

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

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA E GEOMETRIA DE
MÚLTIPLAS CHAMAS NÃO PRÉ-MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDO COM
DIÓXIDO DE CARBONO

por

Pedro Ferreira Nicoloso

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Abril de 2019

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA E GEOMETRIA DE
MÚLTIPLAS CHAMAS NÃO PRÉ-MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDO COM
DIÓXIDO DE CARBONO

por

Pedro Ferreira Nicoloso

Engenheiro Mecânico

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: Energias

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos, PROMEC/UFRGS

Dr. Paulo Roberto Pagot, Petrobras

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 22 de Abril de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Felipe Roman Centeno pelo apoio, paciência e ensinamentos durante a execução deste trabalho. Obrigado pela orientação durante esta jornada importante na minha formação profissional. Serei eternamente grato.

Agradeço à equipe do Laboratório de Combustão pelos ensinamentos que permitiram que este trabalho fosse realizado. Além disso, obrigado Luis e Isaias pelo carinho especial e horas de discussões que foram muito importantes para mim durante este período de formação profissional.

Agradeço aos familiares e amigos pelo carinho especial nesta jornada. Vocês foram e sempre serão muito importantes para mim.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Gustavo e Raphael pela ajuda nos dias de experimentação e amizade construí neste período.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a Petrobras pelo suporte e oportunidades que proporcionaram a realização deste trabalho de mestrado.

RESUMO

Combustão em plataformas offshore podem diminuir os gases poluentes lançados ao ambiente, mas ao mesmo tempo afetar negativamente as áreas de trabalho devido as condições de segurança na plataforma impostas durante a queima de gás natural. Por essa razão, um estudo experimental foi conduzido com bancada em escala laboratorial de múltiplas chamas laminares não pré-misturadas. O trabalho consiste de dois queimadores posicionados lado a lado com o intuito de avaliar a geometria da chama e radiação térmica através da variação da distância de separação entre os queimadores. Analisa-se os impactos na geometria de chama e a radiação térmica emitida pelas chamas impondo diferentes concentrações de combustível e diluente durante a combustão. Medições experimentais indicam que as chamas passam por quatro regimes morfológicos em devido a distância de separação: regime imerso sinuoso e imerso varicoso, regime simétrico sinuoso, regime alternado sinuoso e regime independente. O comprimento visível de chama é máximo quando as chamas estão imersas uma na outra no regime imerso sinuoso, distância de separação mínima, e este diminui gradualmente até se obter o valor de jato único na razão S/d igual a 10. Além disso, no regime alternado sinuoso o comprimento de chama torna-se menor que o comprimento de jato único devido a formação de vórtices na base das chamas. A diluição do combustível com CO_2 mostrou que as chamas reduzem seu comprimento para quantidades crescentes de CO_2 na mistura. Outro efeito da diluição é o de reduzir as oscilações das chamas e a razão S/d para jato único. Equações algébricas foram utilizadas para prever interação de múltiplas chamas e apresentam boa concordância quando se leva em consideração a vazão da mistura. A radiação térmica proveniente de duas chamas em interação tem seu máximo valor em regiões próximas a razão S/d de jato único. A diluição do combustível com CO_2 reduz a intensidade de radiação emitida e incremento da vazão de combustível fazem com que a potência de chama aumente que, conseqüentemente, reduz a fração radiante das chamas. O modelo WMPS apresenta boa concordância para prever o fluxo de calor radiante de duas chamas.

Palavras-chave: Múltiplas chamas; Combustão de gás natural; Combustível diluído; Chamas laminares não pré-misturadas; Comprimento de chama; Radiação térmica.

ABSTRACT

Combustion in offshore platforms can diminish the gaseous pollutants released to the atmosphere, but at the same time affect negatively working areas due to safety requirements during the combustion of natural gas. For this reason, an experimental study in lab-scale is taking in consideration to understand the interaction of diffusion flames. This work consist of two circular burners placed side-by-side to evaluate flame geometry and thermal radiation by varying the distance between the two burners. In addition, the impacts on flame geometry and thermal radiation is also evaluated by varying fuel flowrate and diluent on the mixture during combustion. Experiments shows that the flames will be in four different morphological regimes due to spacing: merged sinuous and varicose, symmetric sinuous, alternated sinuous and independent. Flame height is maximum when the flames are completely merged in the sinuous regime, where the separation distance in minimum and shorten until the flame reaches the single jet height in S/d equals to 10. Moreover, in the regime alternated sinuous the flame height is shorter than the single jet height to due vortex created on the base of the flame. Dilution of the fuel with CO_2 shows that flame height is also shorten with the increase of diluent concentration. Another effect of dilution is the reduction in flame flickering and the ratio S/d for single jet. Algebraic equations were used to predict multiple flames interaction and have good agreement when the flowrate of the mixture is taken into consideration. Thermal radiation from two flames interacting to one another have its maximum value on haft of the ratio S/d for single jet. Dilution of the fuel lessen radiation emitted by the flame and increments on fuel flowrate causes flame power to increase but flame radiation fraction to decrease. The WMPS model have good precision to predict flame radiant flux of two flames.

Keywords: Multiple flames; Natural gas combustion; Diluted fuel; Laminar non-premixed flames; Flame length; Thermal radiation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Revisão da literatura.....	2
1.2.1	Comprimento de chama	3
1.2.2	Altura de descolamento e limite de extinção	5
1.2.3	Radiação térmica	6
1.2.4	Efeito da diluição com gases inertes (CO ₂).....	8
1.3	Objetivos	9
1.3.1	Objetivos específicos.....	9
1.4	Organização da dissertação	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1	Comprimento de chama	11
2.1.1	Modelo algébricos para comprimento de chamas laminares não pré-misturadas..	12
2.1.2	Modelo algébricos para comprimento de múltiplas chamas não pré-misturadas...	14
2.1.3	Influência do número de Reynolds sobre o comprimento de chama	16
2.2	Radiação térmica	18
2.2.1	Fração radiante	19
2.2.2	Fluxo de calor radiante	20
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.1	Medição do comprimento visível de múltiplas chamas	23
3.1.1	Bancada experimental	23
3.1.2	Parâmetros ópticos e regulagens da câmera digital.....	26
3.1.2.1	Tempo de exposição.....	26
3.1.2.2	Abertura do diafragma	26
3.1.2.3	Sensibilidade à luz (ISO).....	27
3.1.2.4	Modo contínuo de disparo.....	27
3.1.2.5	Formato dos arquivos salvos	27
3.1.3	Processamento da geometria das chamas.....	28
3.1.3.1	Photoshop®.....	30
3.1.3.2	Matlab®	32
3.1.3.3	Validação e seleção da ferramenta computacional de processamento de imagens	34

