

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

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E RADIATIVAS DE CHAMAS  
TURBULENTAS DIFUSIVAS DE GÁS NATURAL COM DILUIÇÃO DE CO<sub>2</sub> E INTERAÇÃO DE  
UM ESCOAMENTO TRANSVERSAL DE AR

por

Tiago Bortoluzzi de Oliveira

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

Porto Alegre, dezembro de 2017



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

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E RADIATIVAS DE CHAMAS  
TURBULENTAS DIFUSIVAS DE GÁS NATURAL COM DILUIÇÃO DE CO<sub>2</sub> E INTERAÇÃO DE  
UM ESCOAMENTO TRANSVERSAL DE AR

por

Tiago Bortoluzzi de Oliveira

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<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Guilherme Crivelli Fraga

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 27 de dezembro de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo incentivo ao estudo e pelo suporte ao longo de toda minha vida acadêmica. Ao Professor Felipe Centeno pela orientação constante, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência dedicada no desenvolvimento deste trabalho. Ao Professor Fernando Pereira pelo acompanhamento dedicado durante os anos de trabalho no Laboratório de Combustão. Aos colegas do Laboratório de Combustão pela ajuda, conhecimento e amizade compartilhados. Aos meus amigos, que proporcionam o crescimento mais sincero e a ajuda mais necessária.

OLIVEIRA, T. B. **Análise das Propriedades Geométricas e Radiativas de Chamas Turbulentas Difusivas de Gás Natural com Diluição de CO<sub>2</sub> e Interação de um Escoamento Transversal de Ar.** 2017. 20 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

Chamas provenientes da queima de combustíveis em plataformas de extração de petróleo e em refinarias atraem grande interesse devido às questões ambientais, econômicas e de segurança envolvidas no processo. O entendimento do comportamento de tais chamas é muito importante, por exemplo, no projeto de *flares* utilizados na queima do combustível, o qual apresenta-se, geralmente, como uma mistura de gás natural e dióxido de carbono. O objetivo deste trabalho é o de caracterizar experimentalmente chamas turbulentas difusivas resultantes da queima desta mistura com a interação de um escoamento transversal de ar. Uma bancada experimental foi construída a fim de proporcionar o vento na direção das chamas, as quais foram filmadas e, após o processamento das imagens, foram obtidos seus parâmetros geométricos. Além disso, foi medido o fluxo de calor radiativo emitido por cada chama em diversos pontos de planos paralelos ao plano da chama. A metodologia proposta por Majeski *et al.*, 2004, para a estimativa do comprimento de chama foi analisada e validada para as chamas testadas neste trabalho. Através dos dados experimentais, foram propostas correlações para a estimativa das demais propriedades geométricas e radiativas estudadas. O modelo proposto para a estimativa do fluxo radiativo emitido, complementado pelas outras correlações aqui desenvolvidas, apresentou resultados satisfatórios, com um erro médio geral de 11,6% em relação aos dados experimentais das 45 chamas testadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Chamas turbulentas difusivas, escoamento transversal de ar, fluxo de calor radiativo, queimadores, correlações.

OLIVEIRA, T. B. **Analysis of Geometric and Radiative Properties of Natural Gas Turbulent Diffusion Flames with CO<sub>2</sub> Dilution in Crossflow**. 2017. 20 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

Flames resulting from the burning of fuels in oil extraction platforms and refineries are of much interest due to the environmental, economic and safety issues involved in the process. Understanding the behavior of such flames is very important, for example, in the design of the flares used to burn the fuel, which is, usually, a mixture of natural gas and carbon dioxide. The objective of this work is, therefore, to characterize, experimentally, turbulent diffusion flames resulting from the burning of such mixture in crossflow. An experimental apparatus was built in order to supply the air crossflow towards the flames, which were recorded and, after the image processing, their geometric parameters were acquired. Moreover, the radiative heat flux emitted by each flame was measured at many positions on different planes parallel to the flame plane. The methodology proposed by Majeski et al., 2004, to estimate the flame length was analyzed and validated for the tested flames. With the experimental data, correlations were proposed to estimate the other geometric and radiative properties studied in this work. The proposed model to estimate the radiative heat flux, complemented by the other correlations developed, presented satisfactory results, with a general mean error of 11.6% with respect to the experimental data from the 45 tested flames.

**KEYWORDS:** Turbulent diffusion flames, crossflow, radiative heat flux, flares, correlations.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
3.1 Tipos de chama .....	3
3.2 Modos de chama em <i>crossflow</i> .....	4
3.3 Comprimento de chama visível .....	4
3.4 Inclinação da chama .....	5
3.5 Levantamento da chama.....	5
3.6 Fluxo radiativo e fração radiativa .....	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Bancada experimental .....	6
4.2 Definições geométricas da chama .....	7
4.3 Processamento e análise das imagens.....	8
4.4 Medições de fluxo radiativo.....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	9
5.1 Comprimento de chama visível .....	10
5.2 Ângulo de inclinação da chama .....	11
5.3 Levantamento da chama .....	11
5.4 Fluxo radiativo e fração radiativa .....	12
6. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	16
APÊNDICE III.....	16
APÊNDICE IV .....	17
ANEXO I .....	18

## 1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis injetados em um escoamento cruzado de ar tem crescido consideravelmente junto com o avanço industrial, atraindo interesse de engenheiros e pesquisadores. Sua aplicação em plataformas de extração de petróleo, por exemplo, é de extrema importância, seja em questões ambientais, econômicas ou de segurança. Nestes casos, a liberação dos gases provenientes do processo de extração se dá devido à necessidade de despejo de quantidades não desejadas, seja pela baixa qualidade do gás ou por uma ocorrência em baixo volume, ambas as situações acarretando em uma inviabilidade econômica do processamento. Além disso, a combustão destes gases, também conhecida como *flaring*, é essencial para atender a regulamentos de controle ambiental, tendo em vista que promove a transformação dos gases inflamáveis em produtos menos danosos à atmosfera. Outras aplicações são encontradas em refinarias, onde o *flaring* pode ocorrer tanto pela liberação de produtos de baixa qualidade quanto pela evacuação de alguma unidade em caso de desligamento ou manutenção. Por questões de segurança, também pode haver uma queima emergencial de gases em caso de falha de algum dispositivo ou equipamento da fábrica ou incêndio. Ainda, chamas em escoamento cruzado podem ser encontradas em motores a jato, onde a combustão dos reagentes ocorre no interior da turbina em contato com o ar succionado.

No primeiro exemplo citado, o combustível é usualmente queimado em *flares* com múltiplos bicos injetores e em vazões elevadas, formando uma chama difusiva turbulenta (Figura 1.1). O vento que atua sobre tal chama afeta seu formato, comprimento, campo radiativo e a formação de fuligem. Tendo em vista que a queima é realizada perto de um grande volume de combustíveis estocados e de pessoas e equipamentos, mostra-se necessário o entendimento do efeito do escoamento de ar em tais parâmetros com o intuito de realizar o ideal projeto dos *flares*, minimizando ou mesmo evitando riscos e garantindo a segurança da estrutura e das pessoas.



Figura 1.1 - À esquerda, plataforma de extração de petróleo e, à direita, flare com múltiplos bicos injetores. Fontes: <http://circuitomt.com.br/> e <https://brasilisnet.blogspot.com.br/>

A recente descoberta da camada de pré-sal no Brasil promoveu um intenso desenvolvimento nas tecnologias de extração de petróleo e de gás natural. De acordo com a Petrobras, a produção de petróleo no Brasil cresceu, aproximadamente, 24 vezes o seu volume do ano de 2010 a 2016, atingindo a marca de 1 milhão de barris extraídos por dia [Petrobras, 2017]. O gás natural, cujo volume é composto quase em sua totalidade por metano ( $\text{CH}_4$ ), apresenta uma grande importância tanto na extração do pré-sal quanto na comercialização de combustíveis pelo país. No processo de *flaring* de gás natural no pré-sal, é comum a presença de altos teores de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que atua como diluente, alterando as propriedades da chama. Sendo assim, é, também, essencial a compreensão dos efeitos de tal gás inerte na chama resultante da queima desta mistura.

Estudos realizados em laboratório pretendem investigar o comportamento das chamas sob a influência e variação de diversos parâmetros, simulando aplicações práticas em escala real ou reduzida.

Brzustowski *et al.*, 1975, investigaram o comportamento de chamas turbulentas difusivas de diversos gases em *crossflow* (em contato com um escoamento transversal de ar). Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de circuito aberto com chamas de hidrogênio, metano, propano, butano, etano e benzeno. A razão entre a velocidade do jato de combustível e a velocidade do vento foram variadas de 30 a 80, enquanto o diâmetro do queimador utilizado foi de 5 mm. Concluiu-se que a correlação para a trajetória de jatos frios de hidrocarbonetos proposta anteriormente por Pratte e Baines, 1967, se aplica bem a fim de estimar a trajetória de chamas turbulentas difusivas destes gases em *crossflow*. Além disso, os autores atentaram para a necessidade de estudos do efeito de escala, propondo experimentos de campo em escala real de aplicação de *flares*. Também, Brzustowski e Sommer, 1973, estudaram a emissão radiativa de *flares* e obtiveram bons resultados através do modelo de fonte pontual, que simplifica a chama como sendo uma única fonte radiativa localizada na posição central da trajetória da chama. Mais tarde, Brzustowski, 1976, apresentou um método orientado ao projeto de *flares* para estimar o formato e tamanho de chamas de hidrocarboneto em *crossflow* baseado em correlações para jatos frios de combustível, compilando todo conhecimento e tecnologia desenvolvidos até então. Em seguida, Brzustowski, 1977, propôs um modelo teórico para estimar o comprimento visível de chamas turbulentas difusivas de hidrocarbonetos em *crossflow* através de equações de continuidade das espécies químicas em reação, da equação de conservação de energia e da equação de conservação do momento, considerando variações em diversos parâmetros aerodinâmicos. Seu modelo foi bem suportado por dados experimentais realizados em um túnel de vento.

Kalghatgi, 1981, verificou, experimentalmente, condições de *blow-out* (condição em que a chama não se sustenta e extingue) em chamas difusivas em um estudo dividido em três partes: chamas em ambiente quiescente, chamas em *crossflow* e os efeitos da variação do ângulo do jato de combustível em relação ao escoamento de ar. Foram utilizados os gases metano, propano, etileno e butano, enquanto foram variadas a velocidade do ar, a velocidade do jato de combustível e o diâmetro do queimador. Kalghatgi, 1983, apresentou correlações empíricas para a forma e tamanho de chamas difusivas em *crossflow*. Seu modelo aproximava a chama por um tronco de cone, definindo-a pelo comprimento, largura inicial, largura final e ângulo de inclinação (Figura 1.2a).

Johnson e Kostiuk, 1999, por sua vez, investigaram os efeitos do *crossflow* e de gases diluentes na eficiência de combustão de chamas difusivas. Neste estudo, eles utilizaram misturas de gás natural com dióxido de carbono e verificaram uma drástica redução da eficiência de queima com o aumento da velocidade do vento transversal e com o aumento da fração de gás inerte na mistura. O foco do trabalho foram chamas com baixa relação entre a quantidade de movimento do jato de combustível e a quantidade de movimento do escoamento de ar ( $\leq 5$ ). Kostiuk *et al.*, 2000, propuseram um modelo semi-empírico do comprimento visível de chamas difusivas em relação à velocidade do ar, à velocidade do jato e ao diâmetro do tubo queimador. Desta vez, utilizaram o gás propano como combustível, mas mantiveram baixa a relação entre as quantidades de movimento dos escoamentos. Continuando este estudo, Majeski *et al.*, 2004, assumiram a chama como sendo a superfície de um cilindro inclinado onde há uma mistura estequiométrica, com combustível no lado interno e oxidante no lado externo do cilindro (Figura 1.2b). A fim de melhor estimar o comprimento visível de chama, incluíram parâmetros geométricos e estequiométricos no modelo proposto. Além disso, incluíram um fator representativo dos efeitos da diluição de gases inertes na mistura de combustível. Dados experimentais foram apresentados, concordando com as tendências propostas pelo modelo.

