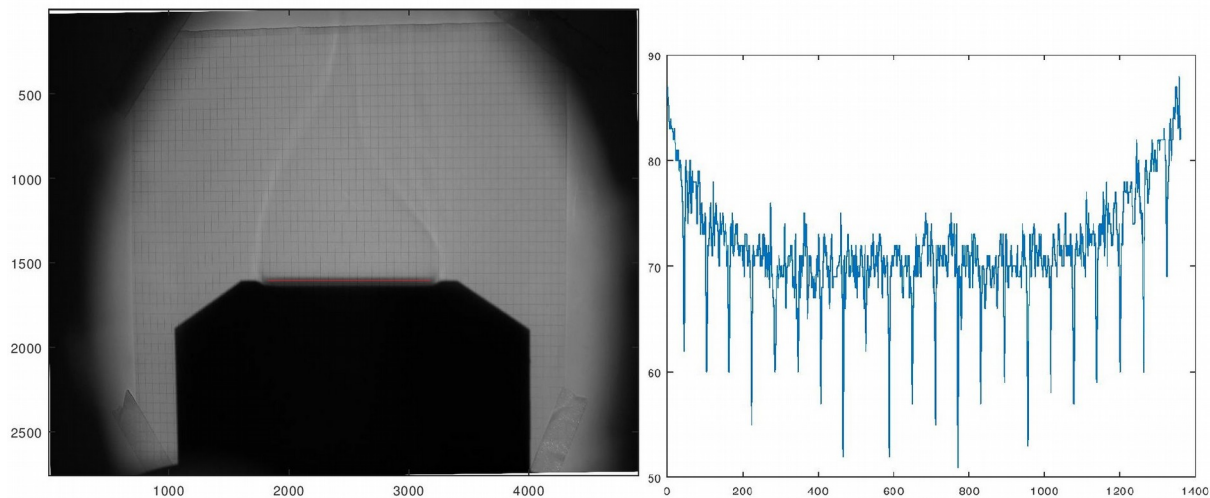


Figura 4: imagem processada em Octave com seu gráfico ao lado direito.

A linha vermelha indica a região e o modo como é feita a leitura e interpretação dos dados na área de interesse definida na frente de chama, onde uma linha é fixada e percorrida com a variação das colunas. O gráfico ao lado representa a intensidade de pixels (eixo vertical) ao longo do comprimento do segmento analisado (eixo horizontal), sendo o valor 0 para preto e 256 para totalmente branco.

O conjunto demonstrado gerou imagem de alta definição com bom contraste, ajuste de foco e ampliação de cerca de 200%, onde a altura de chama pode ser bem visualizada e medida através da escala entre o fundo milimetrado pelos pixels. Apesar desses fatores, foi possível observar dois problemas principais: surgimento de vales periódicos ao longo do gráfico (solucionado e demonstrado a seguir) e distribuição não homogênea de iluminação ao longo da chama (bordas com alterações). Esse último fator é muito importante para a análise de comportamento com variadas vazões e para se estabelecer o limite da condição de chama plana lisa e rugosa.

Seria necessário realizar ajustes na montagem e disposição dos equipamentos e utilizar uma lente com ajuste de foco para direcionar o feixe de luz, mas pela indisponibilidade de tal item foram realizados novos testes com outros equipamentos. Primeiramente se instalou uma luminária spot LED de alta potência com pedestal, que apesar de fornecer grande luminosidade de forma mais homogênea acabou gerando imagem difusa e com foco

inadequado. Em seguida a instalação foi substituída por uma lanterna Maglite Mini LED AA com ajuste manual de foco, disposta da seguinte forma:

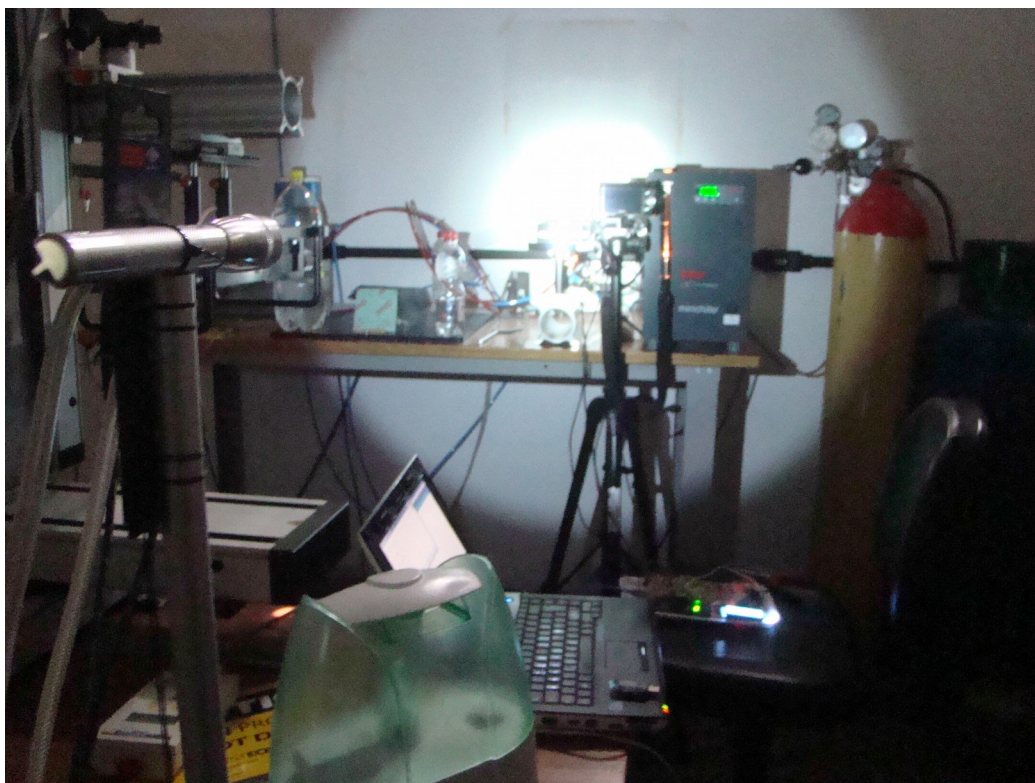


Figura 5: disposição de montagem dos equipamentos no último teste realizado em laboratório.

A imagem obtida com essa montagem no último ensaio em relação estequiométrica é demonstrada abaixo.

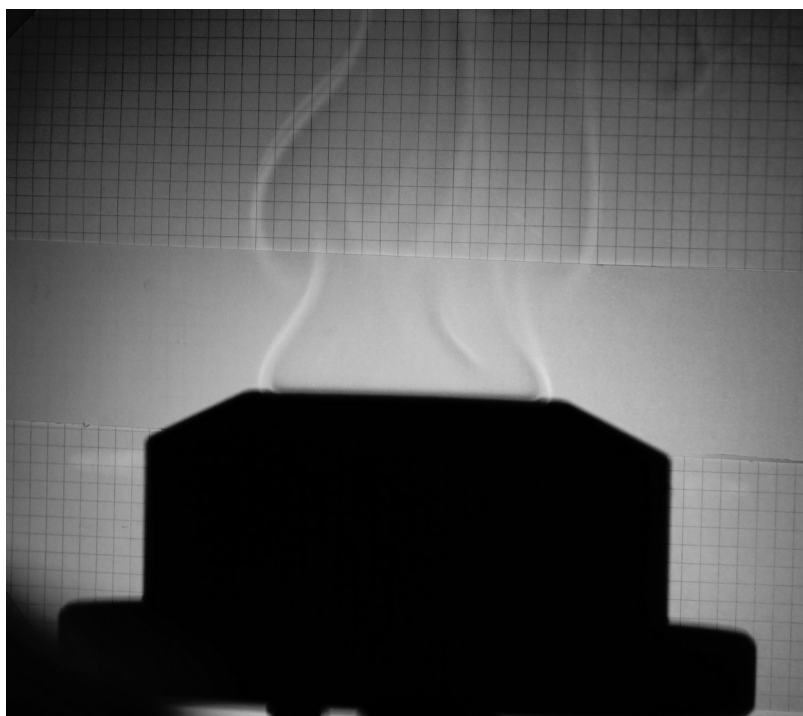


Figura 6: ensaio com mistura estequiométrica de Ar (9,5 Ln/min) e Metano (1 Ln/min).

O plano de fundo milimetrado é útil para a criação de escala relacionando tamanho real de chama e extensão em pixel na imagem digital, mas como as linhas pretas geravam os vales nas funções foi necessário utilizar uma faixa branca na região de frente de chama para solucionar o problema e evitar interferências.