3.2	Medição da radiação térmica em múltiplas chamas.....	36
3.2.1	Bancada experimental	36
3.2.2	Procedimentos de medição.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	Geometria de chama.....	39
4.2	Radiação térmica	59
5	CONCLUSÃO.....	76
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÊNDICE A Características dos Queimadores.....	84
	APÊNDICE B Distância de Separação no Trilho.....	85
	APÊNDICE C Características dos Sensores de Radiação	86
	APÊNDICE D Resultados WMPS (Entrada: dados experimentais)	87
	APÊNDICE E Resultados WMPS (Comparação entre modelos)	92
	APÊNDICE F Tabelas para WMPS modelados.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenvolvimento do perfil de velocidade para escoamento laminar em um tubo circular [Çengel e Ghajar, 2012].....	16
Figura 2.2	Efeito da velocidade do jato na geometria da chama [Adaptado de Hottel e Hawthorne, 1948].	17
Figura 2.3	Efeito da velocidade do jato no descolamento e geometria da chama [Adaptado de Lee et al., 1994].	18
Figura 2.4	Posicionamento do radiômetro no modelo SPS.....	21
Figura 2.5	Posicionamento do radiômetro no modelo WMPS.....	22
Figura 3.1	Bancada experimental para medição do comprimento visível de chama.	24
Figura 3.2	Esquema para medição do comprimento de chama durante a combustão de gás natural.	25
Figura 3.3	Sequência para obtenção do comprimento visível de chama, caso com vazão de 1,5 L/min com 0% de CO ₂ . Parâmetros fotográficos: $t_{exp} = 1/1000$ s, f/4, ISO 800, resolução do sensor de 18 Megapixels.	31
Figura 3.4	Sequência de conversão da imagem para obtenção do comprimento visível de chama ancorada, caso com vazão de 2,5 L/min com 0% de CO ₂ . Parâmetros fotográficos: $t_{exp} = 1/1000$ s, f/4, ISO 800, resolução do sensor de 18 Megapixels.....	33
Figura 3.5	Variação do comprimento visível de chama de jato simples em função do número de imagens.	34
Figura 3.6	Esquema para medição da radiação térmica durante a combustão de gás natural.	37
Figura 3.7	Variação da radiação térmica emitida pela chama em função do número de medições.	38
Figura 4.1	Efeitos da distância de separação no comprimento de chama e regime morfológico. Dados para 2,5 L/min de gás natural e 0% de diluição com CO ₂	41
Figura 4.2	Regime imerso sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO ₂ na mistura em 2 diâmetros de separação.	42
Figura 4.3	Regime imerso varicoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO ₂ na mistura em 7 diâmetros de separação.	42
Figura 4.4	Regime simétrico sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO ₂ na mistura em 11 diâmetros de separação.	42

Figura 4.5	Regime alternado sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO ₂ na mistura em 15 diâmetros de separação.	43
Figura 4.6	Regime independente. Vazão de 1 L/min com 0% de CO ₂ na mistura em 20 diâmetros de separação.	43
Figura 4.7	Possíveis justificativas dos regimes morfológicos existentes durante a interação de duas chamas. (a) regime simétrico sinuoso e (b) alternado sinuoso [Adaptação de Changchun et al., 2019].	44
Figura 4.8	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 0% de CO ₂ na mistura.	45
Figura 4.9	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 10% de CO ₂ na mistura.	46
Figura 4.10	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 20% de CO ₂ na mistura.	47
Figura 4.11	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 30% de CO ₂ na mistura.	47
Figura 4.12	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 40% de CO ₂ na mistura.	48
Figura 4.13	Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 50% de CO ₂ na mistura.	48
Figura 4.14	Influência da concentração de CO ₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 1 L/min na saída do queimador.	50
Figura 4.15	Influência da concentração de CO ₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 1,5 L/min na saída do queimador.	50
Figura 4.16	Influência da concentração de CO ₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 2 L/min na saída do queimador.	51
Figura 4.17	Influência da concentração de CO ₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 2,5 L/min na saída do queimador.	51
Figura 4.18	Efeito da diluição de CO ₂ na geometria de chama com o aumento da distância de separação da esquerda para a direita. Vazão de 1 L/min com 50% de CO ₂	52
Figura 4.19	Dependência do comprimento de chama em função da velocidade do jato e do grau de diluição com CO ₂	53
Figura 4.20	Equação empírica de múltiplas chamas proposta por Lenze et al., 1975, para 1 L/min.	54

Figura 4.21	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 1,5 L/min.....	54
Figura 4.22	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 2 L/min.....	55
Figura 4.23	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 2,5 L/min.....	55
Figura 4.24	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 1 L/min.....	56
Figura 4.25	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 1,5 L/min.....	57
Figura 4.26	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 2 L/min.....	57
Figura 4.27	Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 2,5 L/min.....	58
Figura 4.28	Comparação entre as equações empíricas de múltiplas chamas. Dados para 2,5 L/min com 10% de CO ₂ na mistura.	59
Figura 4.29	Efeito distância de separação na radiação térmica e comprimento de chama.....	60
Figura 4.30	Percentual da fração radiante em função da distância de separação entre os queimadores. Dados para 1 L/min com 10% de CO ₂	61
Figura 4.31	Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 1 L/min com 10% de CO ₂	62
Figura 4.32	Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 1 L/min com 50% de CO ₂	63
Figura 4.33	Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 2 L/min com 30% de CO ₂	63
Figura 4.34	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 0% de CO ₂ na mistura.	64
Figura 4.35	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 10% de CO ₂ na mistura.	65
Figura 4.36	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 20% de CO ₂ na mistura.	65
Figura 4.37	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 30% de CO ₂ na mistura.	66