Wang *et al.*, 2015a, investigaram a evolução do comprimento visível de chamas turbulentas difusivas de propano em *crossflow*. Nos experimentos, foram variados o diâmetro do queimador, a velocidade do vento cruzado e a pressão atmosférica (64 e 100 kPa). Foi observada a diminuição do comprimento visível da chama com o incremento tanto da

velocidade do *crossflow* quanto da pressão atmosférica. Já com o incremento do diâmetro do queimador, foi verificado o aumento do comprimento visível. Por fim, foi proposta uma correlação entre o comprimento visível de chama e os parâmetros variados nos testes. Na mesma série de experimentos, Wang *et al.*, 2015b, analisaram o limite de *blow-out* e observaram que a velocidade do *crossflow* crítica à extinção da chama reduz consideravelmente com a diminuição da pressão atmosférica.

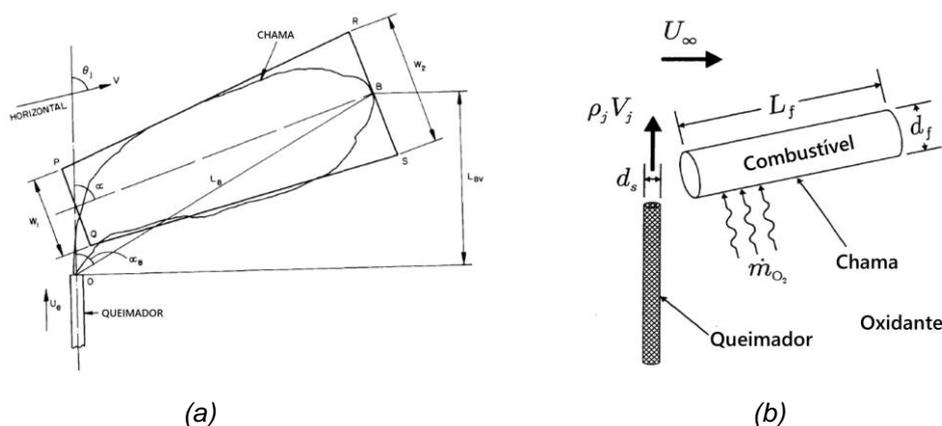


Figura 1.2 – (a) Modelo de tronco de cone proposto por Kalghatgi, 1983. (b) Modelo proposto por Majeski *et al.*, 2004.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização experimental da geometria e do fluxo de calor radiativo emitido por chamas turbulentas difusivas de gás natural com diluição de dióxido de carbono e sob influência de um escoamento transversal de ar. No desenvolvimento do trabalho, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar experimentalmente a geometria das chamas sob influência do escoamento de ar, variando a vazão da mistura de combustível, a diluição de  $CO_2$  na mistura e a velocidade do vento;
- Avaliar a metodologia proposta por Majeski *et al.*, 2004, para a estimativa do comprimento visível de chama e propor correlações para estimar os demais parâmetros geométricos;
- Realizar medições do fluxo de calor radiativo emitido pelas chamas em diversos pontos de um plano paralelo e distante do plano da chama. A partir das medições, calcular a fração radiativa das chamas;
- Propor modelos empíricos para estimar o fluxo radiativo e a fração radiativa emitida por uma chama de gás natural com diluição de  $CO_2$  em *crossflow*.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Tipos de chama

As chamas podem ser classificadas, em relação à mistura dos reagentes, de duas formas: pré-misturadas e não pré-misturadas (difusivas). No caso de chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante são misturados a nível molecular antes da ignição da mistura. Já no caso de chamas difusivas, os reagentes apresentam-se, inicialmente, separados e a reação ocorre no contato do combustível com o oxidante [Turns, 2000].

Quanto à classificação do escoamento do combustível, as chamas são categorizadas em laminares e turbulentas. Nas chamas laminares, as distribuições de velocidade, temperatura e concentração das espécies químicas não variam ao longo do tempo e o único processo de mistura entre combustível e oxidante é a difusão molecular. Já nas chamas turbulentas, tais distribuições variam ao longo do tempo e as flutuações podem ser bastante significativas. Estas flutuações são devidas a vórtices gerados pelas tensões de cisalhamento no escoamento e provocam um aumento na taxa de mistura [Coelho e Costa, 2007].

### 3.2 Modos de chama em *crossflow*

A relação entre as velocidades do jato de combustível e do escoamento transversal de ar define os diversos regimes de queima das chamas. Segundo Johnson e Kostiuk, 1999, e Kostiuk *et al.*, 2000, a chama pode apresentar-se de três diferentes modos, ilustrados na Figura 3.1:

- *Rim-stabilized*: chama ancorada no bocal do queimador. Ocorre somente com baixas velocidades do escoamento de ar e do jato de combustível.
- *Lifted*: chama que ocorre com altas vazões de combustível. Neste caso, a base da chama se encontra descolada do bocal do queimador e, entre a base e o bocal, surge uma região de pré-mistura.
- *Wake-stabilized*: chama resultante de altas velocidades relativas do escoamento de ar. Neste caso, parte do combustível é aprisionado e queimado no lado do bocal protegido do vento.

Huang e Chang, 1994, e Huang e Wang, 1999, realizaram extensos estudos experimentais de chamas do modo *wake-stabilized* e definiram diversas sub-categorias baseadas na relação entre as quantidades de movimento do jato de combustível e do escoamento de ar, dada por

$$R = \frac{\rho_j V_j^2}{\rho_\infty U_\infty^2}, \quad (3.1)$$

onde  $\rho_j$  e  $\rho_\infty$  são as massas específicas do combustível e do vento [ $\text{kg/m}^3$ ], respectivamente, e  $V_j$  e  $U_\infty$  suas velocidades [m/s].

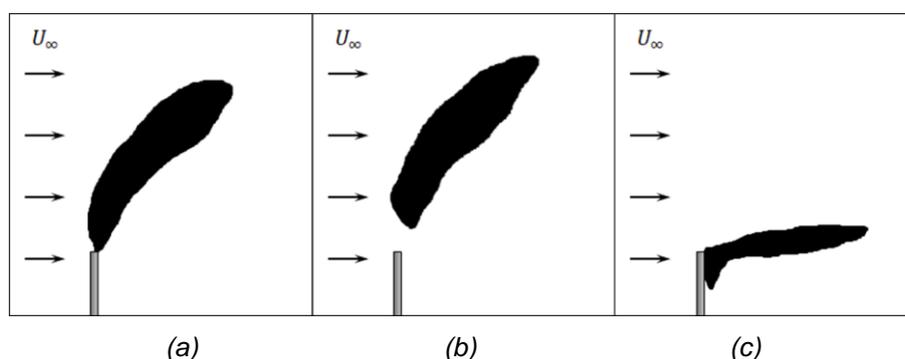


Figura 3.1 – Modos de chama observados por Kostiuk *et al.*, 2000: (a) *rim-stabilized*, (b) *lifted* e (c) *wake-stabilized*.

### 3.3 Comprimento de chama visível

Diferentes métodos para a definição do comprimento visível de chamas em *crossflow* podem ser encontrados na literatura. Brzustowski *et al.*, 1975, definiram o comprimento visível a partir de fotografias de longa exposição (3 segundos) das chamas. Já Kalghatgi, 1983, extraiu cinco *frames* aleatórios da filmagem de cada chama testada, ajustou a forma de um tronco de cone para cada imagem e, por fim, obteve um tronco de cone médio para cada chama. O comprimento visível da chama foi definido, então, como a distância mínima entre as bases do tronco de cone médio. Foi assumido também que, na ponta da chama, a concentração do combustível atinge a fração mássica estequiométrica, isto é, onde há completa oxidação do combustível.

O método mais comum, aplicado por Kostiuk *et al.*, 2000, Majeski *et al.*, 2004, Wang *et al.*, 2015, e Wang *et al.*, 2016, é realizado pela extração de diversos *frames* das filmagens de curta exposição das chamas. Esses *frames* são, então, transformados em imagens binarizadas através de um limite de contraste para a intensidade dos *pixels*. Finalmente, uma imagem média da chama é produzida, normalizando a soma das imagens binarizadas pela quantidade de imagens utilizadas. A intensidade de cada *pixel* desta imagem média indica a probabilidade de ocorrência de chama visível em tal local. A partir deste ponto, contudo, os autores divergem na definição do comprimento visível de chama. Kostiuk *et al.*, 2000, e Majeski *et al.*, 2004, o definiram como a distância reta entre a base da chama e a ponta do contorno de 10% de probabilidade, enquanto Wang *et al.*, 2015, e Wang *et al.*, 2016, utilizaram a ponta do contorno de 50% de probabilidade de ocorrência.

### 3.4 Inclinação da chama

A inclinação da chama é, usualmente, representada pelo ângulo formado entre a vertical e a linha que conecta a base da chama e a ponta da chama. Brzustowski, 1976, e Kalghatgi, 1983, verificaram que, aumentando a velocidade do vento cruzado, este ângulo de inclinação de chamas turbulentas aumenta gradualmente até atingir o valor máximo de 90°, estando a chama, então, em posição horizontal. Também verificaram que, diferentemente do comprimento visível da chama, o ângulo de inclinação independe do diâmetro do queimador, dependendo apenas da relação entre as velocidades do jato de combustível e do escoamento de ar. Wang *et al.*, 2016, propuseram três correlações semelhantes entre o ângulo de inclinação e a relação entre os momentos do jato de combustível e do vento, a fim de abranger uma vasta faixa de valores de  $R$ .

### 3.5 Levantamento da chama

O levantamento da chama é a condição em que a base da chama, em altas vazões de combustível, não se encontra ancorada no bocal do queimador, mas estabilizada a certa distância do mesmo. Este fenômeno está associado à relação entre a velocidade de queima e a velocidade do escoamento de gás. Em aplicações práticas, o levantamento é, geralmente, não desejável, pois pode contribuir para o vazamento de gás não queimado ou para uma combustão incompleta. Além disso, chamas levantadas podem apresentar ruído elevado [Turns, 2000].

Utilizando chamas difusivas de hidrocarbonetos e de hidrogênio em ambiente quiescente, Kalghatgi, 1984, verificou que a altura de levantamento varia linearmente com o aumento da velocidade de saída do jato de combustível e independe do diâmetro do queimador. Por fim, propôs um modelo de estabilidade da base da chama em relação ao equilíbrio entre a velocidade de queima turbulenta e a velocidade média do escoamento de gás.

Para chamas em *crossflow*, contudo, não foram encontrados estudos na literatura com foco no levantamento. Alguns autores que analisaram este tipo de chama incluíram a altura de levantamento no comprimento visível de chama.

