

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO DE CALOR RADIANTE EM
CHAMAS TURBULENTAS

por

Bárbara Schaefer

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, novembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO DE CALOR RADIANTE EM
CHAMAS TURBULENTAS

por

Bárbara Schaefer

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. Eng. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Dr. Eng. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Dr^a. Eng^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 16 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo amor, apoio e incentivo ao longo de todos os meus desafios e conquistas, por dividirem este sonho comigo e me ajudarem a torna-lo realidade. Agradeço imensamente aos meus pais, Renato Worm Schaefer e Nair Schaefer, por fornecerem toda estrutura necessária para que eu pudesse me dedicar aos estudos, por investirem na minha educação e por me ensinarem a lutar para ser uma excelente profissional, sem esquecer-se de ser, antes de tudo, uma boa pessoa. Agradeço à minha irmã, Victória Schaefer, pela amizade, parceria e cumplicidade. Agradeço a ela também pelo auxílio na elaboração do desenho da bancada experimental do presente trabalho, e por toda ajuda prestada em outras oportunidades durante a minha graduação.

Agradeço aos meus amigos por dividirem alegrias e angústias comigo, por me apoiarem nos momentos difíceis e por compreenderem a minha ausência durante os períodos de árduo estudo.

Agradeço aos colegas e amigos da engenharia pela parceria durante toda esta trajetória, fundamental para que esta jornada se concretizasse. Agradeço por toda ajuda, cumplicidade e amizade.

Agradeço ao meu orientador, Professor Fernando Marcelo Pereira, por fomentar ainda mais em mim o gosto pelo estudo e pelas excelentes oportunidades que me deu, tanto com o convite para integrar o corpo do Laboratório de Combustão, quanto com a proposição do tema do presente trabalho. Agradeço por toda ajuda para concretização deste trabalho, pelo compartilhamento do seu conhecimento, pela disponibilidade para ajudar nos momentos de dificuldade e pela excelente orientação.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Combustão por todo auxílio prestado na elaboração dos experimentos, em especial ao colega Orion Costa, pelo auxílio com a montagem da bancada e realização dos experimentos.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de alta qualidade, principalmente aos seus professores, principais responsáveis pela excelência no ensino. Agradeço por todo conhecimento compartilhado, pelo incentivo dado e pelos ensinamentos oferecidos.

Agradeço de forma geral a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação como Engenheira Mecânica.

SCHAEFER, B. **Estudo Experimental da Distribuição de Fluxo de Calor Radiante em Chamas Turbulentas**. 2015. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

A previsibilidade da radiação emitida por processos de combustão é de grande interesse da engenharia. Aplicações industriais, como *flares* em plataformas de petróleo, requerem um correto dimensionamento do processo de combustão, a fim de garantir a segurança humana, ambiental, de processo e patrimonial. O trabalho busca avaliar experimentalmente a capacidade preditiva do modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas, que visa prever o fluxo de calor radiante emitido pela chama. O combustível de estudo é o gás natural puro, com vazões volumétricas de 5, 10, 25, 50 e 100 l/min. Para realização dos experimentos, utiliza-se um queimador de tubo reto, com diâmetro do bico injetor de combustível igual a $7,55 \pm 0,10$ mm, e comprimento aproximadamente 40 vezes superior ao diâmetro do bocal, para que o escoamento seja plenamente desenvolvido. Determinou-se o comprimento visível de chama através da análise de fotografias instantâneas. A altura de levantamento das chamas foi medida a partir do vídeo gerado pela reprodução sequencial das fotografias instantâneas. A distribuição do fluxo de calor radiante foi obtida através de medições ao longo do eixo da chama, utilizando-se um sensor de radiação. Calculou-se o fluxo de calor radiante para os mesmos pontos medidos, através do modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas. Observou-se que o comprimento de chama cresce com o incremento da vazão volumétrica de combustível, porém com taxas decrescentes. Observou-se descolamento da chama apenas nas chamas de 50 e 100 l/min, a partir das quais se notou que a altura de levantamento aumenta quase linearmente com o aumento da vazão de combustível. Concluiu-se que o modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas apresenta boa adequação para a chama com vazão volumétrica de combustível equivalente a 10 l/min, enquanto que para vazões menores que esta o modelo subestima o fluxo de calor radiante, e para vazões superiores, superestima. Notou-se que o modelo tende a apresentar resultados mais satisfatórios nas regiões abaixo da chama e acima do comprimento visível desta.

PALAVRAS-CHAVE: chamas difusivas turbulentas, comprimento visível de chama, fluxo de calor radiante, modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas

SCHAEFER, B. **Experimental Study of Radiant Heat Flux Distribution in Turbulent Flames.** 2015. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The predictability of radiation emitted by combustion processes is of great interest in engineering. Industrial applications, such as flares on oil platforms, require a correct sizing of the combustion process, in order to ensure human, environmental, process and patrimonial safety. The work aims to experimentally evaluate the weighted multi-point source model's predictive ability, which aims to predict the radiant heat flux emitted by the flame. The fuel in study is the pure natural gas, with volumetric flow rates of 5, 10, 25, 50 and 100 ℓ/min . For the experiments, it's used a straight tube burner, with a diameter of the fuel nozzle equal to 7.55 ± 0.10 mm and length about 40 times the diameter of the nozzle, so the flow is fully developed. The visible flame length was determined over image analysis. The lift-off height of the flames was measured from the video generated by the sequential reproduction of snapshots. The radiant heat flux distribution was obtained by measurement along the flame axis, using a radiation sensor. The radiant heat flow was calculated for the same measured points, by the weighted multi-point source model. It was observed that the flame length grows with increasing volumetric flow rate of fuel, but with decreasing rates. The lifting-off was noted only in the flames of 50 and 100 ℓ/min , from which it was noted that the lift-off height increases almost linearly with increasing fuel flow rate. It was concluded that the weighted multi-point source model shows good adequacy for the 10 ℓ/min flame, while for smaller flow rates the model underestimates the radiant heat flux, and for higher flow rates, overestimates. It was noted that the model tends to provide more satisfactory results in regions below the flame and above the visible flame length.

KEYWORDS: turbulent diffusion flames, visible flame length, radiant heat flux, weighted multi-point source model

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.3 Objetivos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Tipos de chama.....	3
2.2 Comprimento visível de chama	3
2.3 Altura de levantamento e extinção de chama	4
2.4 Fração radiante	4
2.5 Radiação térmica emitida pela chama.....	5
2.6 Modelo da fonte pontual.....	5
2.7 Modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas	6
3. BANCADA EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	6
3.1 Bancada experimental.....	6
3.2 Procedimentos de medição	7
4. RESULTADOS	9
4.1 Comprimento visível e altura de levantamento de chama	9
4.2 Fração radiante	11
4.3 Fluxo de calor radiante.....	12
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	16
APÊNDICE III.....	18
ANEXO I	19
ANEXO II.....	20

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Processos de combustão são amplamente utilizados pela indústria. O consumo de energia a nível mundial tem aumentado de forma contínua e crescente, e estima-se que a combustão forneça cerca de 90% da energia primária global [Coelho e Costa, 2007]. Esta utilização intensa tem motivado diversos estudos sobre os processos de combustão a fim de reduzir o grande impacto ambiental gerado por estes, bem como reduzir os riscos à saúde humana e os danos aos equipamentos que podem ser gerados através do dimensionamento incorreto dos processos.

O presente trabalho tem como foco as chamas difusivas, onde os reagentes estão inicialmente separados e a reação de combustão ocorre apenas na interface entre combustível e oxidante [Turns, 2000]. As chamas difusivas podem ser tanto laminares quanto turbulentas, sendo estas últimas muito mais frequentes em processos de combustão aplicados na indústria, o que as faz motivarem este trabalho. As chamas difusivas turbulentas podem ser encontradas, por exemplo, em fornos, caldeiras, motores Diesel, câmaras de combustão de turbinas a gás e *flares*. Estes últimos despertam certa atenção devido à necessidade de sua aplicação nas plataformas petrolíferas, refinarias e indústrias petroquímicas, bem como pela complexidade de seu dimensionamento e operação.

Os sistemas de *flaring* têm como objetivo a eliminação de gases indesejáveis inflamáveis através da sua combustão, sendo utilizados principalmente na partida e parada de equipamentos, e como sistema de segurança, permitindo que fluxos excedentes ou indesejados de produtos inflamáveis sejam direcionados ao *flare* e queimados neste, evitando a ocorrência de vazamentos ou até mesmo explosões.

As chamas difusivas turbulentas formam, em geral, grande quantidade de fuligem, sendo esta responsável por uma parcela considerável da energia liberada através da radiação. Em algumas aplicações práticas o calor proveniente da radiação é um atributo desejado, entretanto, em outras aplicações, o calor pode tornar-se um inconveniente para o processo. É o caso dos sistemas de *flaring*, cujo dimensionamento precisa ser rigorosamente elaborado a fim de evitar a exposição dos trabalhadores e dos equipamentos ao calor excessivo proveniente da chama. A radiação máxima permitida junto à base dos *flares* é de 9,47 kW/m² [API 521, 2007]. Este rigoroso dimensionamento se torna ainda mais necessário no projeto de *flares* para plataformas petrolíferas onde, devido à limitação de espaço, os *flares* são alocados a distâncias muito próximas das áreas operacionais.