Figura 4.38	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 40% de CO ₂ na mistura.	66
Figura 4.39	Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 50% de CO ₂ na mistura.	67
Figura 4.40	Efeitos da diluição do combustível com CO ₂ na fração radiante. Condição para vazão de 1 L/min.	68
Figura 4.41	Efeitos da diluição do combustível com CO ₂ na fração radiante. Condição para vazão de 1,5 L/min.	69
Figura 4.42	Efeitos da diluição do combustível com CO ₂ na fração radiante. Condição para vazão de 2 L/min.	69
Figura 4.43	Efeitos da diluição do combustível com CO ₂ na fração radiante. Condição para vazão de 2,5 L/min.	70
Figura 4.44	Fluxo de calor radiante obtido com o modelo WMPS considerando χ_{RAD} experimental, comparado aos dados coletados experimentalmente para vazão 1 L/min e 10% de CO ₂ na mistura.	71
Figura 4.45	Razão entre as frações radiantes de múltiplos jatos (χ_{ri}) e jato único (χ_{rs}) para todos os dados experimentais em função da separação.	73
Figura 4.46	Fluxo de calor radiante para vazão 1,5 L/min e 20% de CO ₂ na mistura: dados experimentais e resultados do modelo WMPS usando χ_{RAD} experimental, χ_{RAD} ajustado pela Eq. 4.2, e χ_{RAD} conforme correlação de Markstein, 1985.	75
Figura 4.47	Fração radiante em função do ponto de fumaça [Adaptado de Markstein, 1985].	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Formatos de armazenamento das imagens, requisitos e suas vantagens e desvantagens.	28
Tabela 3.2	Parâmetros utilizados na câmera nas condições impostas no experimento de múltiplas chamadas.	29
Tabela 3.3	Dados de validação para cálculo do comprimento de chama.	35
Tabela 3.4	Tempo de processamento de dados do experimento.	35
Tabela 4.1	Comparação entre os resultados do modelo WMPS com entrada experimental em relação aos dados coletados experimentalmente.	72
Tabela 4.2	Valores das constantes na equação da fração radiante (Eq. 4.2).	74

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GN	Gás Natural
SPS	Single Point Source
WMPS	Weighed Multi-Point Source

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C_e	Comprimento de entrada do escoamento laminar
C_f	Coefficiente empírico
d	Diâmetro do queimador, mm
E	Parâmetro adimensional
$f/$	Abertura do diafragma
I	Integral da quantidade de movimento
J_0	Função de Bessel de ordem zero
J_1	Função de Bessel de primeira ordem
k	Constante para descrever um combustível
L_f	Comprimento visível de chama, mm
L_s	Ponto de fumaça
L_o	Origem virtual
L_M	Comprimento visível de múltiplas chamas
\dot{m}_c	Vazão mássica de combustível, kg/s
n	Número de queimadores
N	Número de pontos contidos na chama no modelo WMPS
P	Quantidade de movimento na saída o queimador
$P_{máx}$	Ponto máximo na matrix de pixels
$P_{mín}$	Ponto mínimo na matrix de pixels
Q_F	Vazão volumétrica de combustível, kg/m ³
q_r''	Fluxo de calor coletado pelos radiômetros, W/m ²
\dot{Q}_{RAD}	Calor emitido na forma de radiação, W/m ²
\dot{Q}_{TOTAL}	Calor total liberado na reação de combustão, W/m ²
R	Raio do orifício de combustível
R_{esf}	Raio da esfera no modelo SPS e WMPS
R_o	Raio do orifício do escoamento externo
Re	Número de Reynolds
S	Distância de separação entre as linhas de centro entre os queimadores, mm

Sc	Número de Schmidt
t_{exp}	Tempo de exposição do sensor da câmera
T_f	Temperatura de chama no modelo de Roper, K
T_{∞}	Temperatura do oxidante, K
u_f	Velocidade na saída do queimador, m/s
v	Velocidade do escoamento dentro do tubo
w_i	Fator de ponderação no modelo WMPS
x	Distância radial a frente de chama

Símbolos Gregos

ΔH_r	Poder calorífico inferior da reação , kJ/kgK
D_{∞}	Coeficiente de difusão
λ_m	Raízes positivas
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ_f	Massa específica do combustível
ρ_{∞}	Massa específica do meio ambiente
τ_m	Trasmissividade do meio
χ_{RAD}	Fração radiante
Z	Razão estequiométrica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A comodidade em executar processos diários e os impactos ambientais causados pelo homem fazem com que a sociedade seja coagida a buscar maneiras mais sofisticadas para facilitar as atividades diárias na qual produzem novos avanços tecnológicos. Este processo de desenvolvimento tecnológico está atrelado ao consumo energético e a forma com que se converte uma forma de energia em outra. Além disso, em grande maioria, estes impactos ambientais fazem com que novos métodos de produção sejam implementados para garantir maiores eficiências, proporcionar uma recuperação do meio ambiente e dos recursos naturais. Muitos desenvolvimentos tecnológicos foram criados e desenvolvidos ao longo do tempo através da combustão dos recursos naturais.

A combustão pode ser definida como sendo uma reação exotérmica com oxidação de um combustível liberando calor e/ou luz. Esta é a principal forma de transformação de energia em diversas aplicações desde a revolução industrial até os dias atuais. Suas aplicações são diversas e são encontradas em sistemas com alta densidade de potência, como por exemplo, sistema de turbina a gás em aeronaves comerciais e militares. Ademais, em aplicações industriais, como refinarias e plataformas de petróleo, automobilismo e centrais termoelétricas, mas também em aplicações domésticas como o fogão de cozinha e chuveiros a gás. A combustão pode ocorrer com ou sem a presença de chama e de uma maneira geral, a chama pode ser classificada como pré-misturada, aquela em que o combustível é previamente misturado ao oxidante antes da queima, possuindo características de cor azulada e altas temperaturas; ou ainda, não pré-misturada também conhecida como chama difusiva que tendem a ser mais fuliginosas e com coloração amarelada, Turns, 2000.