### 3.6 Fluxo radiativo e fração radiativa

A radiação emitida por uma chama provém de duas fontes: devido aos produtos da combustão, principalmente o dióxido de carbono e o vapor d'água, e devido à fuligem, partículas muito finas compostas principalmente por carbono e que são resultantes da queima incompleta do combustível [Coelho e Costa, 2007]. Tal radiação pode ser representada pela fração radiativa, ou fração de energia radiativa,  $X_R$ , definida pela razão entre a potência radiativa transmitida pela chama,  $Q_R$ , e a energia total liberada durante a combustão,  $Q_F$ ,

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_F} = \frac{Q_R}{\dot{m}_F \Delta H_c}, \quad (3.2)$$

onde  $\dot{m}_F$  é a vazão mássica do combustível [kg/s] e  $\Delta H_c$  seu poder calorífico [J/kg].

No caso em que se assume a radiação como sendo emitida por uma fonte pontual localizada no ponto central do comprimento visível da chama, a energia liberada pela mesma,  $Q_R$  [W], pode ser representada pelo produto entre o fluxo radiativo (potência por unidade de área),  $q_R$  [W/m<sup>2</sup>], e a área de uma superfície esférica receptora desta energia,  $A_f$  [m<sup>2</sup>], com distância radial  $S$  [m] da fonte pontual. Considerando, também, a transmitância da atmosfera,  $\tau_s$  [adimensional], pode-se reescrever a Equação 3.2 como

$$X_R = \frac{4\pi S^2 q_R}{Q_F \tau_s}. \quad (3.3)$$

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Bancada experimental

A Figura 4.1 ilustra a configuração da bancada experimental. Os cilindros de gás natural e de dióxido de carbono (1) são conectados por tubos a controladores eletrônicos de vazão volumétrica da marca *Bronkhorst* (2) e estes, por sua vez, conectados por tubos que se unem, misturando os gases e levando-os a um queimador de tubo simples com diâmetro interno de 7,55 mm (3). Foi utilizado o gás natural veicular comercial GNV com composição química estimada de 90,8% CH<sub>4</sub>, 6% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 1,2% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 0,5% CO<sub>2</sub> e 1,55% N<sub>2</sub> [GasNet, 2017]. O dióxido de carbono utilizado possui pureza de 99,2% e as diluições empregadas foram de 0, 10 e 20% da vazão volumétrica total da mistura, a qual assumiu valores de 20, 25, 30, 35 e 40 lpm.

Com o intuito de proporcionar o escoamento de ar uniforme em direção à chama, foi construído um túnel aerodinâmico do tipo soprador (4), composto por três diferentes módulos e acoplado a um ventilador centrífugo (5). O primeiro módulo (6) possui seção de 0,45×0,45 m e comprimento de 0,50 m. O segundo módulo (7) possui seção inicial de 0,45×0,45 m, seção final de 1,00×1,00 m e comprimento de 1,50 m. Já o terceiro módulo (8) possui seção de 1,00×1,00 m e comprimento de 1,00 m. Tais dimensões foram projetadas para atender o bocal do ventilador e uma seção de saída capaz de cobrir chamas de até um metro de altura, considerando-se fatores como a perda de carga no túnel, a limitação de espaço no laboratório e o desenvolvimento do escoamento. Além disso, foram instaladas três telas de diferentes tamanhos de malha nas divisas dos módulos, a fim de homogeneizar o escoamento de ar. O ventilador centrífugo da marca *Soler&Palau* foi escolhido em função da perda de carga calculada e da velocidade do vento desejada, e apresenta ponto de operação ótimo em vazão de 10500 m<sup>3</sup>/h, pressão de 95,7 mmca e rendimento de 79%. Um inversor de frequência *WEG* foi conectado ao ventilador e uma curva da velocidade do ar na saída do túnel em função da frequência do inversor foi criada para possibilitar o controle da velocidade do vento durante os experimentos. As velocidades do vento utilizadas foram de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.

Para realizar as filmagens das chamas, foi utilizada uma câmera fotográfica *Canon EOS Rebel T5i* (9). Os parâmetros óticos (abertura do diafragma, tempo de exposição e sensibilidade ISO) foram determinados de acordo com o estudo realizado por Quezada, 2017, com o objetivo de obter imagens bem definidas das chamas. Os experimentos foram realizados com o mínimo de iluminação natural e, adicionalmente, foi instalada uma tela preta opaca (10) atrás da bancada para proporcionar um contraste adequado nas filmagens.

Durante a coleta dos dados de radiação, foi utilizado um conjunto de sensores de fluxo radiativo *Medtherm 64-0.5-20/ZnSeW-1C* (11). Estes sensores, conectados a um banho termostático (12) mantido a uma temperatura próxima à ambiente a fim de garantir a estabilidade das medições, emitiam um sinal elétrico proporcional ao fluxo de calor receptado para um *datalogger Agilent 34972A* (13). Visando considerar o aumento de temperatura do ambiente devido à queima do combustível ao longo dos testes, medições da radiação de fundo (sem chama) foram realizadas intercaladas com os experimentos.

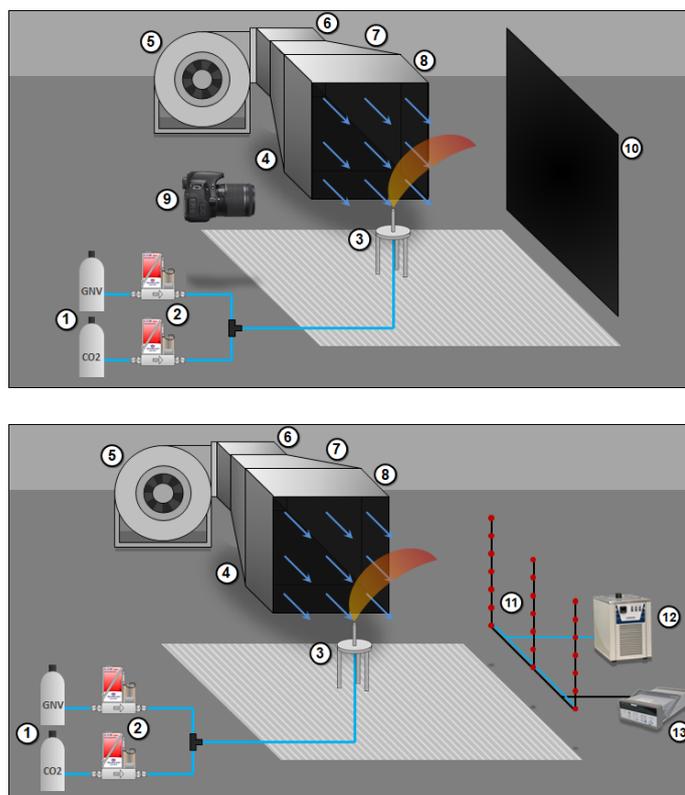


Figura 4.1 – Esquema ilustrativo da bancada experimental. Acima, configuração para experimentos de geometria da chama e, abaixo, configuração para experimentos de radiação.

## 4.2 Definições geométricas da chama

Neste trabalho, é proposta uma simplificação da geometria da chama, sendo ela definida por quatro parâmetros, como indicado na Figura 4.2: o comprimento visível da chama,  $L_f$ , sua inclinação,  $\alpha$ , o comprimento de levantamento,  $L_L$ , e a inclinação do levantamento,  $\beta$ . Essa definição foi mantida simples para possibilitar direta aplicação industrial. Além disso, para a estimativa do fluxo de calor radiativo emitido pela chama, que será discutido mais adiante, é necessário, apenas, conhecer a trajetória reta da chama, não se tornando essencial, portanto, estudar sua área ou seu volume.

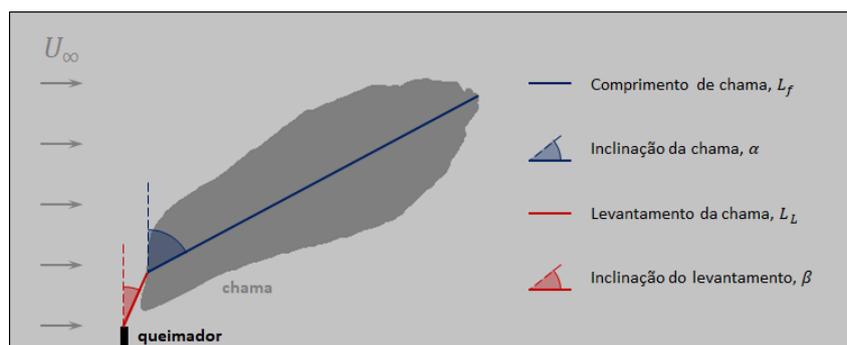


Figura 4.2 – Parâmetros geométricos propostos para definição da chama.

O comprimento visível da chama é definido, então, como a distância reta entre o ponto central da base da chama até a ponta da imagem média da chama. O levantamento é a distância desde o bocal do queimador até o ponto central da base da chama.

### 4.3 Processamento e análise das imagens

O método de processamento de imagens utilizado neste estudo é o mais comumente encontrado na literatura, como citado na seção 3.3. Da filmagem de cada chama, foram extraídos 1000 *frames*. Através de um programa desenvolvido no software *Matlab*, cada *frame* foi, então, convertido para uma escala de cinza e, após, convertido em uma imagem binarizada (Figura 4.3a). O método de binarização dos frames utilizado foi o proposto por Otsu, 1979, o qual divide o histograma da escala de cinza em duas classes através de um nível ótimo de contraste, determinado a partir da maximização da variância entre estas classes. As mil imagens binarizadas foram somadas e a imagem resultante foi normalizada, isto é, o valor de cada *pixel* foi dividido por mil, resultando, assim, em um mapa de frequência de ocorrência da chama (Figura 4.3b). Em síntese, a intensidade de cada *pixel* da imagem resultante representa a probabilidade de ocorrência da chama naquele local.

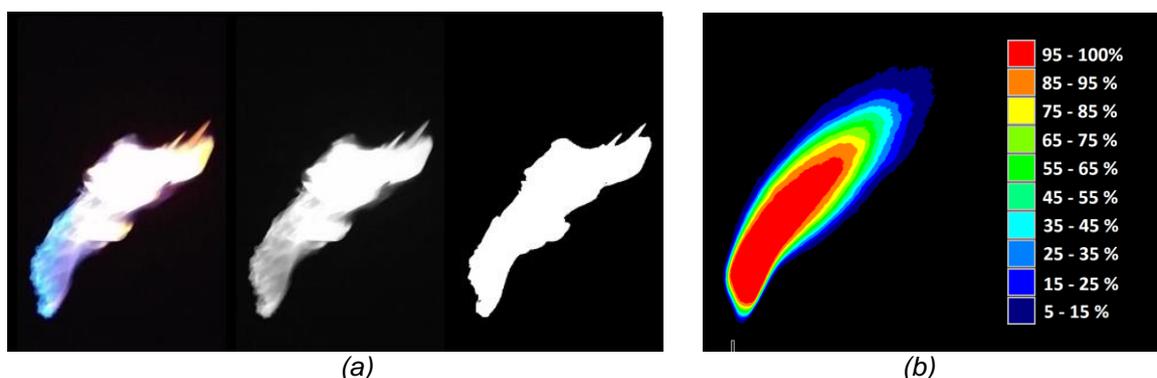


Figura 4.3 – (a) Etapas do processamento da imagem da chama: instantânea, em escala de cinza e binarizada. (b) Mapa de frequência de ocorrência da chama. Cada contorno representa uma faixa de probabilidade de ocorrência da chama.

Foi realizado um estudo da dependência dos resultados medidos em relação à quantidade de *frames* analisados. Pode-se observar na Figura 4.4a que, a partir de 400 *frames*, há pouca variação nos resultados: o comprimento visível de chama variou dentro de uma faixa de 10 mm enquanto que o ângulo de inclinação variou em uma faixa de um grau. Foi decidido utilizar mil *frames*, não obstante, para garantir uma boa amostragem, levando em consideração que o processamento desta grande quantidade de imagens não exige um tempo computacional demasiadamente extenso. As filmagens foram realizadas a uma taxa de 60 *frames* por segundo, sendo que os mil *frames*, assim, representam, aproximadamente, 17 segundos.

