

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESTABILIDADE E EMISSÃO DE RADIAÇÃO
TÉRMICA EM CHAMAS NÃO PRÉ-MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDAS
COM DIÓXIDO DE CARBONO SUJEITAS A ESCOAMENTO CRUZADO

por

Manuel António Kiony Nzinga

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2019.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESTABILIDADE E EMISSÃO DE RADIAÇÃO
TÉRMICA EM CHAMAS NÃO PRÉ-MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDAS
COM DIÓXIDO DE CARBONO SUJEITAS A ESCOAMENTO CRUZADO

por

Manuel António Kiony Nzinga

Engenheiro Químico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Aprovada por:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot DEMEC/UFRGS

Profa. Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak RNC

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 22 de Julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adelina Albertina e Domingos José Casimira, por toda a parceria e incentivo em dar continuidade aos meus estudos.

Aos meus irmãos que ajudaram a cuidar dos meus pais nos momentos em que não pude estar presente.

Ao meu tio Manuel António Paulo pelo apoio cedido em todas as etapas da minha formação. Sem esquecer a sua esposa Josefina Paulo pelo incentivo.

Aos primos e amigos que sempre se colocaram à minha disposição quando os solicitei, sem esquecer a ajuda dos amigos do Laboratório de Combustão/UFRGS, Hidropneumática e LETA em particular Ricardo, Henrique, Quines e Batista. Obrigado pelas opiniões na montagem da bancada experimental.

À minha companheira Greice Silva pelo amor, companheirismo, força e ajuda em vários momentos do curso, assim como aos seus familiares.

Aos professores da Instituição na qual estou me formando, Prof. Dr. Guilherme e Prof. Dr. Andrés pelas discussões na elaboração deste trabalho. Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Serenotti, Engenharia Química/UNISINOS.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Roman Centeno e ao meu coorientador Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira, pelo suporte e apoio na fundamentação do trabalho.

Agradeço à PETROBRAS pelo apoio financeiro concedido durante a realização do mestrado e do trabalho de pesquisa.

Agradeço a Deus que sempre me acompanhou nos momentos mais difíceis dessa trajetória.

RESUMO

Este trabalho descreve o estudo experimental de chamas turbulentas difusivas de gás natural veicular diluído com dióxido de carbono, sujeitas a vento lateral. A primeira parte do trabalho se concentra em estudar a estabilidade e geometria dessas chamas. Para tal, é montado um aparato experimental a fim de realizar os experimentos. Os resultados experimentais obtidos nesta primeira parte do trabalho dizem respeito ao comprimento de chama, altura de levantamento de chama, suas inclinações e mapas de estabilidade. Para comparar os dados experimentais, modelos algébricos da literatura são ajustados para o comprimento de chama. Na segunda etapa do trabalho, são estudados os aspectos da radiação térmica e, para isso, é montada uma bancada experimental para medir os fluxos de calor radiativos e fração radiante emitida pelas chamas. Ainda, mostra de forma quantitativa o efeito da adição de dióxido de carbono na mistura com o combustível e do vento cruzado ocasionando a redução do comprimento de chama e o aumento da altura de levantamento de chama, pois o dióxido de carbono inibe a formação de fuligem e, conseqüentemente, o prosseguimento da reação química. Além disso, a adição do dióxido de carbono faz com que haja redução nos valores da fração radiante. Os modelos algébricos ajustados para o comprimento de chama se mostram coerentes com os dados físico-químicos apresentados neste estudo.

Palavras-chave: Chamas turbulentas difusivas; Vento cruzado; Fluxo de calor radiativo; Efeito de dióxido de carbono.

ABSTRACT

This work describes the experimental study of turbulent diffusion flames of natural gas diluted with carbon dioxide subjected to lateral wind. The first part of the work focused on studying flames stability and geometry. For this purpose it was set up an experimental apparatus to do the experiments of this section. The results of this first part are experimental measurements for flame length, height of uplifting, tilt angle and a stability mapping. To compare the experimental data, algebraic models from the literature were tested and adjusted for the flame length. In the second part of the work it was studied thermal radiation. For this purpose it was set up an experimental bench to measure radiative heat fluxes and radiant fractions emitted by these flames. Additionally, it is shown quantitatively that the addition of carbon dioxide in the mixture with the fuel and crossed wind reduced the length of the flame and increases the flame lifting height, therefore, carbon dioxide inhibits the formation of soot and consequently the continuation of the chemical reaction. Besides that, the addition of this inert causes a decrease in radiative fraction values. The algebraic models fitted for the flame length were consistent with the physicochemical data shown in this study.

Keywords: Turbulent diffusive flames; Crosswind; Radiative heat flux; Effect of carbon dioxide.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Escopo da investigação	3
1.3	Importância acadêmica	4
1.4	Objetivos do trabalho	5
1.4.1	Objetivo geral.....	5
1.4.2	Objetivos específicos	5
1.5	Estrutura do texto	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Modo de queima das chamas em vento cruzado.....	7
2.2	Estabilidade de chamas	8
2.2.1	Comprimento visível de chama	8
2.2.2	Altura de levantamento e extinção da chama.....	14
2.3	Modelos algébricos para previsão da geometria da chama.....	19
2.4	Radiação térmica.....	26
2.4.1	Fração de calor radiante	28
2.4.2	Modelo de Fonte Pontual Única (SPS)	29
2.5	Efeito da diluição do dióxido de carbono	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Instalação experimental da geometria da chama.....	32
3.2	Medição de vazão dos gases reagentes	33
3.3	Medição da velocidade do vento cruzado	33
3.4	Procedimento de aquisição de dados	34
3.5	Construção dos mapas de estabilidade.....	35
3.6	Definição da geometria da chama	37
3.7	Bancada experimental para medição da radiação	39
3.7.1	Procedimento de medição do fluxo de calor radiativo.....	40
3.8	Modificações aplicadas às correlações sobre o comprimento de chama e inclinação do ângulo da chama	41
3.9	Validações e condições para ajustes das correlações.....	41

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Estabilidade de chamas	46
4.1.1	Mapas de estabilidade	46
4.1.2	Geometria da chama.....	48
4.1.2.1	Variação do comprimento de chama com a vazão de mistura (combustível e CO ₂)	48
4.1.2.2	Variação do comprimento de chama com a razão de quantidade de movimento (R) e diluição de CO ₂	51
4.1.2.3	Variação do ângulo de inclinação da chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO ₂).....	52
4.1.2.4	Variação do ângulo de inclinação da chama com a razão de quantidade de movimento (R) e diluição de CO ₂	54
4.1.2.5	Variação da altura de levantamento e extinção de chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO ₂)	55
4.1.2.6	Variação da inclinação da altura de levantamento da chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO ₂)	56
4.1.2.7	Comparação dos resultados experimentais com as correlações.....	57
4.1.2.7.1	Proposição de novas correlações empíricas para previsão do comprimento e ângulo de inclinação de chamas a jatos em vento cruzado	58
4.1.2.7.2	Comparação entre as correlações propostas pela presente pesquisa para previsão do comprimento de chama	63
4.2	Radiação térmica.....	72
4.2.1	Mapeamento do fluxo de calor radiativo	72
4.2.2	Efeito da diluição de CO ₂ e da vazão de mistura sobre a fração radiante.....	75
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Geometria da chama.....	79
5.2	Radiação térmica.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
	APÊNDICE A Análise de incertezas	87
	APÊNDICE B Parâmetros geométricos da chama	91
	APÊNDICE C Dados técnicos dos sensores, medidores e anemômetro	95

APÊNDICE D	Mudança na forma da chama.....	98
APÊNDICE E	Tabelas comparativas dos modelos propostos pela presente pesquisa, ajustadas a partir de Majeski et al., 2004, Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015 para o comprimento de chama e inclinação do ângulo da chama 106	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Unidade industrial com sistema <i>flare</i> [Petrobras, 2017].....	2
Figura 1.2	Parâmetros geométricos propostos para definição da chama.....	4
Figura 2.1	Modos de chama observados por Kostiuk et al., 2000: (a) <i>rim-stabilized</i> , (b) <i>lifted</i> e (c) <i>wake-stabilized</i>	7
Figura 2.2	Espectro da radiação eletromagnética [Adaptado de Incropera, 2008].....	27
Figura 2.3	Representação do modelo de fonte pontual [Adaptado de Hu et al., 2014].....	29
Figura 3.1	Bancada experimental da geometria da chama.	32
Figura 3.2	Bancada de medição da velocidade do vento cruzado.	34
Figura 3.3	Variação do frame de uma chama turbulenta com tempo de exposição e abertura para um valor de ISO constante de 3200, Vazão de 8,012 L/min, 0% CO ₂ , distância de enfoque a 1,0 m, vento lateral de 0,5 m/s e resolução da câmera 18,0 Mpx.	35
Figura 3.4	Processamento de imagem para obtenção do comprimento (L_f) e ângulo de inclinação (θ) de chama: (a) imagem original, (b) conversão em escala de cinza, (c) imagem binária (preto e branco) e (d) contorno de intermitência da chama.	38
Figura 3.5	Esquema da bancada experimental para medição da radiação térmica.....	39
Figura 4.1	Imagens instantâneas de chama para um jato com diferentes vazões de GNV, CO ₂ , diâmetro do bocal do queimador 7,55 mm no vento cruzado de 0,5 m/s.....	45
Figura 4.2	Mapas de estabilidade com ventos cruzados de 0,5 m/s a 2,0 m/s e proporções de diluição de CO ₂ e diâmetro do bocal de queimador de 7,55 mm.....	47
Figura 4.3	Mapas de estabilidade com ventos cruzados de 2,5 m/s a 3,0 m/s e proporções de diluição de CO ₂ e diâmetro do bocal de queimador de 7,55 mm.	48
Figura 4.4	Comprimentos de chama com diferentes vazões de jatos, velocidades de vento cruzado e diluições de CO ₂	49
Figura 4.5	Comprimentos de chama com diferentes vazões de jatos, velocidades de vento cruzado e diluições de CO ₂	50
Figura 4.6	Variação do comprimento de chama em relação da razão de momentos e da diluição de CO ₂ para diferentes velocidades de vento lateral.	52
Figura 4.7	Ângulo de inclinação da chama em relação da vazão combustível e da diluição com CO ₂ para diferentes velocidades de vento lateral.	53

Figura 4.8	Ângulo de inclinação da chama em relação da razão a quantidade de movimento entre os jatos e da diluição com CO ₂ para diferentes velocidades de vento lateral	54
Figura 4.9	Levantamento da chama em relação da vazão do combustível e da diluição com	55
Figura 4.10	Inclinação da altura de levantamento da chama em relação da vazão do combustível e da diluição com CO ₂ para diferentes velocidades de vento lateral.	57
Figura 4.11	Modelo proposto pela presente pesquisa, normalizado a partir de Majeski et al., 2004, para o comprimento de chama e medições experimentais de comprimento de chama para diversas diluições com CO ₂ e vento lateral.....	59
Figura 4.12	Variação do ângulo de inclinação da chama em relação as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos (ajuste logarítmico).....	61
Figura 4.13	Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 0,5 m/s e diferentes diluições de CO ₂	62
Figura 4.14	Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 1,0 m/s e diferentes diluições de CO ₂	63
Figura 4.15	Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, Lf_{exp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, LfN ; Hu et al., 2015, Lfh ; e Wang et al., 2015, $LfWu$ com vento lateral 0,5 m/s em diferentes diluições de CO ₂	69
Figura 4.16	Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, Lf_{exp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, LfN ; Hu et al., 2015, Lfh ; e Wang et al., 2015, $LfWu$ com vento lateral 1,0 m/s em diferentes diluições de CO ₂	70
Figura 4.17	Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, Lf_{exp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, LfN ; Hu et al., 2015, Lfh ; e Wang et al., 2015, $LfWu$ com vento lateral 1,5 m/s em diferentes diluições de CO ₂	70
Figura 4.18	Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, Lf_{exp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al.,	

	2004, LfN ; Hu et al., 2015, Lfh ; e Wang et al., 2015, $LfWu$ com vento lateral 2,0 m/s em diferentes diluições de CO_2	71
Figura 4.19	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	73
Figura 4.20	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 2,0$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	74
Figura 4.21	Fração radiante em relação da vazão de mistura, da diluição com CO_2 e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,0$ e $z/L_f = 0,21$	75
Figura 4.22	Fração radiante em relação da vazão de mistura, da diluição com CO_2 e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,21$	76
Figura 4.23	Influência da média das frações radiantes em relação da porcentagem de CO_2 calculada a partir das diversas velocidades de vento e vazões de combustível. .	77
Figura A.1	Comprimentos de chamas com vazão e velocidades de vento lateral em diferentes diluições de CO_2	90
Figura B.1	Comprimentos de chama em relação a razão de quantidade de movimento entre os jatos e velocidades de vento cruzado em diferentes diluições de CO_2	91
Figura B.2	Ângulo de inclinação da chama em relação da vazão combustível e da diluição com CO_2 para diferentes velocidades de vento lateral.	91
Figura B.3	Ângulo de inclinação da chama em relação da razão a quantidade de movimento entre os jatos e da diluição com CO_2 para diferentes velocidades de vento lateral	92
Figura B.4	Levantamento da chama em relação da vazão de mistura para diferentes velocidades de vento lateral.	93
Figura B.5	Ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama em relação da vazão de mistura para diferentes velocidades de vento lateral.	94
Figura D.1	Influência da velocidade do vento lateral na forma da chama.	98

Figura D.2	Influência da diluição, velocidade do vento cruzado sobre o levantamento e extinção da chama na vazão de combustível 21,99 L/min.....	99
Figura D.3	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 0,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	101
Figura D.4	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 0,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	101
Figura D.5	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,0$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	102
Figura D.6	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,0$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	102
Figura D.7	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	103
Figura D.8	Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 2,0$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.	103
Figura D.9	Fração radiante em função da vazão do combustível, da diluição com CO_2 e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,42$	104
Figura D.10	Fração radiante em função da vazão do combustível, diluição de CO_2 e da velocidade do vento lateral para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,0$ e $z/L_f = 0,63$	104

Figura D.11	Fração radiante em função da vazão do combustível, diluição de CO ₂ e da velocidade do vento lateral para o sensor de radiação posicionado em $y/Lf = 2,0$, $xLf = 0,5$ e $zLf = 0,63$	105
Figura E.1	Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 1,5 m/s e diferentes diluições de CO ₂	111
Figura E.2	Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 2,0 m/s e diferentes diluições de CO ₂	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Procedimento para determinar os mapas de estabilidade.....	36
Tabela 4.1	Valores de Kf e KU referentes ao modelo proposto pela presente pesquisa, ajustado de Majeski et al., 2004 para diferentes diluições de CO_2	58
Tabela 4.2	Valores de Kf e KU referentes ao modelo proposto pela presente pesquisa, ajustado de Majeski et al., 2004 para diferentes diluições de CO_2	60
Tabela 4.3	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, Lf_{exp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, LfN , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 0% de CO_2 e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).....	64
Tabela 4.4	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, Lf_{exp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, Lfh , ajustado a partir de Hu., 2015 com 0% de CO_2 e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).....	65
Tabela 4.5	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, Lf_{exp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, $Lfwu$, ajustado a partir de Wang., 2015 com 0% de CO_2 e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).....	66
Tabela 4.6	Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, Lf_{exp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 0,5 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.....	67
Tabela 4.7	Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, Lf_{exp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,0 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.....	67
Tabela 4.8	Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, Lf_{exp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,5 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.....	68
Tabela 4.9	Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, Lf_{exp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,5 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.....	68

Tabela A.1	Valores de incertezas de Medição para vento 0,5 m/s com diferentes diluições de CO ₂	88-90
Tabela A.2	Valores de incertezas de Medição para vento 1,0 m/s com diferentes diluições de CO ₂	89-91
Tabela D.1	Parâmetros e resultados das medições.	100
Tabela E.1	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_N</i> , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 10% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)	106
Tabela E.2	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_N</i> , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 20% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	106
Tabela E.3	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_N</i> , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 30% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	107
Tabela E.4	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_h</i> , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 10% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)..	107
Tabela E.5	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_h</i> , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 20% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)..	108
Tabela E.6	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_h</i> , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 30% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)..	108
Tabela E.7	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_{wu}</i> , ajustado a partir de Wang et al., 2015 com 10% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	109
Tabela E.8	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lf_{exp}</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lf_{wu}</i> , ajustado a partir de Wang et al.,	

	2015 com 20% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	109
Tabela E.9	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo proposto pela presente pesquisa, <i>Lfwu</i> , ajustado a partir de Wang et al., 2015 com 30% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).	110
Tabela E.10	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Hu et al., 2015, <i>LfH</i> , com 0% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)	112
Tabela E.11	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Hu et al., 2015, <i>LfH</i> , com 10% de CO ₂ e ventos cruzados de...	112
Tabela E.12	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Hu et al., 2015, <i>LfH</i> , com 20% de CO ₂ e ventos cruzados de...	113
Tabela E.13	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Hu et al., 2015, <i>LfH</i> , com 30% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).	113
Tabela E.14	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Wang et al., 2015, <i>LfW</i> , com 0% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).	114
Tabela E.15	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Wang et al., 2015, <i>LfW</i> , com 10% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	114
Tabela E.16	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Wang et al., 2015, <i>LfW</i> , com 20% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	115
Tabela E.17	Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, <i>Lfexp</i> , com o modelo de Wang et al., 2015, <i>LfW</i> , com 30% de CO ₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).....	115

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURA

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS
DSLR	<i>Digital Single-Lens Reflex</i>
GNV	Gás Natural Veicular
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LETA	Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos
MME	Ministério de Minas e Energia
PLIF	Plano de Luz Laser
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PU	Poliuretano
RNC	Rede Nacional de Combustão
SPS	Fonte Pontual Única ou <i>single point source</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A_f	Área da superfície da chama, m ²
ARE	Valor absoluto do erro relativo
$AARE$	Média do valor absoluto do erro relativo
c	Velocidade de propagação da luz no meio, m/s
C_{CO_2}	Fator de correção para chamas diluídas com dióxido CO ₂ de carbono
C_j	Concentração mássica de combustível no jato
dA	Diferencial da área da superfície da chama
D_{ab}	Coefficiente de difusão molecular
d_s	Diâmetro do bocal do queimador, mm
g	Aceleração da gravidade, m/s ²
IM	Incerteza de medição
K_f	Razão entre a massa de oxigênio para o combustível pelo parâmetro do formato geométrico
K_G	Parâmetro do formato geométrico
K_S	Razão estequiométrica da massa de oxigênio para o combustível
K_U	Constante de proporcionalidade entre o alongamento da chama e a velocidade do <i>crossflow</i>
L_f	Comprimento visível de chama, m
L_{fcalc}	Comprimento de chama calculado a partir de correlações propostas, m
L_{fexp}	Comprimento de chama experimental
L_{fh}	Comprimento de chama proposto pela presente pesquisa, ajustado ao modelo de Hu et al., 2015, m
L_{fwu}	Comprimento de chama proposto pela presente pesquisa, ajustado ao modelo de Wang et al., 2015, m
ln	Logaritmo natural
M_{st}	Relação da mistura estequiométrica
MW_a	Peso molecular do ar
MW_j	Peso molecular do combustível

\dot{m}_J	Vazão mássica de combustível no queimador, kg/s
\dot{m}_{Ji}	Vazão mássica total do jato no queimador, kg/s
\dot{m}_{O_2}	Vazão mássica de oxigênio na chama, kg/s
\dot{m}''_{O_2}	Taxa média de oxigênio fornecida por unidade de área na superfície da chama
n	Número de parcelas
N	Número de dados no intervalo
Q_J	Calor total liberado pela reação de combustão, kW
q''_R	Fluxo de calor radiativo, w/m ²
R	Razão de quantidade de movimento entre os jatos
Re	Número de Reynolds
R_{ep}	Repetitividade
R_f	Distância entre o receptor e a fonte pontual, m
RM	Resultado da medição
S	Desvio padrão amostral
S^2	Variância experimental
t	Coefficiente da distribuição <i>t-student</i>
U_∞	Velocidade do vento cruzado, m/s
U_J	Velocidade do jato de combustível, m/s
\dot{V}_J	Vazão volumétrica de combustível, L/min
\dot{V}_{Ji}	Vazão volumétrica do jato, L/min
x_i	Valor da parcela da amostra
X_r	Fração radiante
\bar{x}	Média aritmética das amostras
y	Produto entre a concentração de dióxido de carbono e comprimento de chama

Símbolos Gregos

β	Parâmetro de alongamento
ΔH_c	Energia por unidade de massa ou poder calorífico inferior (PCI), kJ/kg
θ_{tn}	Ângulo de inclinação da chama proposto pela presente pesquisa, graus (°)
λ	Comprimento de onda, m
ν	Frequência, Hz

ρ_j	Massa específica do combustível, kg/m ³
ρ_{ji}	Massa específica do jato, kg/m ³
ρ_∞	Massa específica do vento cruzado, kg/m ³
τ_S	Transmitância da atmosfera avaliada para a distância R_f
∂L_f	Derivada parcial em relação ao comprimento de chama
∂U_∞	Derivada parcial em relação à velocidade do vento
ψ_f	Fator de forma da chama

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O desenvolvimento da sociedade está intimamente ligado ao consumo de energia, se tomam como exemplo o nível de crescimento dos países industrializados, esses são altamente dependentes das diversas fontes de energia para a manutenção de seus parques industriais e também para o fornecimento de energia para seus grandes núcleos populacionais. Porém, o maior percentual de energia consumida no mundo é proveniente de fontes não renováveis.

O petróleo e o gás natural constituem fontes energéticas de vital importância para a humanidade devido à possibilidade desses recursos minerais servirem de matéria-prima para produção de seus derivados que contribuem substancialmente para suprimir a demanda energética. Os derivados desses recursos, em grande parte, são usados como combustíveis na produção de energia para o uso doméstico, na indústria automobilística, na indústria termoelétrica dentre outros.

A queima desses combustíveis é uma prática comum na indústria petrolífera usada para o descarte de gases inflamáveis indesejáveis. Os sistemas *flares* são um dos processos que permitem assegurar a integridade das unidades de processo quando ocorre o aumento de descargas de efluentes e a posterior eliminação destes, preferencialmente, compostos orgânicos voláteis, por combustão controlada. Entretanto, a queima desses combustíveis injetados em escoamento com vento cruzado possui um papel de destaque na conversão de energia primária em outras formas de energia.

A combustão em *flares* com múltiplos bicos injetores com vazões elevadas de combustíveis formando uma chama difusiva turbulenta conforme ilustrada na Figura 1.1, o escoamento transversal de ar que atua sobre essas chamas afeta nas características da forma da chama, nomeadamente a trajetória, o comprimento de chama, inclinação da chama bem como a energia liberada por convecção e radiação. Diferentemente das outras formas de transferência de calor (condução e convecção), a radiação, sendo objeto do presente estudo, não necessita de nenhum meio para ocorrer.



Figura 1.1 – Unidade industrial com sistema *flare* [Petrobras, 2017]

A recente descoberta da camada do pré-sal no Brasil promoveu um potencial desenvolvimento nas tecnologias de extração de petróleo e de gás natural. Conforme o relatório final do balanço energético nacional de 2017, publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) [Brasil, 2017], a produção nacional de petróleo cresceu 3% em 2016, atingindo a média de 2,52 milhões de barris diários, dos quais, 94% são de origem marítima. Em relação aos seus estados produtores, o Rio de Janeiro foi responsável pela maior parcela: 67% do montante anual. Já na produção terrestre, continua sendo liderada pelo Estado do Rio Grande do Norte, com 33% do total *onshore*. A produção do Xisto reduziu em 0,4% atingindo um total de 0,269 milhões de m³.

Tendo em conta a forma como o oxigênio é adicionado para produzir a combustão, basicamente as chamas podem ser classificadas como pré-misturada e difusão (não pré-misturada). As chamas pré-misturadas são caracterizadas pela mistura prévia dos reagentes antes de atingirem a zona da reação (queimadores do tipo Bunsen) e uma característica dessas chamas é a aparição da cor azul, nesta condição, entende-se que a combustão é mais completa e permite alcançar temperaturas elevadas, enquanto que, as chamas de difusão são caracterizadas quando o combustível e o oxidante se encontram separados antes da zona de reação, e a chama se estabelece na interface entre eles, as chamas de difusão se caracterizam pela aparição da cor amarela indicando a presença de fuligem.

As chamas do tipo jato podem ser classificadas em função do nível de escoamento na saída do bocal do queimador em: chamas laminares para velocidades baixas com número de Reynolds menor que 2000 e chamas turbulentas para velocidades altas apresentando um número Reynolds maior ou igual a 2000, considerando escoamento interno em duto circular

[Incropera, 2008]. Contudo, o número adimensional de Reynolds foi determinado a partir da vazão de mistura (combustível e dióxido de carbono) e variando os parâmetros físico-químicos apresentados no presente estudo.

Este trabalho tem por objetivo analisar a geometria e a radiação térmica de chamas turbulentas difusivas com diluição de dióxido de carbono (CO₂) sujeitas a escoamento transversal de ar, usando gás natural veicular (GNV) como combustível. Para a caracterização do comportamento sob o ponto de vista experimental, simulando condições típicas de *flares* reais, foi necessário utilizar métodos fotográficos e filmagens para obter os dados referentes à estabilidade (geometria) e, enquanto para o estudo da emissão e radiação térmica, empregaram-se sensores de fluxo de radiação.

1.2 Escopo da investigação

A composição do combustível, a velocidade do jato de combustível na saída do queimador (U_j), a vazão de mistura com a adição de CO₂ na corrente do combustível e a velocidade do vento cruzado (U_∞), são parâmetros que afetam a característica da forma de chamas difusivas turbulentas (comprimento, ângulo de inclinação, altura de levantamento de chama e sua inclinação) e radiação térmica (fluxo de calor radiante e fração de calor radiante). O GNV foi utilizado como combustível devido ao sucesso no mercado, sobretudo em veículos leves no país, no início dos anos 1990, mostrou-se ter um grande potencial, principalmente quando foi ampliada a atual rede de transportes. [Vaz et al., 2008]. A pesquisa foi estabelecida com o intervalo de velocidade de jato de combustível de 3,21 a 16,3 m/s e para a velocidade do vento cruzado na faixa 0,5 a 3,0 m/s, pois esses parâmetros foram definidos atendendo o espaço físico da instalação no laboratório e o diâmetro do bocal do queimador foi mantido fixo de 7,55 mm.

O problema em questão trata de uma reação química exotérmica sujeita ao escoamento transversal de ar em que, sobre a superfície da chama, concentram-se duas forças concorrentes (velocidade de jato de combustível e a velocidade de jato do vento cruzado) o que resulta na mudança do formato da chama. Com isso, uma quantidade adimensional é definida como razão de quantidade de movimento entre o jato fornecido pelo combustível ($\rho_j U_j$) e o jato do vento cruzado ($\rho_\infty U_\infty$).

Essa razão de quantidade de movimento entre os jatos será utilizada ao longo de toda dissertação para comparar os dados aqui obtidos com os da literatura. No estudo de Briggs,

1975, foi proposto um modelo analítico para determinar a trajetória da chama controlada pela razão de quantidade de movimento entre os jatos, os resultados se mostraram razoáveis quando comparados com os dados experimentais. Outro fenômeno observado, por Sherlock e Stalker, 1941, quando estudaram as chamas com baixas razões de quantidade de movimento entre os jatos, preferencialmente ($R < 2,5$) e verificaram que parte da pluma da chama se envervou para baixos valores de R com o aumento do vento cruzado.

A Figura 1.2 apresenta as definições geométricas da chama, pois, neste trabalho é proposta uma simplificação da geometria da chama, sendo ela definida por quatro parâmetros, entre eles: o comprimento de chama, L_f ; ângulo de inclinação, θ ; altura de levantamento da chama, H_f ; e o ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama, β_f .

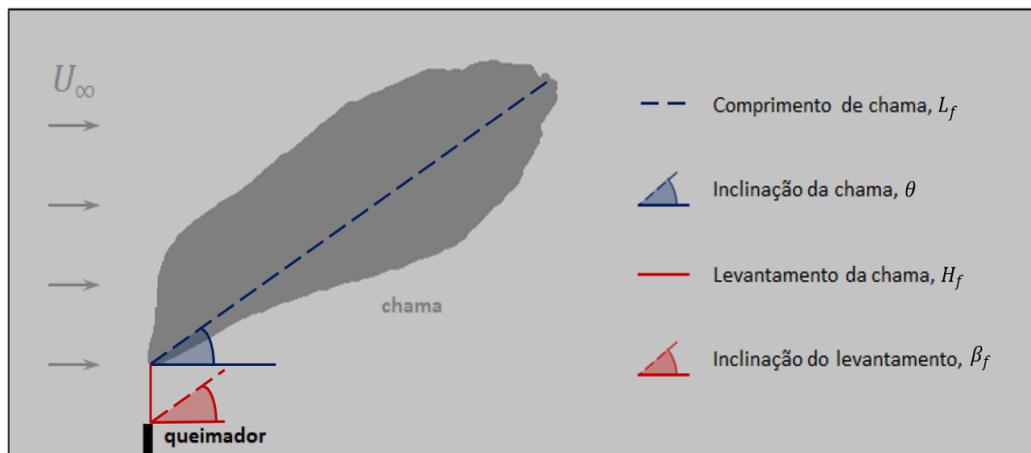


Figura 1.2 – Parâmetros geométricos propostos para definição da chama.

As técnicas para definição dos parâmetros geométricos da chama serão apresentadas com maior abrangência na seção 3 desta dissertação.

1.3 Importância acadêmica

É importante destacar que poucos estudos foram feitos sobre as condições estabelecidas na presente pesquisa. A metodologia experimental do queimador utilizado para determinar as curvas experimentais da geometria e de fluxos radiativos de chamas difusivas turbulentas com ou sem escoamento cruzado já foi amplamente desenvolvida, mas pouco foi utilizada para o GNV com diluição de CO_2 em vento cruzado. As investigações desenvolvidas na área mostram a geometria dessas chamas utilizando combustível puro nomeadamente butano, metano e propano.

Majeski et al., 2004, realizaram pesquisas com gás propano, utilizando variações de concentrações de gás inerte (CO_2) na faixa de (0%, 20%, 30% e 40%). Estes estudos foram desenvolvidos para uma única velocidade de jato de combustível (de 1,0 m/s). Sendo os resultados obtidos para previsão do comprimento de chama, foram comparados com correlações empíricas considerando o comprimento de chama na vertical, conforme Kalghatgi, 1983, e não como está sendo proposto neste trabalho em que o comprimento de chama é definido conforme Majeski et al., 2004, pela linha transversal que une desde o início da chama (dada a jusante do queimador) até o final da chama (dada pelo fim da cor amarela ou azul) e softwares para tratamento estatístico das imagens. Porém, até então não foi desenvolvido um modelo genérico para calcular o comprimento de chama, o ângulo de inclinação, altura de levantamento e sua inclinação para estudos envolvendo chamas difusivas turbulentas sujeitas a escoamento cruzado. Na presente pesquisa, os modelos utilizados para determinar o comprimento de chama foram propostos pelo autor, adaptados a partir dos já existentes, baseados nos modelos descritos por Hu et al., 2015, Wang et al., 2016 e Majeski et al., 2004, usando as propriedades físico-químicas obtidas neste trabalho.

Além disso, mesmo que atualmente o uso desta metodologia apresente algumas imprecisões devido aos fenômenos óticos de visualização da chama, o trabalho oferece um valor agregado para futuros estudos, considerando as metodologias implementadas e os poucos estudos que foram desenvolvidos na área sobre o efeito de CO_2 na mistura de GNV. No entanto, os resultados fornecidos pelo estudo contribuem para o estado da arte sobre geometria e emissão de radiação térmica de chamas difusivas e turbulentas diluídas com CO_2 e sujeitas a vento cruzado e ao desenvolvimento de novas pesquisas neste assunto.

1.4 Objetivos do trabalho

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar a estabilidade (geometria) e a radiação térmica de chamas turbulentas difusivas com diluição de CO_2 sujeitas a escoamento transversal de ar, usando GNV como combustível.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- a) obter os dados experimentais da geometria e radiação de chamas sob influência do escoamento do vento cruzado, variando a vazão de combustível, a diluição de CO_2 na mistura e a velocidade do vento cruzado;
- b) propor correlações empíricas e comparar com as correlações da literatura na estimativa das propriedades geométricas de chamas diluídas com CO_2 sujeitas a escoamento transversal de ar;
- c) implementar o modelo de uma única fonte pontual (SPS, *single point source*) padrão para estimar a fração radiante a partir de medições do fluxo de calor radiante.

1.5 Estrutura do texto

O conteúdo do trabalho é composto por cinco seções, nomeadamente:

Na **Seção 1** são apresentados os aspectos introdutórios da pesquisa, objeto de estudo, sua importância, os objetivos, destacando os principais estudos utilizados como base para cumprir com os objetivos estabelecidos no estudo.

A partir da **Seção 2**, encontra-se a fundamentação teórica usada como referência no trabalho. Nesta parte são expostos os fundamentos teóricos e as pesquisas na área, assim como o estudo da geometria e radiação de chamas difusivas turbulentas sujeitas a escoamento cruzado com as principais contribuições no tema de pesquisa. Primeiramente, é mostrado o panorama atual de estudos desenvolvidos na área e, depois, são abordados conceitualmente os temas sobre combustão, geometria e radiação de chamas difusivas e, por último, os métodos de visualização de imagens, ferramentas complementares desta pesquisa.

A **Seção 3** tem o objetivo de apresentar a metodologia e os materiais utilizados na avaliação experimental da geometria e radiação de chamas difusivas sujeitas a escoamento cruzado gerada a partir de um queimador. Esta seção foi dividida em duas partes, estabilidade da chama, que comporta a parte da geometria, e a radiação térmica.

A **Seção 4** apresenta os resultados e a discussão dos mesmos, e se encontra dividida em duas sessões: a primeira sobre o estudo da estabilidade e a segunda sobre o estudo da radiação térmica, incluindo análises de incerteza de medição e comparações com resultados da literatura.

Finalmente, na **Seção 5** foram apresentadas as conclusões, também sendo dividida em duas sessões, as mesmas da Seção 4.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os estudos relacionados à pesquisa, conceitos de tipos de chama, modos de queima em vento cruzado, sua estabilidade e radiação térmica. Para fundamentar os tópicos envolvendo a seção, artigos, dissertações e teses foram utilizados para facilitar a argumentação e discussão dos resultados.

2.1 Modo de queima das chamas em vento cruzado

Tendo definido o escopo da investigação sobre os tipos de chamas, abordam-se a seguir alguns dos conhecimentos existentes que serão aplicados a esse conjunto de condições. De acordo com Johnson e Kostiuk, 2000, e Kostiuk et al., 2000, a chama pode se apresentar em três diferentes modos, conforme a ilustração na Figura 2.1, como segue:

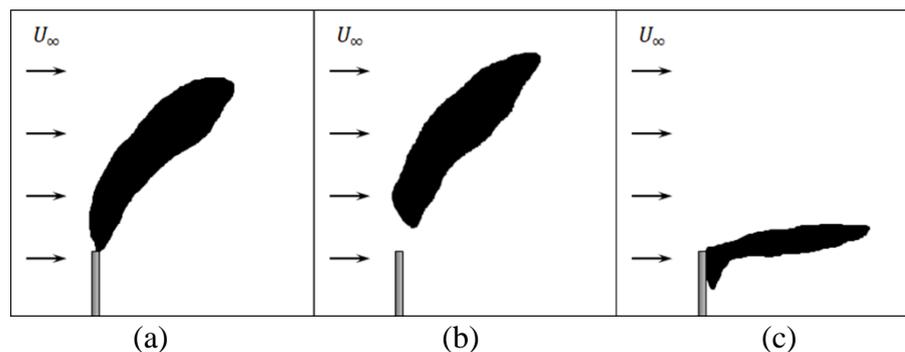


Figura 2.1 – Modos de chama observados por Kostiuk et al., 2000: (a) *rim-stabilized*, (b) *lifted* e (c) *wake-stabilized*.

- a) *rim-stabilized*: chama ancorada no bocal do queimador. Essas chamas ocorrem em função de baixas velocidades de jatos de combustíveis e vento cruzado;
- b) *lifted*: tipos de chamas que ocorrem com altos fluxos de combustível. Nestes casos, a base da chama se encontra levantada do bocal do queimador e, entre a base e o bocal, surge uma região de pré-mistura;
- c) *wake-stabilized*: tipos de chamas resultantes de altas velocidades relativas de escoamento do vento lateral. Nestes casos, parte do combustível é aprisionado e queimado no lado do bocal protegido pelo vento.

De acordo com Huang e Chang, 1994, e Huang e Wang, 1999, realizaram extensos estudos experimentais de chamas do modo *wake-stabilized* e definiram diversas subcategorias

baseadas na relação entre a razão de quantidade de movimento entre os jatos, conforme a Equação 2.1 descrita abaixo:

$$R = \left(\frac{U_J^2 \rho_J}{U_\infty^2 \rho_\infty} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

em que ρ_J e ρ_∞ são as massas específicas do combustível e do vento cruzado, respectivamente, U_J e U_∞ suas velocidades.

2.2 Estabilidade de chamas

Os estudos da combustão turbulenta podem ser divididos em abordagens teóricas, experimentais e numéricas. A presente pesquisa se concentra nos estudos envolvendo os aspectos experimentais de chamas difusivas turbulentas com escoamento de vento cruzado. Em seguida, serão analisadas as características principais de chamas turbulentas sujeitas à velocidade de vento cruzado, nomeadamente comprimento de chama, ângulo de inclinação do comprimento de chama, altura de levantamento da chama e o ângulo de inclinação da altura do levantamento da chama. Assim, serão analisados os parâmetros físicos e químicos que influenciam na geometria da chama.

2.2.1 Comprimento visível de chama

A primeira parte desta seção apresenta uma revisão de estudos experimentais que produzem resultados relevantes para o entendimento dos mecanismos físicos básicos do problema da combustão laminar e turbulenta de chamas não pré-misturadas. Assim, na literatura, encontram-se diversas técnicas para medição do comprimento visível de chama. O comprimento de chamas de difusão foi estudado por diferentes autores, porém, o método mais comum que tem sido usado para estimar esse parâmetro é baseado em fotografias e filmagens de longa exposição.

De acordo com Chamberlin e Rose, 1948, na tentativa de descrever o comportamento visível de chamas usou o método fotográfico e gravações de vídeos com tempo de exposição 1/55 s a uma taxa de 32 *frames* por segundo. A análise das imagens foi realizada pela projeção do vídeo numa folha de papel com um sistema de coordenadas.

Zukoski et al., 1981, estabeleceram uma nova técnica de medir o comprimento visível de chama, que leva em consideração o fenômeno da intermitência. Define-se a intermitência como a fração de tempo que a chama ocupa em um dado lugar geométrico no espaço. Parte da chama luminosa é vista fora do envelope da pluma formada, devido a flutuações instáveis na sua extremidade. Com isso, formatos sucessivos da chama obtidos em vídeo foram utilizados para determinação do seu comprimento visível.

Zhang, 2014, realizou experimentos em condições de microgravidade e gravidade terrestre com objetivo de avaliar os efeitos de velocidade do *coflow* no comprimento visível de chama e diâmetro máximo da chama, oscilação, cor e perda radiativa. Os resultados obtidos apontaram que as características das chamas em microgravidade são significativamente afetadas pela velocidade do ar no *coflow*, enquanto que para as chamas em gravidade terrestre esse efeito é mínimo. O aumento de velocidade do *coflow* foi acompanhado com uma diminuição do diâmetro da chama, e essa, na condição de microgravidade, não apresentou oscilação e diminuição da amplitude. Por outro lado, os autores verificaram que o tempo de residência para fuligem reduziu com o aumento da velocidade do *coflow* nas chamas em microgravidade.

Aboje et al., 2015, realizaram um estudo numérico e experimental de chama de metano e propano em que foram comparadas as seguintes variáveis: comprimento visível de chama, temperatura, concentrações das espécies químicas (NO_x e CO) e efeitos da espessura do bocal do combustível no levantamento da chama. Os resultados obtidos por esses autores mostraram que, por um lado, a chama de propano é mais longa e possui menor temperatura máxima devido à concentração de fuligem e, por outro lado, o maior índice de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) foi encontrado para a chama de metano. Ainda, de acordo com Aboje et al., 2015, a solução numérica apresentou maior índice de monóxido de carbono (CO) para a chama de metano, enquanto os dados experimentais apontaram um índice maior para a chama de propano e, quanto ao parâmetro de levantamento da chama, o maior valor foi observado nas chamas de metano.