Uma das principais fontes de energia no Brasil, se dá através da combustão do petróleo, que é uma mistura de hidrocarbonetos com origem na decomposição de matéria orgânica. Encontrado em bacias sedimentares, este tem seu processo de tratamento e extração em áreas marítimas e terrestres, na qual o seu beneficiamento e conversão de energia garantem em grande parte o desenvolvimento tecnológico. Embora o processo de extração e refinamento seja controlado, existem diversos riscos e potenciais danos aos operários e ao meio ambiente. Um destes riscos se dá através da queima de gases em grandes *flares*, que correspondem às torres com múltiplos queimadores em petroquímicas e plataformas. *Flaring* em plataformas de

petróleo é realizado para reduzir os gases poluentes lançados à atmosfera. Neste processo, queimam-se gases inflamáveis em múltiplos queimadores, uma vez que a estocagem e/ou pressão nas linhas são dificuldades típicas durante o processo de extração ou refinamento do petróleo. Neste cenário, chamas verticais turbulentas não pré-misturadas de gás natural diluído com CO₂ (gás inerte) e outros compostos são encontradas nos queimadores. O CO₂ encontra-se naturalmente misturado com o gás natural durante o processo de extração e, esta diluição altera o comportamento e emissões da chama. As chamas em *flares* são consideradas sobreventiladas, devido ao fato do ar atmosférico ter oxigênio suficiente para garantir a queima do combustível injetado sem que ocorra a extinção da chama pela falta de oxidante.

Um dos riscos ligados à combustão em plataformas de petróleo *onshore* ou *offshore* é a exposição à radiação térmica nas áreas de trabalho, onde uma parcela significativa da energia liberada durante a combustão atinge a plataforma, deteriorando pinturas, equipamentos, plásticos, e o mais importante, causando condições perigosas de trabalho aos operadores [Pagot, 2002]. Outra preocupação está no comprimento visível de chama, que pode ser considerado como um potencial risco durante a combustão dos gases e, por isso, também deve ser estudada a fundo. Por estes motivos, existe uma demanda e um amplo campo de estudo para compreender o comportamento da interação de múltiplas chamas em *flares* de plataformas de petróleo, refinarias ou indústrias de plásticos.

Métodos comuns com o intuito de compreender o comportamento da geometria e da radiação térmica das chamas são: métodos experimentais, analíticos e numéricos. Com isso, o estudo experimental deste trabalho foca em chamas não pré-misturadas de gás natural e com diluição de gás carbônico em escala laboratorial, como uma tentativa de melhor compreender os fenômenos físicos relacionados à radiação térmica e ao comprimento visível de chama em múltiplos queimadores, como aqueles existentes em *flares* industriais.

1.2 Revisão da literatura

A revisão da literatura apresentada nesta seção está dividida por assuntos pertinentes ao presente estudo: comprimento de chama, altura de deslocamento, limite de extinção, radiação térmica compreendendo a fração radiante e os modelos para determinação do fluxo de calor radiante e, os efeitos da diluição com gases inertes (CO₂) na geometria de chama e radiação térmica emitida pela chama.

1.2.1 Comprimento de chama

A forma, configuração e distância de separação entre os queimadores causam variação na geometria da chama durante a combustão. Quando duas chamas difusivas estão suficientemente distantes uma da outra, não existe interação entre elas e a combustão ocorre através de jatos únicos. Na medida que a distância de separação diminui, dá-se início a interação de múltiplos jatos, onde a combustão é alterada e o comprimento de chama varia.

Estudos analíticos e experimentais foram conduzidos por Putnam e Speich, 1963, em múltiplas chamas de propano sem a presença de CO₂ com o intuito de prever o comprimento visível de chama. O comprimento visível de chama do experimento foi reportado através de fotografias e definido como a diferença entre o ponto máximo da chama e saída do queimador. Os estudos mostraram que o comprimento de chama aumentou à medida que a distância de separação diminuiu e foi máximo quando as chamas estavam completamente imersas uma na outra, ou seja, quando elas se unem. Esse fenômeno ocorre devido à insuficiência de ar para completar a combustão em regiões de proximidades.

Lenze et al., 1975, conduziram estudos experimentais em múltiplas chamas de gás natural com 1, 3 e 5 queimadores de mesma seção transversal. Através de métodos fotográficos e medição da concentração de monóxido de carbono para estimar o comprimento de chama, os resultados indicaram que a distância de separação afeta a geometria da chama, e o comprimento de chama foi crescente à medida que as chamas se aproximaram uma da outra.

Chigier e Apak, 1975, estudaram o efeito do *swirl* em múltiplas chamas difusivas e concluíram que a estabilidade da chama e o seu comprimento está atrelado ao nível de *swirl*, maiores quantidades de ar para queima e a distância de separação entre os jatos. Assim, quanto menor for a distância de separação entre os jatos maior será o comprimento visível de chama devido a insuficiência de oxidante durante a reação de combustão. À medida que o efeito de *swirl* aumenta, a temperatura da chama diminui e a combustão torna-se mais rápida e o comprimento da chama diminui.

Menon e Gollahalli, 1988, realizaram estudos com interação de múltiplas chamas de propano com fluxo cruzado de ar, com 2, 3 e 5 queimadores. Métodos fotográficos foram utilizados para medir o comprimento visível de chama e, como resultado, o comprimento de chama foi crescente à medida que a distância de separação diminuiu entre os queimadores e, também crescente quando o número de queimadores aumentou e a distância de separação foi

constante. Esse efeito se dá através da redução da disponibilidade de oxigênio para completar a reação de combustão.

Resultados similares também foram observados por Leite et al., 1996, porém o estudo consta de múltiplas chamas de acetileno com dois queimadores de diâmetro interno nas dimensões de 1, 2, 3 e 4,4 mm e comprimento de 300 mm. Através de métodos fotográficos, os autores concluíram que à medida que a distância entre os queimadores diminuiu, tornou-se mais difícil o aporte de oxidante à chama e a reação de combustão tornou-se mais lenta, acarretando em maiores comprimentos visíveis de chama.