Além disso, foi realizado um estudo da variação dos resultados medidos em relação à escolha do contorno de probabilidade de ocorrência da chama. Pode-se observar que o comprimento visível de chama reduz praticamente de forma linear com o aumento da probabilidade escolhida (Figura 4.4b), com exceção dos casos de probabilidade muito alta e muito baixa, enquanto que o ângulo de inclinação apresenta uma variação não muito significativa, dentro de uma faixa de dois graus. Neste trabalho, foi utilizado o contorno que limita a probabilidade de 10% de ocorrência da chama, reproduzindo a definição de Majeski *et al.*, 2004.

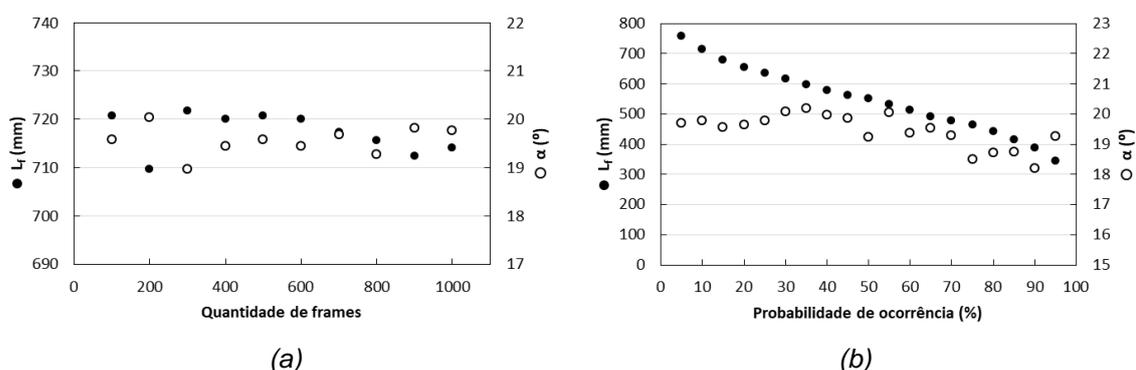


Figura 4.4 – (a) Resultados do estudo de dependência dos parâmetros medidos em função da quantidade de frames analisados. (b) Resultados do estudo da variação dos parâmetros em função da escolha do contorno de probabilidade de ocorrência da chama. Chama utilizada nos estudos: vazão de 40 lpm, 0% de diluição de  $\text{CO}_2$  e vento cruzado a 0,5 m/s.

#### 4.4 Medições de fluxo radiativo

Para a realização das medições de fluxo radiativo, como ilustrado na Figura 4.5, uma coluna de sete sensores igualmente espaçados por 250 mm foi posicionada em frente ao queimador e movida paralelamente ao plano da chama em passos de 60% do comprimento visível da chama medida. Estando a saída do queimador na origem de um sistema de coordenadas, a primeira posição da coluna de sensores ficou na origem de  $x$ , com o terceiro sensor, de baixo para cima, a 55 mm acima da origem de  $y$ . O procedimento foi realizado à distância  $r$  entre a chama e os sensores de  $1 L_f$  e de  $2 L_f$ .

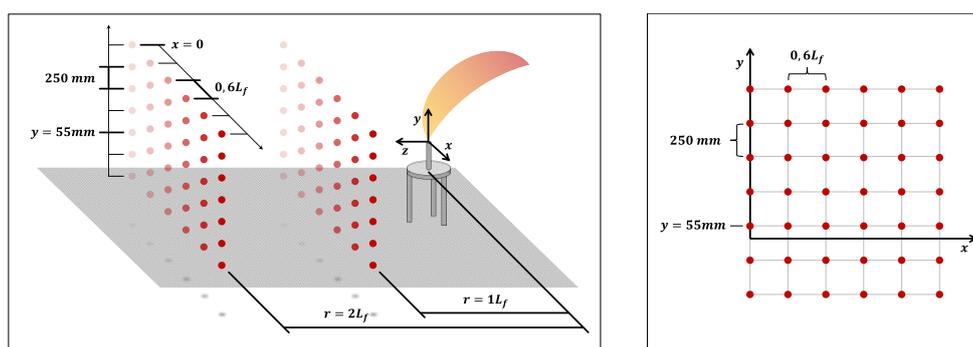


Figura 4.5 – Esquemas representando o posicionamento dos sensores durante as medições de fluxo de calor radiativo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos nas medições dos parâmetros geométricos das chamas como descrito na seção anterior. Será avaliado um modelo proposto na literatura para a estimativa do comprimento visível de chama com base nos parâmetros

variáveis da configuração da queima de combustível. Também, serão propostas correlações empíricas para o ângulo de inclinação, para o comprimento de levantamento e para o ângulo de inclinação do levantamento da chama. Além disso, serão apresentados os resultados obtidos nas medições de fluxo radiativo, seguido por uma normalização dos dados de todas as chamas testadas. Por fim, será feita uma avaliação da estimativa do fluxo radiativo emitido por uma chama com base nos modelos e correlações de todas as propriedades geométricas e radiativas discutidas no presente trabalho.

### 5.1 Comprimento de chama visível

A Figura 5.1a mostra a evolução do comprimento visível de chama,  $L_f$ , em relação aos parâmetros experimentais variados. Percebe-se o aumento do comprimento visível com o incremento da vazão volumétrica total de combustível,  $\dot{V}$ . Com o aumento da diluição de  $\text{CO}_2$  na mistura e com o aumento da velocidade do vento,  $U_\infty$ , contudo, percebe-se uma diminuição do comprimento visível das chamas, concordando com o que foi reportado por Wang *et al.*, 2015a. O incremento da diluição de gás carbônico provoca o aumento da massa específica da mistura e, portanto, o aumento de sua quantidade de movimento, o que poderia resultar no alongamento da chama. Apesar disso, o incremento da diluição representa uma menor quantidade de combustível sendo queimado, resultando no encurtamento da chama.

No estudo mencionado anteriormente, Majeski *et al.*, 2004, propõem, através de equações de balanço de massa na superfície cilíndrica assumida para a chama (Figura 1.2b), um modelo que relaciona o comprimento visível de chama com os parâmetros variáveis da configuração da queima de combustível em *crossflow*. Foi obtida, assim, a seguinte correlação:

$$\left(\frac{1}{C_f}\right)^{1/2} \frac{L_f}{U_\infty} = K_f (\rho_j V_j)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty} + K_U = K_f \psi_f + K_U, \quad (5.1)$$

onde  $C_f$  é a concentração mássica de combustível na mistura,  $\rho_j$  é a massa específica da mistura,  $V_j$  é a velocidade do jato de combustível,  $d_s$  é o diâmetro do queimador,  $K_f$  é uma constante característica das propriedades do combustível e  $K_U$  é uma constante de proporcionalidade entre o alongamento da chama e a velocidade do *crossflow*. Por fim,  $\psi_f$  é o chamado fator de forma da chama. O desenvolvimento do modelo até a obtenção desta correlação pode ser encontrado no Anexo I.

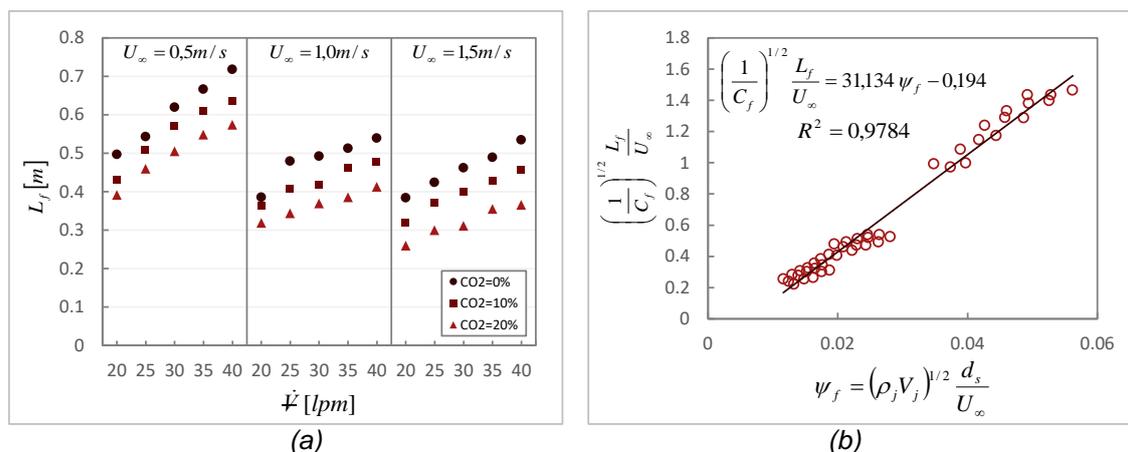


Figura 5.1 – (a) Variação do comprimento visível de chama em relação aos parâmetros variados nos experimentos. (b) Dados experimentais ajustados ao modelo proposto por Majeski *et al.*, 2004.

Os resultados normalizados apresentam uma boa concordância com o modelo baseado na metodologia proposta por Majeski *et al.*, 2004, como pode ser verificado na Figura 5.1b. É importante notar que os autores somente validaram o modelo para chamas de propano com

dióxido de carbono diluído (combustível e diluente com densidades próximas) e com baixas relações de momentos ( $0,006 \leq R \leq 4,6$ ), chamas do tipo *wake-stabilized*. A partir dos resultados obtidos, portanto, o presente estudo valida a metodologia de Majeski *et al.*, 2004, nas faixas de valores das propriedades físicas testadas, para chamas de gás natural com CO<sub>2</sub> (combustível e diluente com densidades distintas) e para maiores relações de momentos ( $14,4 \leq R \leq 673,7$ ), chamas do tipo *lifted*.

## 5.2 Ângulo de inclinação da chama

A Figura 5.2a mostra a variação do ângulo de inclinação da chama,  $\alpha$ , em relação aos parâmetros variados no experimento. Com o aumento da vazão de combustível, mais prevalente é o momento do jato em relação ao momento do *crossflow*, diminuindo, assim, a inclinação da chama. O oposto acontece com o aumento da velocidade do vento cruzado, tornando a chama mais inclinada. Apesar de ter sido observada uma pequena influência da diluição de CO<sub>2</sub> na inclinação da chama, pode-se identificar uma redução do ângulo com o aumento da diluição do gás inerte na mistura. Este efeito pode ser explicado pelo aumento da massa específica da mistura devido à adição de CO<sub>2</sub>, conseqüentemente aumentando sua quantidade de movimento e diminuindo a inclinação da chama.

O fator de forma,  $\psi_f$ , mostrou-se, também, bastante representativo na normalização dos resultados do ângulo de inclinação da chama, como pode ser observado na Figura 5.2b. A correlação logarítmica proposta respeita o fato de que, aumentando o fator de forma, menos inclinada estará a chama, tendendo à posição vertical e, portanto,  $\alpha$  tende a zero. É importante, contudo, realizar experimentos em chamas com valores de fator de forma mais elevados a fim de validar esta proposta.