Dada a extensa aplicação de chamas difusivas turbulentas, faz-se necessária a elaboração de modelos preditivos que permitam estudar a chama e prever o seu comportamento frente às diferentes variáveis de processo. Soluções numéricas têm sido amplamente pesquisadas, entretanto, necessitam de alto investimento computacional e de elevado tempo de processamento, o que as torna menos viáveis para a maioria das aplicações industriais. Quando se trata da previsão da radiação emitida por uma chama esse problema é ainda mais severo devido à complexidade da modelagem da radiação em meios participantes. Frente a isso, têm-se utilizado modelos experimentais que permitem uma resposta mais rápida que os modelos computacionais para radiação. O mais utilizado destes modelos é o modelo da fonte pontual, que considera que a chama pode ser representada como uma única fonte de calor localizada a meio comprimento visível de chama. Este modelo apresenta bons resultados para regiões distantes da chama, entretanto, para regiões próximas à chama, os resultados encontrados são insatisfatórios, pois o modelo não considera os efeitos do formato da chama.

Uma vez que determinadas aplicações necessitam de boas previsões do fluxo de calor radiante em regiões próximas à chama, como é o caso do estudo da radiação proveniente de *flares* de plataformas petrolíferas, faz-se necessária a aplicação de um modelo que apresente resultados satisfatórios nessa região. A fim de suprir essa necessidade, Hankinson *et al.*, 2012, apresentam o modelo das múltiplas fontes pontuais, que considera que a radiação emana de um determinado número de fontes pontuais distribuídas ao longo do eixo da chama, e que a

radiação total pode ser encontrada através do somatório da radiação proveniente individualmente de cada uma das fontes pontuais. Este modelo apresenta bons resultados para medições realizadas em regiões próximas à chama, além de permitir melhor detalhamento da chama que o modelo da fonte pontual única. Este modelo permite, ainda, a obtenção de dados que podem ser utilizados para a validação de simulações numéricas, tornando-as mais assertivas e permitindo que sejam realizadas com menor recurso computacional.

O presente trabalho vai avaliar o modelo das múltiplas fontes pontuais em chamas não pré-misturadas turbulentas em escala de laboratório.

1.2 Revisão bibliográfica

Diversos autores têm investigado a emissão de radiação em chamas. Delichatsios *et al.*, 1988, confirmaram que, para um determinado queimador e certa taxa de liberação de energia, a fração de energia radiativa varia de acordo com o tipo de combustível, devido às diferentes tendências à formação de fuligem dos combustíveis. Becker *et al.*, 1982, Turns *et al.*, 1991 e Markstein, 1985, determinaram a fração radiante para diferentes combustíveis utilizando o modelo da fonte pontual. Hankinson *et al.*, 2012, propuseram o modelo das múltiplas fontes pontuais, com o objetivo de modelar o fluxo radiativo proveniente de chamas tanto nas regiões próximas quanto nas regiões afastadas das chamas. Machado, 2015, mediu a radiação térmica emitida por chamas difusivas de metano diluído com CO₂ utilizando o modelo de múltiplas fontes pontuais e comparou com o modelo proposto por Hankinson *et al.*, 2012, encontrando resultados satisfatórios. Hu *et al.*, 2014, observaram que a fração radiante é maior para chamas ancoradas do que para chamas descoladas do bocal do queimador, pois, neste último caso, o combustível é pré-misturado com o oxidante na região de levantamento e ocorre diminuição da emissão de fuligem. Lowesmith *et al.*, 2007, utilizaram o modelo da fonte pontual para estimar a radiação incidente a determinadas distâncias da chama. Concluíram que a radiação incidente decresce exponencialmente conforme se aumenta a distância entre a chama e o receptor.

Para estudar o comprimento visível de chama de chamas difusivas turbulentas de gás natural, Moschetta, 2014, analisou três fotografias de longa exposição obtidas por câmera ótica para cada vazão de combustível empregada. Mungal *et al.*, 1989, mediram o comprimento visível de chamas turbulentas calculando a média dos comprimentos de 2000 fotos instantâneas. Zukoski *et al.*, 1984, mediram o comprimento visível de chamas difusivas a partir de gravações de vídeo e por inspeção visual. Constataram que, para chamas mais altas do que três vezes o diâmetro do queimador, o diâmetro inicial da chama não afeta o comprimento de chama. Por outro lado, para chamas menores do que três vezes o diâmetro do queimador, a geometria inicial se torna importante. Wohl *et al.*, 1949, encontraram dois comportamentos distintos para o comprimento visível de chamas turbulentas. Concluíram que, para bocais de queimadores com diâmetros inferiores a 3,4 mm (0,133 polegadas), o comprimento de chama é independente da vazão, mantendo-se constante com o aumento desta. Entretanto, para um bocal com diâmetro superior a 3,9 mm (0,152 polegadas), verifica-se um aumento do comprimento de chama com o aumento da vazão de combustível, porém com taxas decrescentes.

Quanto à altura de levantamento e à extinção da chama, Kalghatgi, 1984, concluiu que esta independe do diâmetro do queimador, variando linearmente com a velocidade de saída do jato. Vanquickenborne *et al.*, 1966, propuseram uma teoria que diz que a chama se estabiliza na posição onde o valor médio da componente axial da velocidade é igual à velocidade de propagação de uma chama turbulenta pré-misturada. Ainda segundo esta teoria, ocorre uma pré-mistura do combustível e do oxidante entre a saída do bocal e a base da chama e pode-se dizer que os reagentes estão completamente misturados na superfície onde a fração de mistura é igual à estequiométrica. Peters *et al.*, 1983, contestaram essa teoria, argumentando que não há pré-mistura suficiente entre os reagentes. Sugerem que a chama se extingue na vizinhança do queimador devido ao fato de a taxa de deformação da chama ultrapassar um determinado valor crítico. A chama se estabiliza quando a taxa de deformação atinge este valor crítico.

Através da busca realizada na literatura disponível, observou-se a oportunidade de explorar a utilização do modelo de múltiplas fontes pontuais, dando continuidade aos estudos já iniciados sobre a medição de radiação em regiões próximas à chama. Verificou-se que a gama de chamas estudadas é restrita e pode ser ampliada, realizando-se estudos com chamas difusivas turbulentas com vazões superiores às anteriormente estudadas, o que motivou este trabalho.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é comparar o valor do fluxo de calor radiante medido para diferentes chamas com o calculado através do modelo das múltiplas fontes pontuais, a fim de verificar a adequação do modelo para chamas difusivas turbulentas. Para tanto, objetivos específicos são estabelecidos:

1. Adaptar a bancada experimental construída por Moschetta, 2014, bem como a estrutura utilizada para o suporte do radiômetro, construída por Machado, 2015, para que sejam utilizadas para a medição de radiação em chamas turbulentas;
2. Medir o comprimento visível de chama, a altura de levantamento e a fração radiante para chamas de gás natural com diferentes vazões de combustível;
3. Medir o fluxo de calor radiante para as chamas em diferentes posições axiais ao longo destas;
4. Calcular o fluxo de calor radiante através do modelo das múltiplas fontes pontuais;
5. Comparar os resultados experimentais com as soluções analíticas encontradas aplicando-se o modelo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de chama

Quanto ao tipo de estrutura das chamas, estas podem ser divididas basicamente em dois tipos, de acordo com o processo de mistura dos reagentes gasosos: chamas pré-misturadas e chamas não pré-misturadas (ou chamas difusivas). Nas chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante são misturados a nível molecular, anteriormente à frente de reação, e só depois é dada a ignição da mistura. Este tipo de chama é caracterizado por uma combustão intensa em um pequeno volume, como ocorre nos motores de explosão. Já nas chamas difusivas, os reagentes estão inicialmente separados e a combustão se dá na interface entre o combustível e o oxidante, onde a mistura dos reagentes e a combustão ocorrem simultaneamente. Este tipo de chama é considerado mais seguro, por ter-se maior controle da combustão, sendo utilizado em processos industriais como câmaras de combustão de turbinas a gás, caldeiras e fornalhas [Turns, 2000].

É possível, ainda, classificar as chamas quanto à velocidade de escoamento, em dois tipos: laminares e turbulentas. Chamas laminares são aquelas cuja estrutura é estacionária, ou seja, não apresenta flutuações no tempo. Neste tipo de chama a difusão molecular é o mecanismo de mistura predominante entre o combustível e o oxidante. As chamas turbulentas, por sua vez, apresentam flutuações de velocidade, temperatura e concentrações das espécies no tempo. A turbulência promove um aumento na taxa de mistura, bem como um aumento acentuado da taxa de consumo dos reagentes [Coelho e Costa, 2007].

2.2 Comprimento visível de chama

A literatura contempla muitas formas de definir e medir o comprimento visível de chama, entretanto, nenhuma é tida como preferencial. Métodos experimentais comumente utilizados incluem determinação visual ou fotográfica, medindo-se a distância entre a base e o ponto mais alto onde é possível observar ainda alguma luminosidade, e tomando-se a média dos

comprimentos visíveis de chama em cada observação ou fotografia. O comprimento visível de chama pode ser definido, também, como a distância da base ao ponto onde a temperatura é máxima, na linha central da chama. É possível, ainda, defini-lo como a distância da base ao ponto, na linha central da chama, onde a fração de mistura média é igual à fração de mistura estequiométrica, onde fração de mistura é a razão entre a massa de material na corrente de combustível e a massa total em um volume de controle. Em geral, o comprimento visível de chama tende a ser maior do que o baseado em medições da temperatura ou concentração da mistura [Turns, 2000].