Estudos de Caldeira-Pires e Heitor, 1999, com múltiplas chamas turbulentas de propano, que se encontravam ancoradas aos queimadores, indicaram que o comprimento visível da chama está diretamente ligado ao número de queimadores. O estudo consistiu em medir o comprimento de chama através de fotografias, na qual foi calculado pela média temporal entre a saída do queimador e o final da chama. Os resultados mostraram que o comprimento visível de chama com mesma distância de separação para 3 queimadores foi menor do que o comprimento medido para 5 queimadores. Assim, o principal responsável por esse aumento no comprimento de chama está na área de exposição do combustível com o ar disponível para queima e será maior quanto maior for à competição por oxidante nas regiões de interação entre as chamas.

Wan et al., 2016, conduziram estudos experimentais com dois queimadores quadrados com mesma seção transversal e com vazão de propano idênticas. O efeito do arrasto do ar para seis potências de chamas difusivas sobreventiladas e turbulentas foram avaliadas. Os estudos identificaram três regiões em função de oito distâncias de separação entre os queimadores: região separada, região intermitente e região completamente imersa. Os autores concluíram que a temperatura e comprimento de chama são inversamente proporcionais ao arrasto de ar durante a combustão.

Outro estudo experimental referente ao arrasto de ar durante a combustão de duas chama em interação foi conduzido por Hu et al., 2017. O experimento consistiu de dois queimadores de fenda em regime turbulento para diferentes velocidades de propano e em diferentes distâncias de separação. Os dados mostraram que maiores velocidades aumentam a região nas quais as chamas estão imersas. Assim, três regimes foram observados: chamas imersas contínuas, chamas intermitentes e chamas não imersas. Ademais, existe uma região crítica de separação em que o comprimento de chama reduz a um valor menor do que o observado em chamas não imersas.

Changchun et al., 2019, conduziram um estudo experimental com dois jatos de propano tendo como objetivo avaliar os mecanismos de interação entre as chamas. Quatro regimes morfológicos de chamas foram observados e definidos de acordo com a distância de separação entre as linhas de centro dos queimadores: regime imerso sinuoso e imerso varicoso, regime simétrico sinuoso, regime alternado sinuoso e regime independente. Os resultados mostraram que a distância de separação afeta diretamente o comprimento de chama, bem como altera o formato da mesma, cessando no regime independente no qual não há mais influência entre as chamas. Este comportamento foi explicado da forma em que a distância de separação entre as chamas faz com que exista uma frequência de oscilação entre elas criando vórtices que alteram sua morfologia.

1.2.2 Altura de descolamento e limite de extinção

Dois fenômenos podem ocorrer em jatos simples ou múltiplos jatos, estes são o descolamento da chama (*lift-off*) e a extinção por escoamento (*blow-off*). Para velocidades de injeção baixas, a chama permanecerá ancorada ao bico do queimador (*attached flame*). Se incrementos na velocidade do jato ultrapassarem o limite de descolamento (*lift-off limit*), a chama descola do bico do queimador. A altura de descolamento, H_a , representa a distância acima do bico do queimador na qual a chama é estabilizada. Além disso, se a velocidade do jato de combustível aumentar mais do que o limite de extinção por escoamento (*blow-out limit*), a chama se extingue.

Kalghatgi, 1981 e 1984, enfatizou em seus estudos que uma chama não pré-misturada em ar parado se descola do bico do queimador e forma uma chama estabilizada quando a vazão de combustível aumenta até um ponto na qual o limite de estabilidade do descolamento seja ultrapassado. Os estudos mostraram que a altura de descolamento é proporcional à velocidade de saída do jato e é independente do diâmetro do queimador para um mesmo gás analisado. Além disso, se a velocidade de combustível aumentar mais que o limite de extinção por escoamento, a chama se apaga. Nos casos em que a chama se encontra fora desses limites ela é dita como ancorada ao queimador.

Em estudos de múltiplas chamas, Lee et al., 2004, mostraram que a distância de separação (S) entre as linhas de centro dos queimadores afetou o limite de extinção e as características das chamas. Se S/d , onde d é o diâmetro do queimador, for pequeno o suficiente, as chamas estarão imersas e comportam-se como jatos simples com área da seção transversal

do queimador aumentada. Portanto, o limite de extinção será maior para chamas que interagem entre si devido a suportarem maiores vazões na saída do queimador.

1.2.3 Radiação térmica

Radiação térmica constitui um importante mecanismo de transporte de energia durante a combustão de hidrocarbonetos, na qual propaga-se através da presença ou não da matéria. As ondas eletromagnéticas provenientes das oscilações eletrônicas e moleculares, bem como, vibrações podem sofrer três processos físicos: absorção, emissão e espalhamento em um meio, Howell et al., 2016. Definida por um comprimento de onda característico e uma frequência, a radiação emitida pelos produtos da oxidação de um combustível (principalmente fuligem, CO₂ e H₂O) compreende a faixa do espectro na forma de luz visível e infravermelho, Machado, 2015.

A radiação térmica emitida por chamas durante o processo de combustão tornou-se um amplo campo de estudo e pode ser analisada por diferentes métodos experimentais e/ou analíticos. Os métodos experimentais consistem em avaliar a intensidade do fluxo de calor radiante por instrumentos capazes de captar ondas eletromagnéticas como, por exemplo, radiômetros que pode ser posteriormente comparado com modelos que descrevem a distribuição do fluxo de calor radiante nas chamas, Llanos, 2017.