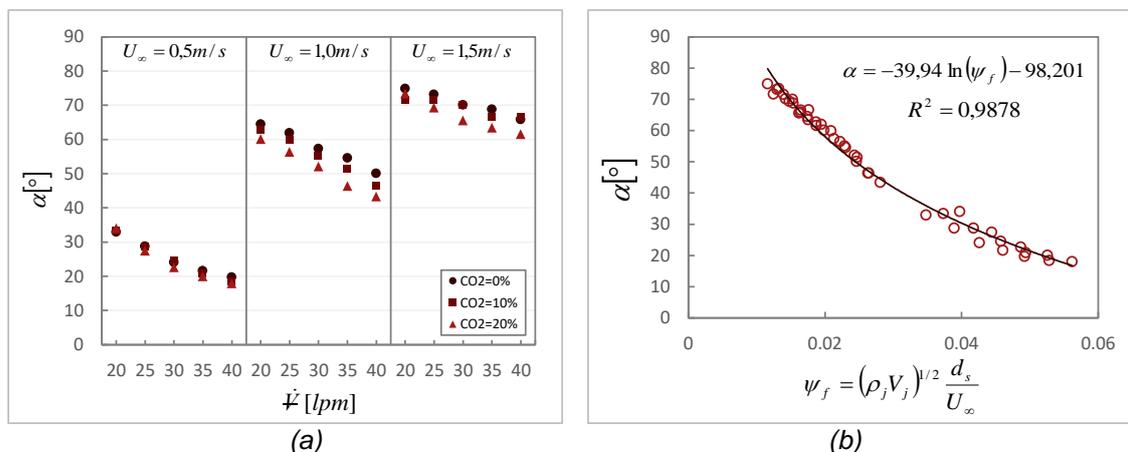


Figura 5.2 – (a) Variação do ângulo de inclinação da chama em relação aos parâmetros variados nos experimentos. (b) Correlação proposta entre o ângulo de inclinação e o fator de forma.

## 5.3 Levantamento da chama

Pode-se observar que o comprimento de levantamento da chama,  $L_L$ , também possui uma correlação direta com o fator de forma (Figura 5.3a). O ângulo de inclinação do levantamento,  $\beta$ , contudo, teve os dados experimentais melhor ajustados em função da relação de momentos dos escoamentos,  $R$  (Figura 5.3b). A variação de  $L_L$  e de  $\beta$  em função dos parâmetros variados no experimento pode ser encontrada no Apêndice I.

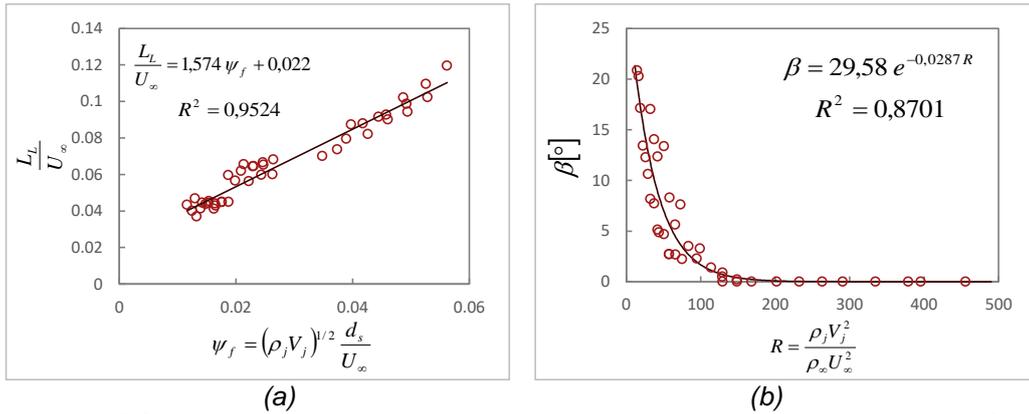


Figura 5.3 – (a) Correlação proposta entre o comprimento de levantamento e o fator de forma. (b) Correlação proposta entre o ângulo de inclinação do levantamento e a relação de momentos dos escoamentos.

#### 5.4 Fluxo radiativo e fração radiativa

A Figura 5.4a apresenta o resultado das medições de fluxo radiativo da chama indicada. Fica evidente a diferença de intensidade do fluxo observado pelos sensores entre as medições a  $1 L_f$  e a  $2 L_f$  de distância da chama.

Os dados de fluxo radiativo medidos de cada chama foram normalizados em função do fluxo máximo medido,  $q''_{máx}$ , da posição do sensor responsável por tal medição,  $x_{máx}$  e  $y_{máx}$ , e da distância entre a medição e a chama,  $r$ . Os dados de todas chamas foram, então, agrupados e uma superfície gaussiana foi ajustada, dada por

$$\frac{q''}{q''_{máx}} = 0,8722 e^{-\left[\frac{(\xi_x + 0,0759)^2}{1,25} + \frac{(\xi_y - 0,0599)^2}{1,11}\right]} + 0,0775. \quad (5.2)$$

O resultado do ajuste é exibido na Figura 5.4b. No detalhe, está apresentada a regressão linear do ajuste para melhor visualização da dispersão.

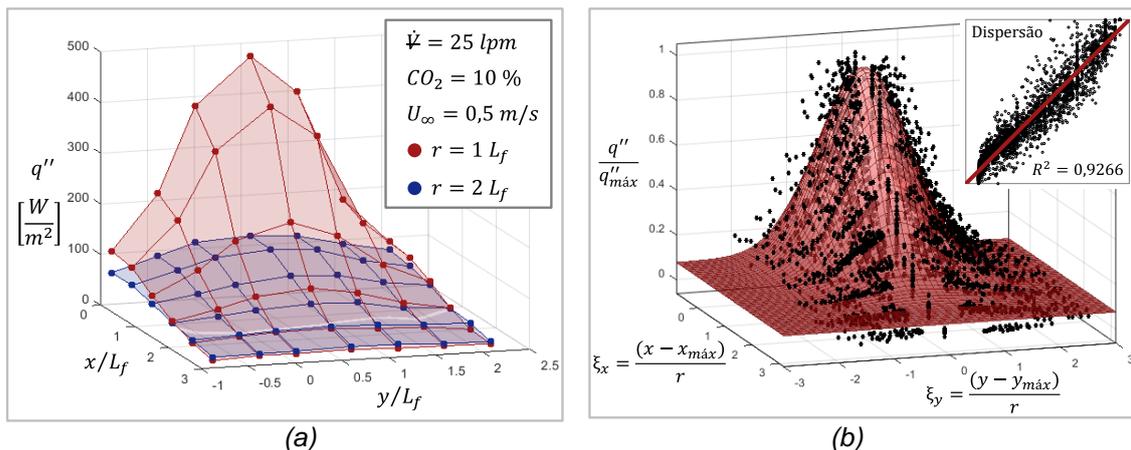


Figura 5.4 – (a) Resultados das medições de fluxo radiativo emitido pela chama indicada, com os eixos  $x$  e  $y$  normalizados. (b) Superfície gaussiana ajustada aos dados de fluxo radiativo normalizados.

A fim de estimar o fluxo radiativo emitido por uma chama através desta curva, é necessária uma estimativa do fluxo radiativo máximo,  $q''_{máx}$ , e de sua posição,  $x_{máx}$  e  $y_{máx}$ . Sendo assim, foi realizado um estudo do comportamento de  $q''_{máx}$  em relação aos parâmetros variados. A fração radiativa foi calculada a partir da Equação 3.3, utilizando a posição e a medição do sensor que registrou o fluxo máximo para cada chama. A Figura II.1 do Apêndice II apresenta a

variação do fluxo máximo e da fração radiativa. Observa-se que há um aumento na intensidade de ambos devido à elevação da velocidade do *crossflow*. Isso pode ser explicado pela intensificação da combustão recorrente de uma vazão de ar mais elevada entrando na chama. A Figura 5.5 apresenta as correlações propostas para  $q''_{máx}$  e para  $X_R$ . A análise de incertezas das medições de fluxo radiativo pode ser verificada no Apêndice III.

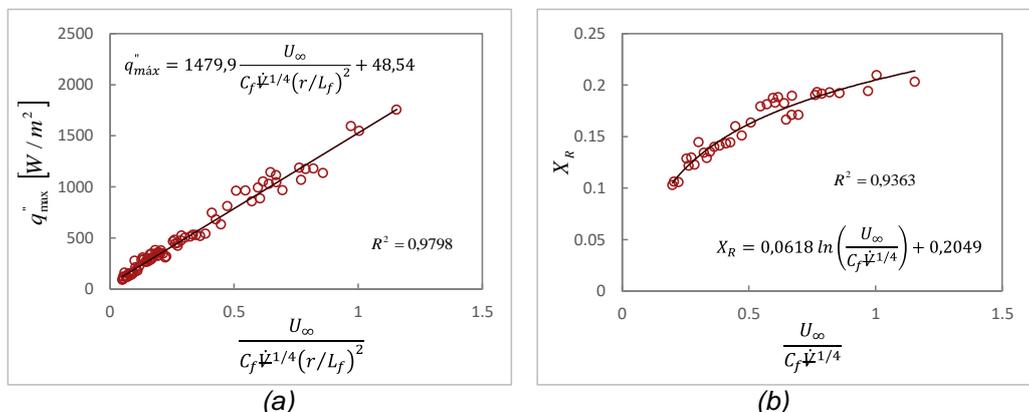


Figura 5.5 – (a) Correlação empírica proposta para o fluxo radiativo máximo. (b) Correlação empírica proposta para a fração radiativa.

Foi realizado, também, um estudo sobre a posição do fluxo radiativo máximo, baseado na suposição de que o mesmo se encontra em um determinado local sobre a trajetória reta da chama, como mostra a Figura 5.6a, sendo a distância entre a base da chama e a posição de  $q''_{máx}$  representada por  $\delta$ . Variando  $\delta$  de 0 a 100% de  $L_f$ , foram estimados os valores de fluxo radiativo através do modelo descrito pela Equação 5.2 e, então, estes foram comparados com os dados experimentais, gerando um erro médio quadrático normalizado, *NMSE*, para cada valor de  $\delta$ . Sendo assim, para cada chama, foi determinada a posição de  $q''_{máx}$  onde o menor *NMSE* foi obtido.

A Figura 5.6b apresenta um exemplo da análise realizada para a chama indicada, tendo como resultado o  $q''_{máx}$  localizado a 44% de  $L_f$  desde a base da chama, com um erro normalizado de 1,25%. Por fim, foi identificada uma correlação entre os valores obtidos de  $\delta/L_f$  de todas as chamas em relação aos parâmetros variados nos experimentos, apresentada na Figura 5.6c.

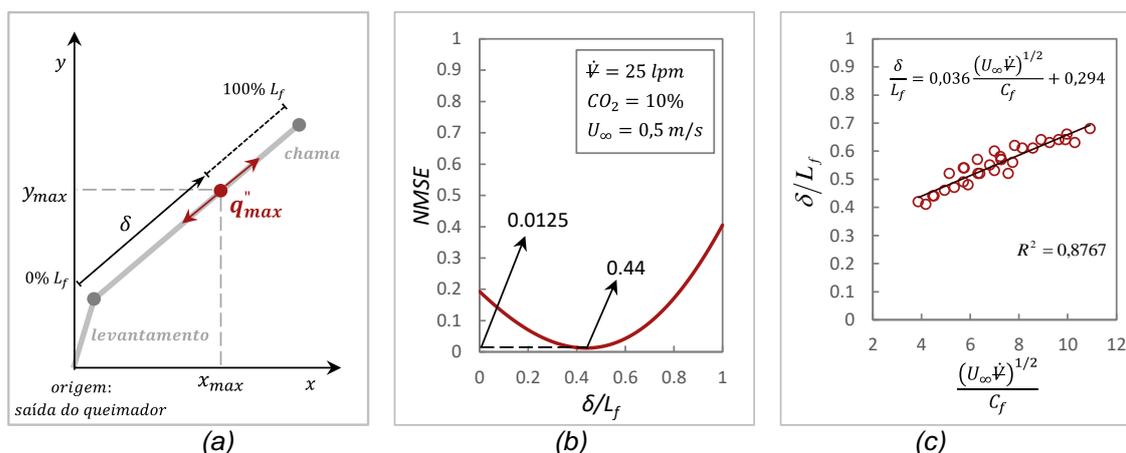


Figura 5.6 – (a) Esquema representando a posição relativa do fluxo radiativo máximo. (b) Análise do erro normalizado em função da posição relativa de  $q''_{máx}$  para a chama indicada. (c) Correlação empírica proposta para a posição relativa de  $q''_{máx}$ .