Zhang et al., 2016, sugeriram um modelo matemático para estimar o volume da chama baseado no seu comprimento visível. Neste procedimento, uma câmera digital foi usada para capturar as imagens com uma qualidade de 3 Mpx. Desta forma, as imagens foram extraídas mediante um vídeo de aproximadamente 20 segundos, com taxa de 25 *frames* por segundo. As imagens foram processadas digitalmente utilizando a técnica desenvolvida por Otsu, 1979,

onde o critério realizado para prever o comprimento e a largura da chama foi mediante a técnica apresentada por Orloff et al., 1981.

Brzustowski et al., 1975 e Tsue et al., 2000, na tentativa de descrever a trajetória de chamas de propano, observaram um comportamento de transição do comprimento visível da trajetória da chama em que, no primeiro momento, diminuía significativamente para um valor mínimo e, em seguida, teve acréscimo com o aumento da velocidade do vento cruzado em uma dada vazão de combustível. Fairweather et al., 1991, sugeriram uma correlação para prever a trajetória e o comprimento de chama, sendo que a correlação proposta pelos autores, mostrou uma razoável concordância quando comparados com os dados experimentais, utilizando o gás natural como combustível. Birch et al., 1989, propuseram um modelo fenomenológico para prever o tamanho da chama de baixa velocidade de jato de combustível, sendo a mesma, diluída com gás inerte em vento cruzado, os resultados mostraram que a estrutura de chama foi afetada pela diluição.

Broadwell e Breidenthal, 1982, desenvolveram um modelo semiempírico para prever o comprimento visível de chama na direção do vento cruzado por meio de análise de leis de escala, usando um sistema líquido com um túnel de água. Kalghatgi, 1983, estudou a forma e o tamanho de uma chama de difusão de jatos de hidrocarbonetos em vento cruzado e correlacionou empiricamente o comprimento de chama na direção do jato com a razão da velocidade do vento cruzado e do jato de combustível (U_{∞}/U_j), assumindo o corpo da chama como um tronco de cone. Karagozian, 1986, propôs um modelo analítico para prever a variação do comprimento total da trajetória da chama considerando a mudança do arrasto com o aumento do vento cruzado. Brzustowski, 1976, também caracterizou os comportamentos de chamas por uma análise de escalonamento simplificada.

Por sua vez, Kostiuk et al., 2000, mediram o comprimento visível de chama com vento cruzado de 1,0 m/s, a partir de uma chama luminosa de propano como combustível. Durante o procedimento de captura de imagens, foi usada uma câmera de vídeo com resolução de 640×480 pixels e digitalizada por uma placa de vídeo de computador de 10 bits. A câmera foi colocada perpendicularmente ao fluxo de ar para produzir um campo de visão no plano vertical do eixo do jato de $1,8 \times 1,3$ m, o que resultou numa resolução de pixels de 2,8 mm na horizontal e de 5,6 mm na vertical. Dependendo da luz disponível, uma velocidade do obturador de 1/500 s ou 1/1000 s foi usada para coletar 200 imagens instantâneas de chama durante 2,5 minutos. Assim, o critério utilizado para definir o comprimento de chama foi dado pela distância do

centro da saída do queimador até a ponta do contorno de 10% (ponto da curvatura máxima naquele contorno).

Majeski et al., 2004 e Wang et al., 2016, determinaram o comprimento visível de chama pela extração de diversos frames de 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 naquele local. Majeski et al., 2004, definiram o comprimento visível de chama sendo a distância da linha transversal entre a base da chama e a ponta do contorno de 10% de probabilidade. Wang et al., 2015 e Wang et al., 2016 utilizaram a ponta do contorno de 50% de probabilidade de ocorrência para estimar o comprimento visível de chama.

Wohl et al., 1949, por intermédio de duas técnicas visuais de medição que permitiram a analisar o efeito da turbulência sobre chamas difusivas, utilizaram imagens fotográficas para medir o comprimento visível de chama, enquanto que imagens produzidas por sombra foram usadas para analisar a estrutura interna da turbulência na base da chama. Pois neste estudo, os autores, não disponibilizaram os parâmetros fotográficos utilizados. Hottel, 1953, utilizou os dados experimentais fornecidos pelos autores anteriores para propor correlações em função das propriedades físicas da chama.

Santos e Costa, 2005, pesquisaram sobre chamas de difusão de propano e etileno em um tubo reto em ar quiescente, usando técnicas fotográficas a fim de adquirir imagens diretas e determinar o comprimento visível de chamas. Nesse estudo foram utilizados números de Reynolds ≥ 8000 , cinco fotografias foram tiradas e, para números de Reynolds < 8000 , foram tiradas três fotografias. Foram definidos os parâmetros óticos com tempo de exposição de 5 segundos e o comprimento visível de chama foi medido para cada fotografia com auxílio de um software de processamento de imagens e, por fim, calculou-se o valor médio dos mesmos. Para além do método fotográfico, Abu-Gharbieh et al., 2001, propuseram a técnica de Fluorescência Induzida por Plano de Luz Laser (PLIF). Este método rastreia a frente de chama por meio da captura da fluorescência emitida pelos radicais químicos produzidos na zona de reação, permitindo mapear a região estequiométrica.

Quezada, 2017, propôs que o comprimento visível de chamas difusivas turbulentas e diluídas com dióxido de CO_2 e carbono sem efeito do vento cruzado seja determinado a partir da média de 300 imagens instantâneas, em que cada medição é definida como a distância entre o

ponto mais alto da chama do espectro visível e o plano paralelo à saída de combustível no queimador. Experimentos foram conduzidos nas condições de 1 atm e 25 °C, os resultados mostraram que o comprimento visível de chama aumenta com o aumento da vazão de combustível e diminui com o aumento da diluição de CO₂ [Quezada, 2017].

Brzustowski et al., 1975, estudaram o comprimento visível de chamas difusivas turbulentas de diversos gases com vento cruzado. Os experimentos foram conduzidos em um túnel de vento de circuito aberto com chamas de hidrogênio, metano, propano, butano, etano e benzeno. A razão de quantidade de movimento entre os jatos se manteve na faixa de 30 a 80, enquanto o diâmetro do queimador utilizado foi de 5 mm.

No estudo, os autores observaram que a correlação proposta por Pratte e Baines, 1967, sobre a trajetória de jatos frios de hidrocarbonetos, teve concordância com seus dados experimentais. Além disso, os autores propuseram estudos sobre efeitos de escala onde os experimentos de campo fossem realizados em escala real (*flares*). Os resultados se mostraram satisfatórios quando aplicado o modelo de engenharia para a estimativa do fluxo de calor radiante (modelo de fonte pontual – que simplifica a chama como sendo uma única fonte radiativa localizada na posição central da trajetória da chama).

Brzustowski, 1976, apresentou um método orientado ao projeto de *flares* para estimar o formato e tamanho de chamas de hidrocarbonetos em vento cruzado, baseado em correlações de jatos frios de combustível, compilando todo conhecimento e tecnologia desenvolvida na época. Brzustowski, 1977, propôs um modelo teórico para estimar o comprimento visível de chamas turbulentas difusivas de hidrocarbonetos em vento cruzado através de equações de transporte (continuidade das espécies químicas em reação, conservação de energia e conservação de quantidade de movimento) considerando as variações em diversos parâmetros aerodinâmicos. Os resultados apresentados tiveram boa aceitação quando comparados com os dados experimentais.

Através dos resultados, duas tendências gerais foram observadas: o comprimento de chama aumenta inicialmente com a velocidade do ar para um máximo local e, em seguida, diminui com o aumento da velocidade do ar. O principal mecanismo para aumentar o comprimento de chama é dado pelo arrastamento de ar para a chama. No ponto de vista estequiométrico da combustão de hidrocarbonetos, uma considerável massa de ar e sua razão de quantidade de movimento horizontal devem ser arrastados para a combustão ocorrer. Como resultado, a chama visível é projetada a jusante, isto é, quanto mais rápida a velocidade de ar,

mais a chama é alongada e, enquanto ocorre a reação, o comprimento visível de chama se torna mais longo.

Em estudos desenvolvidos por Wang et al., 2015, sobre evolução do comportamento visível de chamas turbulentas difusivas de propano em vento cruzado, em que os experimentos foram conduzidos com variações no diâmetro do queimador, bem como a velocidade de vento cruzado e a pressão atmosférica (64 e 100 kPa). Os resultados mostraram que houve diminuição do comprimento visível de chama com o incremento tanto do vento cruzado quanto da pressão atmosférica. Quanto ao incremento do diâmetro do queimador, verificou-se aumento do comprimento visível de chama. Por fim, foi proposta uma correlação entre o comprimento visível de chama e os parâmetros variados nos testes.

Por sua vez, Hu et al., 2017, estudou o comportamento de jatos de chamas turbulentas em vento cruzado, onde estabeleceram uma condição crítica (isto é, a velocidade crítica do ar em *crossflow*) para a ocorrência de *downwash* da chama, assim como a evolução do comprimento visível de chama descendente para várias velocidades de saída de combustível. A evolução do comprimento visível de chama foi dada com diâmetros diferentes de queimadores (8, 10, 13 e 15 mm), o propano foi usado como combustível e a velocidade de jato de combustível na faixa de 0,38 a 2,42 m/s e a velocidade do vento cruzado na faixa de 0 a 2,6 m/s. Os resultados experimentais mostraram que o comprimento de chama aumentou com o aumento da velocidade do vento cruzado para uma dada velocidade de saída do jato de combustível [Hu et al., 2017]. Ainda, os mesmos autores propuseram uma correlação a qual demonstrou caracterizar bem o comprimento de chama em termos de diâmetro interno do bocal do queimador, vazão mássica do combustível e a razão de quantidade de movimento entre os jatos.

Hu et al., 2018, investigaram experimentalmente a evolução não-monótona, bem como o comprimento horizontal de chamas de difusão turbulentas sujeitas a vento cruzado. Neste estudo, foram usados quatro diâmetros diferentes de bocal de queimadores (8, 10, 15 e 20 cm). O propano foi usado como combustível e a velocidade de vento cruzado na faixa de 0 m/s a 6,0 m/s, os resultados mostraram que a base da extensão da chama e a extensão horizontal da chama aumentam primeiro com o incremento da velocidade do vento cruzado numa faixa relativamente baixa de jato de combustível. Ainda, Hu et al., 2018, constataram que, na condição crítica do *crossflow*, ambas as extensões da chama diminuem com o incremento da velocidade do *crossflow*.

Por outro lado, a inclinação da chama é, usualmente, representada pelo ângulo determinado a partir da linha transversal que corresponde ao comprimento de chama e a linha correspondente a horizontal da base da chama. Brzustowski, 1976 e Kalghatgi, 1983, verificaram que, aumentando a velocidade do combustível em proporções moderadas de vento cruzado o ângulo de inclinação de chamas turbulentas, aumenta gradualmente até atingir o valor máximo de 90 graus, estando a chama na posição vertical. Também averiguaram que, diferentemente do comprimento visível de chama, o ângulo de inclinação da chama independe do diâmetro do bocal do queimador, dependendo apenas da relação entre as velocidades do jato de combustível e do vento cruzado.

2.2.2 Altura de levantamento e extinção da chama

Para uma aplicação específica, o projetista de sistemas de combustão precisa analisar diversos aspectos tais como: forma, tamanho e estabilidade da chama. A compreensão dos mecanismos de estabilidade de chamas de difusão é de extrema importância para o dimensionamento de queimadores industriais e/ou substituição de gás combustível em queimadores existentes. Na atualidade, os projetos destes instrumentos são baseados em resultados experimentais para determinadas condições de operação. Todavia, quando se deseja alterar vazão, temperatura, combustível, entre outras condições, enfrenta-se a ausência de correlações que prevejam características de instabilidades.

Para qualquer velocidade de ar, existe uma velocidade de combustível ideal para manter a chama estável. Ou seja, em uma velocidade de jato de combustível extremamente baixa, a chama permanecerá ancorada (*attached*) no bocal do queimador. Aumentando a velocidade de saída do jato, a chama levanta e estabiliza em uma posição a jusante do bocal, a distância entre a borda do queimador e a base da chama levantada é denominada altura de levantamento (*lift-off height*). A altura de levantamento aumenta à medida que é incrementada a velocidade do jato do combustível até que, ao exceder um valor de altura máxima, neste momento a chama se extingue (*blow-out*) [Peters e Williams, 2004].

Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1966, propuseram o primeiro trabalho sobre chamas com altura de levantamento no bocal do queimador, com a hipótese básica de que a chama levantada se estabiliza em uma posição, a uma dada condição, a partir do bocal do queimador, tal que a velocidade de escoamento próxima à periferia do jato (em uma dada distância radial na qual a concentração do gás no ar esteja entre os limites de flamibilidade) é igual à velocidade

da chama turbulenta de pré-mistura estequiométrica de ar e gás. A velocidade máxima de chama turbulenta depende da velocidade máxima de chama laminar e de parâmetros locais de turbulência, tais como, a intensidade das flutuações das velocidades e comprimento das estruturas turbulentas (vórtices). Assim, com base os estudos relacionados sobre as medições de concentração, velocidade e intensidade de turbulência em um jato livre de metano, os autores observaram os seguintes fenômenos:

- a) a base da chama levanta e se estabiliza num círculo de raio r , pois nesta região ocorre uma pré-mistura de ar e gás e as concentrações estão entre os limites de flamabilidade;
- b) na região em que a base da chama se estabiliza, o escoamento é turbulento.

Contudo, com o incremento da velocidade do jato de combustível, a altura de levantamento atinge uma posição na qual a velocidade local do jato aumenta mais rapidamente do que a velocidade local da chama turbulenta e, conseqüentemente, a combustão não pode ser sustentada, pois, nesta condição, ocorre a extinção da chama devido à diferença dessas velocidades.

Kalghatgi, 1981, realizou um estudo experimental de estabilidade e extinção da chama. Neste estudo, jatos de chamas de difusão em ar baseado na abordagem de Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1966, onde foi mostrado que a extinção da chama ocorre devido ao desequilíbrio entre a velocidade local do jato e a velocidade de chama turbulenta (estabelecida em uma dada posição). A partir de uma série de análises teóricas do fenômeno, verificou-se que a velocidade de saída do bocal do queimador que a leva extinção da chama, depende da distância axial a partir da saída do bocal do queimador na qual a concentração do combustível atinge o valor estequiométrico. Segundo Kalghatgi, 1981, essa distância independe da velocidade de saída do gás do bocal do queimador.

Kalghatgi, 1984, relatou sobre o modelo proposto por Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1966, o qual descreve que a mistura ar-combustível seja totalmente pré-misturada na base onde ocorre o levantamento de chama e apresenta um estudo sistemático dos fatores que afetam a altura de levantamento da chama, (como a distância entre o plano de saída do queimador e a base da chama levantada). De acordo com Kalghatgi, 1984, quase todos os resultados publicados anteriormente sobre a altura de levantamento de chama, ocorreram por meio de utilização de combustível metano, porém, no estudo realizado pelo autor, apresentou resultados

para chamas de propano, hidrogênio e etileno, além de metano, usando diâmetros de bocais de queimadores entre 1,08 mm e 10,1 mm. Para o hidrogênio, os resultados foram estendidos para o regime em que a vazão de combustível na saída do bocal do queimador é bloqueado. Assim Kalghatgi, 1984, identificou agrupamentos adimensionais de vários parâmetros do escoamento e do gás que influenciam na altura de levantamento da chama, encontrando uma única curva empírica em termos destes agrupamentos adimensionais, descrevendo todas as suas observações experimentais. Com base nos resultados apresentados pelo autor, constatou-se que a altura de levantamento da chama:

- a) independem do diâmetro do bocal do queimador;
- b) aumentam linearmente com a velocidade descarga dos gases exceto perto do limite de extinção da chama (onde a velocidade de descarga do gás combustível é igual à velocidade de extinção da chama), pois neste caso há o surgimento de uma região de instabilidade da chama.

Kalghatgi, 1984, relatou existir um consenso razoável entre os seus resultados para o metano e os obtidos por Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1966, pois as alturas de levantamento de chama para o metano e propano medidos no seu trabalho são, em geral, maiores do que as obtidas por Annushkin e Sverdlov, 1979. Entretanto, Kalghatgi, 1984, percebeu que os resultados experimentais de altura de levantamento de chama em relação à velocidade, para todos os combustíveis, poderiam ser interpolados em uma única curva empírica em todos os agrupamentos adimensionais. Assim, referido o autor concluiu que, a altura de levantamento de chamas de difusão turbulenta independe do diâmetro do bocal do queimador e das propriedades difusivas do gás combustível, como a difusividade mássica e térmica.

Miake-Lye e Hammer, 1988, mediram experimentalmente a altura de levantamento de jatos de metano e etileno, ambos diluídos com ar, e concluíram, assim como Kalghatgi, 1984, que a altura de levantamento da chama aumenta com o acréscimo da velocidade de descarga do jato e/ou com a inserção de diluição do ar na corrente dos combustíveis. Os autores desenvolveram um modelo baseado na taxa de deformação, devido aos movimentos de grande escala, em uma chama levantada proveniente de um jato simples turbulento axissimétrico, para predizer uma relação linear entre a altura de levantamento e a velocidade de saída do jato.

Segundo Miake-Lye e Hammer, 1988, os resultados deste modelo mostraram estar de acordo com as alturas de levantamentos previamente medidas para vários combustíveis puros.

Dahm e Dibble, 1988, realizaram experimentos em uma instalação composta por um túnel de vento vertical de seção transversal quadrada (0,3m x 0,3m x 2m) e um jato axissimétrico de combustível. Dois bocais de queimadores foram usados: um cujo diâmetro interno era 3,3 mm e o outro de 5,2 mm. O metano e propano foram usados como combustíveis e as velocidades do escoamento no túnel e no bocal foram calculadas por meio de medidores de fluxo de massa. Os pesquisadores, observaram que, embora a velocidade de escoamento externo seja pequena ($U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$) em comparação com a velocidade de descarga no bocal do queimador, as velocidades na ponta da chama e de extinção da chama decaem consideravelmente em relação à condição de um jato simples de gás em ar parado. Além disso, perceberam que quando o número de Damkohler de 4,3 a velocidade de descarga do combustível diminui drasticamente com o aumento da velocidade do escoamento externo, mesmo quando a velocidade é relativamente baixa. A partir dos resultados, os autores argumentaram que a taxa de mistura – entre o ar, os produtos de combustão e o combustível – do escoamento pode ser o mecanismo controlador do fenômeno de extinção de chamas de difusão turbulenta.

Karbassi, 1997, investigou os limites de estabilidade de jatos de chamas de difusão concorrentes com um fluido oxidante escoando em um combustor vertical de aço aberto para a atmosfera, de seção transversal quadrada ($127 \times 127 \text{ mm}^2$) e altura de 1300 mm. Também realizou estudos experimentais e analíticos, apresentando quatro limites de estabilidade, entre eles: levantamento, reinserção, extinção de chamas levantadas e extinção de chamas ancoradas no bocal. Segundo Karbassi, 1997, quando a velocidade do fluxo concorrente é baixa, a extinção da chama ocorre em chamas levantadas, e para velocidades altas de fluxo concorrente, o apagamento da chama pode ocorrer em chamas ancoradas no bocal do queimador. Deste modo, definiu o limite da velocidade do fluxo concorrente como a velocidade mínima deste fluxo à qual a extinção de chamas anexadas no bocal do queimador pode ocorrer. Portanto, no trabalho descrito por Karbassi, 1997, refere-se à velocidade máxima do jato que leva a extinção da chama.

No mesmo ano, o mesmo autor realizou diversos experimentos com o intuito de obter curvas de estabilidade para diferentes combustíveis gasosos puros (metano, propano, etileno e hidrogênio) e misturados, e os efeitos da geometria do bocal do queimador e da adição de gás inerte no jato de combustível e no fluxo concorrente ao jato nos limites de estabilidade, no

estudo, foram utilizados dois bocais de queimadores com diâmetros variados (2,0 mm; 1,82 mm; 2,82 mm; 1,33 mm), a partir dos experimentos, verificou que:

- a) a velocidade do fluxo concorrente afeta significativamente a estabilidade da chama. De acordo a magnitude desta velocidade, identificou três diferentes regiões: em baixas velocidades do fluxo concorrente (região I) se observa apenas a extinção de chamas levantadas; para velocidades elevadas (região III) ocorre apenas a extinção de chamas anexadas (também denominadas como extinção de chama). Para valores moderados (região II), as duas regiões definidas anteriormente são observadas. Nesta última (região II), verifica-se que as chamas levantadas são menos estáveis que as ancoradas, logo, as chamas levantadas devem ser evitadas;
- b) reduzindo a velocidade de descarga do jato, uma chama que se encontra levantada do bocal do queimador pode se reinserir a este, pois pode retornar à condição de chama anexada no bocal de descarga do jato;
- c) a forma do bocal do queimador tem menor efeito em chamas levantadas do que em chamas anexadas no bocal do queimador, isso se dá devido à posição da região de estabilização da chama levantada, que está localizada mais a jusante do bocal do queimador. Vale ressaltar que os escoamentos próximos ao bocal do queimador são responsáveis pela estabilização das chamas anexadas a este (bocal do queimador), logo, o efeito da variação da configuração do bocal nos limites de deslocamento e de extinção destas chamas (anexadas) é muito significativo do que nas chamas levantadas;
- d) os limites de estabilidade de chamas levantadas aumentam com o diâmetro do bocal do queimador, e os limites de chamas anexadas diminuem com o mesmo;
- e) reduzindo-se a velocidade do fluxo concorrente a zero, as velocidades de extinção dos gases estudados correspondem aos resultados obtidos por Kalghatgi, 1981;
- f) o limite de extinção (velocidade de descarga do jato de combustível) de chamas levantadas com fluxo concorrente foi maior para o hidrogênio, seguido pelo etileno, propano e metano;
- g) a adição de nitrogênio, dióxido de carbono e hélio em um jato de metano diminuem o limite de extinção, e a adição de hidrogênio aumenta este limite. Este fenômeno ocorre, pois estes inertes alteram as propriedades do jato, como a massa específica, a

viscosidade dinâmica e a velocidade de chama laminar, além da fração mássica de combustível;

- h) a adição de gás inerte (nitrogênio e dióxido de carbono) no fluxo de ar concorrente tem maior efeito (redução) no limite de extinção do jato do que quando diluídos neste, isto ocorre devido ao arrastamento de grande parte da mistura ar-inerte pelo jato no local de estabilização da chama antes da extinção;
- i) a adição de combustível auxiliar (metano, propano, etileno e hidrogênio) no fluxo de ar concorrente aumenta o limite de extinção.

Yoo e Shin, 1994, Lawal et al., 2013, Chamberlain et al., 2009, identificaram uma região de baixa pressão resultante do bloqueio do tubo que arrasta grande parte de combustível para região de queima. À medida que a velocidade do *crossflow* aumenta até um dado valor crítico, o efeito de arrastamento se torna mais forte e a chama se afasta da direção vertical. Os mesmos autores constataram que quando esse efeito de arrastamento supera a razão de quantidade de movimento entre os jatos, a chama é puxada para o rastro do queimador, os resultados mostraram que a altura de levantamento aumenta com o incremento da velocidade de saída do jato do combustível, conseqüentemente, a altura de levantamento é proporcional ao comprimento de chama, o qual aumenta com a vazão de combustível.

Alguns autores que analisaram este tipo de chama incluíram a altura de levantamento no comprimento visível de chama. Wang et al., 2016, estudaram a evolução de chamas difusivas e turbulentas de hidrocarbonetos com vento cruzado e analisaram a linha da trajetória da chama desde o início da borda do queimador até o limite da propagação da chama. Para chamas sujeitas a vento cruzado, contudo, poucos estudos foram desenvolvidos na literatura com o foco na altura de levantamento e sua inclinação. Alguns autores que analisaram este tipo de chama incluíram a altura de levantamento no comprimento visível de chama.

2.3 Modelos algébricos para previsão da geometria da chama

Majeski et al., 2004, definiu o tamanho da chama de propano de acordo com o tempo necessário para que a quantidade estequiométrica de oxigênio se difunda e reaja com o combustível. Porém, depois, os efeitos de alongamento da chama são adicionados devido ao escoamento do *crossflow* e da diluição de CO₂.

Esses pesquisadores modelaram a chama como uma superfície de um cilindro, com comprimento de chama, L_f e o diâmetro do bocal do queimador d_s , considerando que não existiria queima nas extremidades circulares. Contudo, na fina camada cilíndrica, existe uma mistura estequiométrica com combustível na parte interna e oxidante na parte externa. Assumindo, ainda, que o formato do cilindro o qual será uma função das condições de escoamento, permanece geometricamente similar. No entanto, $d_s = K_G L_f$, 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 do comprimento de chama, L_f , somente. Como explicita a Equação 2.2:

$$A_f = \pi d_s L_f = \pi K_G L_f^2 \quad (2.2)$$

A modelagem da superfície da chama visível pode ser abordada considerando o problema análogo de jato frio. É levado em conta 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 vazão mássica, descrita por sua massa específica, ρ_j , e sua velocidade, U_j , na saída do queimador de diâmetro, d_s . Para uma chama em regime permanente, o parâmetro, \dot{m}''_{o_2} , é introduzido, representando a taxa média de oxigênio fornecida por unidade de área da superfície da chama. O fornecimento total de oxigênio para a chama é $\dot{m}_{o_2} = \int \dot{m}''_{o_2} dA$. 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 na Equação 2.3:

$$\int \dot{m}''_{o_2} dA = (\pi/4) K_S \rho_j U_j d_s^2 \quad (2.3)$$

onde o lado esquerdo representa a taxa total de oxigênio consumido na superfície da chama e o lado direito é a vazão total de oxigênio necessária baseada na vazão de fornecimento de

combustível. O parâmetro K_S é a razão estequiométrica da massa de oxigênio para o combustível, conforme expressa a Equação 2.4:

$$K_S = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_J} \quad (2.4)$$

onde \dot{m}_J é a vazão mássica de fornecimento de combustível no queimador.

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

Desse modo, a Equação 2.3 pode ser rearranjada em função do comprimento de chama, resultante na seguinte Equação 2.5:

$$L_f = K_f (\rho_j U_j)^{1/2} d_s \quad (2.5)$$

onde, de acordo com a Equação 2.6:

$$K_f^2 = \frac{K_S}{4K_G \dot{m}''_{O_2}} \quad (2.6)$$

Esta Equação 2.6 combina todas as constantes de um determinado combustível em apenas uma única constante. Nesta análise de balanço de massa, é assumido também que todo o combustível é consumido pela chama. Segundo Majeski et al., 2004, o modelo não considera a quantidade de movimento intrínseca 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 reagentes e produtos de combustão durante o tempo necessário para a queima. Além disso, o alongamento da chama é acompanhado por uma diminuição em seu diâmetro.

A vazão mássica média de oxigênio na superfície da chama é definida pela difusão, \dot{m}''_{O_2} , portanto não é afetada pelo escoamento transversal de ar. Foi definido anteriormente que para certa taxa de fornecimento de combustível, a área da chama deve permanecer constante. Relembrando que o fluxo de oxigênio na superfície da chama é constante, uma quantidade de tempo fixa, τ_M , é necessária para que o oxigênio na superfície

difunda e reaja com todo 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 se move na velocidade do *crossflow*. Durante o tempo de difusão do ar no combustível, τ_M , o combustível irá adveccionar certa distância na direção do *crossflow* proporcional a $\tau_M U_\infty$.

As hipóteses até aqui feitas em relação ao formato e a direção da chama exigem que variações de comprimento de chama sejam diretamente proporcionais a U_∞ . A constante de proporcionalidade que aparece como uma escala de tempo é dada como apresenta a Equação 2.7:

$$K_U \equiv \frac{\partial L_f}{\partial U_\infty} \quad (2.7)$$

O efeito de alongamento é, então, adicionado ao caso quiescente da Equação 2.5 e o comprimento de chama previsto, incluindo o efeito do *crossflow*. Para enfatizar os dois princípios nos quais o modelo é baseado – a preservação do formato da chama e a escala de tempo de combustão limitada pela difusão – a Equação 2.5 pode ser rearranjada como na seguinte Equação 2.8:

$$\frac{L_f}{U_\infty} = K_f (\rho_j U_j)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty} + K_U \quad (2.8)$$

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

De acordo com Majeski et al., 2004, o efeito da diluição de gás inerte no combustível também é considerado neste modelo. A diluição altera apenas a escala do tempo com que o combustível se mistura com a quantidade necessária de ar e queime, isto é, o tempo necessário para que a partícula de fluido viaje o comprimento de chama. A magnitude deste efeito pode ser determinada reconsiderando a constante estequiométrica, K_S , da Equação 2.4, em termos da concentração de combustível na mistura, como apresentada na Equação 2.9:

$$K_S = \frac{\dot{m}_{O_2}}{C_j \dot{m}_{j_i}} \quad (2.9)$$

onde C_j é a concentração mássica de combustível no jato, expressa pela Equação 2.10:

$$C_J = \frac{\rho_{Ji} \dot{V}_{Ji}}{\rho_j \dot{V}_j} \quad (2.10)$$

onde \dot{m}_j é a vazão mássica total do jato, ρ_{Ji} e \dot{V}_{Ji} são a massa específica e a vazão volumétrica do jato, respectivamente, e ρ_j e \dot{V}_j são a massa específica e a vazão volumétrica do combustível. Vale ressaltar que os autores utilizaram como combustível propano (1,9 kg/m³) e CO₂ como inerte (1,8 kg/m³), em que os valores das massas específicas são semelhantes, tornando a constante, C_J , na prática, uma função volumétrica (diferente do presente estudo que considera gás natural, com massa específica de aproximadamente 0,8 kg/m³). A partir da Equação 2.8 em que $L_f \propto K_S^{1/2}$, espera-se que a escala de tempo também varie em relação a $C_J^{1/2}$, sendo assim, a Equação 2.8 torna-se:

$$\left(\frac{1}{C_J}\right)^{1/2} \frac{L_f}{U_\infty} = K_f (\rho_j U_j)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty} + K_U \quad (2.11)$$

onde C_J é a concentração mássica de combustível na mistura, ρ_j é a massa específica do combustível, U_j é a velocidade do jato do combustível, d_s é o diâmetro do queimador, K_f é uma constante característica das propriedades do combustível, K_U é uma constante de proporcionalidade entre o alongamento da chama e a velocidade do *crossflow*. Apesar de esse modelo apresentar ótimos resultados para estes tipos de chamas, a grande dificuldade está em estimar o parâmetro K_f , que afeta diretamente no comportamento da chama.

Hawthorne et al., 1949, estabeleceram uma relação entre o comprimento visível de chama e o diâmetro do bocal do queimador. A Equação 2.12 descreve o comprimento visível de chama laminar.

$$L_f \approx \frac{d_s^2 U_j}{D_{ab}} \quad (2.12)$$

onde L_f é o comprimento de chama, D_{ab} é o coeficiente de difusão molecular, d_s é o diâmetro do bocal do queimador e U_j é a velocidade do jato de combustível.

Por sua vez, Lewis e Von Elbe, 1987, estudaram misturas de chamas laminares e verificaram que as mesmas são puramente controladas pelo processo de difusão molecular.

Portanto, constataram que o coeficiente de difusão molecular não possui nenhuma dependência com o diâmetro do queimador e concluíram que o comprimento de chama (vertical) depende somente da vazão volumétrica estabelecido pelo produto ($d_s^2 U_j$). Lewis e Von Elbe, 1987, realizaram outros estudos com chamas turbulentas, nestas condições o D_{ab} passa a ser definida como difusividade turbulenta, estabelecida pela mistura turbulenta que depende do movimento microscópico das partículas do fluido. Essas observações permitiram simplificar a Equação 2.12, para a Equação 2.13 que descreve o comprimento visível de chamas turbulentas.

$$L_f \approx \frac{d_s^2 U_j}{D_{ab}} \approx d_s \quad (2.13)$$

A fim de estabelecer uma comparação para estimar o comprimento de chamas flutuantes, Brzustowski et al., 1975, comparou sua expressão com a proposta por Putnam e Speich, 1963, e os resultados mostraram concordância. Conforme a Equação 2.14:

$$\frac{L_f}{d_s} = 26 \left(\frac{U_j}{g d_s} \right)^{0,2} \quad (2.14)$$

Shore, 2006, realizou uma análise de regressão dos dados para estimar o comprimento de chama. Concluiu que o comprimento da chama medida na vertical é proporcional ao termo de liberação de calor do combustível (Q_j), e estabeleceu a expressão matemática, dada na Equação 2.15:

$$L_f = \frac{Q_j^{0,467}}{135} \quad (2.15)$$

Kalghatgi, 1983, estudou a forma e o tamanho de uma chama de difusão em jato de hidrocarbonetos com vento cruzado e correlacionou empiricamente o comprimento de chama na direção do jato com a relação da velocidade do vento cruzado e do jato de combustível (U_∞/U_j), assumindo o corpo da chama como um tronco de cone. O referido autor concluiu que, independentemente do combustível gasoso utilizado, é possível construir uma curva do comprimento visível de chama em função do parâmetro adimensional (razão de quantidade de movimento entre os jatos) para qualquer combustível gasoso em uma única curva, baseando

nas correlações propostas por Becker e Liang, 1978, para orientação vertical. Kalghatgi, 1983, propôs uma correlação para estimar o comprimento de chama difusiva com vento cruzado a partir de regressão de dados experimentais, conforme a Equação 2.16 expressa abaixo:

$$\frac{L_f}{d_s} = \left(\frac{MW_a}{MW_f} \right)^{0,5} \left(6 + \frac{2,35}{R} + 20R \right) \quad (2.16)$$

onde MW_a é o peso molecular do ar, MW_f é o peso molecular do combustível e R é a razão de momentos.

Leahey e Schroeder, 1990, identificaram possíveis erros na equação proposta por Kalghatgi, 1983, que afetaram os resultados das previsões feitas por Leahey e Schroeder, 1987. Leahey e Schroeder, 1990, propuseram mudanças na equação de Kalghatgi, 1983, reescrevendo-a como a Equação 2.17:

$$\frac{L_f}{d_s} = \left(\frac{MW_f}{MW_a} \right)^{0,5} \left(6 + \frac{2,35}{R} + 20R \right) \quad (2.17)$$

Leahey e Schroeder, 1987, apresentaram uma expressão algébrica para estimar o comprimento de chamas sujeitas a vento cruzado e compararam seus resultados experimentais com o modelo proposto por Kalghatgi, 1983. Porém, Leahey e Schroeder, 1987, concluíram que as chamas estudadas são controladas pela razão de momentos, como mostra a Equação 2.18:

$$\frac{L_f}{d_s} = \frac{5}{\beta} \left(\frac{1}{RM_{st}} \right)^{0,5} \quad (2.18)$$

onde β é definido como parâmetro de alongamento $\beta = 0,4 + 1,2R$, M_{st} é a relação da mistura estequiométrica e R é a razão de momentos.

Os resultados de Leahey e Schroeder, 1987, foram comparados com a expressão estabelecida por Beychok, 1979, conforme a Equação 2.19. Essa equação foi obtida a partir de regressão de dados experimentais obtidos a partir de *flares*.

$$L_f = 0,006Q_J^{0,470} \quad (2.19)$$

Após extensa análise do fenômeno de chamas difusivas com ou sem vento cruzado sobre os parâmetros que influenciam o comprimento de chama disponíveis na literatura, o estudo busca ajustar correlações para comparar os dados experimentais obtidos. Para isso, os modelos propostos por Majeski et al., 2004, Wang et al., 2015 e Hu et al., 2015, serviram de base para ajustar as correlações no presente estudo.

Hu et al., 2015, investigaram a evolução do comprimento visível de chamas difusivas de propano em *crossflow* sem adição de CO₂. A fim de validar seus estudos, Hu et al., 2015, propuseram um modelo para estimar o comprimento visível de chama, conforme a Equação 2.20:

$$\frac{L_f}{d_s} = 6 \left(\frac{\rho_J}{\rho_\infty} \right)^{0,5} + 2,35R + 20 \frac{\left(\frac{\rho_J}{\rho_\infty} \right)}{R} \quad (2.20)$$

onde ρ_J e ρ_∞ são as massas específicas do combustível e vento cruzado. A correlação empírica proposta por Wang et al., 2015 foi uma simplificação da Equação 2.20 do estudo de Hu et al., 2015 para previsão do comprimento visível de chama na pressão atmosférica (100 kPa). Assim, a correlação empírica é descrita pela Equação 2.21:

$$\frac{L_f}{d_s} = 13,3R^{0,55} \quad (2.21)$$

2.4 Radiação térmica

A radiação se difere dos outros dois mecanismos de transferência de calor (condução e convecção) na medida em que não exige a presença de um suporte material para ter lugar. A radiação se propaga sob forma de ondas eletromagnéticas. A frequência, ν , e o comprimento de onda, λ , das ondas eletromagnéticas no meio estão relacionados conforme a Equação 2.22.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.22)$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no meio. Toda matéria com temperatura acima de 0 K emite, continuamente, radiação térmica como resultado dos movimentos rotacionais e vibracionais de moléculas, átomos e elétrons de substância.

A Figura 2.2 ilustra o espectro eletromagnético que inclui, também, raios gama, raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, micro-ondas, ondas de rádio e radiação térmica, sendo este último o foco do presente estudo, o qual corresponde a comprimentos de onda na faixa de $0,1 \mu\text{m}$ até $100 \mu\text{m}$.

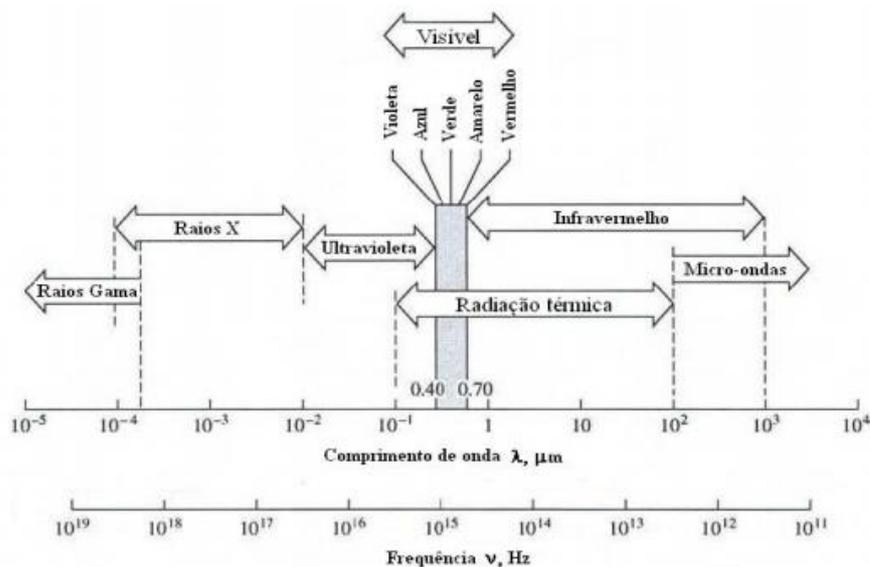


Figura 2.2 – Espectro da radiação eletromagnética [Adaptado de Incropera, 2008].

Em processos com elevadas temperaturas, na ordem de aproximadamente 10^3 K , a radiação térmica se torna o mecanismo dominante de transferência de calor, assim como ocorre em *flares* de refinarias, plataformas de petróleo, fornos industriais, entre outros. As chamas de hidrocarbonetos são constituídas por gases que emitem ou absorvem radiação, vale ressaltar que ambas as fontes (fuligem e por meio da emissão de bandas espectrais distintas de produtos quentes da combustão, com o vapor d'água e o CO_2) emitem, predominantemente, na região espectral do infravermelho, enquanto a emissão contínua de partículas quentes se estende para além do espectro visível, sendo responsável pela intensa luminosidade dessas chamas [Hankinson e Lowesmith, 2012].