2.3 Altura de levantamento e extinção de chama

A uma velocidade de escoamento suficientemente baixa, uma chama difusiva turbulenta está ancorada (*“attached”*, em inglês) ao bocal do queimador. Ao se aumentar a velocidade de saída do combustível até chegar-se à velocidade de descolamento (*“lift-off velocity”*, em inglês), a chama difusiva se estabiliza em uma posição a jusante deste. A altura de levantamento (ou altura de descolamento ou *“lift-off height”* em inglês) pode, então, ser definida como a distância entre o bocal do queimador e a base da chama na posição em que se estabilizou. A altura de levantamento independe do diâmetro do bocal do queimador, entretanto, aumenta proporcionalmente ao aumento da velocidade de saída do combustível, até atingir um valor de altura máximo no qual a chama se extingue (*“blowout”*, em inglês). Reduzindo-se a velocidade de saída, há uma velocidade crítica na qual a chama ancora novamente no bocal do queimador. Entretanto, o valor desta velocidade é diferente da velocidade de descolamento [Peters, 2004].

2.4 Fração radiante

Segundo Coelho e Costa, 2007, a radiação térmica emitida por uma chama pode ser quantificada através da fração radiante, X_R , definida como o quociente entre a potência radiativa transmitida pela chama para a vizinhança, Q_R , e a energia total liberada na combustão por unidade de tempo, conforme a Equação 2.1

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_F} \quad (2.1)$$

onde Q_R é a energia total emitida para o ambiente [kW] e $Q_F = \dot{m}PCI$, onde \dot{m} é a vazão mássica de combustível [kg/s] e PCI é o poder calorífico do combustível [kJ/kg].

O valor da fração radiante pode variar desde uma porcentagem inferior a 5%, até mais de 50%, de acordo com o combustível, o volume da chama e a taxa de liberação de energia na combustão. O volume da chama varia com o cubo do diâmetro interno do queimador, enquanto a vazão de combustível, e conseqüentemente a taxa de liberação de energia na combustão, variam com o quadrado desse diâmetro. Assim, prevê-se que fração radiante seja diretamente proporcional ao diâmetro interno do queimador [Coelho e Costa, 2007].

Um dos métodos utilizados para quantificar a energia emitida por radiação pela chama é baseado no modelo da fonte pontual, onde o valor total da energia irradiada para o ambiente pode ser calculado através do produto entre a área superficial da uma esfera de raio R e o fluxo de calor radiante, podendo ser estimado através da Equação 2.2

$$X_R = \frac{4\pi R^2 q''_R}{\dot{m}PCI} \quad (2.2)$$

onde R é a distância do ponto médio do comprimento de chama até o radiômetro [m] e q''_R é o fluxo de calor radiante emitido pela chama [kW/m²].

2.5 Radiação térmica emitida pela chama

A radiação térmica emitida por chamas de hidrocarbonetos provêm predominantemente de duas fontes: da emissão contínua no espectro de partículas provenientes de fuligem e da emissão em bandas espectrais de produtos quentes da combustão, como H₂O e CO₂. Ambas as fontes emitem predominantemente na região do infravermelho, mas a emissão contínua das partículas quentes se estende ao espectro visível e é responsável pela luminosidade das chamas [Hankinson *et al.*, 2012].

As chamas difusivas turbulentas podem ser altamente irradiantes. Segundo Turns, 2000, em algumas aplicações práticas a radiação é um atributo desejado, contribuindo para o aquecimento da carga, como é o caso dos fornos. Entretanto, em outras aplicações, as perdas de calor por radiação podem contribuir para uma perda de eficiência (como ocorre com os motores Diesel) ou para os riscos de segurança (como as operações de *flares*). A radiação pode ser prejudicial ainda a alguns equipamentos, como é o caso das turbinas a gás, onde a energia transmitida por radiação conduz a um sobreaquecimento indesejado das paredes da câmara de combustão.

2.6 Modelo da fonte pontual

Além do interesse científico como um aspecto do comportamento global da chama, a emissão de radiação por chamas difusivas turbulentas de combustíveis gasosos é de importância prática [Becker *et al.*, 1982]. Métodos simplificados para medição da radiação emitida por chamas têm sido amplamente utilizados para aplicações de engenharia. O método mais simples e mais utilizado para mensurar a energia emitida pela radiação da chama é o modelo da fonte pontual única (*SPS – single point source model*) [Machado, 2015]. Este método é fundamentado na consideração de que a chama pode ser representada por uma fonte pontual, localizada a meio comprimento visível de chama e a radiação que atinge o receptor é proveniente desta fonte pontual, conforme pode ser visto na Figura I do Anexo I.

O fluxo de calor radiante pode, assim, ser estimado em qualquer ponto ao redor da chama, assumindo-se uma fração radiante conhecida através da literatura e aplicando a Equação 2.3

$$q_R'' = \frac{X_R Q_F \tau_S}{4\pi S^2} \cos \varphi \quad (2.3)$$

onde S é a distância entre o receptor e a fonte pontual [m], τ_s é a transmitância da atmosfera avaliada para a distância S e φ é o ângulo formado entre a trajetória de S e o eixo normal à face plana do receptor [graus].

Este método simplificado é amplamente utilizado na indústria, como nos padrões da API para sistemas de *flares* (ANSI/API STANDARD 521, 2007), pois apresenta bons resultados para medição da radiação em regiões distantes da chama (*far field region* – mais do que duas vezes o comprimento de chama segundo [Becker *et al.*, 1982; Markstein, 1985]). Entretanto, para regiões próximas à chama (*near field region*), os resultados são insatisfatórios, pois o modelo desconsidera os efeitos do formato da chama, fator este que ganha relevância conforme é reduzida a distância entre a chama e o receptor.

O modelo da fonte pontual única pode ainda ser utilizado para medição da fração radiante proveniente de uma chama, conforme descrito na Seção 2.4. Para chamas de grande escala, como é o caso dos *flares* de indústrias petroquímicas e refinarias, o único local de onde o fluxo de calor radiante pode ser medido é ao nível do solo. Para essas aplicações, a fração de radiação precisa ser estimada através da medição do fluxo de calor radiante em um único ponto apropriado no plano do queimador [Sivathanu *et al.*, 1993]. Assim, com uma única medição do fluxo de calor radiante, é possível obter a fração radiante através da aplicação da Equação 2.2.

2.7 Modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas

Uma vez que o modelo da fonte pontual apresenta resultados insatisfatórios para regiões próximas à chama, se faz necessária a utilização de outro modelo para a previsão do fluxo de calor radiante nessa região. Para suprir essa necessidade, Hankinson *et al.*, 2012, propõem o modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas (*WMPS – weighted multi-point source model*), que tem como objetivo modelar o fluxo de calor radiante proveniente de chamas tanto nas regiões próximas quanto nas regiões afastadas das chamas. Segundo Hankinson *et al.*, 2012, este modelo consiste em considerar que a radiação emana de um determinado número de fontes pontuais distribuídas ao longo do eixo da chama e dentro do comprimento visível desta, conforme pode ser visto na Figura II do Anexo I.

O modelo considera, também, que a radiação incidente no sensor é determinada como sendo o somatório da radiação proveniente individualmente de cada uma das fontes pontuais, conforme demonstra a Equação 2.4

$$q_R^n = \sum_{j=1}^N \frac{w_j X_R Q_F \tau_S}{4\pi S_j^2} \cos \varphi_j \quad (2.4)$$

onde w_j é o fator de ponderação atribuído a cada fonte pontual e N é o número de fontes pontuais, sendo que a soma de todos os N fatores de ponderação deve ser igual a um. Para um número de fontes N igual ou superior a 20, a radiação incidente é independente do número de fontes pontuais.

A capacidade de prever o fluxo radiativo do modelo é dependente dos fatores de ponderação adotados. Hankinson *et al.*, 2012, assumem que os fatores de ponderação w_j podem ser descritos por duas funções lineares, uma crescente e uma decrescente. A primeira partindo do zero até o seu valor máximo, n , conforme a Equação 2.5, onde $n=0,75N$. A partir deste ponto, inicia-se uma segunda função, que termina em zero, conforme a Equação 2.6.

$$w_j = jw_1, j = 1, \dots, n \quad (2.5)$$

$$w_j = \left[n - \frac{(n-1)}{(N-(n+1))} (j-(n+1)) \right] w_1, j = n+1, \dots, N \quad (2.6)$$

3. BANCADA EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados durante a realização dos experimentos, bem como os métodos empregados nas medições do comprimento e da altura de levantamento da chama, da fração radiante e do fluxo de calor radiante, além da análise das incertezas provenientes destas medições.

3.1 Bancada experimental

Para a realização deste estudo é utilizado o queimador construído por Moschetta, 2014. É utilizado um tubo circular de aço inoxidável com diâmetro interno de $7,55 \pm 0,10$ mm, cujo comprimento é aproximadamente 40 vezes maior que o diâmetro do injetor, a fim de garantir que o escoamento seja plenamente desenvolvido.

Para a obtenção das chamas é utilizado gás natural veicular proveniente da Bolívia, com a seguinte composição química: 90,8% de metano, 6,1% de etano, 1,4% de nitrogênio, 1,2% de propano e 0,5% de dióxido de carbono [GasNet, 2015].

Os experimentos são realizados segundo a configuração de montagem da bancada ilustrada na Figura 3.1. O queimador é posicionado no centro de uma armação retangular, envolvida por uma tela de malha fina de aço galvanizado tipo M-20 desde o chão até a coifa de

exaustão. A malha possui área aberta igual a 58,34% e suas dimensões são de 1 m x 2,5 m. A tela é utilizada com a finalidade de minimizar as interferências do ar ambiente.