A fim de avaliar as correlações propostas, para cada chama, foi analisado o erro médio quadrático normalizado, *NMSE*, dos resultados experimentais em relação ao fluxo radiativo

estimado a partir dos modelos de propriedades geométricas e radiativas. Foi obtido, assim, um *NMSE* geral de todas chamas testadas de 11,6%, com um desvio padrão de 8,6%. Os resultados detalhados de todos experimentos podem ser verificados no Apêndice IV.

## 6. CONCLUSÕES

Através dos experimentos realizados, foi possível propor correlações com o objetivo de estimar as propriedades geométricas e radiativas de chamas difusivas de gás natural diluídas com gás carbônico e com a interação de um escoamento transversal de ar. Nos testes, foram utilizadas vazões de mistura de combustível e gás inerte entre 20 e 40 lpm, diluições de CO<sub>2</sub> de 0, 10 e 20% e velocidades do *crossflow* de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.

A metodologia proposta por Majeski *et al.*, 2004, para a estimativa do comprimento visível de chama foi validada para chamas de gás natural com diluição de CO<sub>2</sub>, em função dos resultados satisfatórios obtidos nos experimentos. As correlações empíricas propostas para a estimativa do ângulo de inclinação da chama, do levantamento e da inclinação do levantamento também apresentaram uma boa representatividade.

A partir das medições experimentais, foi proposto um modelo para a estimativa do fluxo de calor radiativo emitido pela chama em um plano distante paralelo ao plano da chama. A distribuição da intensidade do fluxo radiativo neste plano é representada por uma curva gaussiana. Complementando o modelo, foram apresentadas correlações para a estimativa da intensidade e posição do fluxo radiativo máximo emitido em relação às propriedades da chama. O modelo, por fim, foi avaliado e apresentou resultados satisfatórios, com um erro médio geral de 11,6%. Utilizando estes dados experimentais, também foi calculada a fração radiativa das chamas e uma correlação foi proposta para sua estimativa.

Propõe-se, para trabalhos futuros, a exploração das faixas de valores das propriedades físicas envolvidas no problema. Assim, também pode ser possível averiguar os limites de estabilidade para este tipo de chama. Além disso, é interessante investigar a validade dos modelos para outros gases combustíveis e inertes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brzustowski, T. A.; Sommer, E. C. Jr.; **“Predicting Radiant Heating from Flares”**, Proceedings – Division of Refining, vol. 53, pp. 865-893, 1973.

Brzustowski, T. A.; Gollahalli, S. R.; Sullivan, H. F.; **“The Turbulent Hydrogen Diffusion Flame in a Cross-wind”**, Combustion Science and Technology, vol. 11, pp. 29-33, 1975.

Brzustowski, T. A.; **“Flaring in the Energy Industry”**, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 2, pp. 129-141, 1976.

Brzustowski, T. A.; **“Hydrocarbon Turbulent Diffusion Flame in Subsonic Cross Flow”**, 15<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, pp. 407-430, 1977.

Coelho, P.; Costa, M.; **“Combustão”**, Edições Orion, 1<sup>a</sup> edição, 2007.

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, <http://www.gasnet.com.br/>. Acesso em 20/09/2017.

Huang, R. F.; Chang, J. M.; **“The Stability and Visualized Flame and Flow Structures of a Combusting Jet in Cross Flow”**, Combustion and Flame, vol. 98, pp. 267-278, 1994.

Huang, R. F.; Wang, S. M.; **“Characteristic Flow Modes of Wake-Stabilized Jet Flames in a Transverse Air Stream”**, Combustion and Flame, vol. 117, pp. 59-77, 1999.

Johnson, M. R.; Kostiuk, L. W.; **“Effects of a Fuel Diluent on the Efficiencies of Jet Diffusion Flames in a Crosswind”**, Spring Technical Meeting, 1999.

Kalghatgi, G. T.; **“Blow-Out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames Part II: Effect of Cross Wind”**, Combustion Science and Technology, vol. 26, pp. 241-244, 1981.

Kalghatgi, G. T.; **“The Visible Shape and Size of a Turbulent Hydrocarbon Jet Diffusion Flame in a Cross-wind”**, Combustion and Flame, vol. 52, pp. 91-106, 1983.

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.

Kostiuk, L. W.; Majeski, A. J.; Poudenx, P.; Johnson, M. R.; Wilson, D. J.; **“Scaling of Wake-Stabilized Jet Diffusion Flames in a Transverse Air Stream”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 28, pp. 553-559, 2000.

Majeski, A. J.; Wilson, D. J.; Kostiuk, L. W.; **“Predicting the Length of Low-Momentum Jet Diffusion Flames in Crossflow”**, Combustion Science and Technology, vol. 176, pp. 2001-2025, 2004.

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

Otsu, N.; **“A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”**, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-9, no. 1, pp. 62-66, 1979.

Petrobras; **“Pré-Sal: Produção de Petróleo e Gás Natural”**, <http://www.petrobras.com.br/>. Acesso em 20/09/2017.

Pratte, B. D.; Baines, W. D.; **“Profiles of the Round Turbulent Jet in a Cross Flow”**, Journal of the Hydraulics Division, vol. 93, pp 53-64, 1967.

Quezada, L. A.; **“Estudo experimental de estabilidade e emissão de radiação térmica em chamas não pré-misturadas de gás natural diluídas com dióxido de carbono”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Turns, S. R.; **“An Introduction to Combustion”**, McGraw-Hill Higher Education, 2<sup>nd</sup> edition, 2000.

Wang, Q.; Hu, L.; Zhang, X.; Zhang, X.; Lu, S.; Ding, H.; **“Turbulent jet diffusion flame length evolution with cross flows in a sub-pressure atmosphere”**, Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 703-708, 2015a.

Wang, Q.; Hu, L.; Yoon, S. H.; Lu, S.; Delichatsios, M.; Chung, S. H.; **“Blow-out limits of nonpremixed turbulent jet flames in a cross flow at atmospheric and sub-atmospheric pressures”**, Combustion and Flame, vol. 162, pp. 3562-3568, 2015b.

Wang, J.; Fang, J.; Lin, S.; Guan, J.; Zhang, Y.; Wang, J.; **“Tilt angle of turbulent jet diffusion flame in crossflow and a global correlation with momentum flux ratio”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 36, pp. 2979-2986, 2016.

## APÊNDICE I

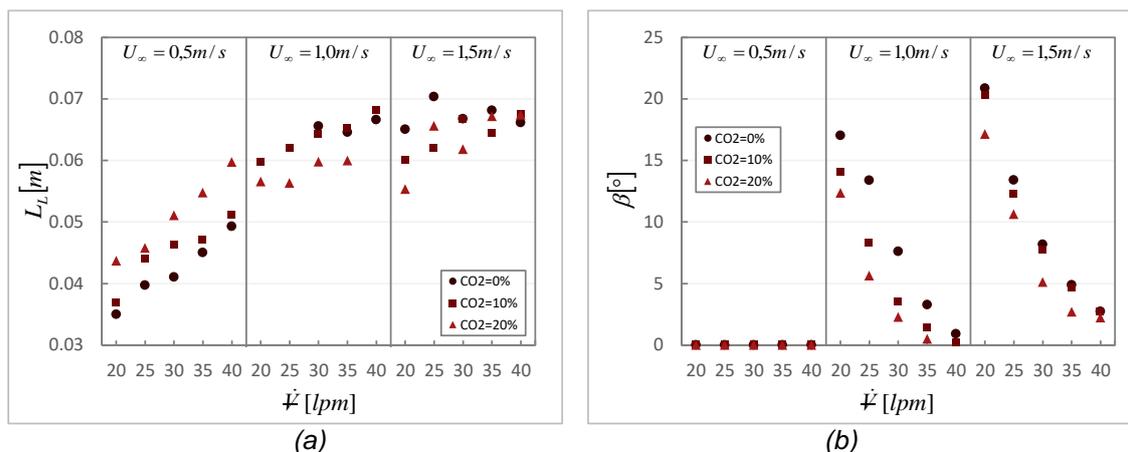


Figura I.1 – (a) Variação do comprimento de levantamento da chama em relação aos parâmetros variados nos experimentos. (b) Variação da inclinação do levantamento em relação aos parâmetros variados nos experimentos.

## APÊNDICE II

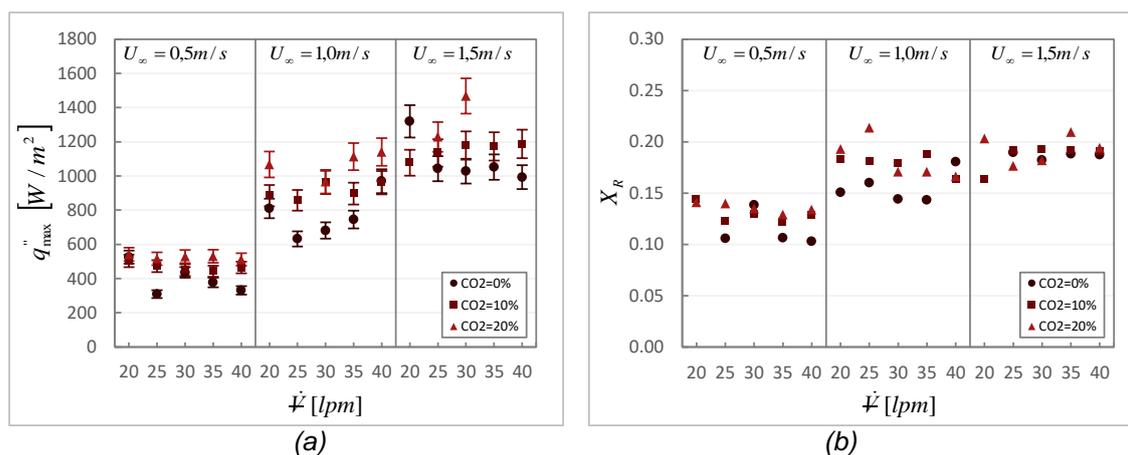


Figura II.1 – (a) Variação do fluxo de calor radiativo máximo em relação aos parâmetros variados nos experimentos. (b) Variação da fração radiativa em relação aos parâmetros variados nos experimentos.

## APÊNDICE III

A incerteza de cada medição de fluxo radiativo é expressa pela Equação III.1, de acordo com o método de Moffat, 1988:

$$\delta_{q''} = a \left\{ G \left[ \left( \frac{S(x_i)}{\sqrt{N}} \right)^2 + (A\bar{x}_i + B\bar{x}_i)^2 + (C\bar{x}_i + D\bar{x}_i)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (\text{III.1})$$

onde  $S(x_i)$  é o desvio padrão da amostra de medições  $x_i$ ,  $N$  é o tamanho da amostra,  $\bar{x}_i$  é o valor médio da amostra de medições  $x_i$ ,  $A$  é a incerteza característica do sensor (3% do sinal),  $B$  é a repetibilidade do sensor (0,5% do sinal),  $C$  é a incerteza da aquisição dos dados (0,005% do sinal),  $D$  é a incerteza da escala de medição (0,004% do sinal) e  $G$  é o fator de calibração do sensor em  $\text{Wm}^{-2}/\text{mV}$ . Os valores de  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $G$  foram obtidos a partir das especificações dos

fabricantes dos sensores e do *datalogger*. Dada a distribuição normal dos dados experimentais, foi utilizada uma confiabilidade de 95%, portanto  $\alpha = 2$ .