Uma reação de combustão é constituída de compostos gasosos desde os reagentes até a formação dos produtos, a citar, metano (ou outro combustível), vapor d'água, CO_2 , monóxido de carbono e fuligem, os quais emitem e absorvem radiação térmica. Este processo ocorre a nível molecular visto que apresenta uma faixa espectral específica para os componentes gasosos participantes no processo de combustão. As chamas também emitem radiação térmica por meio da emissão contínua no espectro de partículas provenientes de fuligem, compostos de partículas sólidas em suspensão, dada numa ampla faixa de espectro de radiação [Miguel, 2015].

2.4.1 Fração de calor radiante

Markstein, 1984, estudou a relação entre a fração radiante e o comprimento visível de chama em chamas de metano controladas por empuxo. Concluiu que a fração radiante diminui com a diminuição do volume da chama e, além disso, com a adição de gás inerte na mistura do combustível, esse parâmetro tende a diminuir mantendo a potência constante.

Turns, 2000, realizaram um estudo comparativo das frações radiantes com chamas de metano, propano e etileno e chegaram à conclusão de que a fração radiante de metano é menor quando comparada às chamas de propano e de etileno. Desse modo, observou-se que o fluxo de calor por radiação a partir dos produtos gasosos da combustão (H_2O e CO_2) é mais importante para chamas com pouca formação de fuligem.

Estudos de Santos e Costa, 2005, determinaram a fração radiante a partir de formação de NO_x em chamas turbulentas não pré-misturadas de etileno, propano e metano, em diversas vazões e diâmetros internos. Esses estudos serviram para mostrar a dependência da fração radiante com o tempo de residência.

Hu et al., 2014, efetuaram medições experimentais de fluxo de calor radiante com chamas difusivas turbulentas controladas por empuxo em duas condições de pressão (baixa e atmosférica). O transdutor utilizado se encontrava na faixa espectral de $0,3 - 50 \mu m$ com ângulo de visão de 170° , sendo resfriado com água. Os autores concluíram que a fração radiante é afetada diretamente pela quantidade de fuligem.

Machado, 2015, estudou as chamas difusivas laminares de metano de potência entre 0,139 a 0,554 kW, sem efeito de vento cruzado e sob condições normais de 1 atm e $25^\circ C$. De acordo com Machado, 2015, os resultados sobre a radiação térmica mostraram que a adição de gás inerte não participante, como o nitrogênio, ao combustível inibe a formação de fuligem, provocando a redução da fração radiante associada à redução da formação de fuligem e à redução da temperatura da chama.

Wang et al., 2016, realizaram seus estudos com chamas laminares de metano com o intuito de determinar a fração radiante e, levando em consideração a geometria da chama nomeadamente, o volume da chama. Os experimentos foram realizados na pressão ambiente (100 kPa) e em baixa pressão (64 kPa). Os autores concluíram que o volume da chama é inversamente proporcional a pressão do ambiente, e que a fração radiante possui dependência com o volume da chama.

2.4.2 Modelo de Fonte Pontual Única (SPS)

Este modelo é considerado o mais simples para descrever o fluxo de radiação térmica incidente em um receptor. Ainda, o modelo considera que a chama pode ser aproximada por uma fonte pontual, posicionada na metade do comprimento visível de chama, e a radiação que atinge esse receptor é procedente desta fonte pontual conforme a ilustração na Figura 2.3.

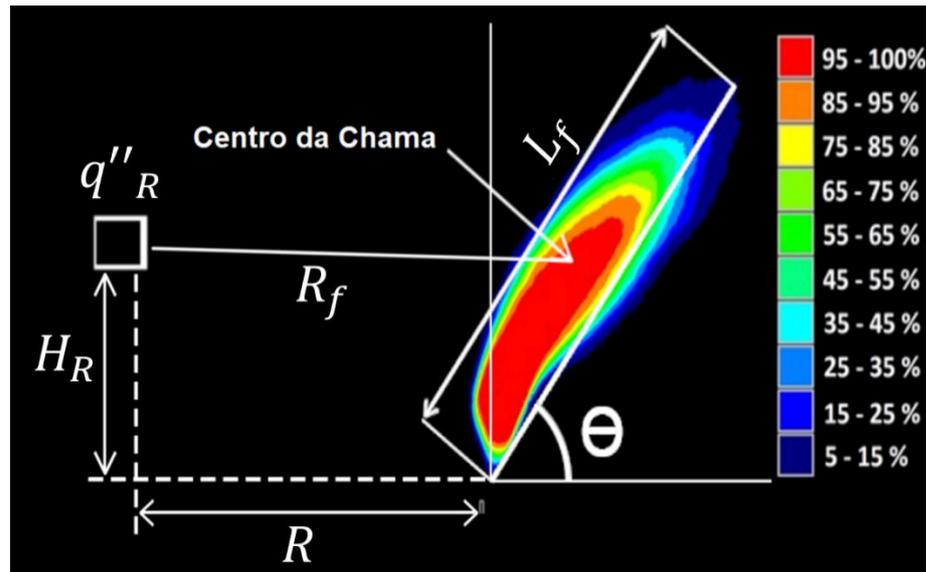


Figura 2.3 – Representação do modelo de fonte pontual [Adaptado de Hu et al., 2014].

A Equação 2.23 determina o fluxo radiante a partir do modelo da fonte pontual:

$$q''_R = \frac{X_r Q_J \tau_S}{4\pi R_f^2} \cos\theta \quad (2.23)$$

a partir da qual a fração radiante pode ser calculada como a Equação 2.24:

$$X_r = \frac{4\pi R_f^2 q''_R}{\dot{m}_j \Delta H_c} \quad (2.24)$$

onde X_r é a fração radiante, ΔH_c , energia por unidade de massa, Q_J é o calor total liberado pela reação de combustão, R_f é a distância entre o receptor e a fonte pontual, τ_S é a transmitância da atmosfera avaliada para a distância R_f (esse parâmetro leva em consideração as condições atmosféricas – composição e temperatura) e θ é o ângulo formado entre o percurso de R_f e o eixo normal com o plano do receptor.

O modelo apresentado desconsidera os efeitos do formato da chama neste caso, tornando-se simples a sua utilização. De acordo com Machado, 2015, o formato da chama é um fator que ganha relevância conforme é reduzida a distância entre a chama e o receptor, enquanto o aumento dessa distância faz com que a hipótese de fonte pontual de radiação seja válida. Becker e Liang, 1982, e Markstein, 1984, relataram que o modelo da fonte pontual deve ser utilizado para regiões distantes da chama, sendo adotada uma distância mínima de até $2L_f$ (sendo L_f o comprimento da chama), ou seja, não é aconselhável que este modelo seja aplicado para regiões próximas da chama. De acordo com Hankinson e Lowesmith, 2012, a transmitância pode ser considerada $\tau_s \approx 1$ para medições realizadas com distâncias de até 2 m.

2.5 Efeito da diluição do dióxido de carbono

Estudos recentes têm revelado que os efeitos de aditivos químicos na formação de fuligem em chamas podem ser bastante complexos, até mesmo quando este aditivo é um gás inerte. Vale ressaltar que a adição de CO_2 na corrente de mistura pode ocasionar grande influência no crescimento ou nos estágios de oxidação, alterando a estrutura da chama.

Detalhes de como o efeito de diluição do CO_2 interfere na posição e estabilização de chamas difusivas laminares são encontradas em Guo, 2010. A altura na qual a chama se estabiliza aumenta levemente com a diluição, sendo esse fenômeno explicado pela transferência de calor da base da chama para o restante do domínio e da alta taxa de dissipação dos escalares. Esse deslocamento da chama para posições elevadas se torna mais abrupto quando um determinado valor crítico de diluente é injetado nos reagentes.

Para Guo, 2010, dos mecanismos que influenciam este fenômeno, os efeitos de transporte das espécies e a transferência de calor por radiação (zona de reação na base da chama é fina) são desprezíveis, os efeitos químicos (adição de CO_2 altera as reações) possuem uma leve significância, os efeitos térmicos são pouco mais relevantes (o elevado calor específico da mistura reduz a temperatura da chama) e, por fim, o principal mecanismo é a diluição pela própria redução da concentração de reagentes. Ou seja, esses mecanismos citados acima fazem com que haja esse deslocamento da chama, pois tendem a reduzir a intensidade da combustão.

Turns et al., 1993, adicionaram nitrogênio na corrente de combustível e verificaram a redução no comprimento de chama quando comparado com a chama de combustível puro de mesma vazão. Esse fenômeno pode ser explicado devido à quantidade de combustível no meio reagente que é reduzida com o aumento da diluição.

Glassman, 1998, relatou que o efeito de diluentes inertes na formação de fuligem é coerente com a diminuição da pressão parcial dos reagentes precursores da fuligem, o que diminui a sua formação.

Johnson e Kostiuk, 2000, investigaram os efeitos de *crossflow* e de gases diluentes na eficiência de combustão de chamas difusivas turbulentas. Na pesquisa, os autores utilizaram misturas de gás natural com diluição de CO₂ e verificaram uma redução da eficiência de queima com o aumento da velocidade do *crossflow* e com aumento da fração de gás inerte na mistura. No estudo foi usado chamas de baixa vazão com razão de quantidade de movimento entre os jatos na faixa de ($R \leq 5$).

Erete et al., 2016, apresentaram um estudo sobre os efeitos da diluição com CO₂ na temperatura, composição da mistura e emissão em chamas turbulentas não pré-misturadas de metano/ar sem efeito de vento cruzado. Este estudo foi realizado variando a diluição de CO₂ e mantendo a vazão de combustível constante até chegar ao de extinção. Os resultados mostraram que a diluição aumenta o levantamento da chama e diminui o comprimento de chama, ainda, reduz a temperatura da chama e as concentrações de NO_x [Erete et al., 2016]. De acordo com os mesmos autores, a luminosidade diminui com o aumento da diluição. No mesmo estudo, Erere et al., 2016, concluíram que o aumento da diluição permitiu a diminuição da formação da fuligem o que possibilitou o aumento nas emissões de monóxido de carbono (CO) e a redução nas emissões de NO_x.

Quezada, 2017, pesquisou a estabilidade (geometria) e a emissão de radiação térmica de chamas difusivas turbulentas, com adição de diluição de CO₂ e GNV como combustíveis, e 7,55, 10,13, 13,15 e 16,55 mm de diâmetros de queimador. Os resultados obtidos pelo autor mostram que para a mesma vazão total, a adição de CO₂ ocasionou a redução do comprimento de chama, fração radiativa e, conseqüentemente, o volume da chama. Ao passo que, com o aumento do diâmetro do queimador, o comprimento de chama teve um crescimento exponencial.

Recentemente, Oliveira, 2017, estudou as propriedades geométricas e radiativas de chamas turbulentas difusivas de GNV como combustível com diluição de CO₂ em *crossflow* (0,5; 1,0 e 1,5 m/s). Os resultados mostraram que o comprimento de chama aumenta com o incremento da vazão do combustível, e com o aumento da diluição de CO₂ na mistura e de *crossflow*, verificou a redução do comprimento de chama.

A literatura apresenta poucos trabalhos envolvendo estudos sobre chamas difusivas em *crossflow* e sua aplicação em processos de combustão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção busca apresentar a metodologia utilizada para as medições da geometria e radiação de chamas difusivas tipo jato, a metodologia proposta se baseia em uma pesquisa na literatura sobre os principais processos existentes para determinar a geometria e o fluxo de calor radiante experimentais, assim como suas principais técnicas apresentadas.

Todo trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Combustão, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.1 Instalação experimental da geometria da chama

O presente estudo consiste na caracterização de chamas turbulentas difusivas sujeitas a fluxo cruzado do tipo jato, tendo como combustível o GNV. A Figura 3.1 ilustra a configuração da bancada experimental. Os cilindros de gás natural e de CO₂ são conectados por tubos e controladores eletrônicos de vazão volumétrica e estes, por sua vez, são conectados por tubos de Poliuretano (PU; 10 mm) que se unem, misturando os gases e elevando-os a um queimador de tubo simples (aço inoxidável) com diâmetro de 7,55 mm. Foi utilizado GNV comercial com a seguinte composição química: 90,8% de CH₄, 6% C₂H₆, 1,2% de C₃H₈, 0,5% de CO₂ e 1,55% de N₂ [GasNet, 2013]. O CO₂ utilizado como inerte possui pureza de 99,2% e as diluições empregadas no presente estudo foram de 0 a 40%, com incremento de 10% do volume total da mistura.

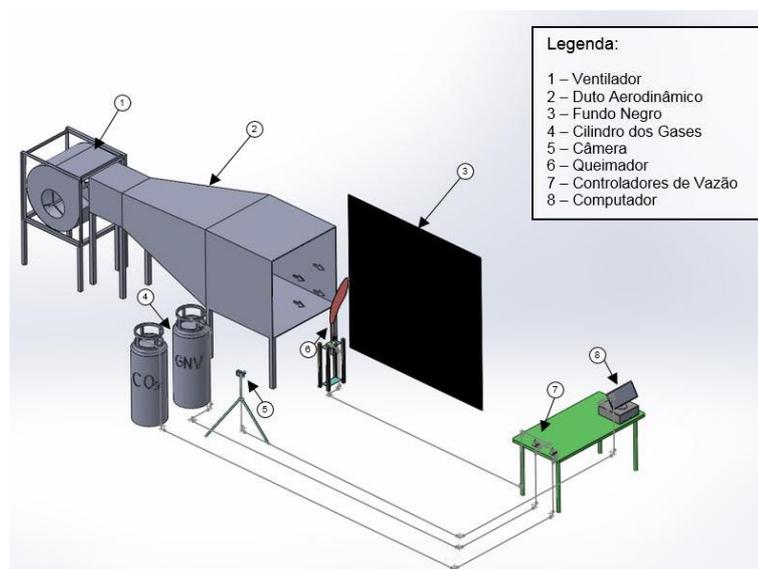


Figura 3.1 – Bancada experimental da geometria da chama.

3.2 Medição de vazão dos gases reagentes

Para medição da vazão da mistura reagente (combustível e CO₂) injetada no queimador, foram utilizados dois medidores da marca OMEGA, modelo FMA – 2600A. Os medidores possuem faixa de medição com vazão de operação máxima de 250 L/min (o medidor utiliza como referência a pressão de 1 atm e temperatura de 20 °C, e incerteza de medição de $\pm 0,8\%$ do valor lido mais $\pm 0,2\%$ do valor de fundo de escala). O controlador é calibrado para o ar e, para programar as vazões desejadas de gás natural e CO₂, utilizou-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.

3.3 Medição da velocidade do vento cruzado

No intuito de proporcionar o escoamento de ar uniforme em direção à chama, Oliveira, 2017, construiu um túnel aerodinâmico do tipo soprador, composto por três diferentes módulos e acoplado a um ventilador centrífugo. O primeiro módulo possui seção transversal de 0,45 m \times 0,45 m e comprimento de 0,50 m. O segundo módulo possui seção transversal inicial de 0,45 m \times 0,45 m e seção transversal final de 1,00 m \times 1,00 m, com comprimento de 1,50 m. Já o terceiro módulo possui seção transversal de 1,00 m \times 1,00 m e comprimento de 1,00 m. Essas dimensões foram projetadas para atender o bocal do ventilador e uma seção de saída capaz de cobrir as chamas até um metro de altura, considerando-se fatores como 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 contribuir para a homogeneização do escoamento de ar.

O fluxo transversal de ar é gerado por um ventilador centrífugo da marca Soler&Palau, o qual foi escolhido em função da perda de carga e da velocidade do vento desejado, e apresenta ponto de operação ótimo em vazão de 10500 m³/h, pressão de 95,7 mmca e rendimento de 79%. Um inversor de frequência da marca WEG está instalado junto do túnel onde está o ventilador, o qual possibilita a variação da frequência de rotação de 0 – 66 Hz e fornece uma velocidade de vento cruzado de 0,5 m/s a 3,0 m/s. Para monitorar o cruzamento do escoamento de ar em tempo real, dois anemômetros foram utilizados: um anemômetro digital, modelo MDA-20, o qual possui uma faixa de medição 2 a 30 m/s utilizando como referência condições atmosféricas e incerteza de medição de $\pm 3,0\%$ do valor lido mais $\pm 0,5\%$ do valor de fundo de escala, e um

anemômetro digital do modelo 113 de marca HOMIS, possuindo uma faixa de medição que varia entre 0,2 a 20 m/s, e incerteza de medição de $\pm 5,0\%$ do valor lido mais $\pm 1,0\%$ do valor de fundo de escala, sendo instalado verticalmente com intervalos de 10 cm no portal de saída do túnel, com tempo de monitoramento de 25 segundos, conforme apresentado na Figura 3.2, esse procedimento foi realizado três vezes como forma de assegurar a confiança nas medições.

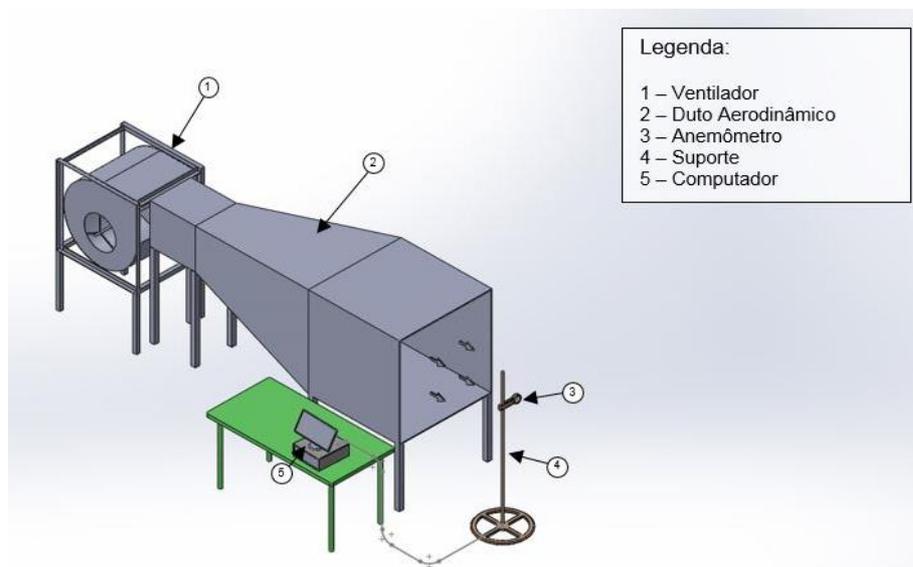


Figura 3.2 – Bancada de medição da velocidade do vento cruzado.

3.4 Procedimento de aquisição de dados

Para a coleta de dados, foi utilizada uma câmera fotográfica de marca Canon, modelo T5i. A câmera é da linha EOS Rebel, tipo DSLR (*digital single-lens reflex câmeras*) com resolução de 18 Mpx e a distância focal equivalente a uma câmera de 35 mm. O equipamento possui conexão USB (*Universal Serial Bus*) para transmissão de dados para o computador.

A fim de obter imagens bem definidas das chamas, Quezada, 2017, realizou um estudo sobre os parâmetros óticos como abertura do diafragma, tempo de exposição e sensibilidade ISO (*International Standards Organization*), medida que indica a sensibilidade do sensor da câmera à luz do ambiente. No mesmo estudo, os experimentos foram conduzidos com o mínimo de iluminação natural e, adicionalmente, foi instalada uma tela preta opaca atrás da bancada experimental para proporcionar um contraste adequado nas filmagens, conforme observado na Figura 3.1 da bancada experimental. Na Figura 3.3, são apresentados parâmetros de ajuste para captura da imagem desejada, utilizando diversas combinações óticas, como tempo de exposição, abertura do diafragma e mantendo o ISO constante.

ISO 3200		Tempo de Exposição				
		1/30	1/60	1/125	1/250	1/500
Abertura	3.5					
	4.0					
	4.5					
	5.0					
	5.6					

Figura 3.3 – Variação do frame de uma chama turbulenta com tempo de exposição e abertura para um valor de ISO constante de 3200, Vazão de 8,012 L/min, 0% CO₂, distância de enfoque a 1,0 m, vento lateral de 0,5 m/s e resolução da câmera 18,0 Mpx.

Devido às altas instabilidades apresentadas pelas chamas em estudo, verificou-se um parâmetro que requer uma análise mais profunda no procedimento de captura das imagens, a mencionar, a altura de levantamento de chama. Devido ao arrasto de ar fornecido por parte do escoamento transversal de ar, as chamas apresentaram uma tonalidade azulada e, à medida que o jato de combustível é elevado, verificaram-se duas regiões distintas nas chamas, a descrever, uma chama amarela (região superior da chama) e a outra azulada (região inferior da chama). Vale ressaltar que essas condições foram estabelecidas na região do espectro visível. A luminosidade da chama também é alterada fazendo com que haja uma limitação na observação devida da chama.

Dentro das questões que afetam a visualização da imagem e excesso de luz, mencionadas acima, no estudo, os parâmetros óticos definidos foram: tempo de exposição 1/125 s, ISO 3200 e a abertura de diafragma de 4,5.

3.5 Construção dos mapas de estabilidade

Primeiramente, foram definidas oito potências de chama e, em seguida, foram calculadas as vazões de jato de combustível, conforme ilustrado na Tabela 3.1. Estas vazões do jato de combustível e CO₂ são controladas a partir dos medidores de fluxo volumétrico.

Nesse estudo, foram utilizadas cinco diferentes concentrações de CO₂ diluídas em GNV para a construção dos mapas de estabilidade: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% em 50% e 60% de diluição de CO₂, o que ocasionou a extinção da chama para algumas das condições de teste (vazões de GNV e velocidade do vento). Os mapas de estabilidade foram construídos separadamente para cada velocidade de vento transversal, a saber: 0,5 a 3,0 m/s, incrementadas de 0,5 m/s. Esse estudo sobre os mapas de estabilidade permitiu melhor compreensão do limite de vazões de trabalho seja de gás natural como de CO₂ para o procedimento experimental. Dados experimentais de região de ancoramento, região de levantamento, região limitada pelo *set-up* experimental e região de extinção, permitiram uma estimativa para a construção dos mapas de estabilidade, com diâmetro de queimador de 7,55 mm. Os pontos foram definidos em função da razão de quantidade de movimento entre os jatos (R) e do número de Reynolds (Re).

A equação da razão de quantidade de movimento entre os jatos ilustra duas forças que estão agindo diretamente na estrutura da chama. Na Tabela 3.1 é ilustrada a metodologia empregada para construir os mapas de estabilidade. Os valores finais do estado da chama da razão de quantidade de movimento entre os jatos (R) e número de Reynolds (Re) foram utilizados para construir os mapas de estabilidade nas respectivas diluições. As condições experimentais apresentadas na Tabela 3.1 correspondem à potência de chama (Q , kW), razão de quantidade de movimento entre os jatos (R), velocidade do jato (gás natural e CO₂ – U_j , m/s), vazão volumétrica de gás natural (\dot{V}_{GNV} , m³/s) e vazão volumétrica de CO₂ (\dot{V}_{CO_2} , m³/s).

Tabela 3.1 – Procedimento para determinar os mapas de estabilidade

Potência estimada [kW]	Razão de momento [R]	Número de Reynolds [Re]	Vazão [L/min] 30%CO ₂		Estado da chama em Crossflow	
			GNV	CO ₂		
5,00	8,25	2898,09	7,85	3,37	Ancorada	
8,00	21,11	4636,94	12,57	5,39	Levantamento	
11,00	39,91	6375,80	17,28	7,41		
14,00	64,65	8114,65	21,99	9,42		
17,00	95,32	9853,50	26,70	11,44		
17,50	101,01	10143,31	27,49	11,78		
18,00	106,87	10433,12	28,27	12,12		
18,50	112,89	10722,93	29,06	12,45		
22,50	166,98	13041,40	35,34	15,15		
23,00	174,48	13331,21	36,13	15,48		
23,50	182,15	13621,02	36,91	15,82		
30,50	306,83	17678,34	47,91	20,53		
31,50	327,28	18257,96	49,48	21,21		
32,00	337,75	18547,77	50,27	21,54		Extinção

3.6 Definição da geometria da chama

Inúmeras técnicas experimentais são usadas para caracterizar a geometria de uma chama difusiva turbulenta, porém a grande dificuldade se concentra em quantificar estes parâmetros em função da intermitência da chama. No entanto, o comprimento de chama é o parâmetro mais estudado na literatura, sendo possível encontrar variedades de técnicas e definições que conduzem em valores com maior ou menor discrepância. A mesma característica ocorre para os demais parâmetros de interesse, nomeadamente: inclinação da chama, altura de levantamento da chama e sua inclinação.

O GNV foi usado como combustível. A vazão de fornecimento de combustível foi monitorada e controlada por um medidor de vazão de gás. O objetivo foi investigar a estabilidade (o que inclui a geometria da chama, além da posição da sua base em relação ao bocal do queimador e a sua extinção) de chamas de difusão turbulenta sujeitas a escoamento cruzado. Uma série de condições experimentais, incluindo a taxa de liberação de calor (5 kW, 8 kW, 11 kW, 13 kW, 17 kW, 20 kW, 23 kW e 26 kW) e ventos cruzados (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s e 3,0 m/s), foram consideradas. Para capturar as imagens das chamas, uma câmera digital Canon (EOS Rebel T5i) foi colocada de frente para a chama de difusão turbulenta (1,5 metros de distância) para registrar a forma da chama. O tempo de filmagem foi de 25 segundos. A parede de fundo estava coberta por um pano preto para evitar o efeito reflexivo.

Baseando-se na análise de imagens de intermitência da chama para medir quantitativamente o comprimento de chama, o qual será extraído de uma série de imagens gravadas pela câmera mantida a uma distância de aproximadamente 1,5 metros do bocal do queimador, ou seja, devido às flutuações dessas chamas com efeito do vento cruzado, as medições do comprimento de chama podem ser um tanto incertas, já que o contorno da chama é bastante variável no tempo e difícil de ser determinado com precisão. Trabalhos anteriores se basearam principalmente na observação visual usando o chamado “comprimento visível de chama” em que seus valores podem ser considerados subjetivos [Majeski et al., 2004; Hu et al., 2015; Hu et al., 2017]. Baseado no processamento de imagem da chama, Hu et al., 2018 propôs uma metodologia fundamentada numa série de imagens de chamas gravadas. A imagem da chama, Figura 3.4a, é processada em imagem de cinza, Figura 3.4b, e então convertida em imagem binária, Figura 3.4c, e o contorno de intermitência da chama resultante é mostrado na Figura 3.4d, onde o contorno de 100% corresponde à posição em que todas as imagens da chama estiveram presentes, enquanto um contorno de 10% significa que 10% das imagens da

chama estiveram presentes naquela posição. O comprimento de chama sob o vento cruzado é definido como a distância reta entre o ponto de origem do queimador e a ponta do contorno no intervalo de 5% a 15% de probabilidade [Majeski, et al., 2004; Hu et al., 2015]. Por este método, o comprimento de chama é objetivamente quantificado, o que será usado para análise e correlações adicionais nas seções seguintes.

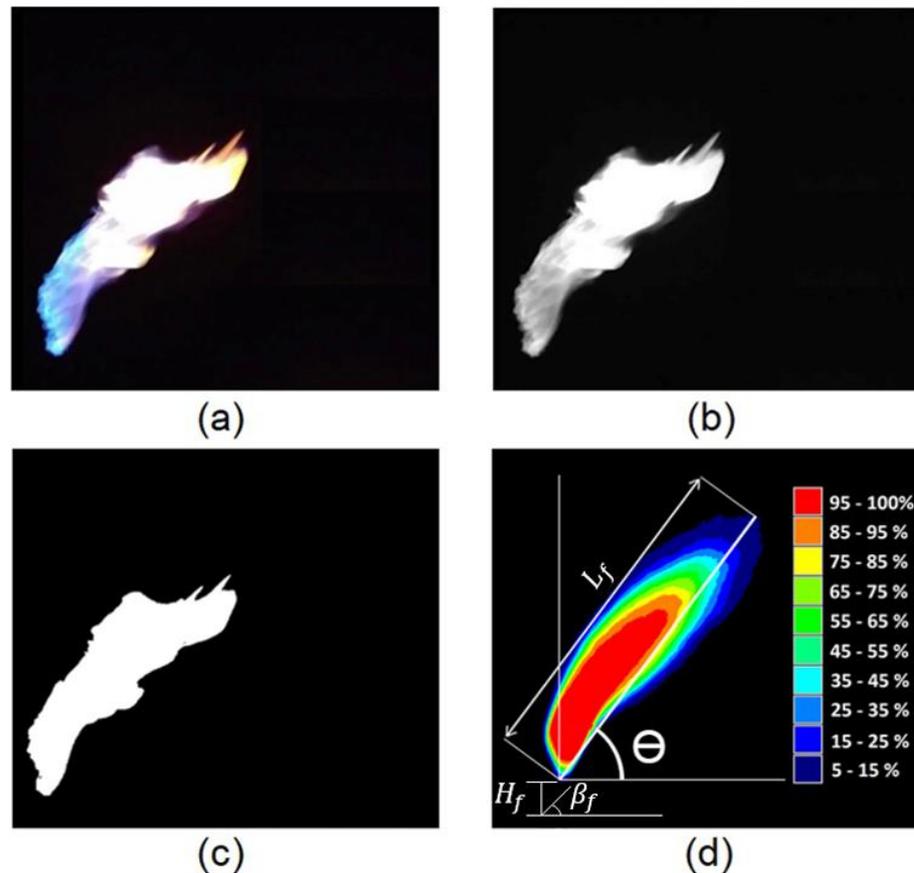


Figura 3.4 – Processamento de imagem para obtenção do comprimento (L_f) e ângulo de inclinação (θ) de chama: (a) imagem original, (b) conversão em escala de cinza, (c) imagem binária (preto e branco) e (d) contorno de intermitência da chama.

Além disso, o ângulo de inclinação da chama (θ) também foi quantificado, conforme ilustrado na Figura 3.4d, determinado a partir da linha transversal que corresponde ao comprimento de chama (L_f) e a linha correspondente a horizontal da base da chama.

Para medição da altura de levantamento de chama (H_f) e a inclinação (β_f), utilizou-se o vídeo gerado através da reprodução dos 250 *frames* extraídos de cada chama, sendo o procedimento análogo utilizado para determinar o comprimento de chama, excepcionalmente para casos em que há necessidade da troca do ISO para 3200.

3.7 Bancada experimental para medição da radiação

A Figura 3.5 apresenta a bancada experimental para determinação do fluxo de calor radiante. Para a realização dos testes, seis sensores de radiação foram utilizados nomeadamente: 3 sensores do tipo MEDTHERM 64-0.2-20/ZnSeW-1C-150 (faixa de medição de 11,19 mV até 2,0 kW/m²), 2 sensores do tipo MEDTHERM 64-0.5-20/ZnSeW-1C-150 (faixa de medição de 5,86 mV até 5,0 kW/m²), 1 sensor do tipo MEDTHERM 64-5-20/ZnSeW-1C-150 (faixa de medição de 5,61 mV até 5,0 W/cm²). Cada sensor emite um sinal de saída que é equivalente ao fluxo de calor radiante recebido pelo sensor, sendo que os sensores possuem uma janela de seleneto de zinco apresentando uma transmitância constante de 70% no faixa espectral 0,7-17 μm e o espectro útil entre 0,5-22 μm (a liga de seleneto de zinco apresenta uma transmitância constante para ângulos de incidência de 50°). Os sinais dos sensores de radiação foram coletados utilizando um *data logger* (Agilent 34972A). Maiores detalhes sobre a incerteza de leitura e escala de medição, seja dos sensores como do *data logger*, podem ser encontrados no Apêndice C.

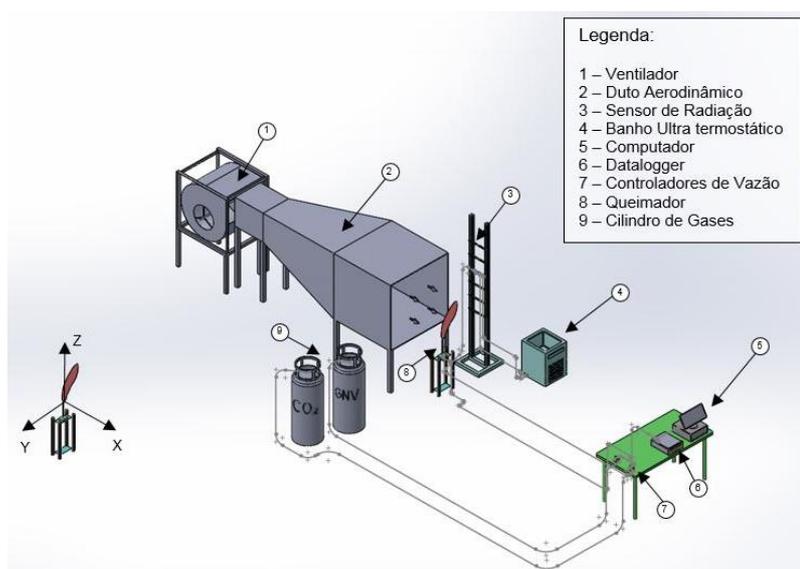


Figura 3.5 – Esquema da bancada experimental para medição da radiação térmica.

Vale ressaltar que durante a realização dos testes os sensores de radiação foram mantidos a uma temperatura estável (25°C) para garantir medições apropriadas de acordo com as recomendações do fabricante. A temperatura ambiente durante os testes variou entre 18 e 25 °C. Devido à essa variação na temperatura ambiente dada pela queima do combustível e outras fontes de energia, ao longo dos testes, foram necessárias medições de radiação de fundo (sem

chama), sendo o fluxo de calor radiante obtido pela diferença entre o valor do fluxo de calor obtido com a chama e o valor do fluxo de calor obtido para a radiação de fundo.

O estudo da geometria da chama estabelecido na primeira parte deste trabalho, principalmente o comprimento de chama, foi utilizado como parâmetro nas medições para determinar os fluxos de calor radiante. O queimador, a potência fornecida pela chama e a diluição de CO₂ foram empregadas para caracterizar a emissão da radiação térmica.

3.7.1 Procedimento de medição do fluxo de calor radiativo

O comprimento de chama foi tido como parâmetro fundamental para realização de ensaios e aquisição de dados devido às distâncias movidas na direção do eixo x e y que foram determinadas em função do comprimento de chama. Foram selecionadas duas posições em y , sendo a distância radial mínima permitida, devido às condições aerodinâmicas do túnel de vento, é de $y_1 = 1,5L_f$, estipulada em função da faixa de operação do sensor de maior sensibilidade (MEDTHERM 64-02-20/ZnSeW-1C-150). A distância radial máxima permitida é de $y_2 = 2,0L_f$, em função das limitações de espaço físico no ambiente de ensaios e da correlação proposta por Becker e Liang, 1982, para determinar a fração radiante. Essas posições foram definidas em função do maior comprimento visível de chama medido de 0,9 m, conseqüentemente, a distância máxima necessária correspondente foi de 1,82 m. Para a medição na horizontal, foram distribuídos 5 pontos e adimensionalizados em relação ao comprimento visível de chama, nomeadamente: $x_{0/L_f} = 0,0$; $x_{1/L_f} = 0,50$; $x_{2/L_f} = 1,0$; $x_{3/L_f} = 1,50$, e $x_{4/L_f} = 2,0$, respectivamente, fixas. Para cada chama, foram mantidas constantes o vento lateral, a diluição de CO₂ e variando a vazão do combustível durante o procedimento experimental. A coluna composta de seis sensores igualmente espaçados por 210 mm (fixa) foi posicionada em frente ao queimador (posição x_{0/L_f}) movida paralelamente ao plano da chama com as distâncias horizontais calculadas em função do comprimento visível de chama (x_{0/L_f} até x_{4/L_f}). Para cada distância radial cinco pontos foram extraídos totalizando 10 pontos em cada medição.

O procedimento de medição experimental foi efetuado em 20 segundos com uma frequência de aquisição de dados de 3,5 Hz equivalente a 70 pontos experimentais. A repetibilidade dos experimentos apresentou uma discrepância menor que 1%.

O modelo de fonte única (SPS) é aplicado para calcular a fração radiante a partir de fluxos de calor radiativos obtidos experimentalmente. O modelo sugere que a distância radial entre o sensor e a chama seja suficientemente elevada de tal maneira que o sensor “veja” a chama como uma fonte pontual de radiação térmica. Becker e Liang, 1982 e Markstein, 1984, sugeriram uma distância de $y_2 = 2,0L_f$, vale ressaltar que a distância sugerida, foi estabelecida para todas as chamas estudadas.

3.8 Modificações aplicadas às correlações sobre o comprimento de chama e inclinação do ângulo da chama

Os modelos de correlações propostas pelo autor da presente pesquisa, com base em outros modelos são descritos a seguir:

- a) correlação ajustada a partir de Hu et al., 2015, foi realizada uma substituição de variáveis nomeadamente: massas específicas do combustível e vento cruzado pelas velocidades do combustível, vento cruzado e o fator de correlação da concentração do CO₂ na mistura. Por outro lado, a correlação de Wang et al., 2015, foi ajustada perante uma regressão linear a partir do MS Excel para acrescentar o fator de correção do efeito do CO₂ sobre o comprimento de chama. Assim, os modelos apresentados neste estudo, encontram-se na seção 4 nas Equações 4.3 a 4.4;
- b) por outro lado, a correlação ajustada a partir de Majeski et al., 2004, propõem, através de equações de balanço de massa e assumindo a chama como uma superfície cilíndrica. Deste modo, um modelo que relaciona o comprimento de chama e a inclinação do ângulo da chama apresentado nesta pesquisa é dada pelas Equações 4.1 e 4.2.

3.9 Validações e condições para ajustes das correlações

Na fundamentação teórica foram obtidas e propostas correlações empíricas para prever o comprimento de chama e para após serem avaliados, com os dados experimentais obtidos no presente estudo. Para avaliar as discrepâncias entre os modelos dos autores, os propostos neste trabalho e os dados experimentais de um grande número de medições, foi empregado a definição de média de desvios entre o comprimento de chama experimental e as estimadas pelas

correlações empíricas. A fim de comparar as previsões de comprimento de chama por meio das correlações propostas por esta pesquisa, ajustadas a partir de Majeski et al., 2004, Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015, com os dados experimentais, adotam-se as seguintes hipóteses:

- a) escoamento do gás através do bocal do queimador é isentrópico;
- b) os fluidos (gás combustível e ar) se comportam como gases perfeitos;
- c) a temperatura e pressão ambientes são iguais a $T = 298,15 \text{ K}$ e $P = 101325 \text{ Pa}$;
- d) o ar em torno do jato é uma mistura composta por 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio (em volume);
- e) os perfis de velocidade são uniformes na saída do bocal do queimador.

Para avaliar a correlação proposta em termos das características dos parâmetros variados no estudo (análise realizada com oito vazões, quatro diluições, quatro velocidades de vento cruzado e mantendo fixo o diâmetro do bocal do queimador) é calculado o valor absoluto do erro relativo (ARE), em seguida, determina-se a média do valor absoluto do erro relativo (AARE) nas velocidades de vento cruzado, variando a diluição de CO_2 . A configuração proposta para validar os modelos propostos neste trabalho aos da literatura, foi feita mediante uma comparação entre os desvios, o qual permite identificar se a correlação prevê um valor menor ou igual a 20%, do número de dados naquele intervalo de comprimento de chama e inclinação do ângulo da chama em referência ao obtido experimentalmente.

Para facilitar a comparação entre o valor de comprimento de chama obtidos experimentalmente, L_{fexp} , e previsto pelas correlações propostas, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- a) $|L_{fexp} - L_{fcalc}|$, que representa o módulo da diferença entre o valor do comprimento de chama experimental, L_{fexp} , e o valor do comprimento de chama calculado a partir de correlações propostas, L_{fcalc} ;
- b) determinar o valor absoluto do erro relativo (ARE) determinada conforme a Equação 3.1 abaixo:

$$ARE = \frac{|L_{fexp} - L_{fcalc}|}{L_{fexp}} \times 100 \quad (3.1)$$

- c) determinar a média do valor absoluto do erro relativo (AARE) conforme a Equação 3.2 abaixo:

$$AARE = \frac{\sum_{i=1}^N ARE}{N} \quad (3.2)$$

onde N representa o número de dados nesse intervalo. Vale ressaltar que esta análise, para avaliar as discrepâncias entre os modelos propostos neste estudo com os dados experimentais, também foi estendida para o ângulo de inclinação da chama. Para os demais parâmetros analisados no estudo, foram apresentados os dados obtidos experimentalmente. No entanto, para facilitar a visualização dos resultados, optou-se por apresentá-los em tabelas e gráficos onde os eixos da ordenada se dispõem (comprimento e ângulo de inclinação da chama) e nos eixos das abscissas (razão de quantidade de movimento entre os jatos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção expõe os resultados experimentais e discussões sobre o comportamento da chama quando submetida a diferentes condições, variando velocidade do vento cruzado, potência da chama e diluição de CO₂. A seção 4.1 se destina a apresentação dos resultados e discussões referentes à estabilidade de chama, enquanto a seção 4.2 apresenta resultados e discussões relativas à radiação térmica.