Os testes foram realizados sempre com a proporção estequiométrica dos reagentes, sendo 9,5 Ln/min de Ar comprimido para 1 Ln/min de Metano. As variações na vazão foram definidas por múltiplos dessa proporção até o limite do controlador (5 Ln/min para combustível).

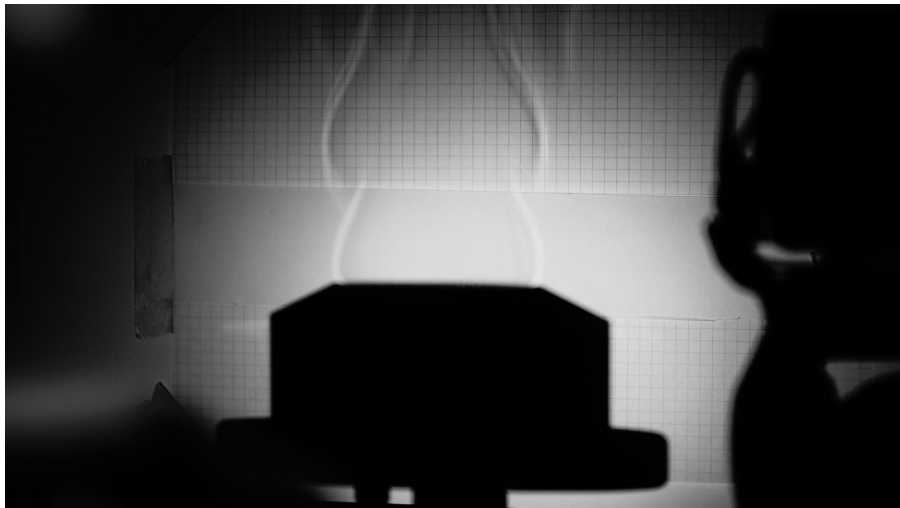


Figura 7: teste com 47,5 Ln/min de Ar para 5 Ln/min de Metano.

Dentro do intervalo testado a chama sempre tende a se estabilizar com a proporção estequiométrica, começando a apresentar rugosidade próximo ao limite do aparelho.

O problema apresentado por essa montagem consiste na pequena ampliação da projeção (cerca de 30% dependendo das disposições dos equipamentos) e de uma pequena região de incerteza ao redor da sombra. Apesar do ajuste manual de foco da fonte de luz, a configuração se mostra mais trabalhosa e limitada pelo espaço em laboratório (há equipamentos compartilhados com outros pesquisadores como linha de combustível e bancada para instalação dos experimentos). Esses fatores impossibilitam o correto processamento da região de frente de chama e determinação de sua altura, dados necessários para os cálculos, definição de energia de ativação e intervalo de trabalho das velocidades de

frente de chama com dados de desvio padrão dentro dos limites necessários para a metodologia. Será necessário realizar a instalação de lente no antigo conjunto LED ou alterações nas instalações em laboratório para se obter o resultado necessário para o experimento.

#### **4. Conclusões**

Atualmente a coleta dos dados para temperatura de entrada e saída do sistema de arrefecimento do queimador junto com sua vazão mássica é realizada corretamente para todos os testes realizados. As últimas alterações necessárias para tratamento de imagem e finalização dos cálculos já estão sendo efetuadas para a realização dos testes e obtenção dos resultados.

#### **5. Próximas Etapas**

Será instalado um sensor para comunicação entre padrão RS232 (arduíno) e RS485 (controlador de vazão) para automatizar a coleta de dados da vazão de água do arrefecimento. Após a finalização das instalações e obtenção correta das imagens e resultados dos cálculos o sistema padronizado será utilizado para as próximas misturas de combustível/comburente.

#### **6. Divulgação dos Resultados**

Os resultados serão disponibilizados para divulgação em artigos e demais meios acadêmicos e científicos.

#### **Referências**

FRANCISCO JR., R. W. Desenvolvimento de Métodos de medição simultâneo de velocidade de chama laminar e energia de ativação aparente e aplicação com misturas combustíveis com baixo poder calorífico. Tese (Doutorado) – UFSC, Florianópolis – SC, Jul. 2014.

Glassman, I. and Yetter, R. A. (2008), *Combustion*, 8° edn, Academic Press.