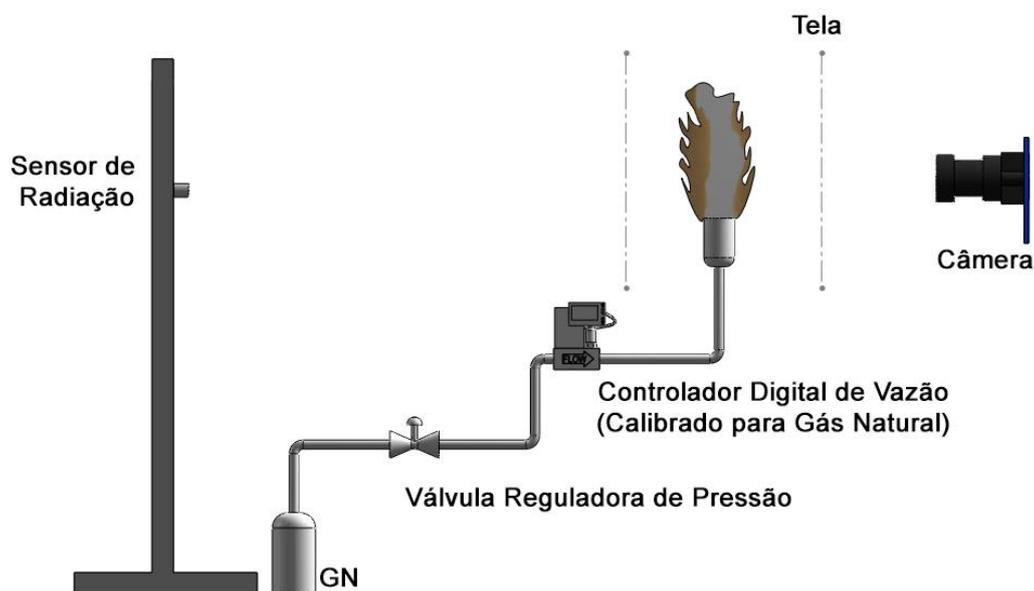


Figura 3.1 – Bancada experimental para realização dos testes.

As medições de vazão são realizadas utilizando-se um controlador digital de vazão da marca BRONKHORST, modelo F-112AC, com vazão de operação máxima de 150 l/min (onde se utiliza como referência a pressão de 1 atm e a temperatura de 20°C) e incerteza de medição de $\pm 0,5\%$ do valor lido mais $\pm 0,1\%$ do valor de fundo de escala. O controlador é calibrado para ar e, para programar as vazões desejadas de gás natural, utiliza-se o software de correção de vazão fornecido pela empresa, que considera as propriedades do gás para fornecer a vazão real deste para determinada vazão programada no controlador.

O fluxo de radiação emitido pela chama é medido com o auxílio de um radiômetro da marca MEDTHERM, modelo 64-0.5-20/ZeSeW-1C-150, que consiste em um transdutor de fluxo de calor do tipo Schmidt-Boelter. O radiômetro opera na faixa de 0 a 0,5 kW/cm² com incerteza de $\pm 3\%$ da responsividade, que é de 0,8503 kW/cm² por mV. O sensor possui um ângulo sólido de abertura igual a 150° e é conectado a um datalogger da marca Agilent, modelo 34972A, responsável pela aquisição dos sinais, que por sua vez é conectado ao computador, onde o software do próprio datalogger faz a captura dos sinais conforme o programado. O radiômetro é fixo a uma placa retangular, que por sua vez é fixa a uma estrutura metálica, onde desliza através de buchas encaixadas internamente nos perfis de alumínio da estrutura. A estrutura metálica é dotada de uma escala graduada com passo de 50 mm, assim como a placa de fixação do sensor é dotada de um nível de bolha, o que permite posicionar o sensor em diferentes posições paralelas ao eixo da chama.

As imagens das chamas são capturadas com uma câmera digital da marca LaVision, modelo Image Pro. Para o processamento das imagens digitais, utiliza-se o software DaVis, versão 8.2, também da LaVision.

3.2 Procedimentos de medição

Os experimentos são feitos para o combustível puro, sem diluições em outros gases. O combustível é injetado verticalmente no ar atmosférico, a partir do bico injetor do queimador. O queimador é posicionado de modo que o bocal de saída do combustível esteja a 550 mm de altura em relação ao chão. As medições são realizadas para cinco vazões de combustível

diferentes: 5, 10, 25, 50 e 100 l/min. A vazão é programada no controlador e, após a estabilização do seu valor, são realizadas as medições.

Para medição do comprimento de chama, a câmera é posicionada a 4,30 m do queimador, em linha reta, e a 1,20 m acima do plano do bocal do queimador. Os tempos de abertura da câmera são programados em 3100 μ s. É utilizada a razão de abertura máxima da lente (igual a 16) e a razão focal é fixada em 1:12,5. Inicialmente, captura-se uma imagem instantânea com um paquímetro fixado na posição vertical ao longo do eixo do queimador, posicionado no bocal deste. Através desta imagem, verifica-se a diferença de pixels entre o ponto inicial e final do instrumento, permitindo estabelecer o comprimento, em mm, de um pixel da imagem obtida. Este valor é utilizado para calibrar o software, permitindo que este passe a apresentar a escala vertical ao longo da chama em mm nas próximas imagens.

Feito isto, são capturadas 600 imagens instantâneas, isto é, com curto tempo de exposição. Para facilitar a leitura, as imagens são binarizadas, ou seja, é definido um limite de intensidade de corte que separa a imagem da chama (de intensidade igual a um) da imagem de fundo (de intensidade igual à zero). Com este método é possível analisar quantas vezes a chama ocupa determinada região da imagem, analisando-se o valor da intensidade. É calculada uma imagem média com as 600 imagens instantâneas capturadas, através da qual é possível verificar a região ocupada pela chama durante o período de exposição. Observa-se que a região central da chama possui um valor de intensidade próximo a 1,00, o que equivale dizer que a chama esteve presente nesta região em aproximadamente 100% das imagens capturadas. Enquanto isso, a região no topo da chama apresenta menor frequência, de 1 a 2%. Sendo assim, o comprimento visível de chama é calculado pela média aritmética entre as posições destas duas regiões, conforme a Equação 3.1. O comprimento médio é medido nas duas posições conforme a Figura 3.2. Exemplos das imagens processadas para cada vazão de combustível podem ser observados na Figura I do Apêndice I.

$$L_f = \frac{L_{f_{100\%}} + L_{f_{1\%}}}{2} \quad (3.1)$$

onde $L_{f_{100\%}}$ e $L_{f_{1\%}}$ são, respectivamente, o comprimento visível de chama referente ao ponto mais alto onde a chama passou em aproximadamente 100% das imagens [m] e referente ao ponto mais alto onde a chama passou em pelo menos 1% das imagens [m].

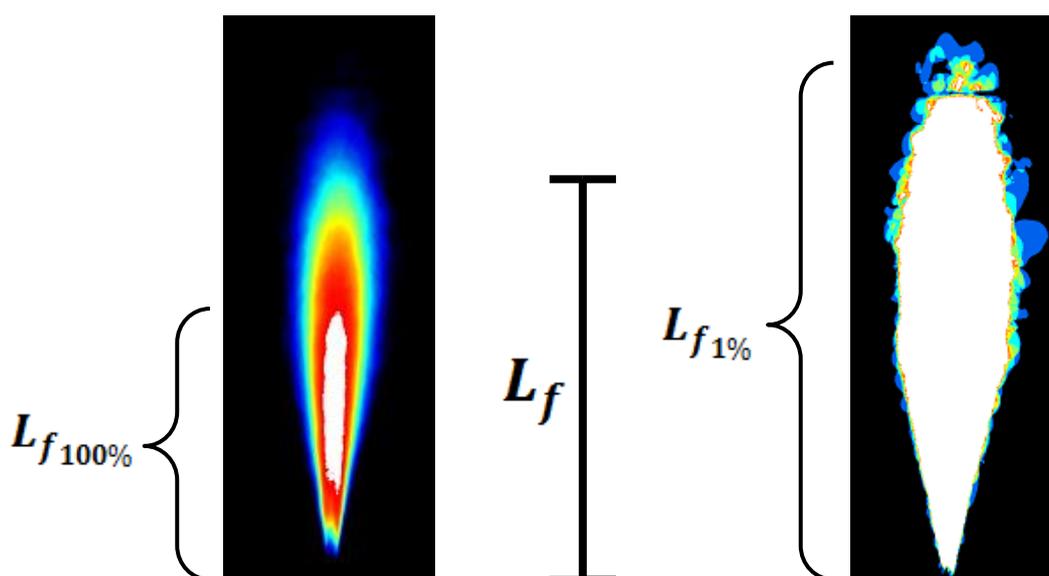


Figura 3.2 – Exemplo da medição da altura referente ao ponto mais alto onde a chama passou em aproximadamente 100% das imagens (à esquerda) e em pelo menos 1% das imagens (à direita).

Para medição da altura de levantamento de chama, utiliza-se o vídeo gerado através da reprodução em sequência das 600 imagens instantâneas de cada chama. As imagens são reproduzidas em alta velocidade, fazendo com que aparente ser uma única imagem e seja possível observar a posição média a partir da qual a chama passa a ser visível.

As medições da fração radiante de cada chama são feitas mantendo-se o queimador na posição inicial e posicionando-se a estrutura metálica com o radiômetro paralelamente à chama, em linha reta, a uma distância radial R equivalente a três vezes o valor do comprimento de chama. Além disso, o radiômetro é posicionado a uma distância do chão equivalente à soma da altura do bocal do queimador com metade do comprimento visível de chama, de modo que o radiômetro fique na altura do ponto médio do comprimento de chama. Assim, mede-se o fluxo de calor radiante, para que a fração radiante seja posteriormente calculada através do modelo da fonte pontual.