A Figura 4.1 mostra imagens representativas da chama para velocidade de vento cruzado de 0,5 m/s, obtidas para diversos valores de vazão de mistura e diluições de CO₂, levando a diferentes valores do número de Reynolds (Re) e da razão de quantidade de movimento entre os jatos (R).

A sequência de imagens abaixo capturadas mostra algumas características visuais típicas de chamas difusivas turbulentas com vento cruzado de 0,5 m/s e diferentes diluições de CO₂, as quais são apresentadas através da Figura 4.1. Observa-se que em baixos valores de razão de quantidade de movimento entre os jatos, as chamas apresentam uma coloração amarela devido à grande quantidade de fuligem, contudo, a base da chama é caracterizada pela coloração azulada, o que indica uma região com menos fuligem. Assim, para determinados valores de razão de quantidade de movimento entre os jatos, o diâmetro do bocal do queimador e da vazão de mistura (combustível e CO₂), a base da chama se descola do bocal do queimador. Pois, nesta condição, devido à entrada de ar na base do bocal do queimador onde ocorre o jato, forma uma pré-mistura parcial ocasionando a redução da fuligem e prevalecendo a coloração azulada. Esse comportamento será discutido na seção a seguir, sobre os mapas de estabilidade de chamas com diferentes ventos e diluições de CO₂.

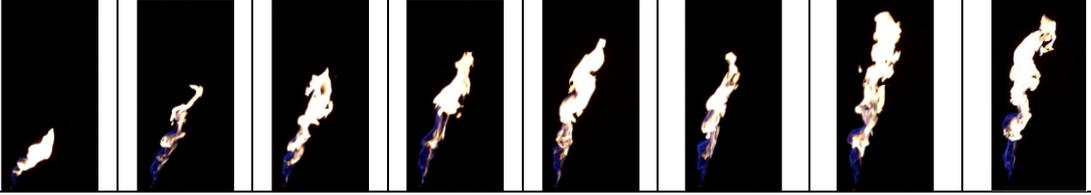
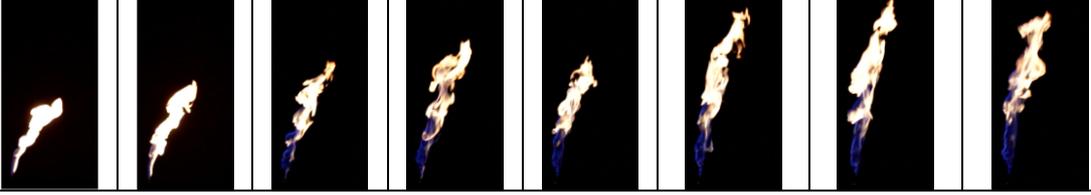
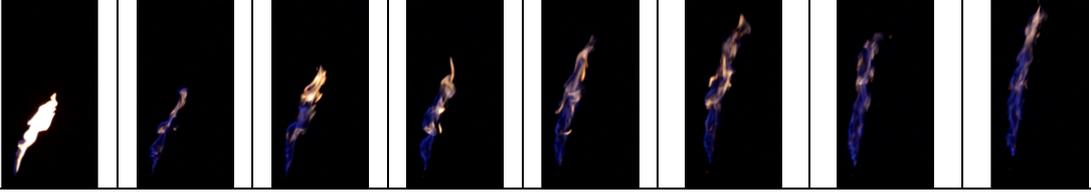
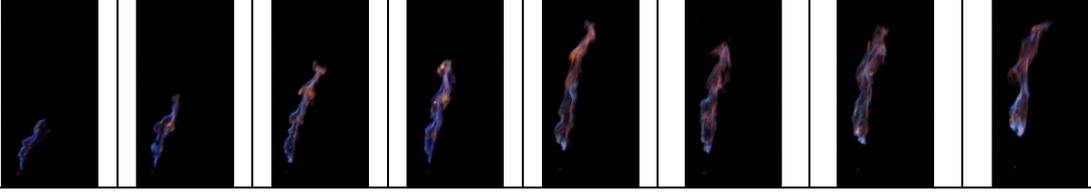
CO_2	Vazão total (L/min)							
	8,63	13,80	18,98	24,15	29,33	34,50	39,68	44,86
0%								
	Número de Reynolds (R_e)							
	1608	2572	3537	4501	5466	6430	7395	8359
	Razão de Momento (R)							
	5,00	8,00	11,00	14,00	17,00	20,00	23,00	26,00
10%								
	Número de Reynolds (R_e)							
	1749	2799	3849	4898	5948	6997	8047	9097
	Razão de Momento (R)							
	5,96	9,54	13,12	16,69	20,27	23,85	27,47	31,00
20%								
	Número de Reynolds (R_e)							
	2362	3779	5196	6613	8029	9447	10864	12281
	Razão de Momento (R)							
	7,13	11,42	15,70	19,98	24,26	28,54	32,82	37,10
30%								
	Número de Reynolds (R_e)							
	2898	4637	6376	8115	9854	11592	13332	15070
	Razão de Momento (R)							
	8,61	13,58	18,95	24,12	29,29	34,46	39,63	44,80

Figura 4.1 – Imagens instantâneas de chama para um jato com diferentes vazões de GNV, CO_2 , diâmetro do bocal do queimador 7,55 mm no vento cruzado de 0,5 m/s.

Após a realização de experimentos com diferentes ventos cruzados (cujos resultados serão mostrados a seguir), outro fenômeno foi observado, o de encurtamento na forma da chama, podendo-se afirmar que o vento lateral altera o formato da chama para determinada faixa de vazões de mistura. Esse comportamento também foi reportado por vários autores, nomeadamente, Majeski et al., 2004 e Hu et al., 2017. Na Figura D.1, do Apêndice D, podem ser encontrados diferentes formatos de chama com ventos cruzados.

4.1 Estabilidade de chamas

4.1.1 Mapas de estabilidade

Na Figura 4.2 são apresentados os mapas de estabilidade em relação à velocidade dos ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s), da diluição de CO₂ (de 0% até 40%) e número de Reynolds do jato (combustível e CO₂, conforme as potências definidas anteriormente). Conforme pode ser observado, os mapas apresentam quatro regiões distintas: região de ancoramento, região de levantamento, região de limite do *set-up* experimental e a região de extinção da chama. Verifica-se uma situação similar para todas as condições apresentadas, para valores baixos de combustível misturado com CO₂, as chamas permanecem ancoradas até um dado valor do número de Reynolds, ainda, a área de ancoramento vai se encurtando à medida que é incrementada a velocidade do vento cruzado. Pode-se verificar também, que a área de ancoramento para as três primeiras velocidades de vento cruzado tem um máximo na diluição de 30% de CO₂, enquanto que os testes com velocidade de vento de 2,0 m/s permitiram que a chama permanecesse ancorada até a diluição de 40% de CO₂.

Outra característica observada é o aumento da área de levantamento da chama à medida que o número de Reynolds aumenta (o qual está relacionada com a vazão de mistura). Esse comportamento cresce em simultâneo com o vento cruzado e a diluição de CO₂. Por outro lado, com o incremento desses parâmetros reduz, cada vez mais, a área do *set-up* experimental e aumenta a área de extinção da chama.

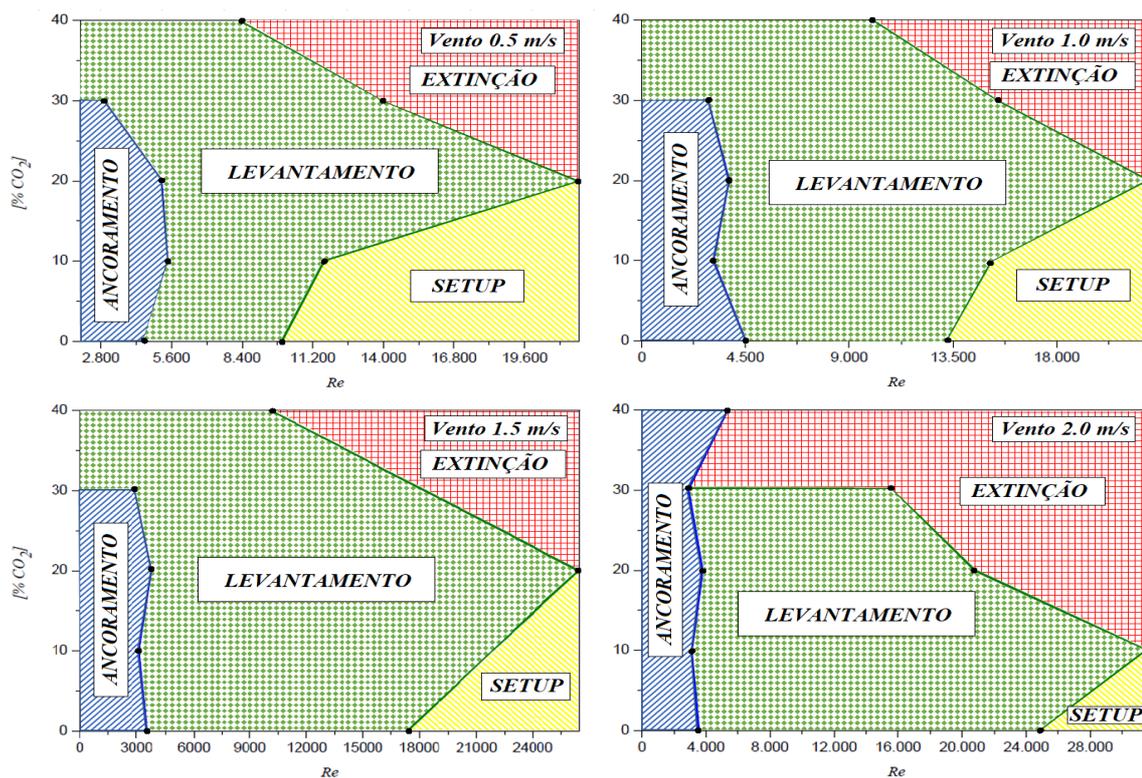


Figura 4.2 – Mapas de estabilidade com ventos cruzados de 0,5 m/s a 2,0 m/s e proporções de diluição de CO₂ e diâmetro do bocal de queimador de 7,55 mm.

Após a realização de experimentos com os ventos cruzados 2,5 m/s e 3,0 m/s, cujos resultados são mostrados a seguir (Figura 4.3), o comportamento na diminuição da área de *set-up* experimental é evidenciado com maior clareza.

Na Figura 4.3, são apresentados os mapas de estabilidade em relação à velocidade dos ventos cruzados (de 2,5 m/s até 3,0 m/s), da diluição de CO₂ (de 0% até 40%) e número de Reynolds do jato (combustível e CO₂, conforme as potências definidas anteriormente). Outro fenômeno é observado, o de encurtamento na forma da chama, podendo se afirmar que o vento cruzado altera a geometria da chama para determinada faixa de vazão de mistura, ou seja, esse comportamento de encurtamento da chama com o aumento da velocidade do vento cruzado, vazão de mistura bem como a adição de CO₂ é evidenciada pela redução da área de *set-up* experimental, pois a competição entre a quantidade de movimento do vento cruzado e a quantidade de movimento do jato (combustível e CO₂) gera uma diferença de pressão a jusante do bocal do queimador, o que fornece uma rotação inversa gerando o efeito de vórtices. Essa diferença de pressão faz com que a chama seja puxada para esteira do bocal do queimador com o aumento da velocidade do vento cruzado, enquanto que a quantidade de movimento do jato (combustível e CO₂) tenta manter a chama na direção vertical, neutralizando com a diferença

de pressão gerada pela velocidade de vento cruzado, essa competição é expressa pela razão de quantidade de movimento entre os jatos.

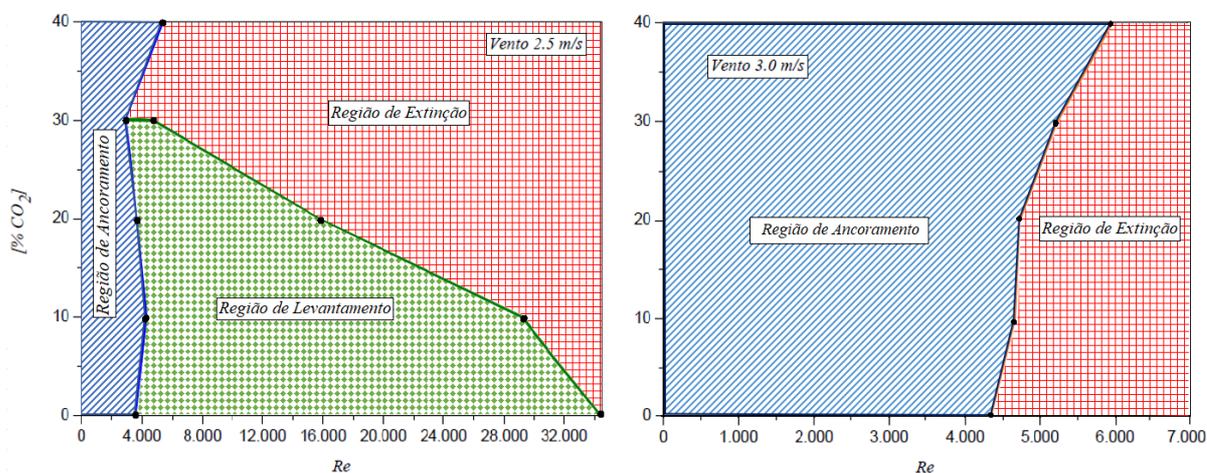


Figura 4.3 – Mapas de estabilidade com ventos cruzados de 2,5 m/s a 3,0 m/s e proporções de diluição de CO₂ e diâmetro do bocal de queimador de 7,55 mm.

As diluições de 50% e 60% de CO₂ não permitiram que a mistura combustível fosse ignizada, sendo assim, os resultados estão mostrando diluições de até 40%. A região de limite de *set-up* não foi estudada devido às limitações da bancada experimental que asseguram valores máximos de altura da chama de 1,0 m. O incremento da vazão de combustível leva ao aumento do comprimento de chama, a adição de CO₂ e vento lateral, fazem com que a chama se alongue até um valor e , em seguida, decresça para valores maiores de vazões e elevados ventos cruzados o que, conseqüentemente, aumenta a área de levantamento da chama.

4.1.2 Geometria da chama

4.1.2.1 Variação do comprimento de chama com a vazão de mistura (combustível e CO₂)

A Figura 4.4 apresenta os resultados da medição experimental do comprimento de chama em relação a vazão de mistura, 0% a 30% de diluição com CO₂ e velocidade de vento cruzado de (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s). Três tendências são observadas nesta figura para o comprimento de chama: a) ele aumenta com o aumento da vazão de mistura (combustível e CO₂); b) ele diminui com o incremento de CO₂; e c) sendo está redução também é verificada com o aumento da velocidade do vento cruzado. O principal mecanismo para o aumento do comprimento de chama é a vazão de mistura, isto é o comportamento esperado dado que a

chama precisa progressivamente de mais ar para consumir o combustível injetado, por outro lado, o incremento da velocidade do vento cruzado o comportamento é mais complexo, para elevadas vazões de mistura há uma tendência clara de redução do comprimento de chama com o aumento da velocidade do vento cruzado, contudo, para uma condição fixa de velocidade de vento cruzado, ao adicionar CO_2 , o comprimento de chama diminui para qualquer condição de vazão da mistura. Essa tendência da redução do comprimento de chama com o incremento da velocidade do vento cruzado se deve provavelmente a uma melhoria na mistura turbulenta entre o combustível e o oxidante, o que tende a reduzir o comprimento de chama, este comportamento também foi reportado por Wang et al., 2015. Assim, a adição de CO_2 , dificulta o prosseguimento da reação química de ocorrer, ocasionando a redução de combustível disponível para queima e conseqüentemente, a redução do comprimento de chama.

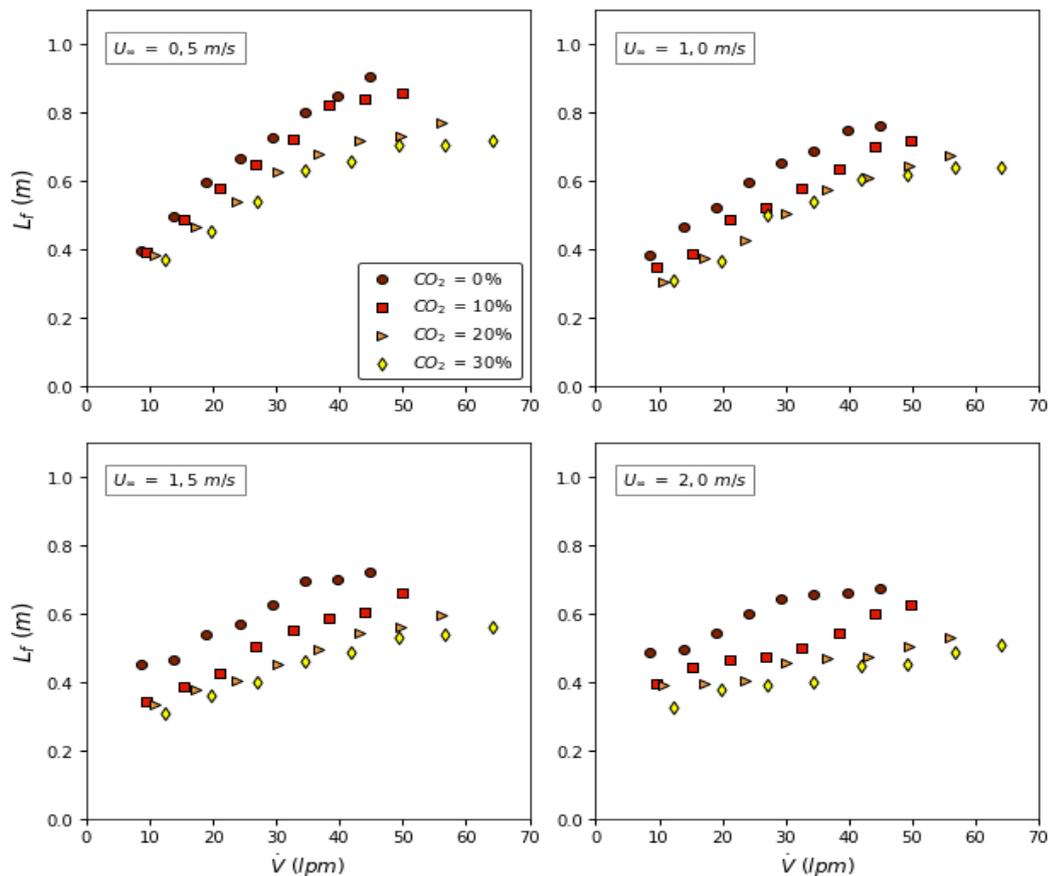


Figura 4.4 – Comprimentos de chama com diferentes vazões de jatos, velocidades de vento cruzado e diluições de CO_2 .

A Figura 4.5 mostra os comprimentos de chamas em relação da vazão de mistura, (0% a 30% de diluição com CO_2) e velocidade de vento cruzado (de 2,5 m/s e 3,0 m/s). A Figura 4.5 apresenta o mesmo comportamento verificado na Figura 4.4 nos ventos apresentados (0,5

m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s). No entanto, na Figura 4.5, observa-se que na diluição 30% de CO₂ no vento cruzado de 2,5 m/s não foi possível obter todos os pontos dos comprimentos de chamas para as vazões correspondentes, pois, nesta condição, dois pontos foram reportados para o comprimento de chama, o que indica a ocorrência da extinção da chama, ou seja, o aumento da diluição de CO₂ e vento cruzado impulsiona a extinção da chama. Esse comportamento pode ser observado no vento cruzado de 3,0 m/s da mesma figura onde foram reportados menos pontos ainda para o comprimento de chama se comparado às demais condições. Desse modo, podemos afirmar que o principal mecanismo para aumentar o comprimento de chama é o aumento do jato (combustível e CO₂), assim como, o principal mecanismo para impulsionar a extinção da chama são a velocidade do vento cruzado e o incremento da diluição de CO₂ na corrente de combustível, esse fenômeno também foi identificado por Majeski et al., 2004 e Hu et al., 2018. Os gráficos e tabelas de incertezas de medição para os ventos cruzados de (0,5 m/s a 2,0 m/s) se encontram no Apêndice A, na Figura A.1 e Tabelas A.1 e A.2.

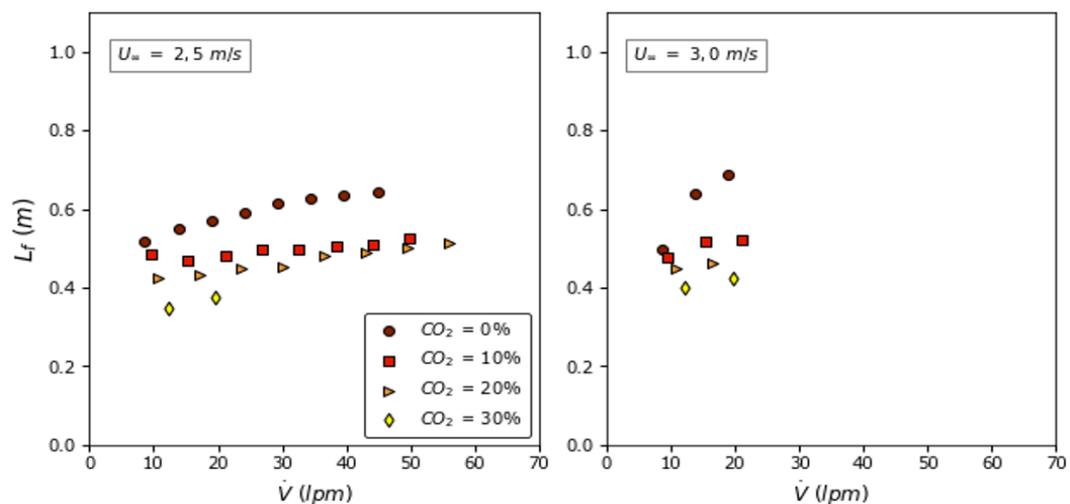


Figura 4.5 – Comprimentos de chama com diferentes vazões de jatos, velocidades de vento cruzado e diluições de CO₂.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam semelhança quanto ao modo do crescimento do comprimento de chama com aumento da vazão de mistura e sua redução com o incremento da velocidade do vento cruzado e a diluição de CO₂. A redução do comprimento de chama com o aumento da velocidade do vento cruzado pode ser explicada devido à força de inércia exercida pelo vento. Essa força representa a diferença de pressão gerada pelo vento à jusante do bocal do queimador (situação que ocorre para baixas vazões de mistura e altas velocidades de ventos cruzados), que são responsáveis pela possível formação de vórtices causados pela contração do

vento e a fluatibilidade. Com isso, a força da velocidade do vento cruzado empurra a chama para baixo (solo), trazendo consigo o vapor de combustível para baixo, esse fato faz com que haja aumento na mistura de combustível com o ar ao mesmo tempo, o que resulta na redução do comprimento de chama. Além disso, a força inercial exercida pela velocidade do vento cruzado interage com a flutuação da combustão, pois quanto mais pesado for o vapor de combustível mais fácil será a chama se fixar ao solo. Esse comportamento também foi identificado por Kostiuk et al., 2000 para chamas com vento cruzado de modo *Wake-stabilized*.

4.1.2.2 Variação do comprimento de chama com a razão de quantidade de movimento (R) e diluição de CO₂

Na Figura 4.6 é apresentada a variação do comprimento de chama com a razão de quantidade de movimento do jato (combustível e CO₂) dividida pela quantidade de movimento do vento cruzado. Pode ser observado o mesmo comportamento das Figuras 4.4 e 4.5, ou seja, o crescimento do comprimento de chama com o aumento da razão de quantidade de movimento (a qual está diretamente relacionada com a vazão do jato de reagentes das Figuras 4.4 e 4.5). Contudo, na Figura 4.6 as velocidades de ventos cruzados apresentados (de 0,5 m/s a 2,0 m/s) à medida que a velocidade do vento cruzado e da mistura de reagentes aumenta, a combustão é direcionada para região de recirculação, pois a fração axissimétrica da chama tem menos combustível para queimar, tornando-se mais curta e a redução do comprimento de chama. Esse fenômeno faz com que a superfície da chama se torne enrugada devido aos vórtices formados na camada de cisalhamento entre o jato da velocidade do vento cruzado e da velocidade de mistura dos reagentes. A intensidade desses vórtices da camada de cisalhamento e do enrugamento da chama aumenta com o incremento da velocidade de vento cruzado à medida que as forças de inércia da velocidade do vento cruzado dominam sobre as forças de empuxo do jato da mistura de reagentes. Porém esse enrugamento na superfície da chama aumenta a área de superfície por unidade de volume da chama, permitindo que o comprimento de chama diminua após atingir seu máximo, neste caso os vórtices são responsáveis por extrair o combustível e deixam a combustão dos produtos para baixo. Ainda, os efeitos químicos, nomeadamente a adição de CO₂, alteram as reações, pois o mecanismo de diluição reduz a concentração de reagentes, ou seja, esse mecanismo reduz a intensidade da combustão, ocasionando o decréscimo do comprimento de chama e a temperatura máxima da chama. Esse fenômeno, da redução do comprimento de chama com a adição de CO₂, também foi observado

por Guo, 2010. Os resultados para os ventos laterais (2,5 m/s e 3,0 m/s) e outras diluições de CO₂ se encontram disponíveis na Figura B.1 do Apêndice B.

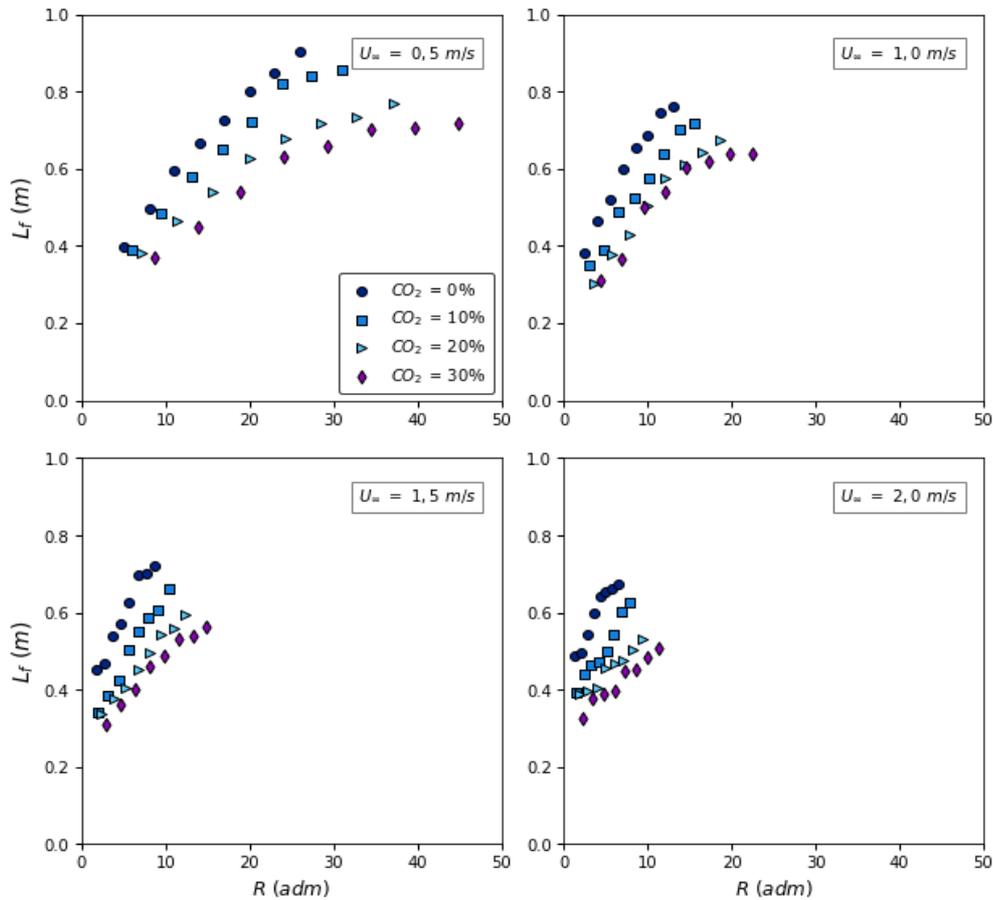


Figura 4.6 – Variação do comprimento de chama em relação da razão de momentos e da diluição de CO₂ para diferentes velocidades de vento lateral.

4.1.2.3 Variação do ângulo de inclinação da chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO₂)

A Figura 4.7 apresenta a variação do ângulo de inclinação da chama com diferentes vazões de mistura, em diferentes diluições de CO₂ (0% a 30%) e velocidades de vento cruzado (0,5 m/s a 2,0 m/s). Verifica-se que o ângulo de inclinação da chama aumenta com o aumento da vazão de mistura. Na velocidade de 0,5 m/s, a Figura 4.7 apresenta elevados ângulos de inclinação da chama quando comparamos com a velocidade de 1,0 m/s, por sua vez, o vento 1,0 m/s apresenta valores elevados de ângulo de inclinação quando comparados com os ventos 1,5 m/s e 2,0 m/s. O que permite afirmar que, o aumento da vazão de mistura dos reagentes produz maior inclinação do ângulo na direção vertical, tornando os valores dos ângulos mais próximos do ângulo de 90°. Por outro lado, o aumento da velocidade do vento lateral deixa a

chama mais inclinada na direção horizontal, fazendo que haja redução do ângulo de inclinação. Assim, a velocidade do vento cruzado deixa a chama mais direcionada para a posição horizontal, fazendo com que o ângulo de inclinação se torne menor, o que está em concordância com os resultados reportados por Kalghatgi, 1983, para chamas sem diluição. Neste caso, é possível notar que a inserção de CO_2 na vazão de mistura, nas velocidades de ventos cruzados de (0,5 m/s a 1,0 m/s) não teve alterações significativas, já no caso das velocidades de ventos cruzados de (1,5 m/s a 2,0 m/s) teve influência. Nota-se que, em cada incremento da velocidade do vento cruzado, a inclinação do ângulo da chama é reduzida nos ventos cruzados considerados, levando à constatação de que a variação da inclinação do ângulo da chama tem maior dependência com o vento lateral do que com a diluição de CO_2 .

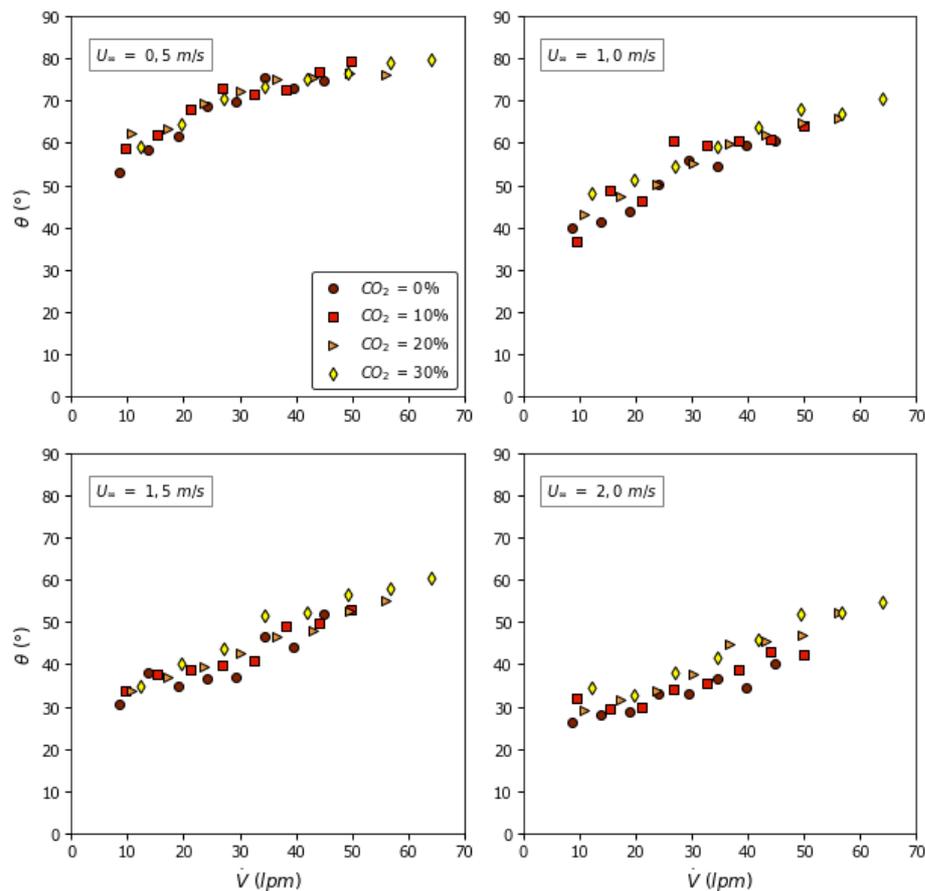


Figura 4.7 – Ângulo de inclinação da chama em relação da vazão combustível e da diluição com CO_2 para diferentes velocidades de vento lateral.

O gráfico de ângulo de inclinação da chama em relação às outras velocidades de vento cruzado (2,5 m/s e 3,0 m/s), diluições de CO_2 e vazões de mistura de reagentes estão mostrados no Apêndice B, na Figura B.2 e segue o mesmo comportamento mostrado na Figura 4.7.

4.1.2.4 Variação do ângulo de inclinação da chama com a razão de quantidade de movimento (R) e diluição de CO_2

A Figura 4.8 apresenta os resultados experimentais do ângulo de inclinação da chama para diferentes valores da razão de quantidade de movimento entre os jatos, em diferentes diluições de CO_2 (0% a 30%) e velocidades de vento cruzado (0,5 m/s a 2,0 m/s).

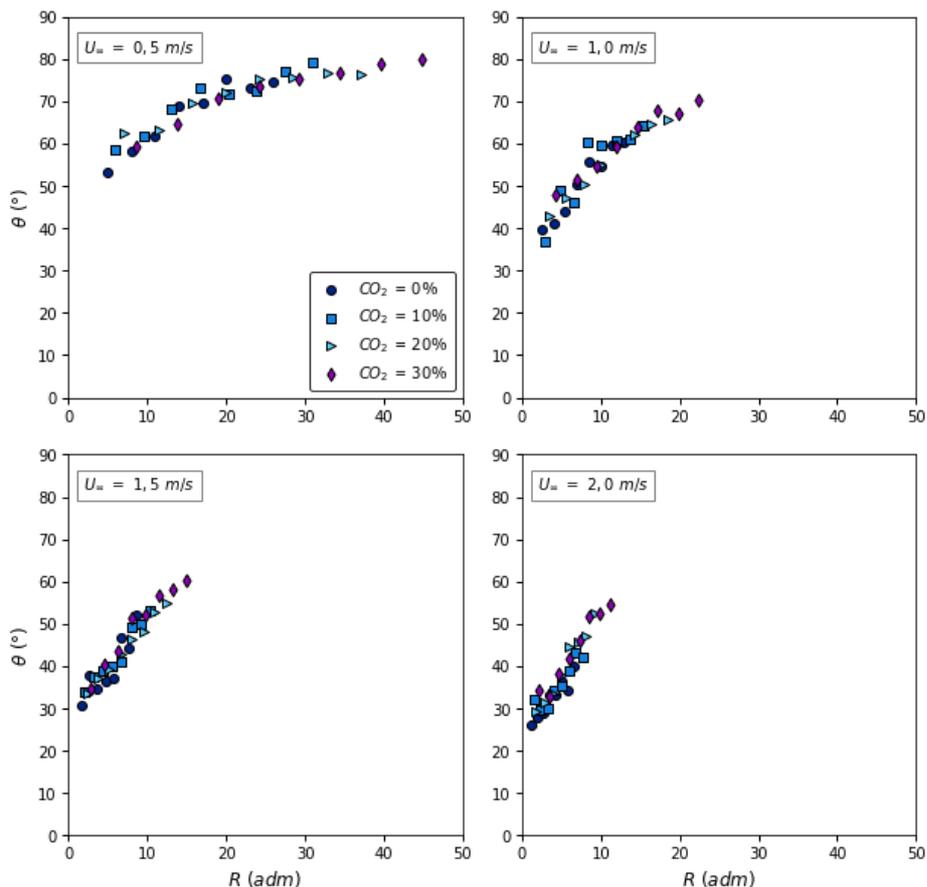


Figura 4.8 – Ângulo de inclinação da chama em relação da razão a quantidade de movimento entre os jatos e da diluição com CO_2 para diferentes velocidades de vento lateral.

O comportamento apresentado na Figura 4.8 se assemelha com o observado na Figura 4.7, porém na figura acima, esse comportamento cresce com a razão de quantidade de movimento dos jatos (combustível, CO_2 e vento cruzado) e decresce com o incremento do vento lateral.

Além disso, é possível notar que a inserção de CO_2 e vento lateral na vazão de mistura não resultaram em alterações significativas, neste caso. Verifica-se que, em cada incremento da velocidade do vento cruzado, a inclinação do ângulo da chama é reduzida nos ventos cruzados considerados, levando à constatação de que a variação da inclinação do ângulo da chama tem maior dependência com o vento lateral do que com a diluição de CO_2 . O gráfico de ângulo de

inclinação da chama em relação às outras velocidades de vento cruzado (2,5 m/s e 3,0 m/s), diluições de CO₂ e razão de quantidade de movimento entre os jatos estão mostrados no Apêndice B, na Figura B.3 e segue o mesmo comportamento mostrado na Figura 4.8.

4.1.2.5 Variação da altura de levantamento e extinção de chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO₂)

A Figura 4.9 apresenta os resultados da altura de levantamento da chama em relação à vazão de mistura, da diluição com CO₂ (de 0% até 30%) e da velocidade do vento lateral (de 0,5 m/s até 2,0 m/s). Observa-se que o aumento da altura de levantamento é proporcional à vazão de mistura.

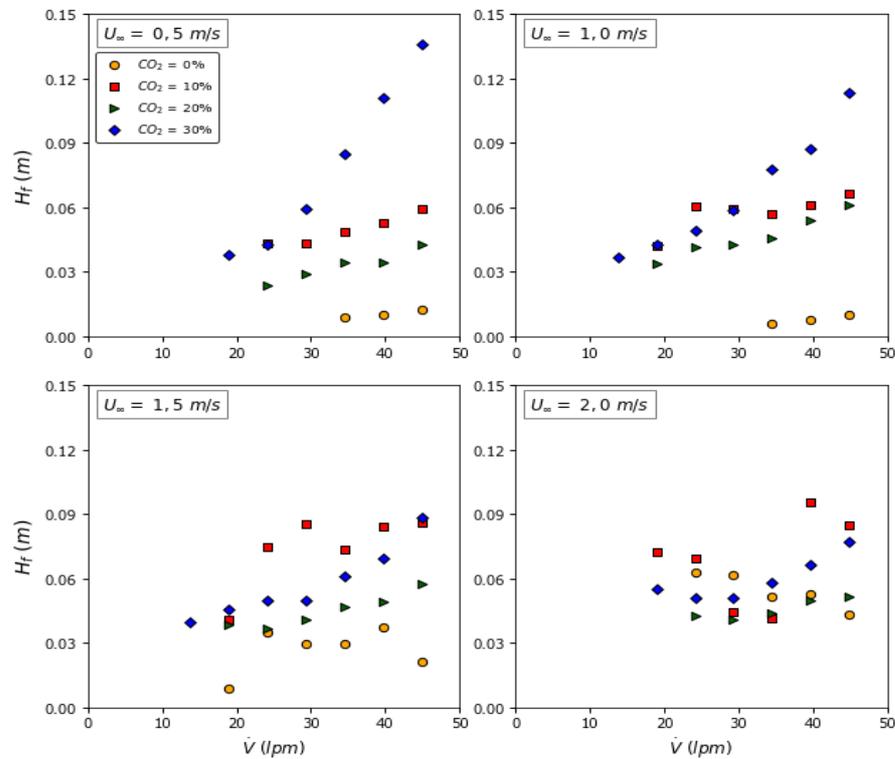


Figura 4.9 – Levantamento da chama em relação da vazão do combustível e da diluição com CO₂ para diferentes velocidades de vento lateral.