Markstein, 1976, conduziu estudos experimentais de radiação térmica com o combustível propano em jatos únicos e múltiplos onde o fluxo de calor radiante foi medido através de radiômetros. Um dos objetivos era comparar a radiação térmica emitida pelas chamas interagindo entre si em diferentes distâncias. Primeiramente foi medida a radiação térmica total dos dois queimadores separadamente e, posteriormente, comparado com os dados obtidos através do funcionamento simultâneo. A radiação térmica total combinada apresentou um ganho devido à interação das chamas e, existiu uma região de proximidade em que este valor é máximo e a partir deste ponto, a radiação térmica decai até o ponto em que não existe interação entre as chamas e retorna-se à condição inicial. A principal razão destacada neste estudo está na influência que a fuligem tem na radiação térmica, onde esta é maior devido a um déficit de oxigênio na região onde as chamas interagem.

Menon e Gollahalli, 1988, salientaram o mesmo efeito do aumento da radiação térmica emitida pelas múltiplas chamas de propano com fluxo cruzado. A intensidade máxima de radiação térmica medida por pireliômetro se encontrou onde a insuficiência de oxigênio foi

máxima e a formação de fuligem teve o papel dominante na intensidade de radiação. Os autores concluíram que existe uma região onde a mistura de combustível e oxigênio é mais eficiente, na qual a formação de fuligem é mais baixa e a radiação térmica torna-se menor. Além disso, a temperatura das chamas está atrelada diretamente a formação de fuligem e a disponibilidade de oxigênio durante a combustão.

Llanos, 2017, conduziu estudos experimentais com chamas de gás natural diluído com CO₂ em jatos únicos. Radiômetros foram utilizados para medir o fluxo de calor radiante proveniente das chamas e posteriormente comparado com dois modelos, o da única fonte pontual e o das múltiplas fontes pontuais, para descrever a distribuição do fluxo radiante. Este autor concluiu que a intensidade da radiação térmica é menor para chamas com menores formações de fuligem.

Fração radiante

A fração radiante é estudada na combustão para caracterizar as chamas em função de sua parcela de calor emitida na forma de ondas eletromagnéticas. Esta propriedade térmica pode ser estimada experimentalmente pela obtenção do fluxo de calor radiante em uma área delimitada, quando comparadas com a potência total de uma chama. A fração radiante é quantificada pela razão entre a radiação térmica emitida pela chama e a potência total da chama.

Markstein, 1976, conduziu experimentos para medir a fração radiante em relação ao espaçamento de chamas turbulentas difusivas. Os resultados mostraram que a fração radiante é significativamente influenciada pela formação de fuligem e tem seu ápice para determinado espaçamento entre os queimadores, onde a competição por oxigênio faz com que a formação de fuligem seja máxima.

Orloff et al., 1992, através de dados experimentais, propuseram uma correlação algébrica para prever a fração radiante de chamas turbulentas e difusivas para sete distintos combustíveis de hidrocarbonetos. O experimento consistiu de um ambiente controlado em relação ao N₂ e O₂ para a queima dos combustíveis e com radiômetros de amplo campo de visão, para captar a radiação emitida pela chama, sendo também obtida uma correlação para representar matematicamente os resultados experimentais.

Modelos para determinação do fluxo de calor radiante

O fluxo de calor radiante pode ser analisado por distintos modelos, sendo os mais comuns o SPS (*Single Point Source*) e o WMPS (*Weighted Multi-Point Source*). O modelo SPS consiste em considerar que a chama é uma fonte pontual de emissão de radiação. O modelo WMPS considera que a radiação total emitida compreende o somatório das intensidades de diversos pontos distribuídos ao longo da chama.

Os estudos de Machado, 2015, e Llanos, 2017, tiveram como base o modelo das múltiplas fontes pontuais em chamas difusivas de gás natural diluído com CO₂. O modelo de múltiplas fontes pontuais apresentou boa concordância com os dados experimentais coletados pelos autores, porém o modelo, diferentemente dos dados experimentais, apresentou curvas suaves para o fluxo de calor radiante. O desvio em relação aos dados experimentais foi influenciado pela distância entre a fonte de calor e o ponto de análise deste fluxo.

1.2.4 Efeito da diluição com gases inertes (CO₂)

A avaliação dos efeitos da diluição com gás inerte na geometria e radiação térmica geralmente consta da diluição do combustível com CO₂, N₂ ou Argônio (Ar). A diluição de gás inerte acarreta na redução de temperatura, mudança na geometria da chama e formação de fuligem, na qual grande parte dos estudos referem-se à análise da diluição dos gases inertes em jatos simples e, por este motivo, existe uma demanda para conduzir estudos de diluição em múltiplos jatos.

Kwang e Hyun, 2006, analisaram experimentalmente os efeitos da concentração de diluição de gás inerte em chamas únicas de propano com o intuito de prever a formação de fuligem ao longo da chama. A adição de CO₂ acarretou na redução da temperatura da chama, bem como, menores tamanhos de partículas de fuligem, as quais estão diretamente associadas ao baixo tempo de residência na região de formação das partículas de fuligem. Isto se deve a nucleação tardia na região de crescimento das partículas de fuligem pela alta capacidade térmica e química do CO₂.

Guo e Smallwood, 2008, conduziram um estudo numérico da influência da adição de CO₂ na formação de fuligem em chamas difusivas de etileno. A adição de CO₂ nas chamas comprovaram a supressão da formação de fuligem através dos efeitos térmicos e químicos associados à diluição do combustível com gases inertes.

Jiesheng et al., 2010, estudaram os efeitos da adição de gases inertes (CO_2 , N_2 e Ar) na estrutura e estabilidade de chamas difusivas de metano em descolamento. A estabilidade da chama e a altura de descolamento do bocal foram influenciados pela concentração do diluente, nas quais os resultados indicaram que o CO_2 é o maior desestabilizador, seguido de N_2 e Ar.

Não foram encontrados na literatura estudos sobre a diluição de chamas de hidrocarbonetos em configurações de múltiplas chamas, sendo este o tema da presente pesquisa.

1.3 Objetivos

O objetivo da presente dissertação é avaliar experimentalmente o efeito da diluição de gás natural com gás inerte (CO_2) em termos da geometria de chama e radiação térmica emitida em múltiplas chamas difusivas e verticais em ar parado.