Para realizar as medições da distribuição de fluxo de calor radiante, mantém-se o queimador na posição inicial e posiciona-se a estrutura metálica com o radiômetro paralelamente à chama, a uma distância radial R fixa de 1 m. O controlador de vazão é calibrado para cada uma das cinco vazões pré-estabelecidas e realizam-se as medições dos fluxos de calor radiante para cada chama. O radiômetro é posicionado em uma posição inicial a 400 mm do chão, sendo este o primeiro ponto de medição para todas as cinco vazões. O datalogger é programado para adquirir o sinal do radiômetro por 30 s para cada ponto, a uma frequência de 10 Hz (100 ms). Passados os 30 s, o software do datalogger exporta os 300 sinais medidos para uma tabela. Feito isto, passa-se a medir o próximo ponto, elevando o radiômetro em 50 mm na escala graduada.

Estabeleceu-se o ponto inicial de medição como sendo a 400 mm do chão (ou 150 mm abaixo do bocal do queimador). O processo de medição do fluxo de calor radiante é repetido para cada ponto até que se meçam, pelo menos, dois pontos acima do comprimento visível de chama. Definiram-se os pontos inicial e final de medição desta maneira para que fosse possível capturar o valor do fluxo de calor radiante além dos limites inferior e superior da chama, uma vez que se sabe que há emissão de radiação nestas regiões também. Esta emissão de radiação além dos limites da chama provém dos gases quentes derivados da combustão. Após serem medidos todos os pontos para uma determinada vazão, realizam-se as medições para a próxima vazão estabelecida, até que tenham sido medidos todos os pontos para a vazão de 100 l/min.

4. RESULTADOS

4.1 Comprimento visível e altura de levantamento de chama

A Figura 4.1 mostra a variação do comprimento visível de chama em função da vazão volumétrica total de combustível. É possível observar que o comprimento visível de chama aumenta conforme é aumentada a vazão de combustível empregada. Entretanto, este aumento do comprimento de chama ocorre a uma taxa decrescente. Como o bocal do queimador utilizado possui diâmetro igual a $7,55 \pm 0,10$ mm ($0,3 \pm 0,00394$ polegadas), este resultado está de acordo com os estudos experimentais de Wohl *et al.*, 1949, que podem ser observados na Figura I do Anexo II. A incerteza é analisada para o comprimento de chama, bem como para os demais resultados analisados no presente trabalho, através da metodologia apresentada no Apêndice II.

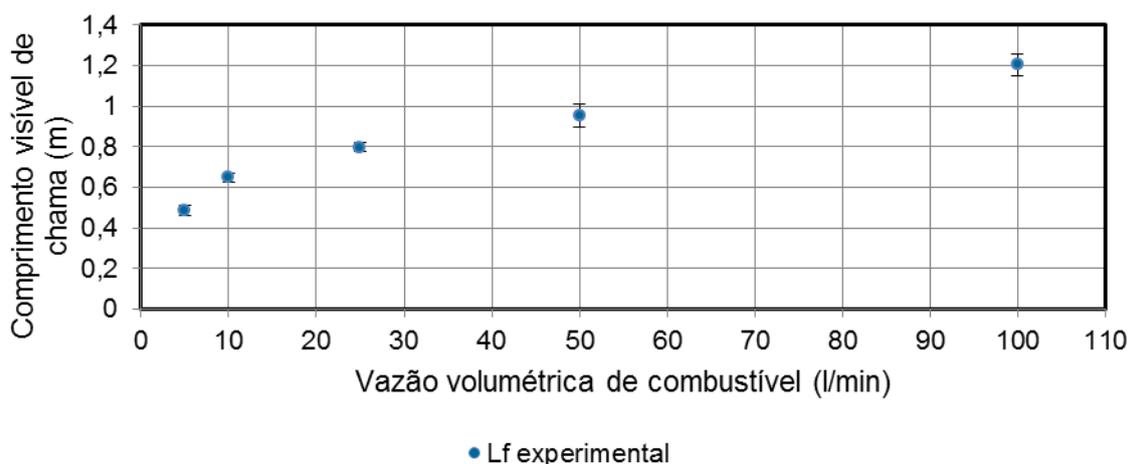


Figura 4.1 – Comprimento visível de chama em função da vazão de combustível.

A Figura 4.2 apresenta os valores de altura de levantamento de chama em função da vazão volumétrica total de combustível. Observa-se que os três primeiros pontos experimentais apresentam valor nulo, o que indica que a chama está ancorada ao bico injetor do queimador. A partir de uma determinada velocidade crítica de saída do combustível, a chama passa a descolar do bocal do queimador, passando a se estabilizar na altura de levantamento de chama. No estudo realizado, este comportamento é observado apenas para as chamas com vazões volumétricas equivalentes a 50 l/min e 100 l/min. Observa-se que a altura de levantamento varia quase linearmente com a velocidade de saída do jato do combustível, uma vez que seu valor praticamente dobra ao aumentarmos a vazão de 50 l/min para 100 l/min. Este resultado está de acordo com o encontrado por Kalghatgi, 1984.

A Figura 4.2 também mostra o fluxo de calor máximo registrado para cada chama. Observa-se que a derivada da curva do fluxo radiante máximo muda de inclinação quando a chama se descola do bocal. Isso indica uma redução na taxa de crescimento do fluxo conforme se aumenta a vazão de combustível, devido à diminuição da emissão de partículas de fuligem.

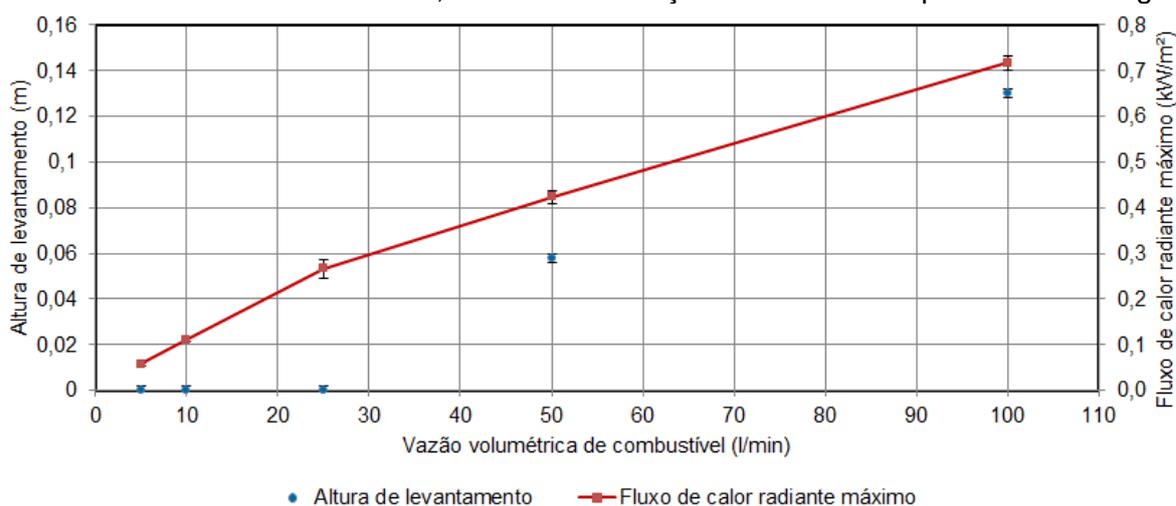


Figura 4.2 – Altura de levantamento de chama e fluxo de calor radiante máximo registrado para cada chama.

A partir da observação da Figura 4.3, nota-se que, quanto maior a altura de levantamento da chama, mais azulada fica a coloração da sua base. Este fato se deve à entrada de oxidante na base da chama, gerando uma pré-mistura parcial e diminuindo a quantidade de fuligem. A diminuição da quantidade de fuligem, por sua vez, diminui em parte a radiação, pois uma parcela desta se deve justamente à emissão das partículas de fuligem.



Figura 4.3 – Fotografias das chamas para as vazões volumétricas de 5, 10, 25, 50 e 100 ℓ/min , da esquerda para a direita.

4.2 Fração radiante

Obteve-se a fração radiante para cada chama, de acordo com a Equação 2.2, utilizando-se para o cálculo os valores contidos na Tabela I do Apêndice III. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.4. Nota-se que a fração radiante cresce até a vazão de 25 ℓ/min , passando a decrescer a partir da chama de 50 ℓ/min , onde se observa o descolamento da chama. Este decréscimo se deve à redução na emissão de partículas de fuligem, ocasionada pela pré-mistura parcial entre combustível e oxidante, devido ao levantamento da chama. Este resultado está de acordo com o encontrado por Hu *et al.*, 2014.

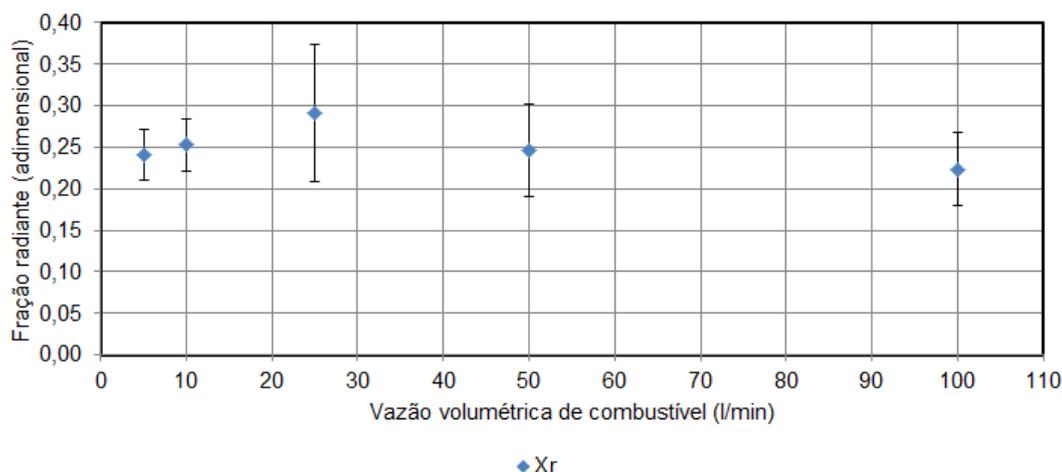


Figura 4.4 - Fração radiante obtida experimentalmente para cada chama.