## APÊNDICE IV

Tabela IV.1 – Parâmetros e resultados das chammas

Teste	$U_{\infty}$ [m/s]	$CO_2$ [%]	$V$ [lpm]	$R$	$\psi_f$	$Q_F$ [kW]	$L_f$ [mm]			$\alpha$ [°]			$L_L$ [mm]		
							exp	est	erro	exp	est	erro	exp	est	erro
1	0.5	0	20	129.2	0.035	11.4	496.1	445.2	11.4%	32.9	35.9	8.4%	35.0	38.4	8.9%
2	0.5	0	25	201.9	0.039	14.2	542.7	509.2	6.6%	28.7	31.4	8.7%	39.7	41.6	4.6%
3	0.5	0	30	290.8	0.043	17.1	618.9	567.0	9.1%	24.0	27.8	13.6%	41.1	44.6	7.9%
4	0.5	0	35	395.8	0.046	19.9	666.2	620.2	7.4%	21.6	24.7	12.7%	45.0	47.2	4.7%
5	0.5	0	40	517.0	0.049	22.8	717.4	669.7	7.1%	19.7	22.1	10.8%	49.3	49.7	0.9%
6	0.5	10	20	148.8	0.037	10.2	429.6	428.6	0.2%	33.4	33.1	0.8%	36.9	40.4	8.7%
7	0.5	10	25	232.6	0.042	12.8	506.7	489.3	3.6%	28.7	28.6	0.2%	44.0	43.9	0.2%
8	0.5	10	30	334.9	0.046	15.4	569.3	544.2	4.6%	24.5	25.0	1.9%	46.3	47.0	1.5%
9	0.5	10	35	455.8	0.049	17.9	610.4	594.6	2.6%	20.8	21.9	5.0%	47.1	49.9	5.5%
10	0.5	10	40	595.4	0.053	20.5	634.2	641.6	1.2%	18.3	19.2	4.7%	51.1	52.6	2.8%
11	0.5	20	20	168.4	0.040	9.1	390.7	409.0	4.5%	34.0	30.6	11.2%	43.7	42.3	3.3%
12	0.5	20	25	263.2	0.044	11.4	459.5	466.2	1.4%	27.4	26.2	4.9%	45.8	46.0	0.4%
13	0.5	20	30	379.0	0.049	13.7	504.4	517.9	2.6%	22.7	22.5	0.6%	51.1	49.3	3.6%
14	0.5	20	35	515.8	0.053	15.9	547.5	565.5	3.2%	20.0	19.4	2.9%	54.8	52.4	4.6%
15	0.5	20	40	673.7	0.056	18.2	573.9	609.7	5.9%	17.9	16.8	6.9%	59.7	55.2	8.2%
16	1.0	0	20	32.3	0.017	11.4	384.7	348.5	10.4%	64.5	63.6	1.4%	68.3	49.4	38.2%
17	1.0	0	25	50.5	0.019	14.2	479.3	412.4	16.2%	61.9	59.1	4.7%	71.7	52.6	36.2%
18	1.0	0	30	72.7	0.021	17.1	492.2	470.3	4.7%	57.3	55.5	3.3%	65.6	55.6	18.0%
19	1.0	0	35	99.0	0.023	19.9	512.2	523.5	2.2%	54.5	52.4	4.0%	64.6	58.2	10.9%
20	1.0	0	40	129.2	0.025	22.8	538.5	573.0	6.0%	50.1	49.7	0.6%	66.6	60.7	9.6%
21	1.0	10	20	37.2	0.019	10.2	363.6	343.1	6.0%	62.6	60.8	3.1%	59.7	51.4	16.1%
22	1.0	10	25	58.1	0.021	12.8	406.5	403.8	0.7%	59.8	56.3	6.2%	62.0	54.9	12.9%
23	1.0	10	30	83.7	0.023	15.4	416.5	458.7	9.2%	55.1	52.7	4.5%	64.3	58.0	10.9%
24	1.0	10	35	114.0	0.025	17.9	460.5	509.1	9.6%	51.4	49.6	3.7%	65.3	60.9	7.2%
25	1.0	10	40	148.8	0.026	20.5	475.9	556.1	14.4%	46.3	46.9	1.3%	68.2	63.6	7.2%
26	1.0	20	20	42.1	0.020	9.1	318.1	333.1	4.5%	60.1	58.3	3.1%	56.6	53.3	6.2%
27	1.0	20	25	65.8	0.022	11.4	343.1	390.4	12.1%	56.4	53.8	4.7%	56.3	57.0	1.1%
28	1.0	20	30	94.7	0.024	13.7	369.5	442.1	16.4%	52.1	50.2	3.7%	59.8	60.3	0.9%
29	1.0	20	35	129.0	0.026	15.9	385.0	489.7	21.4%	46.4	47.1	1.6%	60.0	63.4	5.3%
30	1.0	20	40	168.4	0.028	18.2	412.3	533.9	22.8%	43.3	44.5	2.6%	-	66.2	-
31	1.5	0	20	14.4	0.012	11.4	383.3	251.7	52.3%	74.9	79.8	6.2%	65.1	60.4	7.7%
32	1.5	0	25	22.4	0.013	14.2	423.9	315.7	34.3%	73.2	75.3	2.9%	70.3	63.6	10.5%
33	1.5	0	30	32.3	0.014	17.1	461.8	373.5	23.6%	70.1	71.7	2.2%	66.7	66.6	0.3%
34	1.5	0	35	44.0	0.015	19.9	488.9	426.7	14.6%	68.8	68.6	0.2%	68.1	69.2	1.6%
35	1.5	0	40	57.4	0.016	22.8	533.9	476.2	12.1%	65.8	65.9	0.2%	66.1	71.7	7.8%
36	1.5	10	20	16.5	0.012	10.2	317.6	257.6	23.3%	71.6	77.0	6.9%	60.0	62.4	3.8%
37	1.5	10	25	25.8	0.014	12.8	369.1	318.3	16.0%	71.5	72.5	1.4%	61.9	65.9	6.0%
38	1.5	10	30	37.2	0.015	15.4	400.0	373.1	7.2%	69.9	68.9	1.6%	66.7	69.0	3.4%
39	1.5	10	35	50.6	0.016	17.9	426.8	423.6	0.7%	66.5	65.8	1.1%	64.4	71.9	10.4%
40	1.5	10	40	66.2	0.018	20.5	456.2	470.5	3.0%	66.6	63.1	5.5%	67.4	74.6	9.6%
41	1.5	20	20	18.7	0.013	9.1	259.4	257.3	0.8%	73.4	74.5	1.5%	55.4	64.3	13.9%
42	1.5	20	25	29.2	0.015	11.4	299.3	314.6	4.9%	69.3	70.0	1.0%	65.6	68.0	3.5%
43	1.5	20	30	42.1	0.016	13.7	310.7	366.3	15.2%	65.6	66.4	1.3%	61.8	71.3	13.3%
44	1.5	20	35	57.3	0.018	15.9	354.6	413.9	14.3%	63.4	63.3	0.2%	67.2	74.4	9.7%
45	1.5	20	40	74.9	0.019	18.2	365.6	458.1	20.2%	61.5	60.7	1.4%	67.4	77.2	12.7%

exp - dado experimental / est - valor estimado pelo modelo

Tabela IV.1 – Parâmetros e resultados das chamas (continuação)

Teste	$U_{\infty}$ [m/s]	$CO_2$ [%]	$V$ [ppm]	$\beta$ [°]			$q''_{max}$ [W/m <sup>2</sup> ]			$X_R$			$\delta/L_f$	NMSE
				exp	est	erro	exp	est	erro	exp	est	erro		
1	0.5	0	20	0	0	0.0%	525.2	398.4	31.8%	0.142	0.116	22.7%	0.41	18.4%
2	0.5	0	25	0	0	0.0%	308.8	379.5	18.6%	0.109	0.112	2.8%	0.42	38.8%
3	0.5	0	30	0	0	0.0%	436.0	364.7	19.5%	0.144	0.110	31.4%	0.43	7.1%
4	0.5	0	35	0	0	0.0%	376.4	352.8	6.7%	0.109	0.107	1.6%	0.44	2.5%
5	0.5	0	40	0	0	0.0%	331.1	342.8	3.4%	0.097	0.105	7.9%	0.45	2.2%
6	0.5	10	20	0	0	0.0%	503.1	496.3	1.4%	0.142	0.131	8.6%	0.44	4.7%
7	0.5	10	25	0	0	0.0%	473.0	472.0	0.2%	0.126	0.128	1.2%	0.46	1.3%
8	0.5	10	30	0	0	0.0%	449.5	453.1	0.8%	0.131	0.125	5.0%	0.47	1.8%
9	0.5	10	35	0	0	0.0%	442.9	437.8	1.2%	0.126	0.122	2.9%	0.49	1.7%
10	0.5	10	40	0	0	0.0%	464.9	425.0	9.4%	0.127	0.120	5.9%	0.50	3.4%
11	0.5	20	20	0	0	0.0%	541.4	618.5	12.5%	0.141	0.146	3.4%	0.48	1.9%
12	0.5	20	25	0	0	0.0%	516.6	587.6	12.1%	0.143	0.142	0.1%	0.50	3.3%
13	0.5	20	30	0	0	0.0%	528.7	563.6	6.2%	0.135	0.140	3.3%	0.52	2.6%
14	0.5	20	35	0	0	0.0%	530.7	544.1	2.5%	0.135	0.137	1.4%	0.54	1.5%
15	0.5	20	40	0	0	0.0%	512.1	527.8	3.0%	0.137	0.135	1.7%	0.56	1.7%
16	1.0	0	20	17.0	11.7	45.6%	810.3	748.3	8.3%	0.146	0.159	8.0%	0.45	9.4%
17	1.0	0	25	13.4	6.9	92.5%	632.3	710.4	11.0%	0.138	0.155	11.3%	0.47	6.0%
18	1.0	0	30	7.6	3.7	107.3%	680.9	680.9	0.0%	0.136	0.152	10.9%	0.49	6.6%
19	1.0	0	35	3.3	1.7	89.2%	745.5	657.0	13.5%	0.136	0.150	9.5%	0.51	11.3%
20	1.0	0	40	0.9	0.7	25.0%	970.1	637.0	52.3%	0.200	0.148	35.4%	0.52	42.0%
21	1.0	10	20	14.0	10.2	38.1%	885.0	944.0	6.2%	0.154	0.174	11.5%	0.50	9.3%
22	1.0	10	25	8.3	5.6	48.9%	857.5	895.4	4.2%	0.152	0.170	10.9%	0.52	10.8%
23	1.0	10	30	3.5	2.7	31.5%	962.7	857.7	12.2%	0.153	0.168	8.4%	0.55	17.9%
24	1.0	10	35	1.4	1.1	23.3%	897.4	827.1	8.5%	0.195	0.165	17.9%	0.57	17.0%
25	1.0	10	40	0.2	0.4	46.4%	960.9	801.5	19.9%	0.189	0.163	15.7%	0.59	20.9%
26	1.0	20	20	12.4	8.8	39.9%	1067.4	1188.5	10.2%	0.203	0.189	7.5%	0.56	7.3%
27	1.0	20	25	5.6	4.5	25.8%	1353.4	1126.7	20.1%	0.216	0.185	16.6%	0.59	18.8%
28	1.0	20	30	2.3	2.0	16.4%	966.7	1078.6	10.4%	0.197	0.183	7.7%	0.62	10.2%
29	1.0	20	35	0.5	0.7	31.2%	1113.8	1039.7	7.1%	0.198	0.180	9.9%	0.64	12.7%
30	1.0	20	40	-	0.2	-	1141.3	1007.1	13.3%	0.191	0.178	7.4%	0.66	11.9%
31	1.5	0	20	20.9	19.6	6.5%	1319.7	1098.2	20.2%	-	0.184	-	0.49	16.1%
32	1.5	0	25	13.4	15.5	13.7%	1043.2	1041.3	0.2%	0.212	0.180	17.6%	0.51	10.0%
33	1.5	0	30	8.2	11.7	30.3%	1027.9	997.1	3.1%	0.207	0.177	16.4%	0.54	11.3%
34	1.5	0	35	4.9	8.4	41.8%	1052.5	961.2	9.5%	0.203	0.175	16.0%	0.55	14.5%
35	1.5	0	40	2.7	5.7	51.9%	992.7	931.2	6.6%	0.205	0.173	18.4%	0.57	11.7%
36	1.5	10	20	20.3	18.4	10.1%	1077.0	1391.7	22.6%	0.200	0.199	0.5%	0.55	14.2%
37	1.5	10	25	12.3	14.1	13.0%	1135.2	1318.8	13.9%	0.215	0.195	10.0%	0.58	10.8%
38	1.5	10	30	7.7	10.2	24.1%	1178.5	1262.2	6.6%	0.214	0.193	11.0%	0.60	8.7%
39	1.5	10	35	4.7	6.9	32.2%	1172.5	1216.3	3.6%	0.214	0.190	12.6%	0.63	8.9%
40	1.5	10	40	2.7	4.4	39.4%	1187.2	1178.0	0.8%	0.208	0.188	10.7%	0.65	10.8%
41	1.5	20	20	17.1	17.3	0.8%	1754.4	1758.5	0.2%	0.219	0.214	2.6%	0.62	14.9%
42	1.5	20	25	10.6	12.8	16.8%	1228.7	1665.7	26.2%	0.210	0.210	0.1%	0.65	19.9%
43	1.5	20	30	5.1	8.8	41.9%	1467.7	1593.7	7.9%	0.223	0.208	7.2%	0.69	15.6%
44	1.5	20	35	2.7	5.7	52.8%	1545.4	1535.3	0.7%	0.173	0.205	15.8%	0.72	14.3%
45	1.5	20	40	2.2	3.5	35.2%	1593.0	1486.4	7.2%	0.170	0.203	16.1%	0.75	19.4%