Para a diluição de 0% de CO₂ e velocidade de vento cruzado de 0,5 m/s, verifica-se que o levantamento se dá a partir da vazão de mistura de 34,40 L/min, situação similar ao vento 1,0 m/s. Tais levantamentos são dados nas razões de quantidade de movimento entre os jatos na faixa de 10,0 e 20,0. Para os demais ventos (1,5 m/s e 2,0 m/s) o levantamento da chama se dá, praticamente, nas mesmas vazões de mistura de 17,30 L/min, o que corresponde a valores de razão de quantidade do movimento entre os jatos na faixa de 3,50 a 3,67. E, a partir da velocidade do vento cruzado de 2,5 m/s, a altura de levantamento ocorre a partir da vazão de

mistura de 21,99 L/min e, para o vento 3,0 m/s, não há levantamento. Nesta condição apenas são encontradas chamas ancoradas, conforme apresentadas nos mapas de estabilidade na Figura 4.3 sobre os mapas de estabilidade no vento cruzado de 3,0 m/s.

Observa-se também que a inserção de CO₂ causa um aumento na altura de levantamento da chama. Em cada diluição, a altura de levantamento é, aproximadamente, a mesma para diferentes velocidades de ventos cruzados, podendo se constatar que a variação da altura de levantamento tem maior dependência com a diluição de CO₂ e com a vazão de mistura, do que com a variação na velocidade do vento cruzado. Isso ocorre porque a adição de CO₂ reduz a luminosidade da chama, a formação de fuligem e a temperatura da chama. Por outro lado, proporciona o aumento da altura de levantamento da chama bem como a diminuição do comprimento de chama. Esse fenômeno também foi reportado por Erete et al., 2016 e Quezada, 2017, para chamas sem o efeito da velocidade do vento cruzado. Os resultados após a realização de experimentos da altura de levantamento da chama em relação outro teste nas mesmas condições (vazão de mistura, diluição com CO₂ e da velocidade do vento lateral) estão mostrados no Apêndice B, na Figura B.4, e seguem os mesmos comportamentos mostrados na Figura 4.9.

4.1.2.6 Variação da inclinação da altura de levantamento da chama com a vazão de mistura (combustível e diluição de CO₂)

A Figura 4.10 apresenta os resultados do ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama em relação da vazão da mistura, da diluição com CO₂ (de 0% até 30%) e da velocidade do vento lateral (de 0,5 m/s até 2,0 m/s). Para o vento de 0,5 m/s com diferentes diluições de CO₂, observa-se que os valores do ângulo β_f são, aproximadamente, independentes da vazão do jato de reagentes, enquanto que a maiores velocidades de vento lateral este ângulo se torna dependente da vazão do jato, apresentando valores crescentes. Além disso, é possível perceber que a inserção de CO₂ produz alterações moderadas no ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama, pelo que se sugere, contudo, realizar novos estudos sobre chamas difusivas e diluídas com CO₂ sujeitas a vento cruzado nas mesmas condições a fim de validar o efeito da inserção do CO₂ na corrente de combustível.

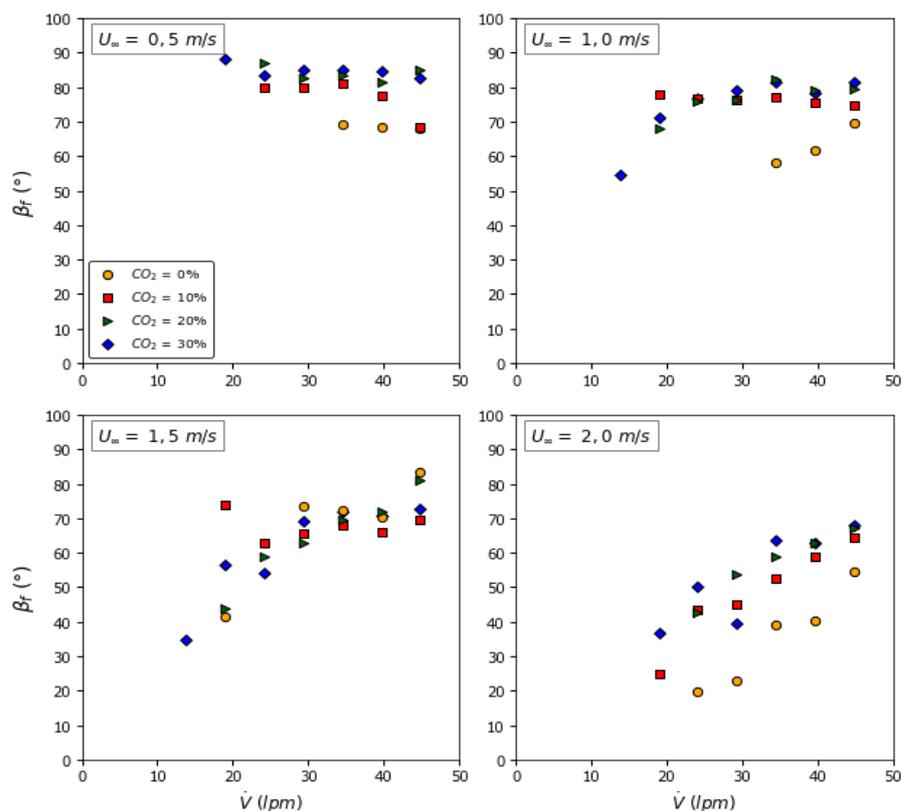


Figura 4.10 – Inclinação da altura de levantamento da chama em relação da vazão do combustível e da diluição com CO₂ para diferentes velocidades de vento lateral.

Os resultados após a realização de experimentos da altura de levantamento da chama em relação a outro teste nas mesmas condições (vazão de mistura, diluição com CO₂ e da velocidade do vento lateral) estão mostrados no Apêndice B, na Figura B.5, e seguem os mesmos comportamentos mostrados na Figura 4.10.

4.1.2.7 Comparação dos resultados experimentais com as correlações

Com base na literatura, correlações empíricas são propostas para prever o comprimento de chama e foram avaliados com os dados experimentais obtidos neste trabalho. Vale ressaltar que poucos modelos são apresentados na literatura para chamas em vento cruzado com GNV e diluídas em CO₂. A seção 4.1.2.6.1 se destina a apresentação do modelo proposto pelo autor deste estudo, ajustado de Majeski et al., 2004, e discussões referentes a este modelo. Já a seção 4.1.2.6.2 apresenta resultados referentes a comparações entre os modelos propostos também pelo mesmo autor, ajustados de Majeski et al., 2004, Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015 e discussões relativas dos mesmos. Ainda na mesma seção, o modelo de Majeski et al., 2004 foi estendido para obter correlações empíricas que permite prever o comportamento do ângulo de

inclinação da chama, assim, se propôs uma correlação para previsão deste parâmetro geométrico.

4.1.2.7.1 Proposição de novas correlações empíricas para previsão do comprimento e ângulo de inclinação de chamas a jatos em vento cruzado

Após extensa análise do fenômeno da geometria de chamas em vento cruzado sobre os parâmetros que as influenciam e das correlações empíricas para previsão do comprimento de chama disponíveis na literatura, este estudo propõe a Equação 4.1 para previsão do comprimento de chamas difusivas turbulentas em vento cruzado (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s), bocal do queimador de 7,55 mm e diluições de CO_2 de (0%, 10%, 20% e 30%).

$$y = K_f \psi_f - K_U \quad (4.1)$$

onde $y = \left(\frac{1}{C_J}\right)^{1/2} \frac{L_{fN}}{U_\infty}$, C_J é a concentração mássica de combustível na mistura, e o fator de forma é definido como $\psi_f = (\rho_J U_J)^{1/2} \frac{d_s}{U_\infty}$.

Nesta equação os valores de K_f (razão entre a massa de oxigênio para o combustível e o parâmetro do formato geométrico) e K_U (constante de proporcionalidade entre o alongamento da chama e a velocidade do vento cruzado) estão ilustrados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Valores de K_f e K_U referentes ao modelo proposto pela presente pesquisa, ajustado de Majeski et al., 2004 para diferentes diluições de CO_2 .

CO_2 (0%)	K_f	K_U
0	34,364	0,03
10	32,385	0,09
20	27,552	0,06
30	25,523	0,09

Os coeficientes representados na Tabela 4.1 foram obtidos a partir da Equação 4.1 que é resultante da simplificação da Equação 2.11 proposta por Majeski et al., 2004, para chamas em vento cruzado e diluídas com CO_2 , e será referenciada como correlação proposta neste trabalho.

A Figura 4.11 mostra a evolução do comprimento de chama, L_f , em relação aos parâmetros experimentais variados. Percebe-se o aumento do comprimento com o incremento do fator de forma, ψ_f . Com o aumento da diluição de dióxido de CO_2 na mistura e da velocidade

do vento cruzado, U_∞ , contudo, percebe-se uma diminuição do comprimento da chama, concordando com o que foi reportado por Wang et al., 2015. Por outro lado, o incremento da diluição de CO_2 provoca aumento da massa específica da mistura e, portanto, o aumento na sua quantidade de movimento, o que poderia resultar no alongamento da chama. Além disso, o incremento de CO_2 representa uma menor quantidade de combustível sendo queimada, resultando no encurtamento da chama.

Por outro lado, o estudo proposto por Majeski et al., 2004, propõe através de equações de balanço de massa e assumindo a chama como uma superfície cilíndrica, um modelo que relaciona o comprimento de chama com os parâmetros variáveis da configuração da queima de combustível sujeita a vento lateral. Assim, foi obtida a seguinte correção, conforme a Equação 2.11 descrita na seção 2.3.

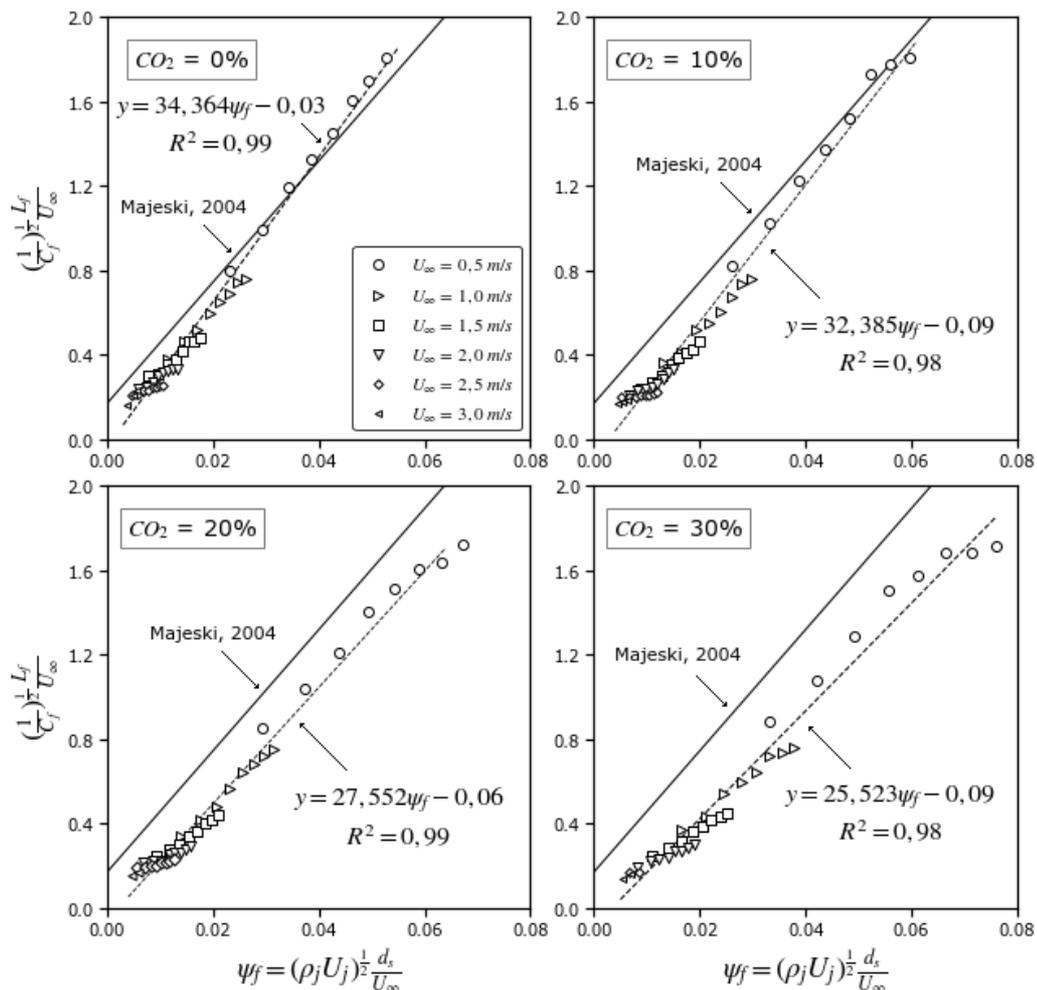


Figura 4.11 – Modelo proposto pela presente pesquisa, normalizado a partir de Majeski et al., 2004, para o comprimento de chama e medições experimentais de comprimento de chama para diversas diluições com CO_2 e vento lateral.

A partir da Figura 4.11, observa-se que os resultados normalizados por este modelo apresentam uma concordância com os parâmetros experimentais adotados no presente estudo. É importante salientar que os autores validaram o modelo para chamas de propano com diluições de CO_2 (onde as massas específicas dos componentes são próximas) e com baixas razões de quantidade de movimento entre os jatos na faixa de $0,006 \leq R \leq 4,6$ com chamas do tipo *Wake-stabilized*. Desse modo, a partir dos resultados obtidos, o presente estudo valida a metodologia estabelecida por Majeski et al., 2004, nas faixas de valores das propriedades físicas testadas para chamas de GNV diluídas com CO_2 (em que os componentes apresentam uma faixa de massas específicas distintas) e para elevados valores de razão de quantidade de movimento entre os jatos, nomeadamente $5,003 \leq R \leq 873,67$, para chamas do tipo *lifted*.

O modelo de Majeski et al., 2004, foi estendido para previsão de correlações empíricas de ângulo de inclinação da chama. Portanto, o autor da presente pesquisa, propõe a Equação 4.2 para previsão do ângulo de inclinação de chamas difusivas turbulentas em vento cruzado (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s), bocal do queimador de 7,55 mm e diluições de CO_2 (de 0%, 10%, 20% e 30%).

$$\left(\frac{1}{C_J}\right)^{1/2} \theta_{ln} = K_f \ln(\psi_f) - K_U \quad (4.2)$$

onde θ_{ln} representa o ângulo de inclinação da chama proposto neste trabalho, ajustado a partir de Majeski et al., 2004 na forma logarítmica.

Tabela 4.2 – Valores de K_f e K_U referentes ao modelo proposto pela presente pesquisa, ajustado de Majeski et al., 2004 para diferentes diluições de CO_2 .

CO_2 (0%)	K_f	K_U
0	24,51	146,8
10	22,10	139,5
20	22,81	141,2
30	22,30	139,0

Os coeficientes representados na Tabela 4.2 foram obtidos a partir da Equação 4.2 que é resultante da simplificação da Equação 2.11 proposta por Majeski et al., 2004, para chamas em vento cruzado e diluídas com CO_2 , e será referenciada como correlação proposta pelo autor deste estudo.

A Figura 4.12 apresenta a variação do ângulo de inclinação da chama em relação aos parâmetros variados nos experimentos. Percebe-se que para mesma diluição de CO₂ e vento cruzado, com o aumento do fator de forma (o qual está relacionado com a velocidade dos jatos de e a massa específica) aumenta o ângulo de inclinação da chama à medida que aumenta a velocidade do jato de mistura. Por outro lado, a predominância do vento cruzado faz com que haja diminuição do ângulo de inclinação, conforme mostraram os resultados experimentais. Apesar de ter sido observada uma pequena influência da diluição de CO₂ sobre o ângulo de inclinação, pois a inserção de CO₂ permitiu o aumento da massa específica da mistura, acreditando-se que este efeito ocasionou o aumento da quantidade de movimento, fez com que houvesse diminuição do ângulo de inclinação da chama com o aumento do vento cruzado.

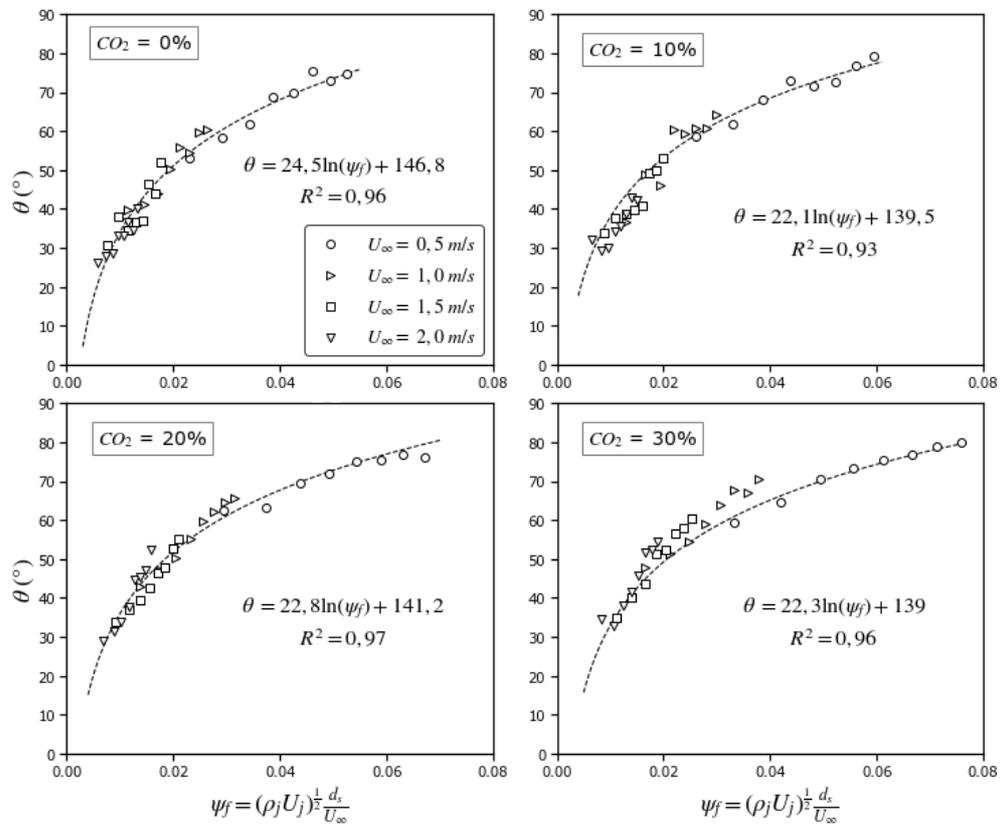


Figura 4.12 – Variação do ângulo de inclinação da chama em relação as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos (ajuste logarítmico).

A extensão do modelo proposto pelo autor do presente estudo, ajustado a partir de Majeski et al., 2004 representado pelo fator de forma, ψ_f , mostrou-se representativo na normalização dos resultados do ângulo de inclinação da chama para um ajuste logarítmico, como pode ser observado na Figura 4.12 a partir do valor de R².

As Figuras 4.13 e 4.14 compara os dados obtidos experimentalmente com o modelo logarítmico proposto pelo autor do presente estudo, ajustado a partir de Majeski et al., 2004 em diferentes diluições de CO₂ (de 0% até 30%) para velocidades de ventos cruzados (de 0,5 m/s a 1,0 m/s).

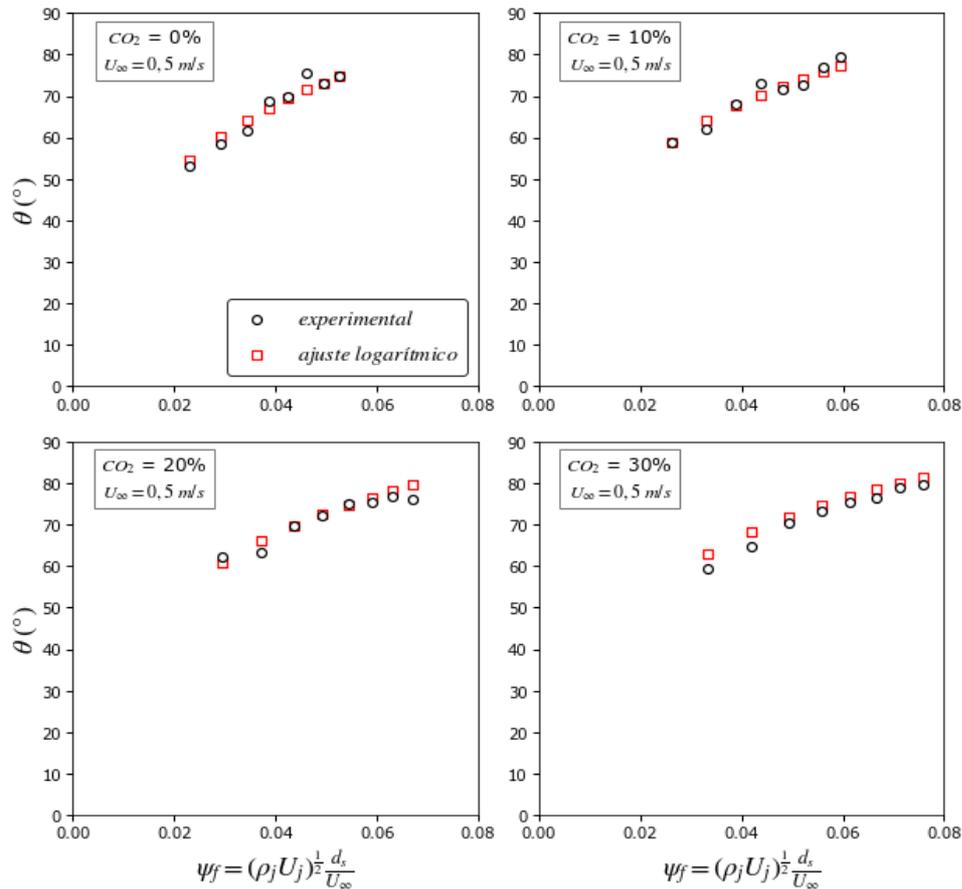


Figura 4.13 – Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 0,5 m/s e diferentes diluições de CO₂.

Na Figura 4.12 ilustra o ajuste logarítmico proposto pelo autor do presente estudo sobre o ângulo de inclinação da chama comparando com os obtidos experimentalmente. Segue o fato de que aumentando o fator de forma (o qual está relacionada com as velocidades dos jatos), mais inclinada estará a chama, tendendo a posição vertical e, portanto, o ângulo de inclinação da chama tende a aproximar de 90°.

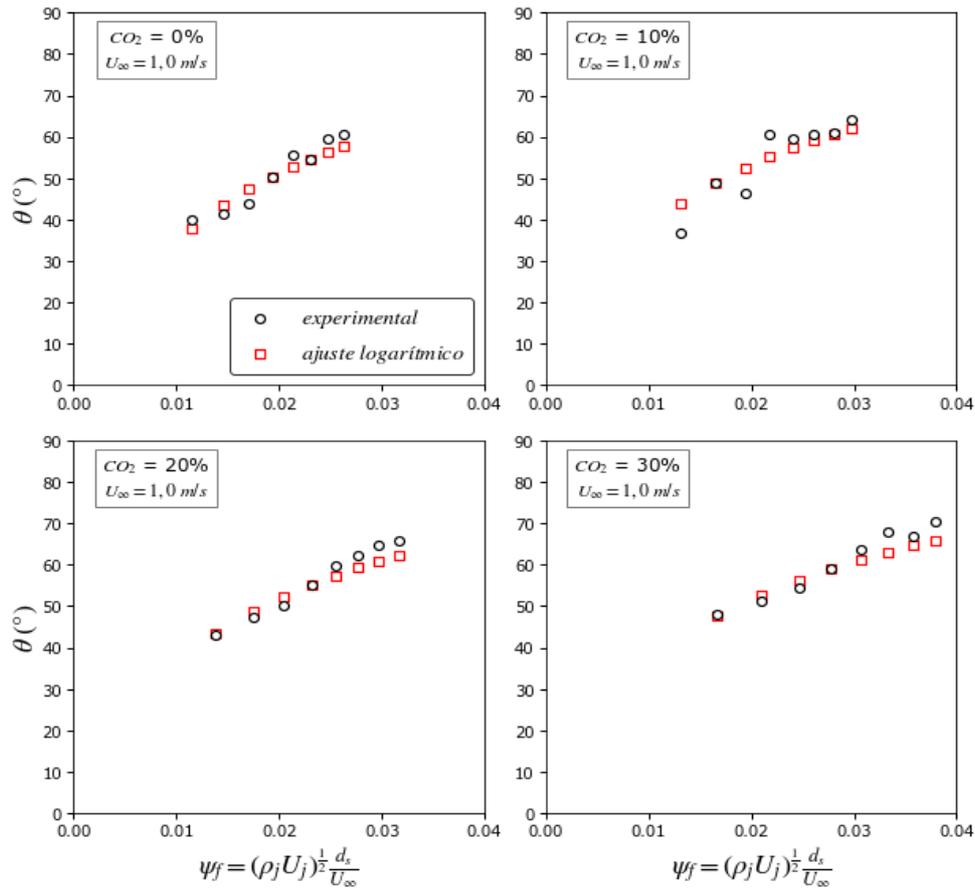


Figura 4.14 – Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 1,0 m/s e diferentes diluições de CO_2 .

Por outro lado, a Figura 4.13 apresenta um comportamento semelhante ao da Figura 4.14, mas na Figura 4.14 é ilustrada para velocidade de vento cruzado de 1,0 m/s podendo ser observado com o incremento do fator de forma ocasionou a redução do ângulo de inclinação da chama, seguindo o que foi obtido experimentalmente. Os resultados do comparativo entre a correlação do ajuste logarítmico e dados experimentais em relação às velocidades de ventos cruzados (de 1,5 m/s e 2,0 m/s) nas diluições de CO_2 (de 0%, 10%, 20% e 30%) estão mostrados no Apêndice E, na Figura E.1 para velocidade de vento cruzado 1,5 m/s e na Figura E.2 para velocidade 2,0 m/s, e seguem os mesmos comportamentos mostrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

4.1.2.7.2 Comparação entre as correlações propostas pela presente pesquisa, para previsão do comprimento de chama

A Tabela 4.3 apresenta o comparativo de comprimento de chama experimental, L_{fexp} , com vazões de mistura de reagentes, vento cruzado (de 0,5 m/s até 2,0 m/s) e diluição de 0%

CO₂ em relação ao modelo proposto neste estudo, ajustado com base em Majeski et al., 2004. As tabelas sobre o comparativo de comprimentos de chamas de dados experimentais e o modelo proposto, ajustado a partir de Majeski et al., 2004, para outras velocidades de vento lateral e diluições de CO₂, estão mostrados no Apêndice E nas Tabelas E.1, E.2 e E.3.

Tabela 4.3 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fN} , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 0% de CO₂ e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 0% CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 0% CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 0% CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 0% CO ₂		
	L_{fexp} [m]	L_{fN} [m]	ARE [%]									
8,63	0,398	0,381	4,127	0,382	0,367	4,099	0,451	0,352	22,175	0,486	0,336	30,756
13,80	0,496	0,487	1,974	0,465	0,472	1,363	0,466	0,457	2,099	0,494	0,441	10,699
18,98	0,597	0,573	4,006	0,522	0,558	6,895	0,539	0,543	0,828	0,544	0,528	2,907
24,15	0,665	0,648	2,476	0,598	0,633	6,007	0,571	0,618	8,316	0,598	0,603	0,848
29,33	0,727	0,716	1,439	0,654	0,701	7,136	0,625	0,686	9,724	0,642	0,671	4,445
34,50	0,802	0,778	2,987	0,687	0,763	11,016	0,696	0,748	7,409	0,656	0,733	11,821
39,68	0,850	0,835	1,744	0,747	0,820	9,834	0,700	0,805	14,991	0,660	0,790	19,692
44,86	0,903	0,889	1,5747	0,763	0,874	14,551	0,722	0,859	19,037	0,673	0,844	25,442
AARE	2,225			7,016			7,862			2,646		

O modelo proposto aqui, de acordo com as variáveis que influenciam no estudo, nomeadamente velocidades dos jatos (reagentes e vento cruzado), bem como a diluição do CO₂ na mistura de combustível, foram ajustados a partir da correlação empírica da literatura, estabelecida por Hu et al., 2015. Essas propõem, através de equações de chamas puramente controladas pela razão de quantidade de movimento entre os jatos, um modelo estimado para determinar o comprimento de chama conforme a correlação expressa na Equação 4.3:

$$\left(\frac{1}{C_{CO_2}}\right) \frac{L_{fh}}{d_s} = 6 \left(\frac{U_J}{U_{\infty}}\right)^{0,5} + 2,35R + 20 \frac{\left(\frac{U_J}{U_{\infty}}\right)}{R} \quad (4.3)$$

onde C_{CO_2} é o fator de correção para chamas diluídas com dióxido CO₂ de carbono, L_{fh} é o comprimento de chama proposto neste trabalho, ajustado a partir do modelo de Hu et al., 2015.

Os resultados referentes ao comparativo de comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , modelo proposto pelo autor deste estudo, L_{fh} , e ajustado a partir de Hu et al., 2015 com de 0% CO_2 e vento cruzado (de 0,5 m/s até 2,0 m/s) estão mostrados na Tabela 4.4. Para outras condições, nomeadamente diluições (de 10% até 30%), encontram-se disponíveis no Apêndice E, das Tabelas E.4, E.5 e E.6.

Tabela 4.4 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fh} , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 0% de CO_2 e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_\infty = 0,5 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 1,0 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 1,5 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 2,0 \text{ m/s}$ 0% CO_2		
	L_{fexp} [m]	L_{fh} [m]	ARE [%]									
8,63	0,379	0,497	24,936	0,382	0,498	30,397	0,452	0,569	25,917	0,486	0,622	27,953
13,80	0,496	0,565	13,868	0,465	0,557	19,814	0,466	0,528	13,225	0,494	0,643	30,008
18,98	0,597	0,635	6,419	0,522	0,594	13,738	0,539	0,627	16,452	0,544	0,681	25,224
24,15	0,665	0,680	2,339	0,598	0,589	1,363	0,571	0,652	14,179	0,598	0,645	7,788
29,33	0,727	0,754	3,766	0,654	0,598	8,561	0,625	0,691	10,566	0,642	0,687	6,966
34,50	0,802	0,805	0,323	0,687	0,655	4,660	0,696	0,612	12,069	0,655	0,668	1,877
39,68	0,850	0,886	4,255	0,747	0,664	11,145	0,700	0,678	3,212	0,660	0,741	12,199
44,86	0,903	0,951	5,234	0,763	0,701	8,173	0,722	0,633	12,302	0,673	0,683	1,454
AARE	4,745			3,011			11,895			9,994		

A Tabela 4.5 apresenta o comparativo de comprimentos de chama obtidas experimentalmente, L_{fexp} , com os comprimentos de chama do modelo proposto, L_{fwu} , ajustados de Wang et al., 2015, através de equações de chamas controladas pela razão de quantidade de movimento entre os jatos na pressão atmosférica. Propõe-se o modelo estimado para o comprimento de chama, que é apresentado na Equação 4.4:

$$\left(\frac{1}{C_{CO_2}}\right) \frac{L_{fwu}}{d_s} = 13,3R^{0,67} \quad (4.4)$$

onde C_{CO_2} é o fator de correção para chamas diluídas com CO_2 , L_{fwu} , é o comprimento de chama referente ao modelo proposto neste estudo.

Os resultados referentes ao comparativo de comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , modelo proposto, L_{fwu} , e ajustado a partir de Hu et al., 2015, com de 0% CO_2 e vento cruzado (de 0,5 m/s até 2,0 m/s) estão mostrados na Tabela 4.5 Para outras condições, nomeadamente diluições (de 10% até 30%), encontram-se disponíveis no Apêndice E, das Tabelas E.7, E.8 e E.9.

Tabela 4.5 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chama, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fwu} , ajustado a partir de Wang., 2015 com 0% de CO_2 e ventos cruzados (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_\infty = 0,5 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 1,0 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 1,5 \text{ m/s}$ 0% CO_2			$U_\infty = 2,0 \text{ m/s}$ 0% CO_2		
	L_{fexp} [m]	L_{fwu} [m]	ARE [%]									
8,63	0,379	0,370	6,932	0,382	0,290	24,048	0,452	0,278	38,379	0,486	0,266	45,288
13,80	0,496	0,477	3,986	0,465	0,387	16,898	0,466	0,316	32,326	0,494	0,341	31,024
18,98	0,597	0,570	4,471	0,522	0,455	12,860	0,539	0,422	21,610	0,544	0,412	24,242
24,15	0,665	0,633	4,797	0,598	0,482	19,403	0,571	0,475	16,733	0,598	0,427	28,620
29,33	0,727	0,717	1,376	0,654	0,511	21,868	0,625	0,534	14,568	0,642	0,486	24,298
34,50	0,802	0,775	3,398	0,687	0,578	15,849	0,696	0,494	29,025	0,655	0,497	24,109
39,68	0,850	0,860	1,166	0,747	0,600	19,649	0,700	0,566	19,175	0,660	0,575	12,949
44,86	0,903	0,926	2,542	0,763	0,645	15,416	0,722	0,543	24,756	0,673	0,547	18,641
AARE	3,692			18,150			23,183			24,267		

As Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 mostram o comparativo dos desvios calculados a partir do AARE para validação do comprimento de chama entre os modelos propostos, ajustados para o presente estudo com base na literatura, bem como as correlações propostas por Majeski et al., 2004, Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015, para comparar os dados experimentais, com diferentes ventos laterais e diluições de CO_2 .

Tabela 4.6 – Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 0,5 m/s de vento lateral, diluições de CO₂ e diversos autores.

Vento lateral [m/s]	Autores	0%CO ₂	10%CO ₂	20%CO ₂	30%CO ₂
		AARE [%]	AARE [%]	AARE [%]	AARE [%]
0,5	Autor da presente pesquisa/ Majeski et al., 2004	2,225	0,877	5,248	12,240
	Autor da presente pesquisa / Wang et al., 2015	3,692	3,563	2,373	3,347
	Autor da presente pesquisa / Hu et al., 2015	4,745	1,112	2,492	1,021
	Hu et al., 2015	51,486	43,225	30,099	16,123
	Wang et al., 2015	30,180	22,953	9,163	3,111

Tabela 4.7 – Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,0 m/s de vento lateral, diluições de CO₂ e diversos autores.

Vento lateral [m/s]	Autores	0%CO ₂	10%CO ₂	20%CO ₂	30%CO ₂
		Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]
1,0	Autor da presente pesquisa / Majeski et al., 2004	7,016	16,418	21,567	28,216
	Autor da presente pesquisa / Wang et al., 2015	18,150	12,944	8,934	12,546
	Autor da presente pesquisa / Hu et al., 2015	3,011	3,378	5,923	10,658
	Hu et al., 2015	59,631	52,329	41,501	35,525
	Wang et al., 2015	36,177	28,224	16,105	7,492

Tabela 4.8– Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,5 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.

Vento lateral [m/s]	Autores	0%	10% CO_2	20% CO_2	30% CO_2
		Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]
1,5	Autor da presente pesquisa / Majeski et al., 2004	7,862	14,837	29,130	34,779
	Autor da presente pesquisa / Wang et al., 2015	23,183	15,025	9,901	15,736
	Autor da presente pesquisa / Hu et al., 2015	11,895	8,738	3,726	12,938
	Hu et al., 2015	59,565	51,930	43,698	36,817
	Wang et al., 2015	38,271	21,407	12,141	8,633

Tabela 4.9 – Resultados referente ao comparativo de desvios com outros comprimentos de chamas entre os dados experimentais, L_{fexp} , e as correlações ajustadas e correlações propostas pelos autores, com 1,5 m/s de vento lateral, diluições de CO_2 e diversos autores.

Vento lateral [m/s]	Autores	0% CO_2	10% CO_2	20% CO_2	30% CO_2
		Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]	Desvio [%]
2,0	Autor da presente pesquisa / Majeski et al., 2004	2,646	13,974	25,160	42,643
	Autor da presente pesquisa / Wang et al., 2015	24,269	14,181	15,119	16,509
	Autor da presente pesquisa / Hu et al., 2015	9,994	17,188	2,599	4,266
	Hu et al., 2015	60,514	48,474	45,486	37,300
	Wang et al., 2015	36,447	23,212	13,162	6,893

Nas Tabelas apresentadas, verifica-se que para velocidades de vento cruzado de 0,5 m/s os resultados apresentados de AARE, mostraram um valor mínimo de 0,8777% e máximo de 12,240%, ao passo que nas correlações originais apresentados pela literatura o valor mínimo foi de 3,111% e máximo de 51,486% do valor calculado de AARE. Entretanto, para esta

condição, os modelos propostos no presente trabalho, com base em Hu et al., 2015, Wang et al., 2015 e Majeski et al., 2004, mostraram ser próximos aos dados experimentais.

Por outro lado, na velocidade de vento cruzado de 1,0 m/s se obtiveram maiores valores de AARE, se comparado a velocidade de vento cruzado anterior, pois nesta condição, observa-se o valor máximo de AARE de 28,216% na correlação ajustada com base a Majeski et al., 2004, e o mínimo de AARE de 3,011% na correlação proposta neste estudo, com base em Hu et al., 2015. Assim, essa correlação proposta, com base em Hu et al., 2015, seguida de Wang et al., 2015 mostraram valores AARE mais baixos, o que nos permite afirmar que estas correlações apresentam valores de comprimento de chama mais próximos aos dados experimentais, conforme pode ser observada na Figura 4.7. No entanto, nas velocidades de vento cruzado de 1,5 m/s e 2,0 m/s, observa-se o mesmo comportamento na correlação ajustada pelo autor do presente estudo, com base em Hu et al., 2015, apresentando valores baixos de AARE, contudo, na velocidade de vento cruzado de 1,5 m/s, os valores de AARE ficam abaixo de 13%, ao passo que na velocidade de vento cruzado de 2,0 m/s os valores de AARE, mostram-se abaixo de 20%.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam as curvas da evolução do comparativo dos comprimentos de chama obtidos experimentalmente, L_{fexp} , em relação às correlações ajustadas de Majeski et al., 2004, L_{fM} ; Hu et al., 2015, L_{fh} ; e Wang et al., 2015, L_{fwu} , para diferentes velocidades de ventos laterais e diluições de CO_2 .

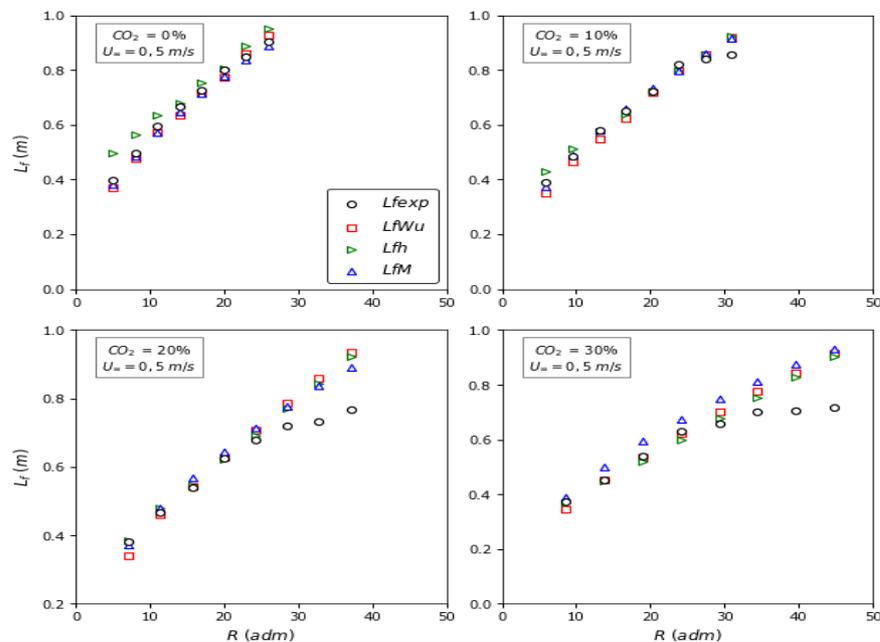


Figura 4.15 – Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, L_{fexp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, L_{fN} ; Hu et al., 2015, L_{fh} ; e Wang et al., 2015, L_{fwu} com vento lateral 0,5 m/s em diferentes diluições de CO_2 .