4.3 Fluxo de calor radiante

Os valores do fluxo de calor radiante para cada ponto, em cada chama, são obtidos através da multiplicação do valor médio do sinal adquirido em Volts pela constante de calibração do sensor, equivalente a $850,3 \text{ (W/m}^2\text{)/mV}$.

Com o objetivo de verificar a adequação do modelo das múltiplas fontes pontuais para chamas difusivas turbulentas, procedeu-se com o cálculo do fluxo de calor radiante através do modelo sugerido por Hankinson *et al.*, 2012, a fim de comparar o fluxo de calor medido em cada ponto com o valor do fluxo de calor calculado para este mesmo ponto. Primeiramente, calcularam-se os fatores de ponderação de acordo com a Equação 2.5 e a Equação 2.6, assumindo-se 24 fontes pontuais distribuídas ao longo do comprimento visível de chama. Após, procedeu-se com o cálculo do fluxo de calor radiante através do modelo, conforme a Equação 2.4, considerando-se a transmitância da atmosfera como sendo equivalente à unidade, conforme Becker *et al.*, 1982, assumiram.

A Figura 4.5 apresenta os valores do fluxo de calor radiante medidos para cada ponto em cada chama, comparando-os com os valores de fluxo radiante calculados pelo modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas. Os valores de fluxo de calor radiante são representados por curvas em função da cota y/L_f , posição adimensional do sensor ao longo da chama (altura y do sensor dividida pelo comprimento visível de chama L_f). Observa-se que as curvas para os fluxos de calor calculados e medidos a uma vazão de 10 l/min apresentam boa concordância, apresentando uma diferença máxima de 6% do fluxo calculado em relação ao medido. Para uma vazão de 5 l/min o modelo subestima o fluxo radiante, apresentando uma diferença máxima de 12%. Para as vazões de 25, 50 e 100 l/min o modelo superestima o fluxo radiante, apresentando diferenças máximas equivalentes a 28%, 29% e 35%, respectivamente.

Em geral, as curvas tendem a apresentar maior concordância abaixo da chama e acima do comprimento visível desta. Essa característica pode ser muito interessante, principalmente para a utilização do modelo para a previsão do fluxo radiante em aplicações industriais como *flares*, uma vez que, para aplicações como esta, a região abaixo da chama é justamente a região de maior interesse. Outro ponto que se pode observar é o fato de que, com o aumento da vazão de combustível, o modelo tende a superestimar o fluxo de calor radiante, o que também pode ser interessante para o dimensionamento dos processos de combustão em aplicações industriais, uma vez que esta estimativa superior ao fluxo real acaba englobando um coeficiente de segurança intrínseco.

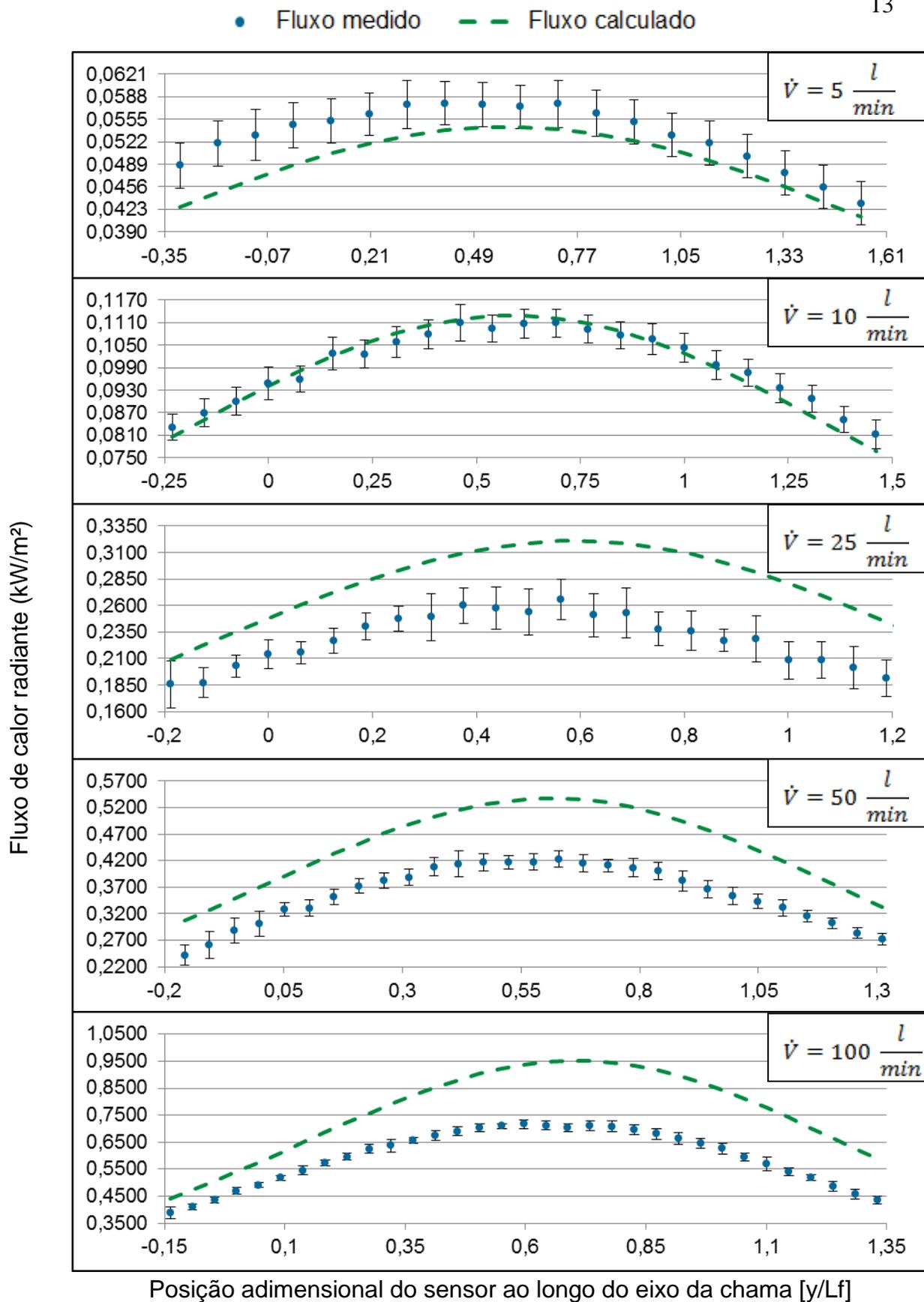


Figura 4.5 – Fluxo de calor radiante medido experimentalmente e calculado através do modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas.

5. CONCLUSÕES

A medição do comprimento visível de chama, através da análise de fotografias instantâneas, confirmou o aumento deste com o aumento da vazão volumétrica de combustível, porém com taxas decrescentes, para um queimador com diâmetro do bocal superior a 3,9 mm.

Para as chamas estudadas, observou-se que apenas as chamas de 50 l/min e 100 l/min possuem altura de levantamento, enquanto as demais permaneceram ancoradas ao bico injetor do queimador. Notou-se que a altura de levantamento variou quase linearmente com a velocidade de saída do combustível, conforme o esperado. Concluiu-se que o levantamento da chama acarreta uma diminuição da formação de fuligem e, conseqüentemente, o fluxo de calor radiante cresce a taxas decrescentes conforme se aumenta a vazão de combustível.

O fluxo de calor radiante foi obtido experimentalmente para as cinco chamas estudadas, e comparado com o fluxo calculado para as mesmas cinco chamas através do modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas. Concluiu-se que o modelo apresentou resultados satisfatórios para a chama de 10 l/min, enquanto que para vazões inferiores a esta o modelo subestimou o fluxo real, e para vazões superiores superestimou o fluxo. Observou-se que o modelo tende a apresentar resultados mais satisfatórios para as regiões abaixo da chama e acima do comprimento visível de chama, o que pode ser interessante, dado que em algumas aplicações industriais, como os *flares* de plataformas de petróleo, a região que se necessita estudar é justamente a região abaixo da chama. Notou-se que o modelo tende a superestimar o fluxo de calor radiante conforme se aumenta a vazão de combustível empregada, fato este que também pode ser interessante, uma vez que acarreta em um coeficiente de segurança intrínseco ao cálculo do fluxo.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar um estudo a fim de elaborar equações para obtenção dos pesos a serem utilizados no modelo das múltiplas fontes pontuais ponderadas, diferentes das equações propostas anteriormente pela literatura. Sugere-se, ainda, que este estudo seja realizado para vazões iguais ou superiores às das chamas estudadas no presente trabalho, a fim de aproximar cada vez mais as chamas estudadas das chamas utilizadas em aplicações industriais. Por fim, sugere-se também que se analise a influência da diluição do combustível com gases inertes na assertividade do modelo para chamas difusivas turbulentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI, API Standard 521, ISO 23251; **“Pressure Relieving and Depressuring Systems”**, 5th Ed., 2007.