exp - dado experimental / est - valor estimado pelo modelo

## ANEXO I

Nesta seção, será apresentado o desenvolvimento da metodologia proposta por Majeski *et al.*, 2004. No modelo, o tamanho da chama foi definido pelo tempo necessário para que a quantidade estequiométrica de oxigênio difunda e reaja com o combustível. Mais tarde, são adicionados os efeitos do alongamento da chama devido ao *crossflow* e da diluição de gás inerte.

A chama é modelada como a superfície de um cilindro, assim representada na Figura 1.2b, com comprimento  $L_f$  e diâmetro  $d_f$  e sem queima nas extremidades circulares. Na fina

camada cilíndrica, existe uma mistura estequiométrica, com combustível na parte interna e oxidante na parte externa. É assumido, também, que o formato do cilindro, o qual será uma função das condições do escoamento, permanece geometricamente similar, isto é,  $d_f$  varia proporcionalmente com  $L_f$ . Sendo assim,  $d_f = K_G L_f$ , onde  $K_G$  é o parâmetro do formato geométrico que depende das condições do escoamento, e, portanto, pode-se expressar a área da superfície da chama,  $A_f$ , em função de  $L_f$  somente,

$$A_f = \pi d_f L_f = \pi K_G L_f^2. \quad (1.1)$$

A modelagem da superfície da chama visível pode ser abordada considerando o problema análogo de jato frio. É considerado que o combustível está em sua concentração máxima na linha central do cilindro e o oxidante está em sua concentração máxima distante da chama. Por simplicidade, o formato da chama é definido como a superfície onde a quantidade exata de oxigênio difundiu no combustível, criando uma mistura estequiométrica. Através desta hipótese, o fator limitante da combustão é a taxa na qual o ar chega na superfície da chama. Esta abordagem simplifica a análise, pois, assim, o combustível somente é considerado em termos de sua necessidade estequiométrica de ar e de sua vazão mássica, descrita por sua massa específica,  $\rho_j$ , e sua velocidade,  $V_j$ , na saída do queimador de diâmetro  $d_s$ . Para uma chama em estado permanente, o parâmetro  $\dot{m}_{O_2}''$  é introduzido, representando a taxa mássica média de oxigênio fornecida por unidade de área da superfície da chama. O fornecimento total de oxigênio para a chama é  $\dot{m}_{O_2} = \int_{A_f} \dot{m}_{O_2}'' dA$ . Já que a quantidade necessária de oxigênio é diretamente proporcional ao tipo de combustível e a sua taxa de fornecimento, um balanço da taxa mássica fornecida de oxigênio na superfície da chama resulta em

$$\int_{A_f} \dot{m}_{O_2}'' dA = (\pi/4) K_S \rho_j V_j d_s^2, \quad (1.2)$$

onde o lado esquerdo é a taxa total de oxigênio consumido na superfície da chama e o lado direito é a taxa total de oxigênio necessária baseada na taxa de fornecimento de combustível. O parâmetro  $K_S$  é a razão estequiométrica da massa de oxigênio para combustível,

$$K_S \equiv \frac{\dot{m}_{O_2}''}{\dot{m}_f}, \quad (1.3)$$

onde  $\dot{m}_f$  é a taxa mássica de fornecimento de combustível no queimador.

É assumido que  $\dot{m}_{O_2}''$  é um valor médio e constante em toda superfície da chama, portanto  $\int_{A_f} \dot{m}_{O_2}'' dA = \dot{m}_{O_2}'' \pi K_G L_f^2$ . Isto é consistente ao considerar que o fator limitante de  $\dot{m}_{O_2}''$  é a difusão molecular e não o transporte turbulento.

A Equação 1.2 pode ser rearranjada em função do comprimento de chama,

$$L_f = K_f (\rho_j V_j)^{1/2} d_s, \quad (1.4)$$

onde

$$K_f^2 = \frac{K_S}{4K_G \dot{m}_{O_2}''} \quad [m^2 s/kg] \quad (1.5)$$

combina todas constantes de um determinado combustível em um parâmetro.

Nesta análise de balanço de massa, é assumido, também, que todo combustível é consumido pela chama.

Até este ponto, o modelo não considera a quantidade de movimento intrínscica ao *crossflow* que causa a inclinação e o alongamento da chama na direção do escoamento e que afeta o comprimento de chama. Este alongamento ocorre, pois o escoamento de ar transversal transporta os processos de combustão durante o tempo necessário para o combustível queimar. Além disso, o alongamento da chama é acompanhado por uma diminuição em seu diâmetro. O fluxo mássico médio de oxigênio na superfície da chama,  $\dot{m}_{O_2}''$ , é definido pela difusão, portanto não é afetado pelo *crossflow*.

Foi definido anteriormente que, para certa taxa de fornecimento de combustível, a área da chama deve permanecer constante. Lembrando que o fluxo de oxigênio na superfície da chama é constante, uma quantidade de tempo fixa,  $\tau_M$ , é necessária para que oxigênio

suficiente difunda e reaja com todo o combustível. No momento em que uma quantidade suficiente de ar difundiu no jato de combustível para incliná-lo, o que ocorre logo após ele sair do queimador, pode-se assumir que o combustível move-se na velocidade do *crossflow*,  $U_\infty$ . Isto pode ser considerado, pois há uma mistura estequiométrica na superfície da chama e a razão mássica de ar para propano é de 15,6 para 1, portanto a combinação dos momentos resulta na chama movendo-se a uma velocidade aproximada à do *crossflow*. Para ar e gás natural, isto também é válido, pois a razão mássica é de 17,2 para 1. Durante o tempo de difusão do ar no combustível,  $\tau_M$ , o combustível irá adveccionar certa distância na direção do *crossflow* proporcional a  $\tau_M U_\infty$ . As hipóteses feitas em relação ao formato e à difusão da chama exigem que variações no comprimento de chama sejam diretamente proporcionais a  $U_\infty$ . A constante de proporcionalidade, que aparece como uma escala de tempo, é

$$K_U \equiv \frac{\partial L_f}{\partial U_\infty}. \quad (1.6)$$

O efeito de alongamento é, então, adicionado ao caso quiescente da Equação 1.4 e o comprimento de chama previsto incluindo o efeito do *crossflow* torna-se

$$L_f = K_f (\rho_j V_j)^{1/2} d_s + K_U U_\infty. \quad (1.7)$$

Para enfatizar os dois princípios nos quais o modelo é baseado – a preservação do formato da chama e a escala de tempo da combustão limitada pela difusão – a Equação 1.7 pode ser rearranjada para

$$\frac{L_f}{U_\infty} = K_f (\rho_j V_j)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty} + K_U, \quad (1.8)$$

onde o lado esquerdo representa o tempo que uma partícula de fluido leva para viajar o comprimento da chama.

O efeito da diluição de gás inerte no combustível também é contemplado neste modelo. A diluição altera apenas a escala de tempo para que o combustível se misture com a quantidade necessária de ar e queime, isto é, o tempo necessário para que a partícula de fluido viaje o comprimento da chama. A magnitude deste efeito pode ser determinada reconsiderando a constante estequiométrica  $K_S$ , da Equação 1.3, em termos da concentração de combustível na mistura,

$$K_S \equiv \frac{\dot{m}_{O_2}}{C_f \dot{m}_j}, \quad (1.9)$$

onde  $C_f$  é a concentração mássica de combustível no jato,

$$C_f = \frac{\rho_f Q_f}{\rho_j Q_j} \quad (1.10)$$

e  $\dot{m}_j$  é a vazão mássica total do jato.  $\rho_j$  e  $Q_j$  são a massa específica e a vazão volumétrica do jato, respectivamente, e  $\rho_f$  e  $Q_f$  são as propriedades do combustível. É importante mencionar que os autores utilizaram combustível e diluente com massas específicas semelhantes (propano - 1,9 kg/m<sup>3</sup> e CO<sub>2</sub> - 1,8 kg/m<sup>3</sup>) tornando  $C_f$ , na prática, uma fração volumétrica. O presente trabalho, contudo, valida a hipótese de fração mássica utilizada na metodologia, pois foram utilizados gases com massas específicas distintas (GNV - 0,7 kg/m<sup>3</sup> e CO<sub>2</sub> - 1,8 kg/m<sup>3</sup>). Lembrando das Equações 1.4 e 1.5 que  $L_f \propto K_S^{1/2}$ , espera-se que a escala de tempo também varie em relação a  $C_f^{1/2}$ . A Equação 1.8 torna-se, finalmente,

$$\left( \frac{1}{C_f} \right)^{1/2} \frac{L_f}{U_\infty} = K_f (\rho_j V_j)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty} + K_U. \quad (1.11)$$