1.3.1 Objetivos específicos

Características geométricas de chama

1. Construção de uma bancada experimental com dois queimadores móveis;
2. Avaliar os principais parâmetros fotográficos para medir as chamas que serão diluídas em diferentes concentrações de CO_2 ;
3. Avaliar um método apropriado para determinar os parâmetros geométricos das chamas difusivas de gás natural;
4. Validar e selecionar uma ferramenta computacional de aquisição de dados para medir o comprimento médio visível de chama;
5. Avaliar o efeito do afastamento entre as duas chamas; e
6. Avaliar em termos da razão S/d a região de término da interação de múltiplas chamas e o início da combustão em jato único.

Radiação térmica

1. Construção de uma bancada experimental para medir o fluxo de calor radiante de múltiplas chamas;

2. Conduzir medições experimentais em chamas laminares de gás natural com efeitos da diluição com CO_2 em três posições ao longo do comprimento da chama;
3. Calcular a fração radiante de múltiplas chamas;
4. Avaliar o modelo WMPS aplicado à múltiplas chamas para prever o fluxo de calor radiante;
5. Ajustar o modelo WMPS para garantir a distribuição do fluxo de calor radiante proveniente de cada uma das chamas em interação; e
6. Adaptar o método WMPS para prever o fluxo de calor radiante e comparar com os dados experimentais de múltiplas chamas de gás natural diluídas com CO_2 .

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos para os quais serão abordados os estágios do estudo da interação de múltiplas chamas. O capítulo um consta da breve introdução e motivação ao estudo de múltiplas chamas, seguido da revisão da literatura e os objetivos do presente trabalho. O segundo capítulo, aborda aspectos da fundamentação teórica no estudo do comprimento visível e radiação térmica das chamas. No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia empregada para medir o comprimento visível de chama, bem como, a validação do método escolhido. Além disso, este capítulo contém o método utilizado no estudo experimental e analíticos da radiação térmica aplicado à múltiplas chamas. O quarto capítulo contém os resultados experimentais de geometria de múltiplas chamas e radiação térmica para as chamas estudadas. Ainda, são apresentados os resultados da utilização do método algébrico WMPS. O último capítulo consta das conclusões gerais do estudo da interação de múltiplos jatos e as sugestões para futuros campos de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos trabalhos na literatura, usando chamas em jato único e/ou múltiplos, buscaram prever através de equações algébricas o comprimento de chamas, a radiação térmica, a fração radiante e o fluxo de calor radiante. A chama proveniente da combustão de um combustível pode ocorrer de 3 modos: em escoamento laminar, em transição ou em escoamento turbulento.

2.1 Comprimento de chama

Uma chama constitui uma propagação autossustentada proveniente da reação de um combustível com oxidante. A chama pode ser definida por um comprimento característico, L_f , por sua emissão na forma de radiação térmica, \dot{Q}_{RAD} , entre outros parâmetros. Estas medidas são essenciais para o dimensionamento de um queimador a gás para aplicações industriais ou comerciais. O comprimento de chama sofre influência de diversos parâmetros, sendo os principais: a vazão volumétrica de combustível e a quantidade de oxigênio disponível durante a reação de combustão. Turns, 2000, salienta que pequenas reduções abaixo de 21% da concentração de oxigênio no ar atmosférico, acarretam em comprimentos de chama muito maiores. Além disso, durante o processo de extração do petróleo o gás natural encontra-se em grande maioria diluído com CO_2 . A diluição do combustível muda a razão estequiométrica, Z , na qual resulta em menores comprimentos de chama.

A estabilidade de chama constitui um importante campo de pesquisa devido ao controle da chama em regiões de segurança de operação e menores emissões de gases nocivos à atmosfera. Weber e Vandaveer, 1965, comentam que um dos critérios a ser evitado na construção de queimadores a gás é o de não trabalhar na região dos limites de descolamento de chama. O descolamento é indesejável devido as emissões de combustível não queimado e CO à atmosfera, ainda a chama deslocada produz ruído indesejado nos locais de trabalho. Após o limite de descolamento ser ultrapassado, novos incrementos na velocidade do escoamento ou aumento da concentração de diluente podem causar a extinção e uma chama estabilizada não é formada. Neste caso, a liberação de combustível ocorre de forma direta à atmosfera.

2.1.1 Modelos algébricos para comprimento de chamas laminares não pré-misturadas

Burke e Schumann, 1928, realizaram a primeira tentativa para descrever as características físicas de chamas confinadas não pré-misturadas ou difusivas (nome dado pelos autores) de metano. A difusão entre o combustível e o oxidante ocorre de forma em que o combustível se move na direção à frente de chama e o oxidante na direção ao encontro do combustível. Os produtos da combustão difundem-se nas direções opostas à frente de chama. Os autores propuseram uma equação algébrica, Equação 2.1, para descrever as chamas difusivas sobreventiladas e subventiladas, os resultados foram comparados com os dados experimentais e apresentam boa concordância.

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \frac{J_1(\lambda_m R) J_0(\mu x)}{[J_0(\lambda_m R_o)]^2} e^{-\frac{D\lambda_m^2 L_f}{v}} = \frac{R_o^2}{2R} \left(1 + \frac{1}{Z}\right) - \frac{R}{2} = E \quad (2.1)$$

Sendo L_f o comprimento visível de chama, D o coeficiente de interdifusão das espécies, R o raio do orifício de saída de combustível, R_o o raio do orifício do escoamento externo, v a velocidade do gás, E um parâmetro adimensional, Z a razão estequiométrica molar de oxidante (orifício externo) e combustível (orifício interno), x a distância radial da frente de chama, J_0 e J_1 são funções de Bessel de ordem zero e de primeira ordem, respectivamente, λ_m são definidos por todas as raízes positivas da equação $J_1(\lambda_m R_o) = 0$.

Burke e Schumann, 1928, indicam que um aumento no valor de E acarreta no decréscimo do comprimento de chama. Ainda, os estudos mostraram que a adição de gases inertes causa um decréscimo no comprimento de chamas sobreventiladas, devido à redução da quantidade de combustível na mistura e o aumento de E . Além disso, o aumento no comprimento de chamas subventiladas ocorre devido à redução do valor de E . Portanto, os parâmetros que afetam o comprimento de chama são: a concentração de gás inerte na mistura, velocidade do escoamento e concentração de oxidante. Os parâmetros que não afetam o comprimento de chamas são: os raios dos tubos e a pressão.