Becker, H. A., Liang, D.; **“Total Emission of Soot and Thermal Radiation by Free Turbulent Diffusion Flames”**, Combustion and Flame 44, pp 305–318, 1982.

BSI, ISO 13385-1; **“Geometrical product specifications (GPS). Dimensional measuring equipment. Callipers; Design and metrological characteristics”**, 1st Ed., 2011.

Coelho, P., Costa, M.; **“Combustão”**, Edições Orion, 1^a Ed., 2007.

Delichatsios, M. A., Orloff, L.; **“Effects of Turbulence on Flame Radiation From Diffusion Flames”**, 1988.

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp#gas12. Acessado em 12/09/2015.

Hankinson, G., Lowesmith, B. J.; **“A Consideration of Methods of Determining the Radiative Characteristics of Jet Fires”**, Combustion and Flame, 159, pp 1165-1177, 2012.

Hu, L., Wang, Q., Delichatsios, M., Lu, S., Tang, F.; **“Flame radiation fraction behaviors of sooty buoyant turbulent jet diffusion flames in reduced and normal atmospheric pressures and a global correlation with Reynolds number”**, Fuel, vol. 116, pp 781-786, 2014.

Kalghatgi, G. T.; **“Lift-Off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air”**, Combustion Science and Technology, vol. 41, pp 17-29, 1984.

Lowesmith, B. J., Hankinson, G., Acton, M. R., Chamberlain, G.; **“An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards”**, Process Safety and Environmental Protection, 85(B3): 207–220, 2007.

Machado, I. M.; **“Caracterização experimental da radiação térmica emitida por chamas não pré-misturadas de metano diluído com CO₂”**. 2015. 135. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Markstein, G. H.; **“Relationship Between Smoke Point and Radiant Emission from Buoyant Turbulent and Laminar Diffusion Flames”**, Sym (Int) Combust, pp 1055-1061, 1985.

Moffat, R. J.; **“Describing the uncertainties in experimental results”**, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 1, p. 3-17, 1988.

Moschetta, M.; **“Estudo Experimental do Efeito da Diluição do Gás Natural com Dióxido de Carbono Sobre Características de Chamas Difusivas Turbulentas”**. 2014. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Mungal, M. G., O’Neil, J. M.; **“Visual Observations of a Turbulent Diffusion Flame”**, 1989.

Peters, N.; **“Turbulent Combustion”**, Cambridge Monographs on Mechanics, 2004.

Peters, N., Williams, F. A.; **“Lift-off Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames”**, AIAA Journal, vol. 21, pp. 423-429, 1983.

Sivathanu, Y. R., Gore, J. P.; **“Total Radiative Heat Loss in Jet Flames from Single Point Radiative Flux Measurements”**, Combustion and Flame, vol 94, pp 265 – 270, 1993.

Turns, S. R.; **“An Introduction to Combustion”**, McGraw-Hill Higher Education, 2nd Ed., 2000.

Turns, S. R., Myhr, F. H.; **“Combust Flame 87”**, pp 319-335, 1991.

Vanquickenborne, L., Van Tiggelen, A.; **“The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames”**, Combustion and Flame, vol. 10, pp. 59-66, 1966.

Zukoski, E. E., Cetegen, B. M., Kubota, T.; **“Visible Structure of Buoyant Diffusion Flames”**, 20th Int’l. Symp. on Comb., The Combustion Institute, Pitts., PA, pp 361-366, 1984.

Wohl, K., Gazley, C., Kapp, N.; **“Diffusion Flames”**, Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, pp. 288, 1949.

APÊNDICE I

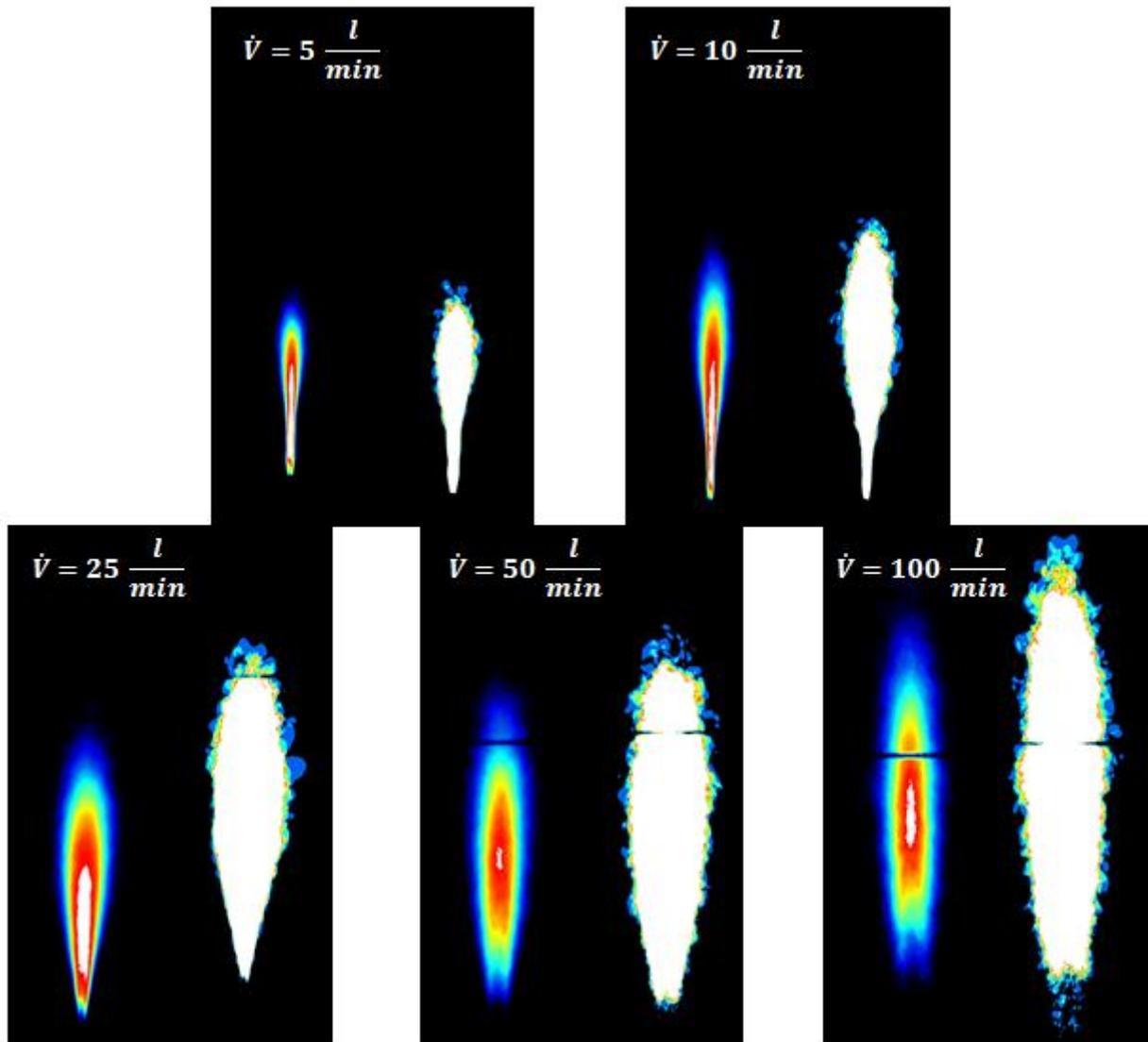


Figura I – Imagens das chamas processadas pelo software DaVis. Nas chamas à esquerda de cada par, a região em branco representa os locais onde a chama esteve em aproximadamente 100% das imagens. Nas chamas à direita de cada par, a região em branco representa os locais onde a chama esteve, pelo menos, em 1% das imagens.

APÊNDICE II

A análise de incertezas é feita conforme Moffat, 1988. Iniciando-se pela análise das incertezas na medição do comprimento visível de chama, primeiramente calcula-se a variância $S_{\bar{X}_i}$, conforme a Equação II.1

$$S_{\bar{X}_i} = \left[\sum_{i=1}^{N_A} \frac{(X_i - \bar{X}_i)^2}{N_A - 1} \right]^{0,5} \quad (II.1)$$

onde X_i é dado pelos valores adquiridos [mm], \bar{X}_i é a média dos valores adquiridos [mm] e N_A é o tamanho da amostra. Para o comprimento de chama, o valor da variância é calculado através

do desvio padrão, calculado pelo próprio software de processamento das imagens, uma vez que a variância é equivalente ao quadrado do desvio padrão.

A incerteza do sistema de aquisição, $B_{\bar{x}_i}$, é proveniente da incerteza de medição do paquímetro, uma vez que esta é a única fonte de incerteza no sistema. De acordo com a norma BS 13385-1:2011, a incerteza associada ao paquímetro, equivale a, no máximo, $\pm 0,02$ mm. Sendo assim, a incerteza associada ao comprimento visível de chama, $U_{\bar{L}_f}$, é dada pela equação II.2

$$U_{\bar{L}_f} = \left[\left(B_{\bar{L}_f} \right)^2 + \left(t S_{\bar{L}_f} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (II.2)$$

onde $B_{\bar{L}_f}$ é o erro associado ao sistema de medidas, $S_{\bar{L}_f}$ é a variância da amostra associada ao comprimento visível de chama médio, \bar{L}_f , e t é a distribuição t de *Student*, avaliado para o número de graus de liberdade da amostra e o nível de confiança adotado. Para a análise em questão, o nível de confiança foi adotado como sendo de 95% bilateral, ou seja, existe uma probabilidade de 95% de o intervalo de confiança conter efetivamente a média dos valores adquiridos.