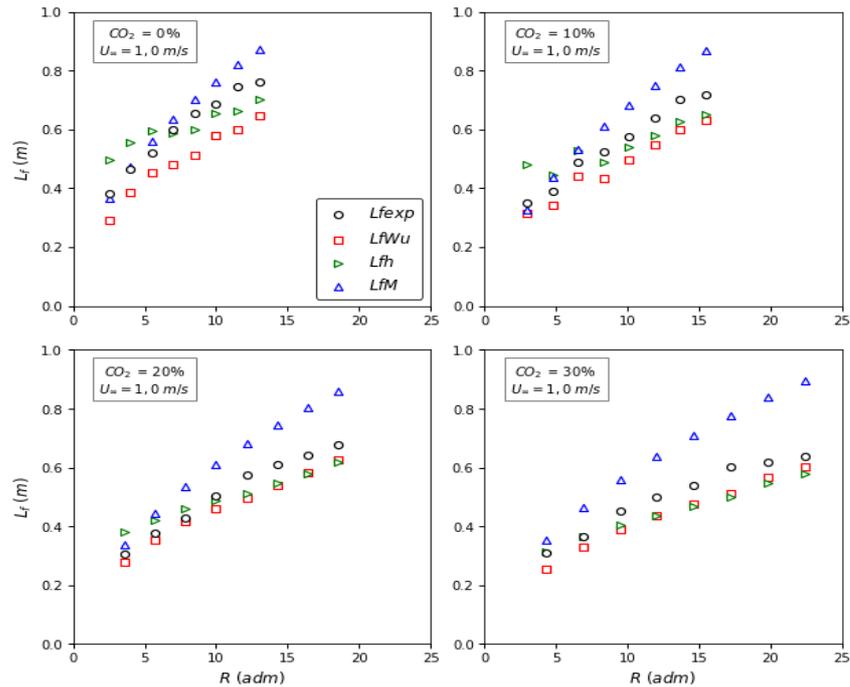


Figura 4.16 – Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, L_{fexp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, L_{fN} ; Hu et al., 2015, L_{fh} ; e Wang et al., 2015, L_{fWu} com vento lateral 1,0 m/s em diferentes diluições de CO_2 .

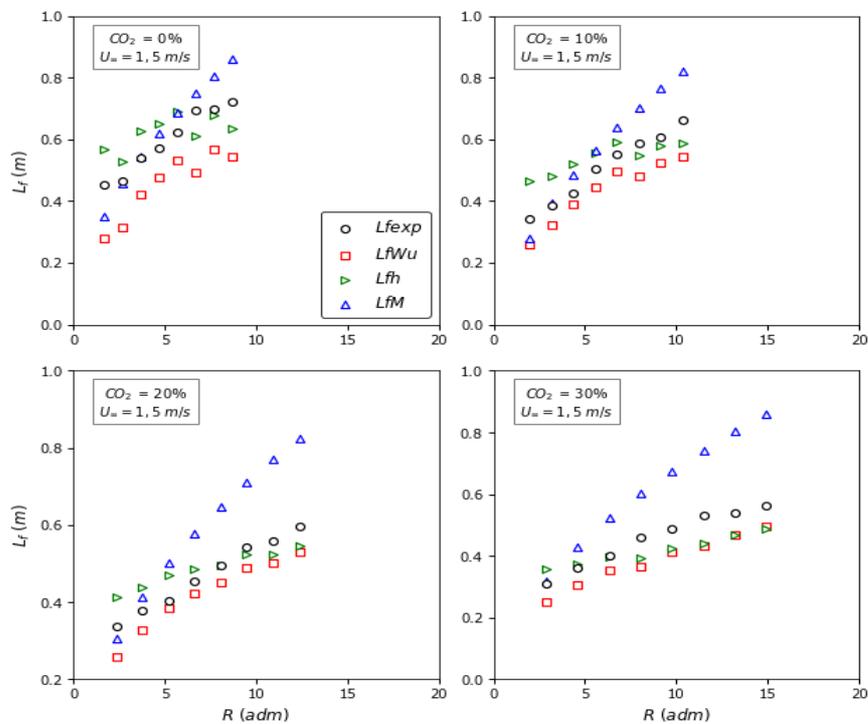


Figura 4.17 – Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, L_{fexp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, L_{fN} ; Hu et al., 2015, L_{fh} ; e Wang et al., 2015, L_{fWu} com vento lateral 1,5 m/s em diferentes diluições de CO_2 .

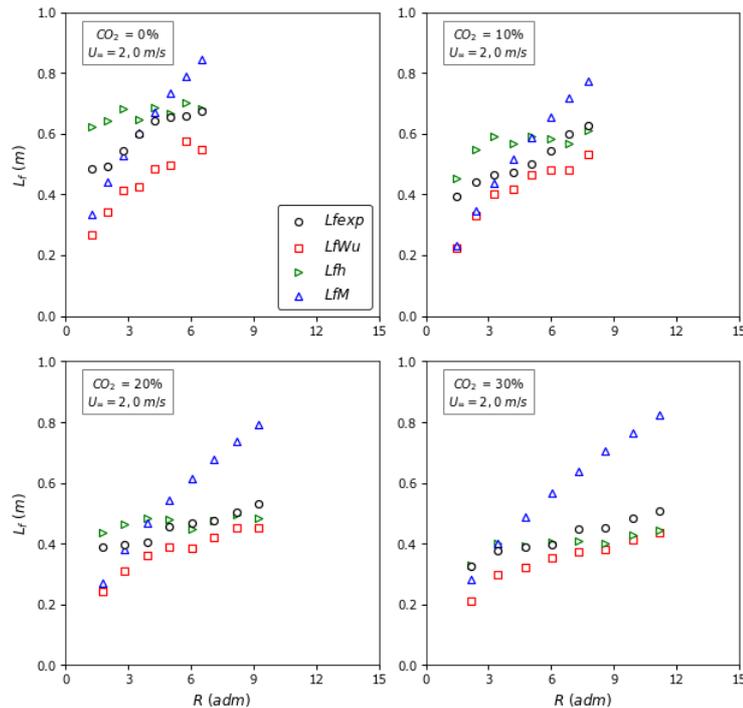


Figura 4.18 – Comparativo do comprimento de chama de dados experimentais, L_{fexp} , com os modelos propostos pela presente pesquisa, ajustados a partir de Majeski et al., 2004, L_{fN} ; Hu et al., 2015, L_{fh} ; e Wang et al., 2015, L_{fWu} com vento lateral 2,0 m/s em diferentes diluições de CO_2 .

A partir das Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, observa-se que há o aumento do comprimento de chama com o incremento da razão de momentos, R . O aumento de CO_2 na mistura, do vento lateral produz uma diminuição do comprimento da chama, ou seja, com o incremento de CO_2 provoca aumento da massa específica da mistura e, portanto, ocasiona o aumento da razão de quantidade de movimento. Por outro lado, o incremento de CO_2 reduz a quantidade de fuligem, permitindo que menor quantidade de combustível seja queimada, resultando no encurtamento da chama, conforme discutido na etapa da apresentação dos resultados experimentais.

Nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 e nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, verificam-se que as correlações propostas neste estudo, ajustadas de Hu et al., 2015, e de Wang et al., 2015, fornecem valores de comprimentos de chamas, L_f , mais próximas dos dados experimentais do que as demais correlações, com exceção da correlação proposta pelo autor da presente pesquisa, ajustado de Majeski et al., 2004, no vento lateral de 0,5 m/s com diferentes diluições. Além disso, é possível notar que a partir dos valores apresentados de AARE, que a correlação também proposta por este trabalho, ajustado de Hu et al., 2015, fornece valores mais baixos se comparados as outras correlações.

Observa-se que nos ventos apresentados (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s) os valores de AARE para a correlação proposta pelo autor do presente estudo, ajustada de Hu et al., 2015, não passa dos 18% do valor de AARE. A correlação proposta ajustada de Wang et al., 2015, apresentou o máximo de desvio de 24% na velocidade de vento cruzado de 2,0 m/s e diluição de 0% CO₂. Com base resultados apresentados de correlações propostas por esta pesquisa, ajustados de Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015, os resultados obtidos nos ensaios experimentais (L_{fexp}), quando comparados com outras correlações, mostram-se coerentes, tomando como critério dos valores calculados de AARE percentuais apresentados.

Os resultados do comparativo de outros comprimentos de chamas com os dados experimentais, L_{fexp} , com os modelos propostos por Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015, diluições de CO₂ e outros ventos, estão indicados no Apêndice E, nas Tabelas E.10, E.11, E.12, E.13, E.14, E.15, E.16 e E.17.

4.2 Radiação térmica

4.2.1 Mapeamento do fluxo de calor radiativo

A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos para o fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições, para o caso sem diluição (0% de CO₂), vento lateral de $U_{\infty} = 1,5$ m/s, e os sensores distantes, na direção y , $1,5 L_f$ da chama (Figura 4.19a) e $2,0L_f$ (Figura 4.19b). Já a Figura 4.20 mostra os resultados obtidos para vento lateral com $U_{\infty} = 2,0$ m/s. O mapeamento do fluxo de calor radiativo corresponde às diversas posições na direção z (vertical) e x (horizontal, na direção do vento), sendo ambas adimensionalizadas pelo comprimento de chama (L_f) nas Figuras 4.19 e 4.20.

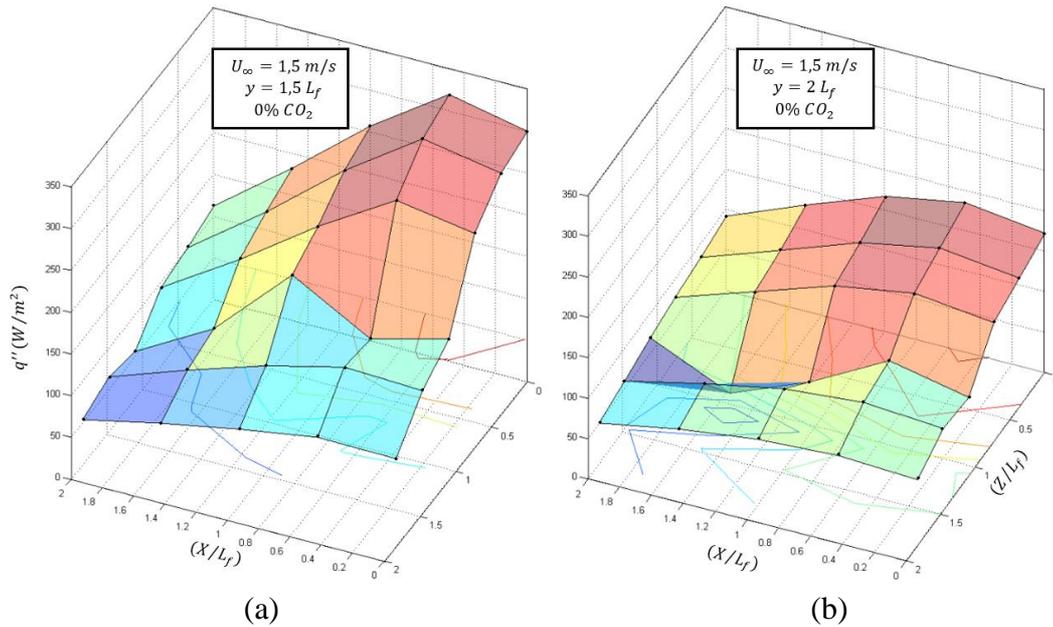


Figura 4.19 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais do fluxo radiativo mostram a sua redução na medida em que os sensores se afastam da chama (na direção y). Esse comportamento está de acordo com o esperado fisicamente, uma vez que os sensores mais distantes cobrem áreas maiores. Considerando uma esfera imaginária ao redor da chama, com o centro da chama sendo o centro da esfera, a distância entre o sensor e o centro da chama sendo o raio da esfera, e levando ainda em consideração que a chama emite como uma fonte pontual para observadores (neste caso, os sensores) localizados a partir de certa distância da mesma.

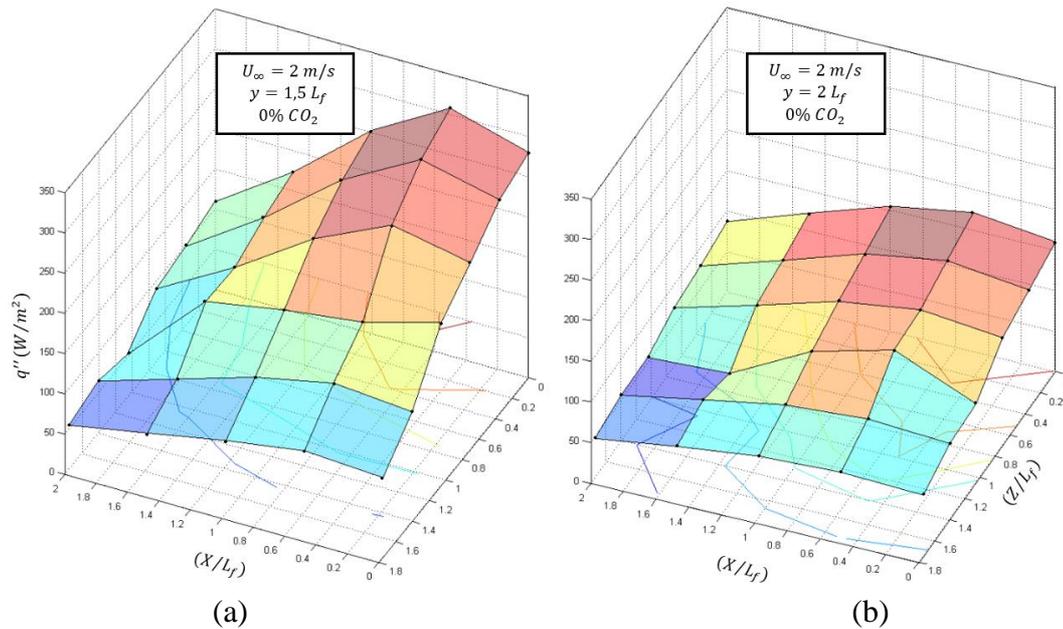


Figura 4.20 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO₂), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 2,0$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

A Figura 4.20 apresenta um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4.19 com ventos cruzados diferentes ($U_\infty = 1,5$ m/s e $U_\infty = 2,0$ m/s). É possível notar que o aumento na velocidade do vento cruzado não produz alteração significativa no comportamento do fluxo radiativo, sendo os maiores valores de fluxo encontrados nas posições próximas ao queimador (x e $z \approx 0$). Entretanto, observam-se que os fluxos radiativos apresentaram valores um pouco menores com o aumento da velocidade do vento lateral, comparando as mesmas posições radiais (y/L_f), longitudinais (x/L_f) e verticais (z/L_f) entre as duas figuras. Assim, a variação do fluxo radiativo apresenta pouca dependência com a velocidade do vento cruzado, tendo maior dependência com a potência da chama, como será mostrado a seguir.

Os mapas de fluxo de calor radiativo para as outras velocidades de vento lateral, diluições de CO₂ e vazões de combustível estão mostrados no Apêndice D, nas Figuras D.3, D.4, D.5 e D.6, D.7 e D.8 e seguem os mesmos comportamentos mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20.

4.2.2 Efeito da diluição de CO₂ e da vazão de mistura sobre a fração radiante

A Figura 4.21 apresenta os resultados obtidos para a fração radiante em relação à vazão de mistura, da diluição com CO₂ (de 0% a 30%), e da velocidade do vento cruzado (de 0,5 m/s a 2,0 m/s), para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,0$ e $z/L_f = 0,21$. Os resultados para outras posições dos sensores de radiação (x/L_f e y/L_f) estão mostrados no Apêndice D, Figura D.9, D.10 e D.11.

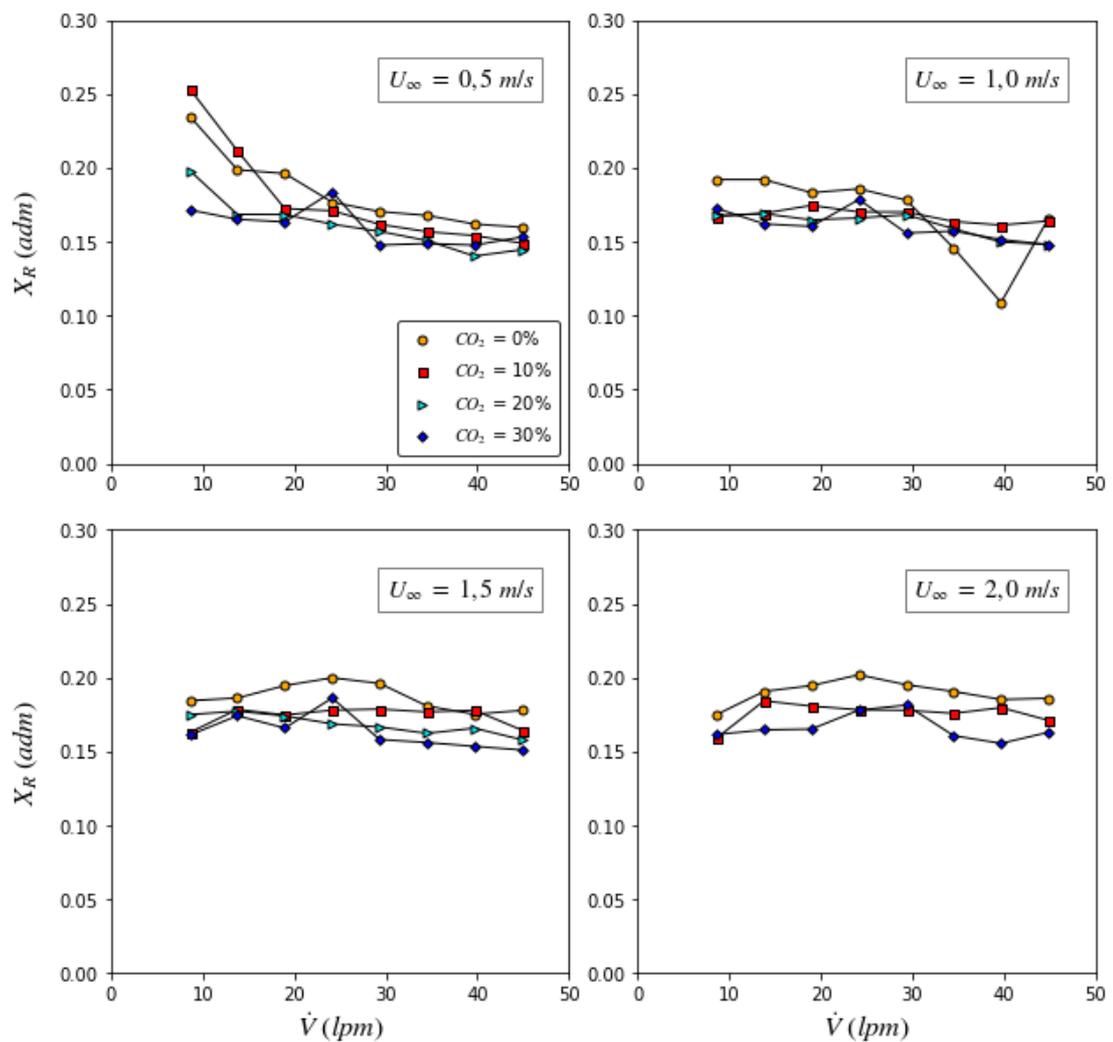


Figura 4.21 – Fração radiante em relação da vazão de mistura, da diluição com CO₂ e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,0$ e $z/L_f = 0,21$.

A Figura 4.22 mostra os resultados experimentais da fração radiante em relação à vazão de mistura, da diluição com CO₂ (de 0% a 30%) e da velocidade do vento cruzado (de

0,5 m/s a 2,0 m/s), para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,21$.

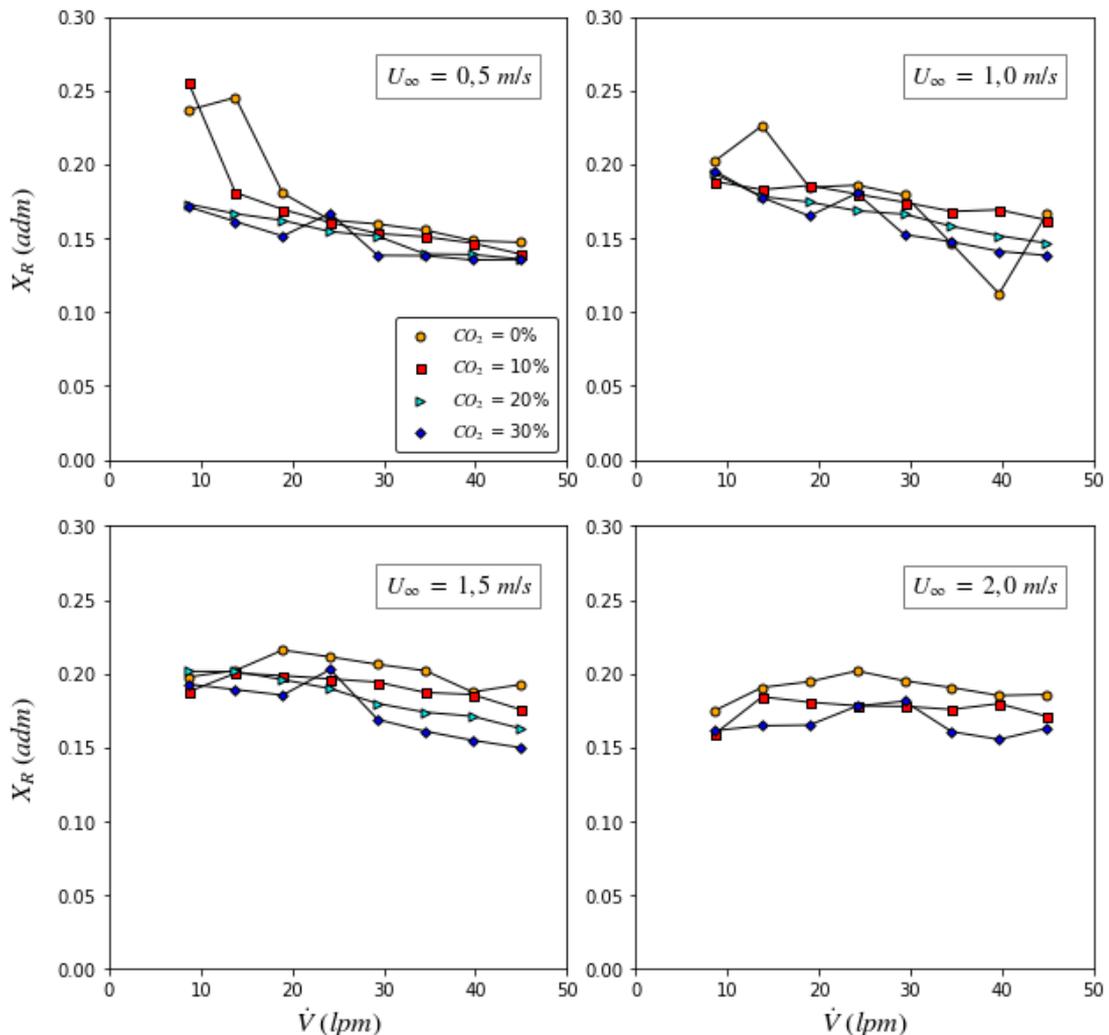


Figura 4.22 – Fração radiante em relação da vazão de mistura, da diluição com CO_2 e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,21$.

Os resultados experimentais das Figuras 4.21 e 4.22 mostram que inicialmente a fração radiante decresce com o incremento da vazão de mistura para todas as situações apresentadas, nas velocidades de ventos cruzados de 1,5 m/s e 2,0 m/s, para vazão mostraram inicialmente um crescimento da fração radiante e depois, apresentou, de 8,63 L/min, passando a decrescer a partir da chama de 29,33 L/min, onde se observa o levantamento da chama. Este decréscimo se deve à redução na emissão de partículas de fuligem (o qual é observada pela mudança de coloração de amarela para azul), ocasionada pela pré-mistura parcial entre o combustível e o oxidante, devido ao efeito da adição de CO_2 , que conduz ao levantamento da chama. Além

disso, é possível notar que a inserção da velocidade do vento cruzado não produz alteração significativa no comportamento dos valores da fração radiante. Observa-se que nos ventos apresentados (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s) os valores de fração radiante descrevem os mesmos fenômenos para diferentes ventos cruzados com o incremento da diluição de CO₂. Sendo assim, pode-se considerar que a variação da fração radiante tem maior dependência com a diluição de CO₂ e vazão de mistura do que com o vento lateral. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Quezada, 2017 e Hu et al., 2014.

Na Figura 4.23 é mostrada a influência da diluição de CO₂ e da velocidade do vento lateral sobre o valor médio da fração radiante (média calculada com os resultados das diversas vazões de combustível).

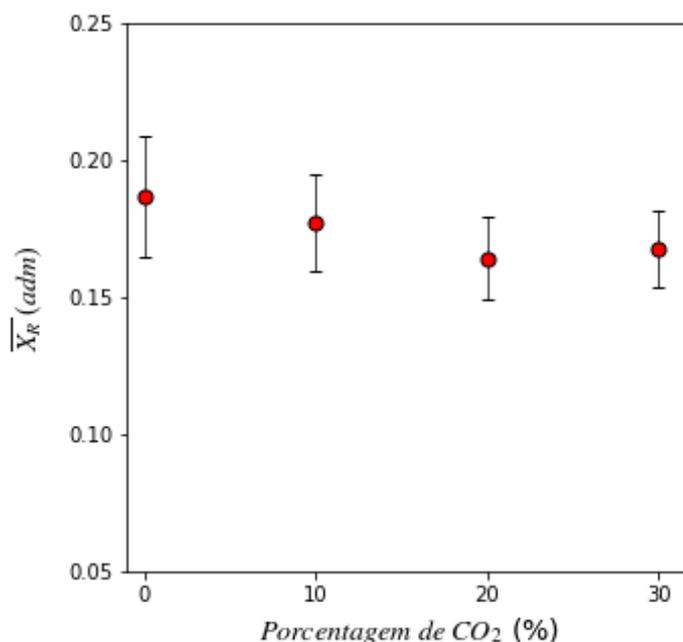


Figura 4.23 – Influência da média das frações radiantes em relação da porcentagem de CO₂ calculada a partir das diversas velocidades de vento e vazões de combustível.

Com base na Figura 4.23, observa-se a redução da fração radiante com o incremento da porcentagem de CO₂. Verifica-se nos ventos apresentados (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s) a redução da média das frações radiantes que é aproximadamente maior para valores menores de CO₂ e descrevem os mesmos fenômenos para diferentes ventos cruzados com o incremento da diluição de CO₂. Contudo, podemos assumir que a variação nos valores das médias das frações radiantes tem maior dependência com a diluição de CO₂ e vazão de mistura do que com a velocidade do vento cruzado.

Na Figura 4.23, nota-se que, à medida que a porcentagem de CO_2 aumenta de 0% até 20% o valor médio da fração radiante é reduzido, tendendo a $\bar{X}_r = 0,17$. No entanto, o aumento da diluição de CO_2 de 20% para 30% leva a um aumento na fração radiante média. Por outro lado, esse efeito do aumento da média da fração radiante com o aumento da diluição de CO_2 de 20% para 30% está relacionado ao fato de que o CO_2 é um gás participante e, neste ponto, o seu efeito de diluição, o qual tende a reduzir a emissão de radiação e conseqüentemente, \bar{X}_r , é menor do que o seu efeito como gás participante, que irá emitir radiação térmica, levando o aumento de \bar{X}_r .

5 CONCLUSÕES

A pesquisa apresentada se destinou a avaliar os efeitos da adição do CO_2 e da velocidade do escoamento de ar cruzado na chama, sobre as suas características da geometria e radiação térmica, usando GNV como combustível. Para tal, esta análise foi dividida em duas sessões. Na primeira etapa do trabalho, realizou-se um estudo sobre a estabilidade e geometria da chama, sendo averiguados os seguintes parâmetros: comprimento, altura de levantamento e ângulos de inclinação. Na segunda parte, estudou-se a radiação térmica, tendo como parâmetros analisados: fluxo de calor radiativo e fração radiante. Para alcançar os resultados de acordo os escritos acima, uma bancada experimental foi construída.

5.1 Geometria da chama

Na primeira parte, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- a) o comprimento de chama aumenta com o incremento da vazão do combustível inicialmente, e a adição de CO_2 fez com que houvesse redução do comprimento de chama, reduzindo a temperatura da chama, a formação de fuligem e interrompendo a propagação da reação química;
- b) o vento lateral causou alongamento da chama para vazões de misturas menores e encurtamento para vazões misturas elevadas, quando comparada a uma chama com a mesma vazão de GNV;
- c) por outro lado, a adição de CO_2 na mistura com GNV e vento lateral causou um crescimento na altura de levantamento da chama e, por consequência, a redução do ângulo do comprimento de chama, intensificando a extinção da chama;
- d) os modelos algébricos propostos para previsão do comprimento de chama foram bem ajustados de acordo com as variáveis físicas apresentadas no estudo, mostrando valores de AARE na faixa de 0,8777% a 28%, vale ressaltar que o modelo proposto no presente estudo, ajustado de Hu et al., 2015 seguido de Wang et al., apresentaram valores de comprimento de chama mais próximos dos obtidos experimentalmente.

5.2 Radiação térmica

Para o estudo da radiação térmica, as seguintes conclusões seguem abaixo:

- a) a adição de CO_2 ao combustível ocasionou a redução da fração radiante das chamas estudadas, pois o CO_2 inibiu a formação de fuligem fazendo com que houvesse diminuição no volume da chama se comparado as chamas de vazões constantes;
- b) além disso, foi possível notar que o vento cruzado não produziu alteração importante no comportamento dos valores da fração radiante. Observou-se que nos ventos apresentados (0,5 m/s; 1,0 m/s; 1,5 m/s e 2,0 m/s) a fração radiante descreveram os mesmos fenômenos nos ventos apresentados e diluições de CO_2 . Por este motivo, conclui-se que a fração radiante tem maior dependência com a diluição de CO_2 do que com o vento lateral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboje, A. A., Erete, J. I., Hughes, K. J., Ma, L., Pourkashanian, M. e Williams, A. An Investigation of Methane and Propane Vertical Flares, **Journal of Energy Institute**, vol. 29, p. 793-806, 2015.

Abu-Gharbieh, R., Hamarneh, G., Gustavsson, T. e Kaminski, C. F. Flame Front Tracking by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy and Advanced Image Analysis, **Optics Express**, vol. 8(5), p. 278-287, 2001.

Andrade, G. S. **Avaliação experimental da duração de combustão para diferentes combustíveis, em um motor padrão ciclo Otto ASTM-CFR**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

Annushkin, Y. M. e Sverdlov, E. D. Stability of Submerged Diffusion Flames in Subsonic and Underexpanded Supersonic Gas-Fuel Streams, **Combustion, Explosion and Shock Waves**, vol. 14(5), p. 597-605, 1979.

Becker, H. A. e Liang, D. Total Emission of Soot and Thermal Radiation by Free Turbulent Diffusion Flames, **Combustion and Flame**, vol. 44, p. 305-318, 1982.

Becker, H. A. e Liang, D. Visible Length of Vertical Free Turbulent Diffusion Flames, **Combustion and Flame**, vol. 32, p. 115-137, 1978.

Beychok, M. R. Observations and Predictions of Jet Diffusion Flame Behaviour, **Atmospheric Environment**, vol. 21(8), p. 1868, 1979.

Birch, A. D., Brown, D. R., Fairweather, M., e Hargrave, G. K., An experimental study of a turbulent natural gas jet in a cross-flow, **Combustion Science and Technology**, vol. 66, 217-232, 1989.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>, 2017, Acesso em: 01-10-2017.

Briggs, G. A. Plume Rise Predictions. In: Haugen, D. A. (Ed.), **Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses**. American Meteorological Society, Lexington 1975. p. 59-111.

Broadwell, J. E. e Breidenthal, R. E. A Simple Model of Mixing and Chemical Reaction in a Turbulent Shear Layer, **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 125, p. 397-410, 1982.

Brzustowski, T. A. Flaring in the Energy Industry, **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 2(3), p. 129-141, 1976.

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

Brzustowski, T. A. Hydrocarbon Turbulent Diffusion Flame in Subsonic Cross-Flow. In: Kennedy, L. A. (Ed.), **Turbulent Combustion**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, 1977. p. 407-430.

Chamberlin, D. S.; Rose, A. The Flicker of Luminous Flames. **Proceedings of the Symposium on Combustion**, vol. 1, p. 27-32, 1948.

Chamberlain, G. A., Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J. e Emerson, D. A Computational Study of Turbulent Non-Premixed Methane Jet Flames in a Crosswind. In: Fifth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, [**Proceedings...**], Edinburgh, 2009. p. 394-403.

Dahm, W. J. A. e Dibble, R. W. Coflowing Turbulent Jet Diffusion Flame Blowout, **Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute**, vol. 22, p. 801-808, 1988.

Erete, J. I., Hughes, K. J., Ma, L., Pourkashanian, M. e Williams, A. An Investigation of Methane and Propane Vertical Flares, **Journal of Energy Institute**, vol. 29, p. 793-806, 2016.

Fairweather, M., Jones, W. P., Lindstedt, R. P. e Marquis, A. J. Predictions of a Turbulent Reacting Jet in a Cross-Flow, **Combust Flame**, vol. 84, p. 361-375, 1991.

GasNet. Gás Natural. **Composição do Gás Natural Comercial**. http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp#gas12/, 2013, Acesso em: 24-03-2019.

Glassman, I. Sooting Laminar Diffusion Flames: Effect of Dilution, Additives, Pressure and Microgravity, **Symposium (International) on Combustion**, vol. 27(1), p. 589-1596, 1998.

Guo, H. A. Numerical Study on the Effects of CO₂ /N₂ / Ar Addition to Air on Lift-off of a Laminar CH₄ / Air Diffusion Flame, **Combustion Science and Technology**, vol. 182, p. 11-12, 2010.

Hankinson, G. e Lowesmith, B. J. A Consideration of Methods of Determining the Radiative Characteristics of Jet Fires, **Combustion and Flame**, vol. 159, p.1165-1177, 2012.

Hawthorne, W. R., Wendel, D. S. e Hottell, H. C. **Third Symposium on Combustion**. Williams and Wilkins, Baltimore, 1949.

Hottel, H. Burning in Laminar and Turbulent Fuel Jets. **Symposium (International) on Combustion**, vol. 4(1), p. 97-113. 1953.

Hu, L. H., Wang, Q., Delichatsios, M., Lu, S. e 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, p. 781-786, 2014.

Hu, L. H., Wang, Q. e Yoon, S. H. Blow-Out Limits of Nonpremixed Turbulent Jet Flames in a Cross Flow at Atmospheric and Sub-Atmospheric Pressures, **Combust Flame**, vol. 162, p. 3562-3568, 2015.

Hu, L. H., Lin Y. e Zhang X. An Experimental Study and Analysis on Maximum Horizontal Extents of Buoyant Turbulent Diffusion Flames Subject to Relative Strong Cross Flows, **Fuel**, vol. 234, p. 508-515, 2018.

Hu, L. H., Zhang, X., Delichatsios, M. A., Wu, L. e Kuang, C. Pool Fire Flame Base Drag Behavior With Cross Flow in a Sub-Atmospheric Pressure, **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 36(2), p. 3105-3112, 2017.

Huang, R. F. e Chang, J. M. Coherent structure in a combusting jet in cross flow, **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal**, vol. 6, p. 1120-1125, 1994.

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

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. e Lavine, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, LTC, Rio de Janeiro, 6. ed., 2008.

Johnson, M. R. e Kostiuk, L. W. Efficiencies of Low Momentum Jet Diffusion Flames in Cross Winds. **Combust Flame**, vol. 123, p.189-200, 2000.

Kalghatgi, G. T. Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air, **Combustion Science and Technology**, vol. 41(1), p.17-29, 1984.

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

Kalghatgi, G. T. Blowout Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames - Part I: In Still Air. **Combustion Science and Technology**, vol. 26, p. 233-239, 1981.

Karagozian, A. R. The Flame Structure and Vorticity Generated by a Chemically Reacting Transverse Jet, **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal**, vol. 2(9), p. 1502-1507, 1986.

Karbassi, M. **Analytical and Experimental Studies of the Stability Limits of Nonpremixed Flames in a Co-flowing Stream**. Thesis, University of Calgary, 1997.

Kostiuk L. W., Majeski A. J. e Poudenx P. Scaling of wake-stabilized jet diffusion flames in a transverse air stream, **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 28, p. 553-559, 2000.

Lawal, M. S., Fairweathera, M., Gogolekb, P., Inghama, D. B., Ma, L., Pourkashanian, M. e Williamsa, A. CFD predictions of wake-stabilised jet flames in a cross-flow, **Energy**, vol. 53, p. 259-269, 2013.

Leahey, D. M. e Schroeder, M. B. Observations and Predictions of Jet Diffusion Flame Behaviour, **Atmospheric Environment**, vol. 21(4), p. 777-784, 1987.

Leahey, D. M. e Schroeder, M. B. Observations and Predictions of Jet Diffusion Flame Behaviour, **Atmospheric Environment**, Part A, General Topics, 24(9), p. 2527-2529, 1990.

Lewis, B. e Von Elbe, G. Air Entrainment and Burning of Jets of Fuel Gases. In: Lewis, B. e Von Elbe, G. **Combustion Flames and Explosion of Gases**, Academic, Academic Press, Massachusetts, 1987. p. 479-531.

Machado, I. M. **Caracterização experimental da radiação térmica emitida por chamas não pré-misturadas de metano diluído com CO₂**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

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

Markstein, G. H. Relationship Between Smoke Point and Radiant Emission From Buoyant Turbulent and Laminar Diffusion Flames, **Symposium (International) on Combustion**, vol. 20, p. 1055-1061, 1984.

Miake-Lye, R. C. e Hammer, J. A. Lifted Turbulent Jet Flames: A Stability Criterion Based on the Jet Largescale Structure. **Symposium (International) on Combustion**, 22(1), p. 817-824, 1988.

Miguel, R. B. **Aplicação da análise inversa para determinar os parâmetros do modelo de múltiplas fontes ponderadas para estimar o fluxo de calor de uma chama do tipo jato laminar de metano-ar**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Oliveira, T. B. **Análise das propriedades geométricas e radiativas de chamas turbulentas difusivas de gás natural com diluição de CO₂ e interação de um escoamento transversal de ar**. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Orloff, L., Ris, J. e Delichatsios, M. A. **Chemical Modelling of Gaseous Species in Turbulent Fires**. FM Global Technical Report, FMRC J.I. OK0J2.BU, 1981.

Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. 9(1), p. 62-66, 1979.

Peters, N. e Williams, F. A. Liff Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames, **AIAA Journal**, vol. 21, p. 423-429, 2004.

Petrobras. **Pré-Sal: Produção de petróleo e gás natural**. <http://www.petrobras.com.br>, Acesso em: 20-09-2017.

Putnam, A. A. e Speich, C. F. A Model Study of the Interaction of Multiple Turbulent Diffusion Flames, **Symposium (International) on Combustion**, vol. 9(1), p.867-877, 1963.

Pratte, B. D. e Baines, W. D. Profiles of rounds turbulent jet in cross flow, **Journal of the Hydraulics Division**, vol. 93(6), p. 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 de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Santos, A. e Costa, M. Reexamination of the scaling laws for NO_x emissions from hydrocarbon turbulent jet diffusion flames, **Combustion and Flame**, vol. 142(1), p. 160-169, 2005.

Sherlock, R. H. e Stalker, E. A. **A Study of Flow Phenomena in the Wake of Smokestacks: University of Michigan Department of Engineering Research, N. 29**, Literary Licensing, Whitefish, 2013.

Shore, D. A proposed comprehensive model for elevated flare flames and plumes. In: AIChE Spring Meeting and Global Congress on Process Safety, [**Proceedings...**], 2006. p. 1-39.

Tsue, M., Kadota, T. e Kono, M. Detailed Measurements of the Structure of a Jet Diffusion Flame in a Cross-Flow, **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 28, p. 295-301, 2000.

Turns, S. R. e Myhr, F. H. Oxides of Nitrogen Emissions From Turbulent Jet Flames: Part I: Fuel Effects and Flame Radiation, **Combustion and Flame**, vol. 87, p. 319-335, 2000.

Turns, S. R., Myhr, F. H., Bandaru, R. V. e Maund, E. R. Oxides of Nitrogen Emissions From Turbulent Jet Flames: Part II: Fuel Dilution an Partial Premixing Effects, **Combustion and Flame**, vol. 93, p. 255-269, 1993.

Vanquickenborne, L. e Van Tiggelen, A. The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames. **Combustion and Flame**, vol. 10(1), p. 59-69, 1966.

Vaz, C. E. M., Maia, J. L. P. e Santos W. G. **Tecnologia da Indústria do Gás Natural**. Blucher, São Paulo, 2008.

Wang, J. W., Fang, J., Guan, J. F., Zeng, Y. e Zhang, Y. M. Flame Volume and Radiant Fraction of Jet Diffusion Methane Flame at Sub-Atmospheric Pressures, **Fuel**, vol. 167, p. 82-88, 2016.

Wang, Q., Hu, L. H. e Zhang, X. L. Turbulent Jet Diffusion Flame Length Evolution With Cross Flows in a Sub-Pressure Atmosphere, **Energy Convers Manage**, vol. 106, p. 703-708, 2015.

Wohl, K., Kapp, N. e Gazley, C. Diffusion Flames. **Third Symposium (International) on Combustion**, vol. 3(1), p. 288-300, 1949.

Yoo, Y. D. e Shin, H. D. Experimental Study of Jet-Diffusion Flames in Cross Air-Flow, **Journal of the Energy Institute**, vol. 472, p. 121-127, 1994.

Zhang, C., Hu, G., Liao, S., Cheng, Q., Xiang, C. e Yuan, C. Comparative Study on the Effects of Nitrogen and Carbon Dioxide on Methane/Air Flames, **Energy**, vol. 106, p. 431-442, 2016.

Zhang, D. Laminar Jet Methane/Air Diffusion Flame Shapes and Radiation of Low Air Velocity Coflow in Microgravity, **Fuel**, vol. 130, p. 25-33, 2014.

Zukoski, E. E., Kubota, T. e Cetegen, B. Entrainment in Fire Plumes, **Fire Safety Journal**, vol. 3(3), p. 107-121, 1981.

APÊNDICE A – Análise de incertezas

A.1 Análise de incerteza para amostragem simples

Para estimar a incerteza de medição do comprimento visível de chama se consideram as incertezas do desvio padrão das medições aleatórias e a resolução visual das imagens das chamas. Desse modo, a metodologia utilizada para determinar as incertezas de medição foi descrita por Andrade, 2007, como a Equação A.1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{A.1})$$

onde,

\bar{x} – Média aritmética;

n – Número de parcelas;

x_i – Valor da parcela;

- a) calcular a variância experimental (S^2), conforme a Equação A.2:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (\text{A.2})$$

- b) calcular o desvio padrão experimental (s), conforme a Equação A.3:

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{n - 1}} \quad (\text{A.3})$$

- c) calcular a repetitividade (R_{ep}) utilizando a distribuição de *t-student*, conforme a Equação A.4:

$$R_{ep} = \bar{x} \cdot t \cdot s \quad (\text{A.4})$$

onde,

R_{ep} – faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório, utilizando a probabilidade de 95%;

t – É o coeficiente da distribuição *t-student*, com o valor de $t = 1,960$ para 250 leituras e intervalo de confiança de 95%.

d) a indeterminação ou a incerteza de medição (IM), conforme a Equação A.5:

$$IM = \frac{R_e}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.5})$$

e) a representação do resultado da medição (RM), conforme a Equação A.6:

$$RM = \bar{X} \cdot IM \quad (\text{A.6})$$

A incerteza calculada com este formato, leva em consideração a determinação da média das medições. Portanto, o intervalo de confiança para média pode ser determinado a partir da Equação A.7:

$$\bar{x} - t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.7})$$

A medição experimental apresenta um grau de incerteza referente aos equipamentos e a metodologia de medição empregada. Para o presente estudo, foram empregadas as incertezas do tipo B, que representa as incertezas calculadas a partir das especificações de calibração do fabricante, da resolução do equipamento e dos procedimentos operacionais.

Tabela A.1 – Valores de incertezas de Medição para vento 0,5 m/s com diferentes diluições de CO₂.

Vento Lateral [m/s]	Vazão do Combustível [L/min]	Diluição [%CO ₂]	Média (L_f) [m]	Desvio Padrão	Incerteza de Medição
0,50	7,8541	0,00	0,3979	0,0597	0,3979 \mp 0,0074
	12,5666	0,00	0,4963	0,0730	0,4963 \mp 0,0090
	17,2790	0,00	0,5969	0,0831	0,5969 \mp 0,0103
	21,9915	0,00	0,6649	0,0931	0,6649 \mp 0,0115
	26,7039	0,00	0,7265	0,0962	0,7265 \mp 0,0119
	31,4164	0,00	0,8019	0,1043	0,8019 \mp 0,0129
	36,1289	0,00	0,8502	0,1027	0,8502 \mp 0,0127
	40,8413	0,00	0,9033	0,1039	0,9033 \mp 0,0129
0,50	7,8541	10,00	0,3909	0,0601	0,3909 \mp 0,0075
	12,5666	10,00	0,4855	0,0783	0,4855 \mp 0,0097
	17,2790	10,00	0,5809	0,0785	0,5809 \mp 0,0097
	21,9915	10,00	0,6506	0,0904	0,6506 \mp 0,0112
	26,7039	10,00	0,7205	0,0883	0,7205 \mp 0,0110
	31,4164	10,00	0,8209	0,0992	0,8209 \mp 0,0123
	36,1289	10,00	0,8416	0,0936	0,8416 \mp 0,0116
	40,8413	10,00	0,8561	0,0924	0,8561 \mp 0,0115

Continua

Continuação

Tabela A.1 – Valores de incertezas de Medição para vento 0,5 m/s com diferentes diluições de CO₂.

0,50	7,8541	20,00	0,3827	0,0592	0,3827±0,0073
	12,5666	20,00	0,4662	0,0720	0,4662±0,0089
	17,2790	20,00	0,5408	0,0740	0,5408±0,0092
	21,9915	20,00	0,6264	0,0834	0,6264±0,0103
	26,7039	20,00	0,6778	0,0893	0,6778±0,0111
	31,4164	20,00	0,7195	0,0807	0,7195±0,0100
	36,1289	20,00	0,7327	0,0916	0,7327±0,0113
	40,8413	20,00	0,7689	0,0831	0,7689±0,0103
0,50	7,8541	30,00	0,3716	0,0547	0,3716±0,0068
	12,5666	30,00	0,4507	0,0537	0,4507±0,0071
	17,2790	30,00	0,5389	0,0752	0,5389±0,0093
	21,9915	30,00	0,6298	0,0878	0,6298±0,0109
	26,7039	30,00	0,6591	0,0724	0,6591±0,0090
	31,4164	30,00	0,7031	0,0830	0,7031±0,0103
	36,1289	30,00	0,7046	0,0715	0,7046±0,0089
	40,8413	30,00	0,7181	0,0658	0,7181±0,0082

Tabela A.2 – Valores de incertezas de Medição para vento 1,0 m/s com diferentes diluições de CO₂.

Vento Lateral [m/s]	Vazão do Combustível [L/min]	Diluição [%CO ₂]	Média (L_f) [m]	Desvio Padrão	Incerteza de Medição
2,00	7,8541	0,00	0,4859	0,0593	0,4859±0,0074
	12,5666	0,00	0,4944	0,0654	0,4944±0,0081
	17,2790	0,00	0,5439	0,0489	0,5439±0,0061
	21,9915	0,00	0,5983	0,0734	0,5983±0,0091
	26,7039	0,00	0,6425	0,0839	0,6425±0,0104
	31,4164	0,00	0,6555	0,0773	0,6555±0,0096
	36,1289	0,00	0,6603	0,0914	0,6603±0,0113
	40,8413	0,00	0,6729	0,0809	0,6729±0,0100
2,00	7,8541	10,00	0,3932	0,0403	0,3932±0,0050
	12,5666	10,00	0,4421	0,0371	0,4421±0,0046
	17,2790	10,00	0,4631	0,0489	0,4641±0,0061
	21,9915	10,00	0,4716	0,0431	0,4716±0,0053
	26,7039	10,00	0,4986	0,0446	0,4986±0,0055
	31,4164	10,00	0,5438	0,0488	0,5438±0,0060
	36,1289	10,00	0,6005	0,0542	0,6005±0,0067
	40,8413	10,00	0,6277	0,0530	0,6277±0,0066
2,00	7,8541	20,00	0,3901	0,0540	0,3901±0,0067
	12,5666	20,00	0,3955	0,0563	0,3055±0,0070
	17,2790	20,00	0,4053	0,0489	0,4053±0,0061
	21,9915	20,00	0,4566	0,0593	0,4566±0,00703
	26,7039	20,00	0,4686	0,0595	0,4686±0,0074
	31,4164	20,00	0,4740	0,0623	0,4740±0,0077
	36,1289	20,00	0,5036	0,0563	0,5036±0,0070
	40,8413	20,00	0,5314	0,00574	0,5314±0,0066

Continua

Continuação

Tabela A.2 – Valores de incertezas de medição para vento 1,0 m/s com diferentes diluições de CO₂.

2,00	7,8541	30,00	0,3247	0,0564	0,3247±0,0070
	12,5666	30,00	0,3757	0,0578	0,3757±0,0072
	17,2790	30,00	0,3897	0,0489	0,3897±0,0061
	21,9915	30,00	0,3973	0,0447	0,3973±0,0055
	26,7039	30,00	0,4482	0,1171	0,4482±0,0145
	31,4164	30,00	0,4531	0,4190	0,4531±0,0052
	36,1289	30,00	0,4850	0,0848	0,4050±0,0105
	40,8413	30,00	0,5077	0,0482	0,5077±0,0066

Na Figura A.1, são apresentados os gráficos de barra de erros de comprimentos de chama com vazão de combustível e velocidades de vento cruzado em diferentes diluições de CO₂.

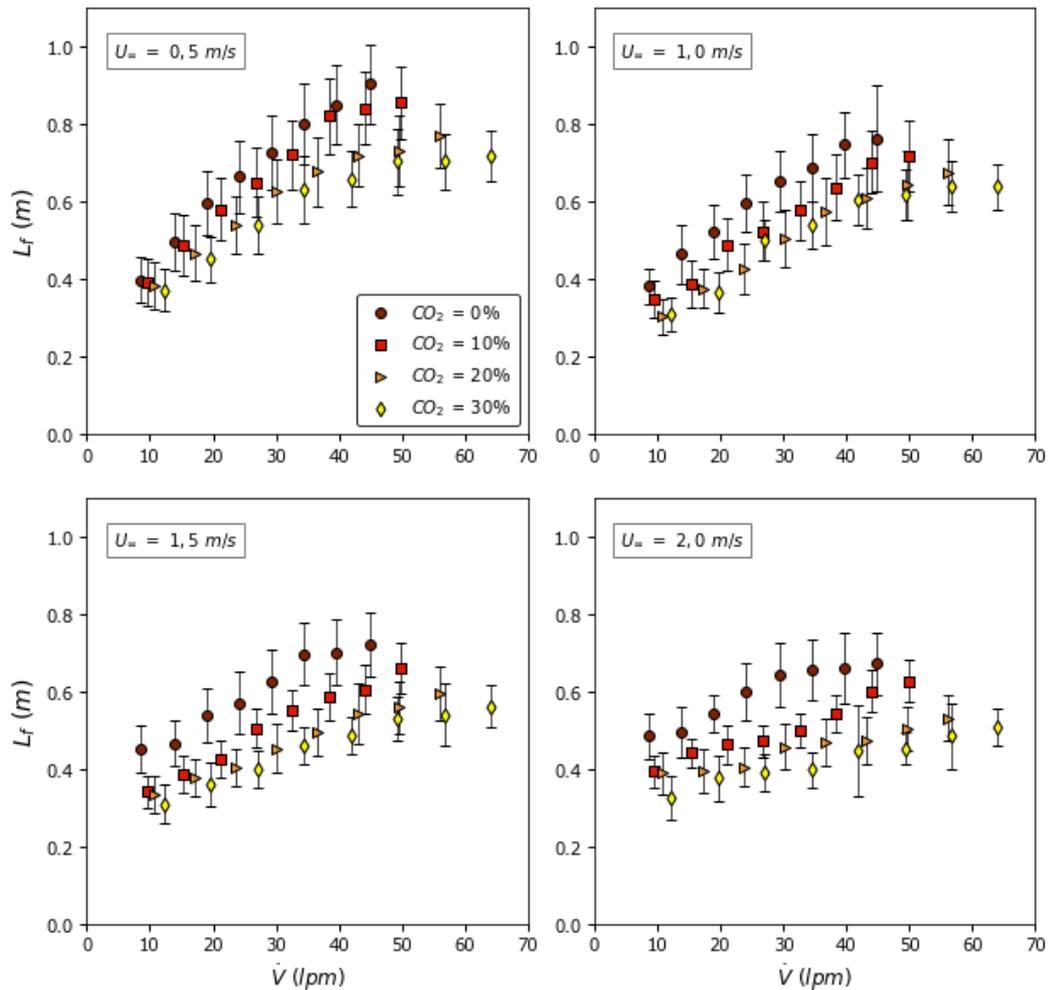


Figura A.1 – Comprimentos de chamas com vazão e velocidades de vento lateral em diferentes diluições de CO₂.

APÊNDICE B – Parâmetros geométricos da chama

Na Figura B.1 é apresentado o gráfico de comprimento de chama em relação a razão de quantidade de movimento entre os jatos com velocidade de vento cruzado (de 2,5 m/s até 3,0 m/s), em diferentes diluições de CO₂.

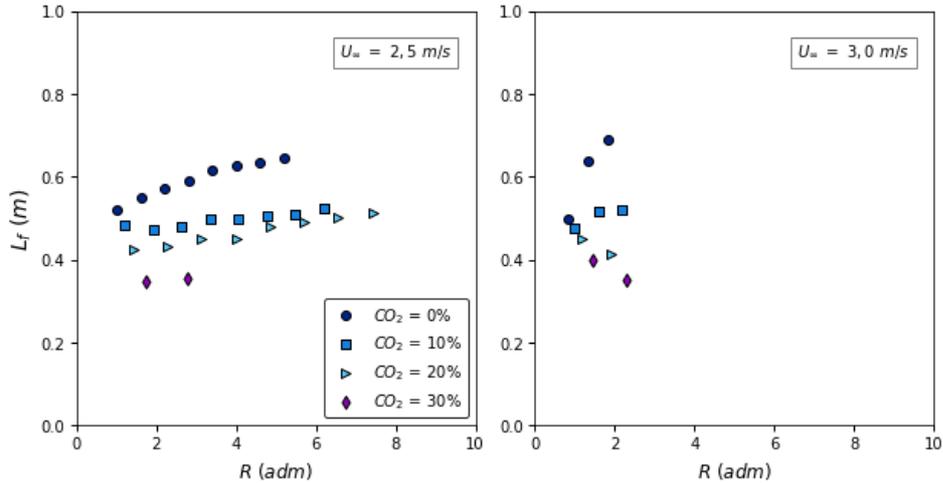


Figura B.1 – Comprimentos de chama em relação a razão de quantidade de movimento entre os jatos e velocidades de vento cruzado em diferentes diluições de CO₂.

Na Figura B.2 é apresentado o gráfico de ângulo de inclinação da chama em relação à razão de mistura de reagentes com velocidade de vento cruzado (de 2,5 m/s até 3,0 m/s), em diferentes diluições de CO₂.

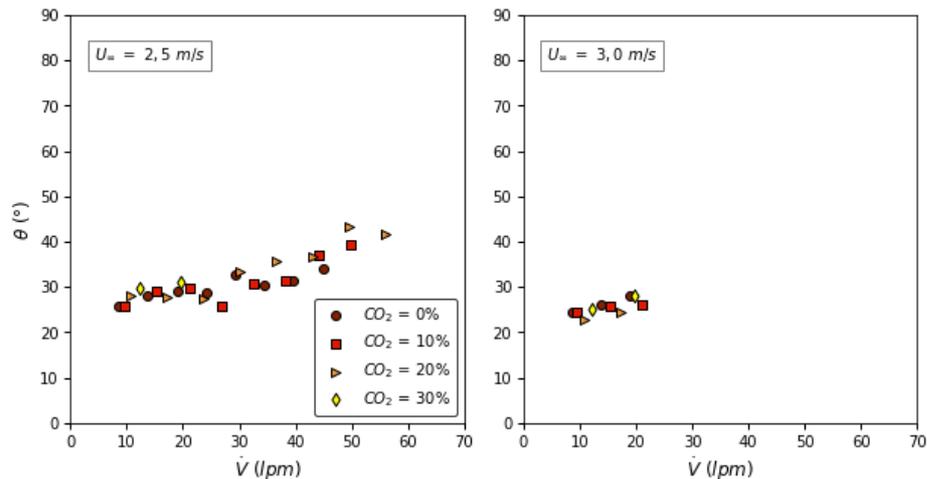


Figura B.2 – Ângulo de inclinação da chama em relação da vazão combustível e da diluição com CO₂ para diferentes velocidades de vento lateral.

Na Figura B.3 é apresentado o gráfico de ângulo de inclinação da chama em relação à razão de quantidade de movimento entre os jatos com velocidade de vento cruzado (de 2,5 m/s até 3,0 m/s), em diferentes diluições de CO₂.

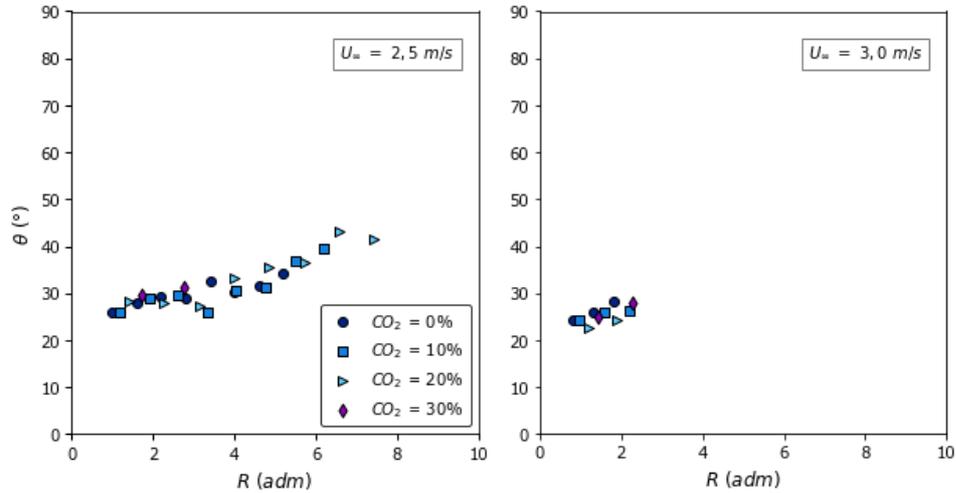


Figura B.3 – Ângulo de inclinação da chama em relação da razão a quantidade de movimento entre os jatos e da diluição com CO₂ para diferentes velocidades de vento lateral.

A Figura B.4 apresenta os resultados da altura de levantamento da chama em relação à vazão de mistura, da diluição com CO₂ (de 0% até 30%) e da velocidade do vento lateral (de 0,5 m/s até 2,0 m/s). Observa-se que o aumento da altura de levantamento é proporcional a vazão de mistura.

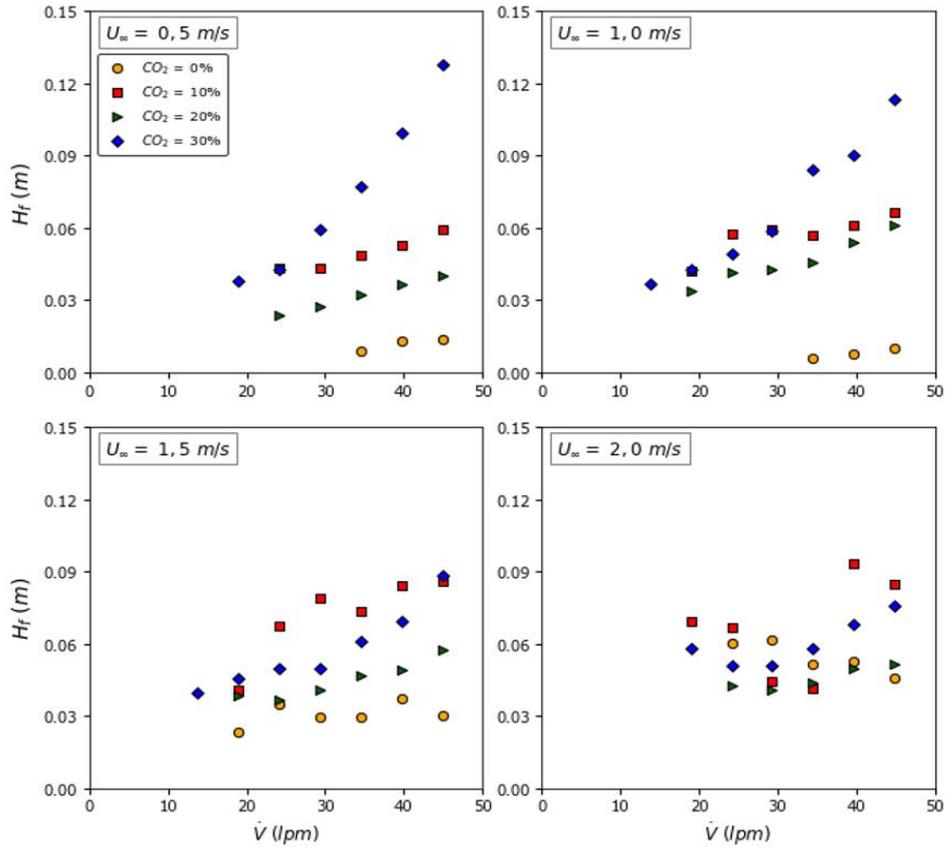


Figura B.4 – Levantamento da chama em relação da vazão de mistura para diferentes velocidades de vento lateral.

A Figura B.5 apresenta os resultados do ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama em relação à vazão de mistura, da diluição com CO₂ (de 0% até 30%) e da velocidade do vento lateral (de 0,5 m/s até 2,0 m/s).

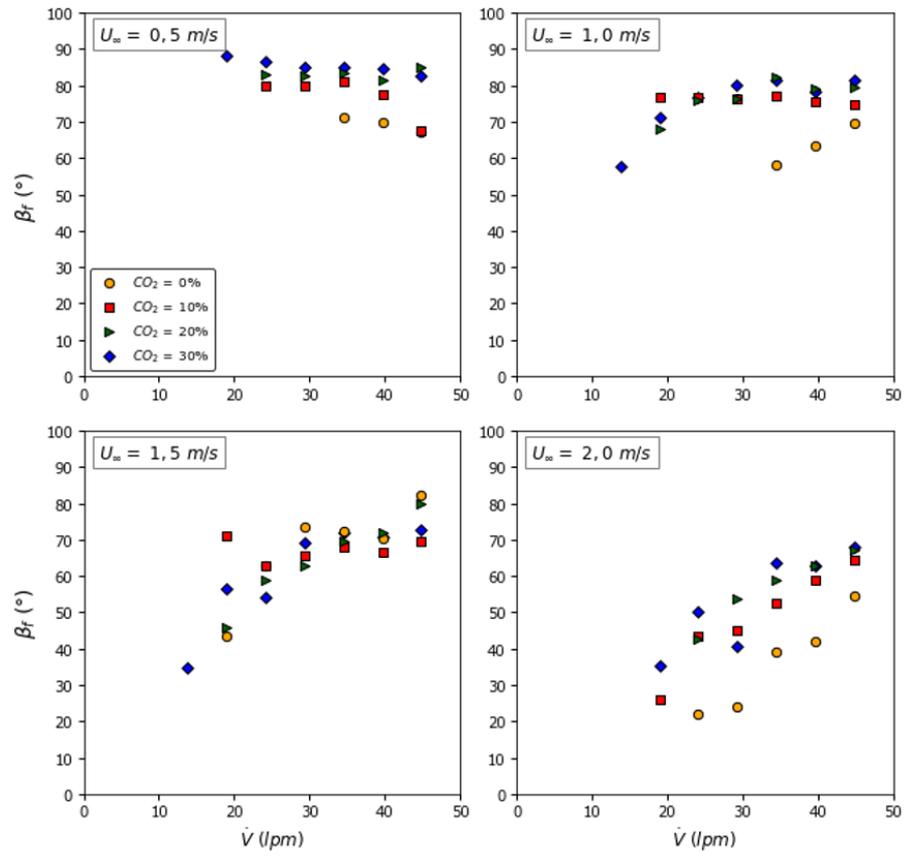


Figura B.5 – Ângulo de inclinação da altura de levantamento da chama em relação da vazão de mistura para diferentes velocidades de vento lateral.

APÊNDICE C – Dados técnicos dos sensores, medidores e anemômetro

Sensor N°	01		
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon		
Fabricante	MEDTHERM		
Modelo	64-0.2-20		
Número de Série	199494		
Ângulo de visão	150°		
Janela	Sem janela		ZnSe
Absortância	0,94		0,94
Incerteza	±3 % s/ responsividade		±3 %
Responsividade	Saída máxima		11,19 $mV@2kW/m^2$
	Sensibilidade		5,595 $\frac{mV}{kW/m^2}$

Sensor N°	02		
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon		
Fabricante	MEDTHERM		
Modelo	64-0.2-20		
Número de Série	199492		
Ângulo de visão	150°		
Janela	Sem janela		ZnSe
Absortância	0,94		0,94
Incerteza	±3 % s/ responsividade		±3 %
Responsividade	Saída máxima		8,37 $mV@2kW/m^2$
	Sensibilidade		4,185 $\frac{mV}{kW/m^2}$

Sensor N°	03		
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon		
Fabricante	MEDTHERM		
Modelo	64-5-20		
Número de Série	188133		
Ângulo de visão	150°		
Janela	Sem janela		ZnSe
Absortância	0,94		0,94
Incerteza	±3 % s/ responsividade		±3 %
Responsividade	Saída máxima		5,86 $mV@5kW/m^2$
	Sensibilidade		1,172 $\frac{mV}{kW/m^2}$
Sensor N°	04		
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon		
Fabricante	MEDTHERM		
Modelo	64-5-20		
Número de Série	188133		

Continua

Continuação

Ângulo de visão	150°	
Janela	Sem janela	ZnSe
Absortância	0,94	
Incerteza	±3 % s/ responsividade	
Responsividade	Saída máxima	$8.06 mV @ 5 \frac{W}{cm^2}$
	Sensibilidade	$0.6203 \frac{mV}{W / cm^2}$
		$5.61 mV @ 5 \frac{W}{cm^2}$
		$1.122 \frac{mV}{W / cm^2}$

Sensor N°	05	
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon	
Fabricante	MEDTHERM	
Modelo	64-0.5-20	
Número de Série	188131	
Ângulo de visão	150°	
Janela	Sem janela	ZnSe
Absortância	0,94	
Incerteza	±3 % s/ responsividade	
Responsividade	Saída máxima	$5,88 mV @ 5 W/m^2$
	Sensibilidade	$11,76 \frac{mV}{kW/m^2}$

Sensor N°	06	
Tipo de Sensor	Sensor de Radiação Tipo Gardon	
Fabricante	MEDTHERM	
Modelo	64-0.2-20	
Número de Série	188133	
Ângulo de visão	150°	
Janela	Sem janela	ZnSe
Absortância	0,94	
Incerteza	±3 % s/ responsividade	
Parâmetros Operacionais	Saída máxima	$8,09 mV @ 2 W/m^2$
	Sensibilidade	$4,045 \frac{mV}{kW/m^2}$

Medidor N°	01	
Tipo de Medidor	Controlador de Vazão	
Fabricante	Omega Engineering Inc.	
Modelo	FMA-2611A	
Número de Série	123173	
Parâmetros Operacionais	Pressão Máxima	160 PSIA
	Vazão Máxima	250.0 SLPM
	Incerteza s/ Pressão	±0,5% s/ Escala Máxima

Medidor N°	02	
Tipo de Medidor	Controlador de Vazão	
Fabricante	Omega Engineering Inc.	
Modelo	FMA-2611A	
Número de Série	122621	
Parâmetros Operacionais	Pressão Máxima	160 PSIA
	Vazão Máxima	500.0 SLPM
	Incerteza s/ Pressão	±0,5% s/ Escala Máxima

Anemômetro N°	01	
Tipo de Anemômetro	Termo Anemômetro Digital	
Fabricante	Minipa do Brasil	
Modelo	MDA-20	
Número de Série	--	
Parâmetros Operacionais	Velocidade Mín	2,0 m/s
	Velocidade Max	30,0 m/s
	Precisão	±(0,5% Leit. + 0.5D)

Anemômetro N°	02	
Tipo de Anemômetro	Termo Anemômetro Digital	
Fabricante	HOMIS	
Modelo	113	
Número de Série	123173	
Parâmetros Operacionais	Velocidade Min	0,2 m/s
	Velocidade Max	20,0 m/s
	Precisão	±(5% +a) leitura ±(1%+a) escala cheia

APÊNDICE D – Mudança na forma da chama

A Figura D.1 mostra a influência da velocidade do vento lateral sobre o formato da chama de 13,80 L/min de vazão total do combustível, obtidos para diversos valores de vento lateral e %CO₂, levando a diferentes valores de razão de momento (R).

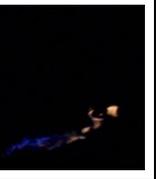
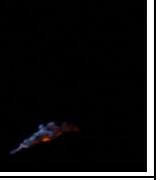
%CO ₂	Vento Lateral (m/s)					
	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
0%						
<i>R</i>	8,00	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33
10%						
<i>R</i>	9,54	4,77	3,18	2,38	1,91	1,59
20%						
<i>R</i>	11,42	5,71	3,81	2,85	2,28	1,90
30%						
<i>R</i>	13,78	6,89	4,59	3,45	2,76	2,30

Figura D.1 – Influência da velocidade do vento lateral na forma da chama.

CO_2	Vento Lateral (m/s)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0%					
R	14,00	7,00	4,67	3,50	2,80
10%					
R	16,69	8,35	5,56	4,17	3,34
20%					
R	19,98	9,99	6,66	4,99	4,00
30%					<i>Blow-Out</i>
R	24,12	12,06	8,04	6,03	<i>Blow-Out</i>
40%				<i>Blow-Out</i>	<i>Blow-Out</i>
R	29,56	14,78	9,74	<i>Blow-Out</i>	<i>Blow-Out</i>

Figura D.2 – Influência da diluição, velocidade do vento cruzado sobre o levantamento e extinção da chama na vazão de combustível 21,99 L/min.

Tabela D.1 – Parâmetros e resultados das medições.

Vento Lateral [m/s]	Vazão [L/min] e (0%CO ₂)			Razão de momento [adm]	Comprimento de chama [m]	Potência [kW]
	GNV	CO ₂	Total			
0,50	7,8541	0,000	7,8541	5,00	0,3979	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	8,00	0,4963	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	11,00	0,5969	11,00
	21,9915	0,000	21,9915	14,00	0,6649	14,00
	26,7039	0,000	26,7039	17,00	0,7265	17,00
	31,4164	0,000	31,4164	20,00	0,8019	20,00
	36,1289	0,000	36,1289	23,00	0,8502	23,00
	40,8413	0,000	40,8413	26,00	0,9033	26,00
1,00	7,8541	0,000	7,8541	2,50	0,3821	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	4,00	0,4652	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	5,50	0,5221	11,00
	21,9915	0,000	21,9915	7,00	0,5975	14,00
	26,7039	0,000	26,7039	8,50	0,6544	17,00
	31,4164	0,000	31,4164	10,00	0,6872	20,00
	36,1289	0,000	36,1289	11,50	0,7469	23,00
	40,8413	0,000	40,8413	13,00	0,7631	26,00
1,50	7,8541	0,000	7,8541	1,67	0,4516	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	2,67	0,4663	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	3,67	0,5386	11,00
	21,9915	0,000	21,9915	4,67	0,5709	14,00
	26,7039	0,000	26,7039	5,67	0,6253	17,00
	31,4164	0,000	31,4164	6,67	0,6963	20,00
	36,1289	0,000	36,1289	7,67	0,7003	23,00
	40,8413	0,000	40,8413	8,67	0,7217	26,00
2,00	7,8541	0,000	7,8541	1,25	0,4859	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	2,00	0,4944	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	2,75	0,5439	11,00
	21,9915	0,000	21,9915	3,50	0,5983	14,00
	26,7039	0,000	26,7039	4,25	0,6425	17,00
	31,4164	0,000	31,4164	5,00	0,6555	20,00
	36,1289	0,000	36,1289	5,75	0,6603	23,00
	40,8413	0,000	40,8413	6,50	0,6729	26,00
2,50	7,8541	0,000	7,8541	1,00	0,5186	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	1,60	0,5507	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	2,20	0,5715	11,00
	21,9915	0,000	21,9915	2,80	0,5893	14,00
	26,7039	0,000	26,7039	3,40	0,6155	17,00
	31,4164	0,000	31,4164	4,00	0,6251	20,00
	36,1289	0,000	36,1289	4,60	0,6349	23,00
	40,8413	0,000	40,8413	5,20	0,6446	26,00
3,00	7,8541	0,000	7,8541	0,83	0,4969	5,00
	12,5666	0,000	12,5666	1,33	0,6383	8,00
	17,2790	0,000	17,2790	1,83	0,6873	11,00

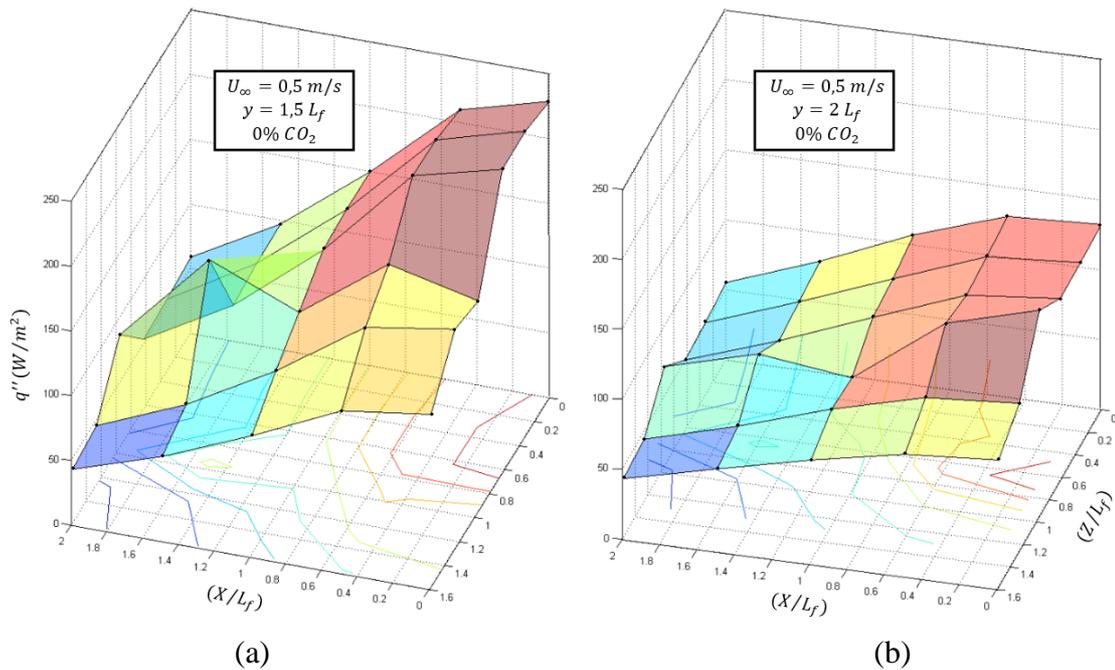


Figura D.3 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 0,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

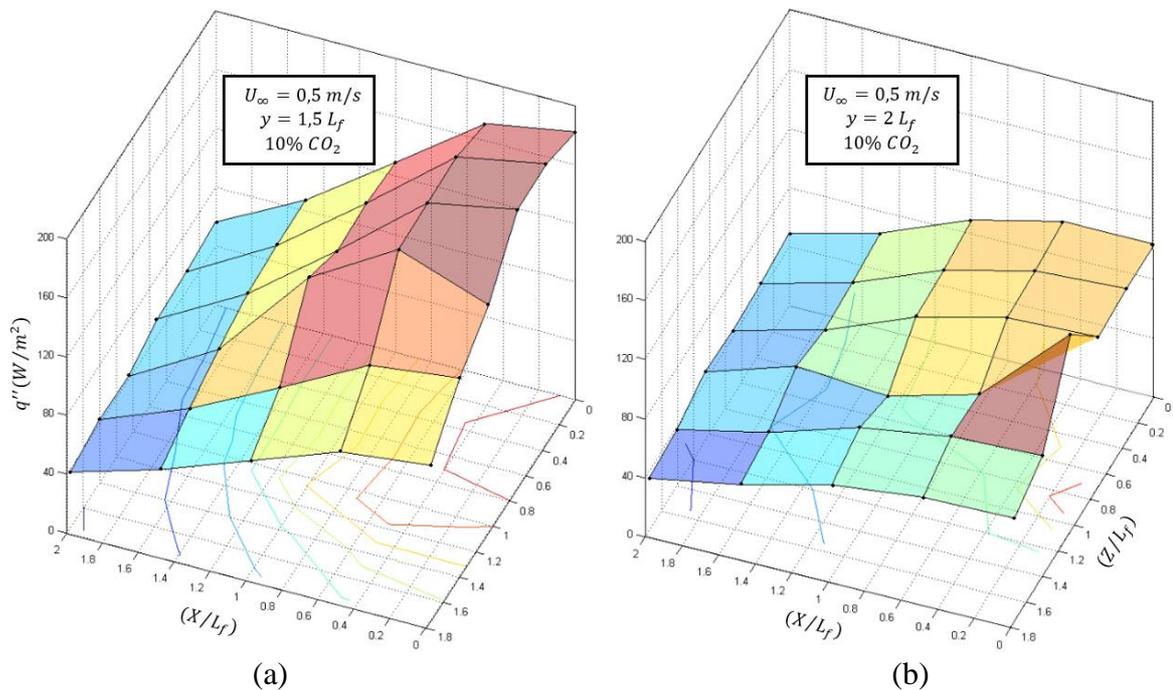


Figura D.4 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 0,5$ m/s: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