Para o fluxo de calor radiante, o tratamento das incertezas é feito de maneira semelhante, com os valores adquiridos em Volts. Primeiramente, utiliza-se a Equação 3.1 para o cálculo da variância da amostra. Já para o cálculo da incerteza proveniente do sistema de aquisição, $B_{\bar{x}_i}$, utiliza-se a Equação II.3

$$B_{\bar{x}_i} = \left[\left(J \bar{X}_i \right)^2 + \left(K \bar{X}_i \right)^2 + \left(L \bar{X}_i + M \right)^2 \right]^{0,5} \quad (II.3)$$

onde J é a incerteza característica do sensor (3% do sinal médio), K é a repetibilidade do sensor (0,5% do sinal médio), L é a incerteza do sistema de aquisição (0,0030% do sinal médio) e M é a incerteza associada à faixa de medição do sistema de aquisição (0,0035% da faixa de medição, equivalente a 100 mV).

Por fim, a incerteza associada ao fluxo de calor radiante, $U_{\bar{x}_i}$, é dada pela Equação II.4.

$$U_{\bar{x}_i} = \left[\left(B_{\bar{x}_i} \right)^2 + \left(t S_{\bar{x}_i} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (II.4)$$

Sendo assim, o valor representativo do fluxo de calor radiante para cada ponto, q_i'' , é dado pela Equação II.5

$$q_i'' = \alpha \left(\bar{X}_i \pm U_{\bar{x}_i} \right), i = 1, \dots, N_p \quad (II.5)$$

onde α é a constante de calibração do sensor [(W/m²)/mV] e N_p é o número de pontos de medição ao longo do eixo axial.

A incerteza na medição da fração radiante necessita de análise diferenciada, pois as incertezas das variáveis de controle se propagam para a grandeza final, seguindo uma função. Considerando que a grandeza final seja uma função $Z = Z(X_1, X_2, \dots, X_n)$, a incerteza na grandeza final é dada pela Equação II.6

$$U_Z = \left[\sum_{i=1}^{N_v} \left(\frac{\delta Z}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{0,5} \quad (II.6)$$

onde N_v é o número de variáveis de controle envolvidas, equivalente ao número de fontes de incerteza.

Para o presente trabalho, a função Z da Equação 3.6 é dada pela definição de fração radiante neste experimento, representada pelo lado direito da Equação 2.2. Assim, a incerteza associada à fração radiante é então definida pela Equação II.7

$$U_{X_R} = \left[\left(\frac{8\pi R q_R''}{\dot{m} PCI} \delta R \right)^2 + \left(\frac{4\pi R^2}{\dot{m} PCI} \delta q_R'' \right)^2 + \left(\frac{-4\pi R^2 q_R''}{\rho (\dot{V})^2 PCI} \delta \dot{V} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (II.7)$$

onde δR é a incerteza associada à medição da distância entre o sensor e a chama, $\delta q_R''$ é a incerteza associada à medição do fluxo de calor radiante, $\delta \dot{V}$ é a incerteza associada à medição da vazão volumétrica de combustível e ρ e \dot{V} são, respectivamente, o peso específico e a vazão volumétrica do combustível.

Quanto à altura de levantamento, a incerteza é assumida como sendo de ± 2 mm, associada à facilidade de se observar a base da chama.

APÊNDICE III

Tabela I – Valores obtidos experimentalmente e assumidos para os cálculos do presente trabalho.

Vazão volumétrica de combustível	V ponto	5	10	25	50	100	l/min
Vazão lida no controlador	V pontoc	6,825	13,65	34,125	68,25	136,5	l/min
Vazão mássica	m ponto	6,06E-05	0,000121	0,000303	0,000606	0,001212	kg/s
Comprimento visível de chama	Lf	0,4869	0,65	0,799	0,9536	1,2054	m
Altura de levantamento	Hf	0	0	0	0,058	0,13	m
Altura do sensor para medição de Xr	h	0,7934	0,875	0,9495	1,0268	1,1527	m
Distância do sensor para medição de Xr	R	1,4607	1,95	2,397	2,8607	3,6161	m
Fluxo de calor radiante medido para o cálculo de Xr	q''	0,025949	0,030626	0,058488	0,069485	0,078784	kW/m ²
Fração radiante	Xr	0,24	0,25	0,29	0,25	0,22	Adim.
Potência de chama	Sr	2,9	5,8	14,5	29	58	kW
Fluxo de calor radiante máximo	q'' máx	0,057848	0,111018	0,265495	0,422789	0,716936	kW/m ²
Massa específica	ρ	0,727					kg/m ³
Constante de calibração do sensor de radiação	-	850,3					(W/m ²)/mV
Poder calorífico	PCI	47816,02					kJ/kg
Transmitância da atmosfera avaliada para a distância S	T _s	1					Adim.
Pressão de referência	p	1					atm
Temperatura de referência	T	20					°C

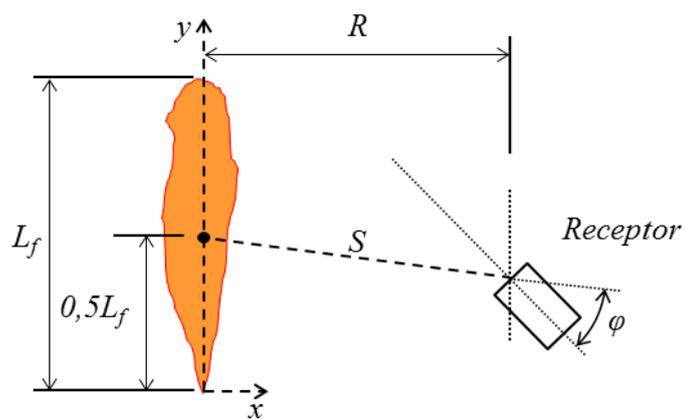


Figura I – Modelo da fonte pontual. Fonte: Machado, 2015.

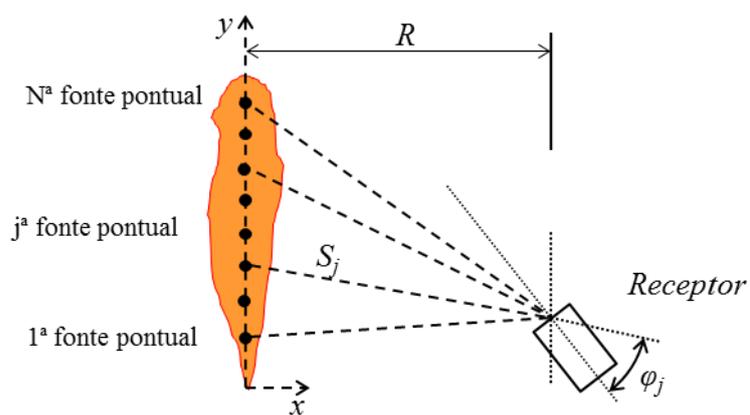


Figura II – Modelo das múltiplas fontes pontuais. Fonte: Machado, 2015.

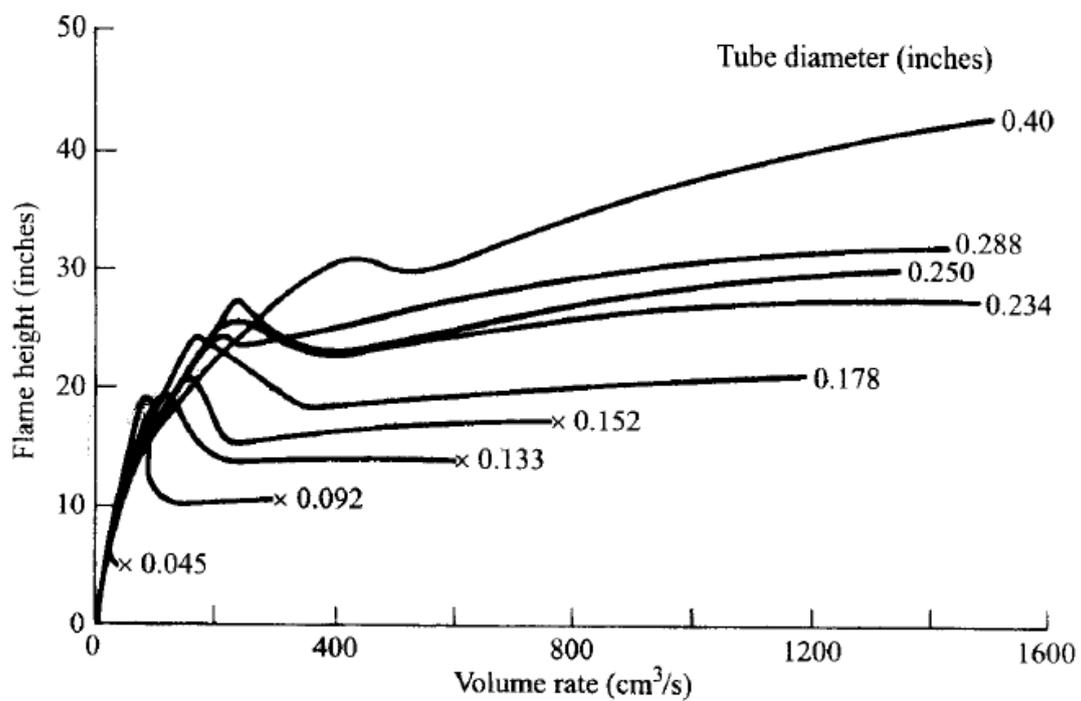


Figura I – Variação do comprimento visível de chama em função da vazão volumétrica de combustível para diferentes diâmetros de bocal. Adaptado de Wohl *et al.*, 1949.