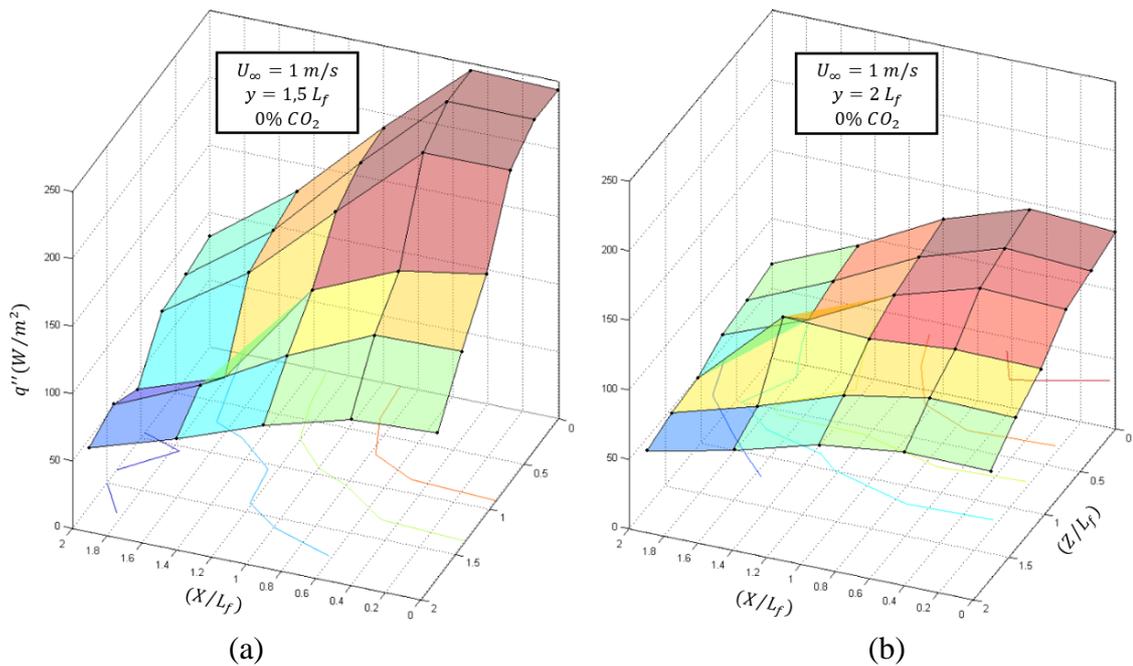


Figura D.5 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (0% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,0 \text{ m/s}$: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

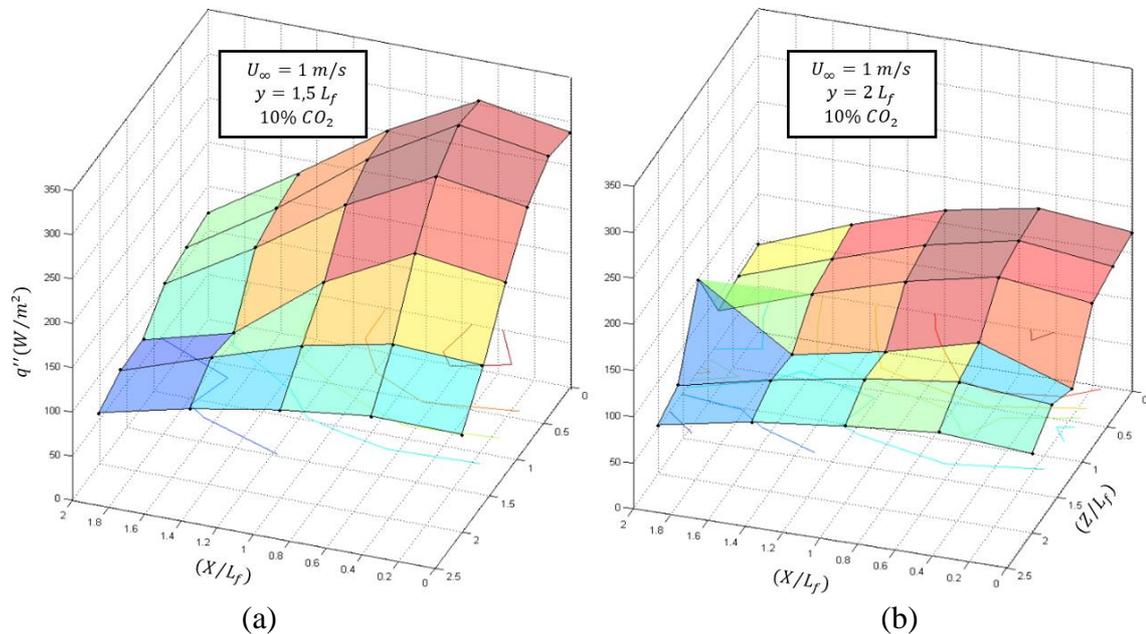


Figura D.6 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_\infty = 1,0 \text{ m/s}$: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

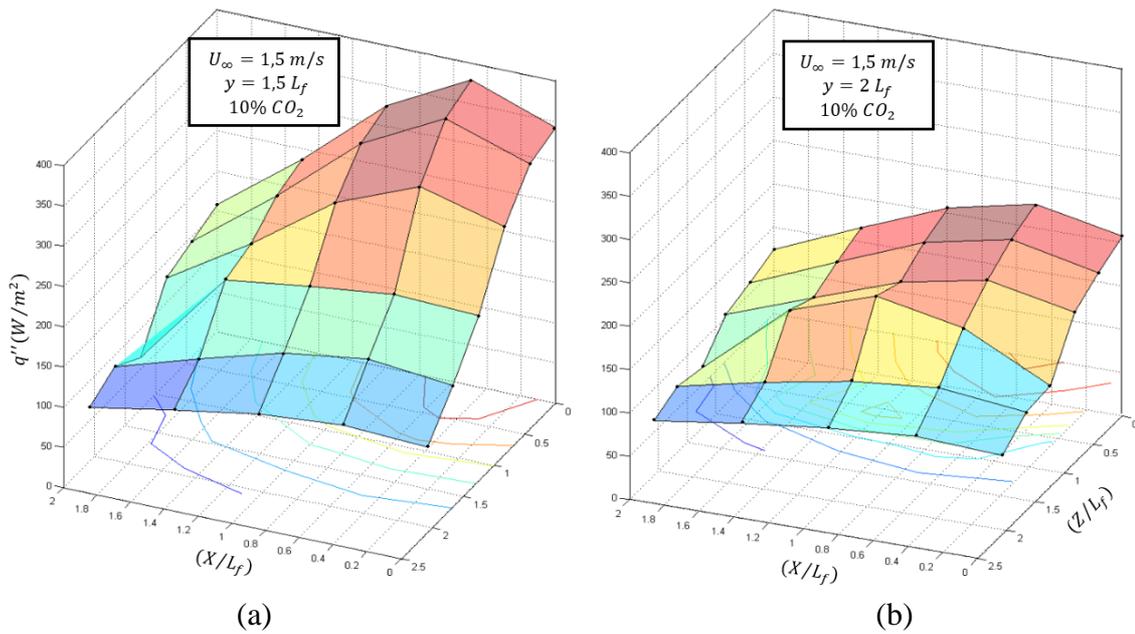


Figura D.7 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

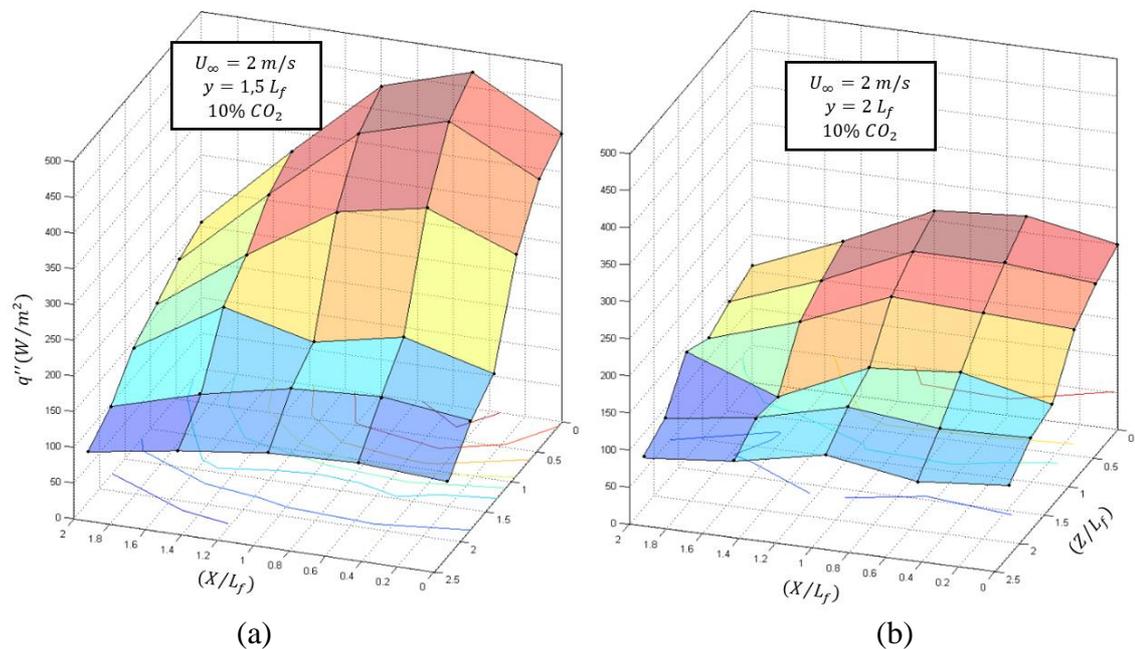


Figura D.8 – Fluxo de calor radiativo medido com os sensores em diferentes posições x - y - z , para o caso sem diluição (10% de CO_2), vazão de combustível de 24,15 L/min, vento lateral com $U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$: (a) sensores distantes $y/L_f = 1,5$ da chama, (b) sensores distantes $y/L_f = 2,0$ da chama.

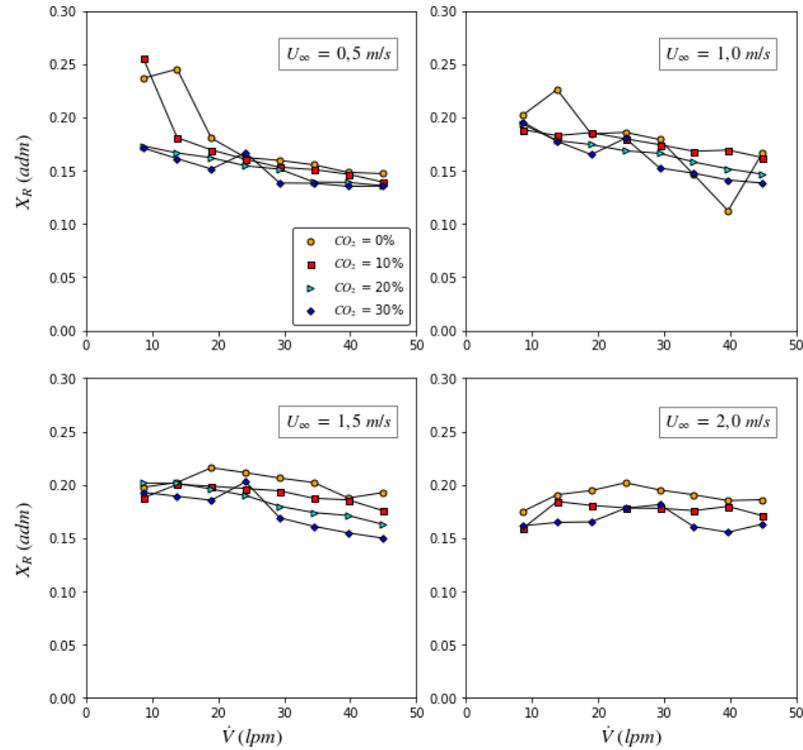


Figura D.9 – Fração radiante em função da vazão do combustível, da diluição com CO₂ e da velocidade do vento cruzado, para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,42$.

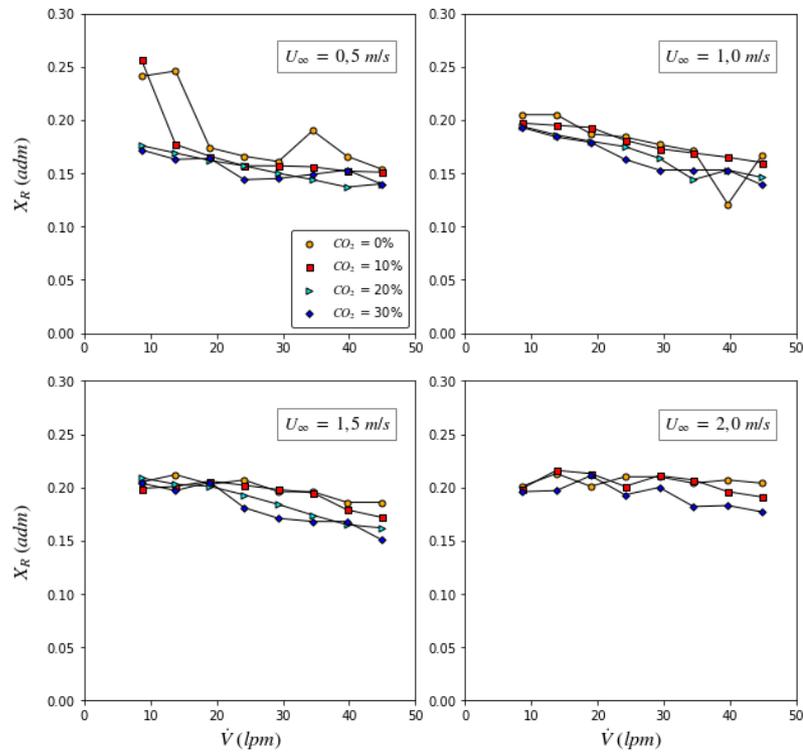


Figura D.10 – Fração radiante em função da vazão do combustível, diluição de CO₂ e da velocidade do vento lateral para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,0$ e $z/L_f = 0,63$.

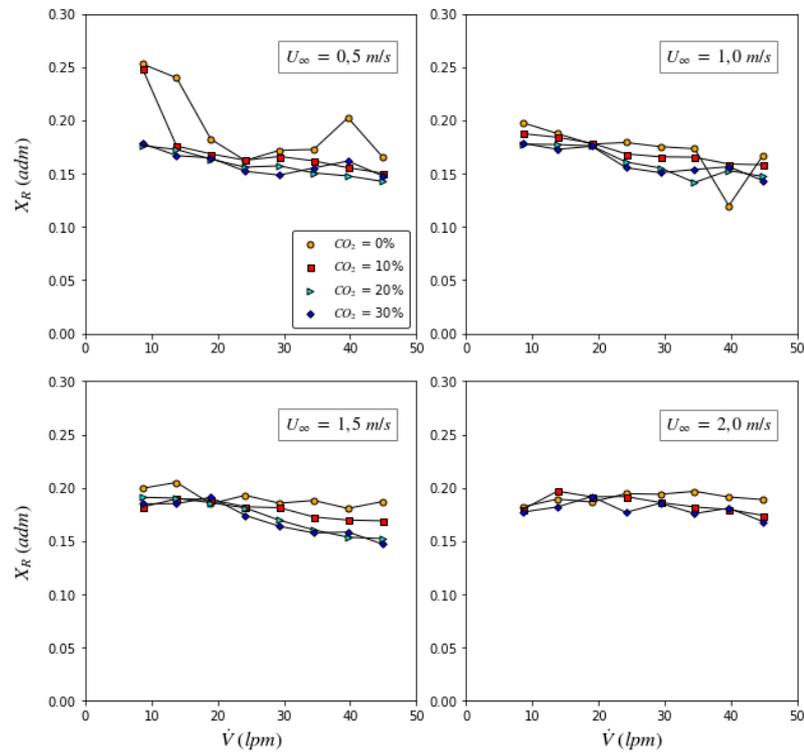


Figura D.11 – Fração radiante em função da vazão do combustível, diluição de CO_2 e da velocidade do vento lateral para o sensor de radiação posicionado em $y/L_f = 2,0$, $x/L_f = 0,5$ e $z/L_f = 0,63$.

APÊNDICE E – Tabelas comparativas dos modelos propostos pela presente pesquisa, ajustadas a partir de Majeski et al., 2004, Hu et al., 2015 e Wang et al., 2015 para o comprimento de chama e inclinação do ângulo da chama

Tabela E.1 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fN} , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 10% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 10% CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 10% CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 10% CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 10% CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fN}	ARE	L_{fexp}	L_{fN}	ARE	L_{fexp}	L_{fN}	ARE	L_{fexp}	L_{fN}	ARE
	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]
8,63	0,391	0,375	4,023	0,349	0,328	5,982	0,342	0,280	17,991	0,393	0,233	40,779
13,80	0,486	0,487	0,346	0,389	0,439	13,143	0,386	0,392	1,730	0,442	0,345	21,994
18,98	0,581	0,579	0,257	0,489	0,532	8,744	0,425	0,485	14,057	0,463	0,437	5,617
24,15	0,651	0,659	1,409	0,523	0,612	17,046	0,505	0,565	11,974	0,472	0,517	9,724
29,33	0,721	0,732	1,578	0,577	0,684	18,67	0,551	0,637	15,616	0,499	0,589	18,224
34,50	0,821	0,798	2,819	0,637	0,750	17,729	0,586	0,703	20,041	0,544	0,656	20,531
39,68	0,842	0,859	2,059	0,701	0,812	15,791	0,606	0,764	26,109	0,601	0,717	19,351
44,86	0,856	0,916	7,029	0,718	0,869	21,06	0,661	0,821	24,272	0,628	0,774	23,308
AARE	0,877			16,418			14,837			13,974		

Tabela E.2 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fN} , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 20% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 20% CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 20% CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 20% CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 20% CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fN}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,383	0,372	2,749	0,304	0,339	11,271	0,336	0,305	9,219	0,390	0,272	30,400
13,80	0,466	0,479	2,875	0,376	0,446	18,499	0,378	0,413	9,166	0,396	0,379	4,180
18,98	0,541	0,568	5,075	0,429	0,535	24,743	0,404	0,501	24,093	0,405	0,468	15,354
24,15	0,626	0,645	3,026	0,505	0,612	21,190	0,454	0,578	27,406	0,457	0,545	19,303
29,33	0,678	0,715	5,421	0,575	0,681	18,341	0,494	0,647	31,140	0,469	0,614	31,018
34,50	0,719	0,778	8,107	0,610	0,744	21,945	0,543	0,711	30,854	0,474	0,677	42,883
39,68	0,732	0,837	14,181	0,642	0,803	25,002	0,559	0,769	37,626	0,504	0,736	46,135
44,86	0,769	0,892	15,953	0,676	0,858	26,935	0,595	0,825	38,534	0,531	0,791	48,841
AARE	5,248			21,567			29,130			25,160		

Tabela E.3 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fN} , ajustado a partir de Majeski et al., 2004 com 30% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fN}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,372	0,389	4,578	0,309	0,353	13,841	0,310	0,317	2,153	0,325	0,281	13,459
13,80	0,451	0,501	11,178	0,364	0,465	27,756	0,361	0,429	19,089	0,376	0,394	4,737
18,98	0,539	0,594	10,165	0,451	0,558	23,737	0,399	0,522	30,702	0,389	0,486	24,756
24,15	0,629	0,674	7,077	0,499	0,639	27,786	0,461	0,603	30,859	0,397	0,567	42,669
29,33	0,659	0,747	13,302	0,541	0,711	31,406	0,487	0,675	38,699	0,448	0,639	42,618
34,50	0,703	0,813	15,639	0,604	0,777	28,646	0,530	0,741	39,832	0,453	0,706	55,701
39,68	0,705	0,875	24,116	0,619	0,839	35,549	0,541	0,803	48,487	0,485	0,767	58,151
44,86	0,718	0,932	29,803	0,638	0,896	40,473	0,563	0,860	52,919	0,508	0,825	62,394
AARE	12,240			28,216			34,779			42,643		

Tabela E.4 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fh} , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 10% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fh}	ARE	L_{fexp}	L_{fh}	ARE	L_{fexp}	L_{fh}	ARE	L_{fexp}	L_{fh}	ARE
	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]
8,63	0,391	0,429	9,848	0,349	0,479	37,611	0,342	0,463	35,489	0,393	0,454	15,429
13,80	0,486	0,513	5,698	0,389	0,446	14,749	0,386	0,480	24,589	0,442	0,548	23,945
18,98	0,581	0,576	0,924	0,489	0,528	7,994	0,425	0,519	22,191	0,463	0,592	27,826
24,15	0,651	0,639	1,781	0,523	0,488	6,677	0,505	0,557	10,387	0,472	0,569	20,767
29,33	0,721	0,724	0,485	0,577	0,542	6,078	0,551	0,590	7,088	0,499	0,593	18,947
34,50	0,821	0,798	2,828	0,637	0,582	8,765	0,586	0,545	6,167	0,544	0,585	7,636
39,68	0,842	0,856	1,739	0,701	0,626	10,718	0,606	0,581	4,151	0,601	0,569	5,235
44,86	0,856	0,922	7,699	0,718	0,650	9,369	0,661	0,589	10,807	0,628	0,612	2,536
AARE	1,112			6,378			8,739			17,187		

Tabela E.5 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fh} , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 20% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fh}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,383	0,383	1,187	0,304	0,380	24,996	0,336	0,413	22,834	0,390	0,437	11,942
13,80	0,466	0,479	2,785	0,376	0,420	11,615	0,378	0,439	16,301	0,396	0,462	16,698
18,98	0,541	0,545	0,838	0,429	0,462	7,751	0,404	0,469	16,213	0,405	0,483	19,098
24,15	0,626	0,621	0,800	0,505	0,487	3,507	0,454	0,486	7,004	0,457	0,478	4,729
29,33	0,678	0,693	2,199	0,575	0,512	11,024	0,494	0,496	0,447	0,469	0,449	4,017
34,50	0,719	0,771	7,130	0,610	0,547	10,349	0,543	0,524	3,501	0,474	0,476	0,471
39,68	0,733	0,845	15,283	0,642	0,580	9,710	0,559	0,525	6,024	0,504	0,496	1,609
44,86	0,769	0,923	20,041	0,676	0,619	8,338	0,595	0,545	8,462	0,531	0,485	8,664
AARE	2,492			5,923			3,726			2,599		

Tabela E.6 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fh} , ajustado a partir de Hu et al., 2015 com 30% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fh}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,372	0,367	1,188	0,309	0,315	1,680	0,310	0,357	15,085	0,325	0,331	2,066
13,80	0,451	0,449	0,453	0,364	0,364	0,046	0,361	0,372	3,089	0,376	0,399	6,083
18,98	0,539	0,520	3,469	0,451	0,406	9,850	0,399	0,396	0,756	0,389	0,393	0,743
24,15	0,629	0,598	5,096	0,499	0,438	12,314	0,461	0,391	15,187	0,397	0,403	1,427
29,33	0,659	0,676	2,495	0,541	0,468	13,535	0,487	0,425	12,658	0,448	0,407	9,274
34,50	0,703	0,753	7,092	0,604	0,499	17,375	0,530	0,439	17,286	0,453	0,402	11,312
39,68	0,705	0,826	17,226	0,619	0,548	11,466	0,541	0,466	13,762	0,485	0,428	11,712
44,86	0,718	0,902	25,644	0,638	0,579	9,227	0,563	0,488	13,218	0,508	0,443	12,704
AARE	1,021			10,658			12,938			4,266		

Tabela E.7 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fwu} , ajustado a partir de Wang et al., 2015 com 10% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fwu}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,301	0,351	10,210	0,349	0,315	9,739	0,342	0,256	24,376	0,393	0,223	43,259
13,80	0,486	0,466	4,102	0,389	0,342	11,894	0,386	0,323	16,329	0,442	0,329	25,409
18,98	0,581	0,548	5,599	0,489	0,442	9,562	0,425	0,388	8,642	0,463	0,402	13,203
24,15	0,651	0,625	4,003	0,523	0,432	17,484	0,505	0,447	11,421	0,472	0,419	11,024
29,33	0,721	0,717	0,466	0,577	0,497	13,872	0,551	0,498	9,667	0,499	0,464	7,029
34,50	0,821	0,795	3,124	0,637	0,547	14,176	0,586	0,491	17,874	0,544	0,479	12,018
39,68	0,842	0,856	1,653	0,701	0,599	14,467	0,606	0,523	13,720	0,601	0,482	19,782
44,86	0,856	0,921	7,554	0,717	0,631	12,016	0,661	0,542	17,938	0,628	0,533	15,159
AARE	3,564			12,944			15,025			14,181		

Tabela E.8 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fwu} , ajustado a partir de Wang et al., 2015 com 20% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fwu}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,383	0,339	11,401	0,304	0,277	8,892	0,336	0,259	22,766	0,390	0,244	37,481
13,80	0,466	0,461	1,065	0,376	0,352	6,443	0,378	0,327	13,406	0,396	0,311	21,352
18,98	0,541	0,544	0,589	0,429	0,417	2,760	0,404	0,384	4,819	0,405	0,363	10,440
24,15	0,626	0,629	0,518	0,505	0,459	8,977	0,454	0,423	6,842	0,457	0,387	15,324
29,33	0,678	0,706	4,156	0,575	0,497	13,657	0,494	0,450	8,803	0,469	0,383	18,298
34,50	0,719	0,786	9,216	0,610	0,541	11,359	0,543	0,490	9,709	0,474	0,421	11,150
39,68	0,733	0,859	17,191	0,642	0,581	9,607	0,559	0,503	10,094	0,504	0,451	10,412
44,86	0,769	0,934	21,441	0,676	0,626	7,472	0,595	0,530	10,951	0,531	0,452	14,915
AARE	2,373			8,934			9,901			15,119		

Tabela E.9 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo proposto pela presente pesquisa, L_{fwu} , ajustado a partir de Wang et al., 2015 com 30% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fwu}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,372	0,347	6,577	0,309	0,253	18,500	0,310	0,251	19,244	0,325	0,209	35,782
13,80	0,451	0,453	0,430	0,364	0,329	9,585	0,361	0,304	15,804	0,376	0,298	20,725
18,98	0,539	0,537	0,385	0,451	0,391	13,369	0,399	0,352	11,968	0,389	0,323	17,002
24,15	0,629	0,621	1,457	0,499	0,436	12,815	0,461	0,365	20,828	0,397	0,354	11,025
29,33	0,659	0,700	6,264	0,541	0,475	12,278	0,487	0,411	15,668	0,448	0,373	16,869
34,50	0,703	0,776	10,421	0,604	0,513	15,161	0,530	0,433	18,258	0,453	0,379	16,149
39,68	0,705	0,845	19,949	0,619	0,566	8,469	0,541	0,468	13,371	0,485	0,414	14,558
44,86	0,718	0,915	27,432	0,638	0,601	5,833	0,563	0,496	11,808	0,508	0,437	14,015
AARE	3,347			12,547			15,736			16,509		

As Figuras E.1 e E.2 compara os dados obtidos experimentalmente com o modelo proposto pela presente pesquisa, ajustado a partir de Majeski et al., 2004 em diferentes diluições de CO₂ (de 0% até 30%) para velocidades de ventos cruzados (de 1,5 m/s a 2,0 m/s).

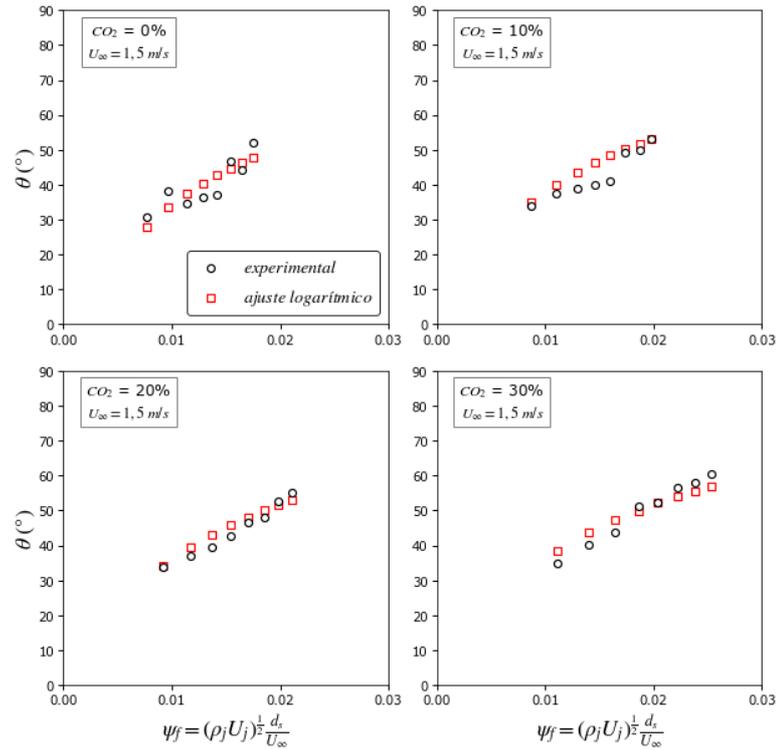


Figura E.1 – Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 1,5 m/s e diferentes diluições de CO_2 .

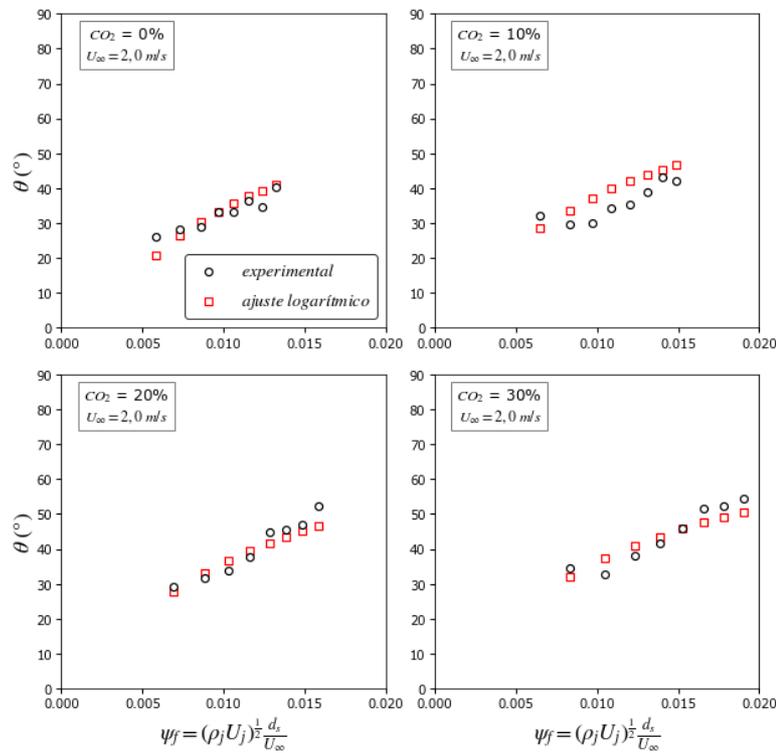


Figura E.2 – Variação do ângulo de inclinação da chama em relação ao fator de forma (o qual está relacionado com as propriedades físico-químicas variadas nos experimentos) para o vento cruzado de 2,0 m/s e diferentes diluições de CO_2 .

Tabela E.10 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Hu et al., 2015, L_{fH} , com 0% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s)

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 0%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fH}	ARE	L_{fexp}	L_{fH}	ARE	L_{fexp}	L_{fH}	ARE	L_{fexp}	L_{fH}	ARE
	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]
8,63	0,398	0,178	55,276	0,382	0,181	52,561	0,452	0,235	47,971	0,486	0,297	38,880
13,80	0,496	0,222	55,351	0,465	0,196	57,917	0,466	0,190	59,287	0,494	0,248	49,850
18,98	0,597	0,271	54,579	0,522	0,215	58,725	0,539	0,220	59,169	0,544	0,244	55,186
24,15	0,665	0,311	53,189	0,598	0,224	62,512	0,571	0,232	59,449	0,598	0,226	62,189
29,33	0,727	0,365	49,782	0,654	0,238	63,597	0,625	0,252	59,680	0,642	0,242	62,309
34,50	0,802	0,408	49,131	0,687	0,272	60,372	0,696	0,230	66,931	0,655	0,239	63,530
39,68	0,850	0,467	450,021	0,747	0,287	61,596	0,700	0,263	62,437	0,660	0,271	58,983
44,86	0,903	0,518	42,612	0,763	0,314	58,890	0,722	0,253	64,912	0,673	0,255	62,045
AARE	51,486			59,631			59,565			60,514		

Tabela E.11 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Hu et al., 2015, L_{fH} , com 10% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fH}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,391	0,189	51,693	0,349	0,211	39,604	0,342	0,227	33,576	0,393	0,254	38,880
13,80	0,485	0,247	49,075	0,389	0,192	50,666	0,386	0,209	45,822	0,442	0,253	49,850
18,98	0,581	0,300	48,279	0,489	0,236	51,816	0,425	0,222	47,666	0,463	0,256	55,186
24,15	0,651	0,356	45,334	0,523	0,228	56,381	0,504	0,243	51,881	0,472	0,244	62,189
29,33	0,720	0,424	41,116	0,577	0,265	54,085	0,551	0,265	51,979	0,499	0,256	62,309
34,50	0,821	0,488	40,600	0,637	0,296	53,539	0,586	0,254	56,595	0,544	0,257	63,530
39,68	0,842	0,542	35,572	0,701	0,331	52,842	0,606	0,277	54,278	0,600	0,256	58,983
44,86	0,856	0,602	29,717	0,718	0,355	50,544	0,661	0,290	56,189	0,628	0,286	62,045
AARE	43,225			52,329			51,929			48,474		

Tabela E.12 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Hu et al., 2015, L_{fH} , com 20% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂		
	L_{fexp} [m]	L_{fH} [m]	ARE [%]									
8,63	0,383	0,207	51,693	0,304	0,201	39,604	0,336	0,239	28,868	0,390	0,285	26,934
13,80	0,466	0,284	49,075	0,376	0,221	50,666	0,378	0,231	39,933	0,396	0,254	35,856
18,98	0,541	0,348	48,279	0,429	0,253	51,816	0,404	0,245	39,238	0,405	0,253	37,615
24,15	0,626	0,421	45,334	0,505	0,280	56,381	0,454	0,260	42,770	0,457	0,249	45,354
29,33	0,678	0,492	41,116	0,575	0,307	54,085	0,494	0,273	44,626	0,469	0,238	49,226
34,50	0,720	0,569	40,600	0,610	0,341	53,539	0,543	0,298	45,109	0,474	0,257	45,740
39,68	0,733	0,643	35,572	0,642	0,374	52,842	0,559	0,308	44,909	0,504	0,274	45,618
44,86	0,769	0,722	29,717	0,676	0,412	50,544	0,595	0,328	44,806	0,531	0,275	48,314
AARE	30,099			41,501			43,698			45,486		

Tabela E.13 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Hu et al., 2015, L_{fH} , com 30% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂		
	L_{fexp} [m]	L_{fH} [m]	ARE [%]									
8,63	0,372	0,245	33,995	0,310	0,202	34,879	0,310	0,245	28,868	0,325	0,252	22,339
13,80	0,451	0,328	27,109	0,364	0,236	35,216	0,361	0,237	39,933	0,376	0,262	30,151
18,98	0,539	0,409	24,060	0,451	0,276	38,800	0,399	0,255	39,238	0,390	0,250	35,778
24,15	0,630	0,497	21,142	0,500	0,312	37,607	0,461	0,258	42,770	0,397	0,258	35,022
29,33	0,659	0,586	11,104	0,541	0,347	35,835	0,487	0,290	44,626	0,448	0,265	40,785
34,50	0,703	0,676	3,853	0,604	0,384	36,397	0,530	0,309	45,109	0,453	0,268	40,758
39,68	0,705	0,763	8,297	0,619	0,435	29,639	0,541	0,338	44,909	0,485	0,293	39,578
44,86	0,718	0,854	18,900	0,638	0,473	25,823	0,563	0,364	44,806	0,508	0,311	38,822
AARE	16,123			35,525			36,817			37,300		

Tabela E.14 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Wang et al., 2015, L_{fW} , com 0% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 0%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 0%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fW}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,398	0,305	23,277	0,382	0,260	31,957	0,452	0,262	42,044	0,486	0,259	46,734
13,80	0,496	0,371	25,190	0,465	0,327	29,634	0,466	0,281	39,841	0,494	0,314	36,530
18,98	0,597	0,428	28,358	0,522	0,371	28,981	0,539	0,361	32,927	0,544	0,365	32,903
24,15	0,665	0,461	30,639	0,598	0,381	36,187	0,571	0,395	30,786	0,598	0,367	38,589
29,33	0,727	0,510	29,802	0,654	0,395	39,564	0,625	0,434	30,622	0,642	0,409	36,364
34,50	0,802	0,541	32,569	0,687	0,439	36,166	0,696	0,394	43,476	0,655	0,410	37,438
39,68	0,850	0,590	30,558	0,747	0,448	40,062	0,700	0,443	36,702	0,660	0,466	29,431
44,86	0,903	0,627	30,641	0,763	0,474	37,825	0,722	0,419	41,933	0,673	0,437	35,009
AARE	30,179			36,177			38,271			36,447		

Tabela E.15 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Wang et al., 2015, L_{fW} , com 10% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 10%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 10%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fW}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,391	0,315	19,473	0,349	0,307	12,030	0,342	0,264	22,620	0,393	0,236	39,903
13,80	0,485	0,395	18,712	0,389	0,315	18,839	0,386	0,312	19,082	0,442	0,330	25,330
18,98	0,581	0,447	22,981	0,489	0,392	19,815	0,425	0,361	14,960	0,463	0,387	16,368
24,15	0,651	0,495	23,913	0,523	0,372	28,925	0,504	0,404	19,898	0,472	0,393	16,714
29,33	0,720	0,555	22,926	0,577	0,418	27,522	0,551	0,440	20,194	0,499	0,424	14,979
34,50	0,821	0,604	26,433	0,637	0,451	29,173	0,586	0,417	28,846	0,544	0,429	21,095
39,68	0,842	0,639	24,089	0,701	0,486	30,587	0,606	0,445	26,490	0,600	0,425	29,254
44,86	0,856	0,678	20,856	0,718	0,505	29,641	0,661	0,455	31,105	0,628	0,463	26,270
AARE	22,953			28,224			21,407			23,212		

Tabela E.16 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Wang et al., 2015, L_{fW} , com 20% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 20%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 20%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fW}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,383	0,335	12,514	0,304	0,298	2,234	0,336	0,292	12,990	0,390	0,284	27,093
13,80	0,466	0,430	7,666	0,376	0,357	5,112	0,378	0,348	7,795	0,396	0,343	13,315
18,98	0,541	0,489	9,641	0,429	0,407	5,074	0,404	0,394	2,452	0,405	0,385	4,989
24,15	0,626	0,549	12,282	0,505	0,436	13,677	0,454	0,421	7,249	0,457	0,398	12,732
29,33	0,678	0,602	11,200	0,575	0,460	20,002	0,494	0,438	11,291	0,469	0,385	17,736
34,50	0,720	0,657	8,684	0,610	0,492	19,459	0,543	0,468	13,869	0,474	0,416	12,267
39,68	0,733	0,706	3,646	0,642	0,519	19,233	0,559	0,472	15,662	0,504	0,438	13,009
44,86	0,769	0,757	1,610	0,676	0,551	18,533	0,595	0,490	17,687	0,531	0,433	18,588
AARE	9,163			16,105			12,141			13,162		

Tabela E.17 – Comparação dos dados experimentais de comprimentos de chamas, L_{fexp} , com o modelo de Wang et al., 2015, L_{fW} , com 30% de CO₂ e ventos cruzados de (0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Vazão do combustível [L/min]	$U_{\infty} = 0,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 1,5 \text{ m/s}$ 30%CO ₂			$U_{\infty} = 2,0 \text{ m/s}$ 30%CO ₂		
	L_{fexp}	L_{fW}	ARE									
	[m]	[m]	[%]									
8,63	0,372	0,383	3,069	0,310	0,303	2,287	0,310	0,315	1,649	0,325	0,272	16,329
13,80	0,451	0,472	4,723	0,364	0,373	2,457	0,361	0,361	0,167	0,376	0,367	2,374
18,98	0,539	0,539	0,021	0,451	0,426	5,512	0,399	0,403	0,804	0,390	0,383	1,622
24,15	0,630	0,605	3,918	0,500	0,462	7,619	0,461	0,406	11,928	0,397	0,407	2,456
29,33	0,659	0,667	1,223	0,541	0,491	9,191	0,487	0,446	8,348	0,448	0,419	6,481
34,50	0,703	0,725	3,153	0,604	0,520	13,871	0,530	0,462	12,878	0,453	0,419	7,492
39,68	0,705	0,776	10,188	0,619	0,565	8,624	0,541	0,491	9,206	0,485	0,450	7,305
44,86	0,718	0,828	15,354	0,638	0,591	7,365	0,563	0,512	8,917	0,508	0,467	8,078
AARE	3,111			7,492			8,633			6,893		