Fay, 1954, concentrou seus estudos em chamas laminares não pré-misturadas e não confinadas. Foi proposto uma expressão para estimar o comprimento de chama, Equação 2.2, para chamas tipo jato livre na atmosfera. Esta expressão é válida para os casos em que a composição do jato de gás não é idêntica ao meio e a mistura do combustível e oxidante se dá por difusão.

$$L_f \approx \frac{3}{8\pi} \frac{P}{\mu_s u_f} \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_s} \right) \left[I \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_f} \right) \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Sendo P a quantidade de movimento na saída do bocal, u_f velocidade na saída do bocal, $I(\rho_\infty/\rho_f)$ integral da quantidade de movimento, ρ_∞ a densidade do meio ambiente e ρ_f a densidade do combustível. Os resultados mostram que a equação algébrica está em concordância com os dados experimentais apenas em regiões onde a vazão volumétrica de gás é baixa e a chama se mantém próxima ao queimador.

Roper, 1977, propôs uma mudança na equação algébrica de Burke e Schumann, 1928, com o intuito de satisfazer a equação da continuidade quando o perfil de velocidade do combustível não é constante. Os estudos descreveram equações que preveem o comprimento de chamas laminares não pré-misturadas em queimadores com seções circulares, Equação 2.3, quadrados ou queimadores de fenda.

$$\frac{L_f}{Q_F} = \left\{ 4\pi D_\infty \ln \left(1 + \frac{1}{Z} \right) \right\}^{-1} \left(\frac{T_\infty}{T_f} \right)^{0.67} \quad (2.3)$$

Nesta equação, L_f representa o comprimento de chama, Q_F a vazão volumétrica de combustível, D_∞ o coeficiente de difusão médio avaliado para o oxidante na temperatura do escoamento de oxidante, T_∞ , Z a razão estequiométrica molar de oxidante e combustível e T_f a temperatura de chama equivalente a 1500 K no modelo de Roper.

Faeth et al., 1999, concentrou seus experimentos em chamas difusivas laminares de etileno e propano onde o efeito do empuxo criado pela gravidade é negligenciado. Para reduzir os efeitos de empuxo, os experimentos foram realizados durante a órbita do ônibus espacial Columbia. Utilizando as considerações de Spalding, 1979, referentes a chamas laminares sem empuxo, Faeth et al., 1999, efetuaram modificações para determinar algebricamente o comprimento de chama luminoso pela Equação 2.4.

$$\frac{(L_f - L_o)}{d} = \left(\frac{3C_f}{32} \right) \frac{ReSc}{Z} \quad (2.4)$$

Onde L_f representa o comprimento visível de chama, L_o a origem virtual, d o diâmetro do queimador, C_f um coeficiente empírico, Re o número de Reynolds, Sc número de Schmidt e Z a razão estequiométrica molar de oxidante e combustível.

O comprimento visível de chama é uma função da vazão volumétrica de combustível, Q_F , bem como da fração mássica de combustível estequiométrico, Z_{est} , Equação 2.5. Esta função é diretamente proporcional à vazão volumétrica de combustível e, inversamente proporcional à fração mássica estequiométrica de combustível, ou seja, quanto maior for a concentração de oxidante necessária para completar a reação, maior será o comprimento de chama. Por exemplo, Turns, 2000, enfatizou que chamas formadas por metano são mais curtas que chamas formadas por propano devido a maior razão estequiométrica molar de ar/combustível para completar a reação de combustão.

$$L_f = f(Q_F, Z) \quad (2.5)$$

2.1.2 Modelo algébricos para comprimento de múltiplas chamas não pré-misturadas

O comportamento do decaimento do comprimento de múltiplas chamas foi proposto por diferentes métodos algébricos, sendo os principais descritos por Lenze et al., 1975, Menon e Gollahalli, 1985, Heitor et al., 1991 e Leite et al., 1996. A expressão empírica descrita pelos autores descreve o decaimento do comprimento de múltiplas chamas através de uma curva. Os métodos propostos levaram em consideração a relação S/d (espaçamento entre as linhas de centro dos jatos, d o diâmetro do queimador), o número de queimadores presentes durante a queima de combustível e o comprimento de chama de jato simples.

Lenze et al., 1975, propuseram uma equação algébrica para prever o comprimento de múltiplas chamas de gás natural com 3 ou 5 queimadores quando comparadas ao jato único. A Equação 2.6 representa o comportamento do comprimento do jato central de múltiplas chamas apenas quando as chamas estão em interação e, este valor é máximo quando S/d for mínimo, ou seja, quando a distância entre os queimadores for a menor possível.

$$\frac{L_M}{L_f} = 1 + \left[(n - 1) \cdot \left(1 - \frac{(S/d)}{k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Nesta equação, L_M corresponde ao comprimento de chama de múltiplos jatos, L_f o comprimento de chama de jato único, S representa a distância de separação entre as linhas de centro dos jatos, d representa o diâmetro do queimador, n o número de queimadores, k uma constante que tem magnitude 18 para gás liquefeito de petróleo e 25 para gás natural.

A equação algébrica proposta por Menon e Gollahalli, 1985, Equação 2.7, apresenta o decaimento do comprimento de chama através de uma curva e tende a estabilizar quando S/d apresentar um valor próximo a 20.

$$\frac{L_M}{L_f} = \frac{1}{[1 - c_1(n - 1)] \left[\left(1 - \left(\frac{d}{2S} \right)^{c_2} \right) \right]} \quad (2.7)$$

Nesta equação, L_M corresponde ao comprimento de chama de múltiplos jatos, L_f o comprimento de chama de jato único, S representa a distância de separação entre as linhas de centro dos jatos, d representa o diâmetro do queimador, n o número de queimadores, c_1 e c_2 constantes para o propano com o valor de 0,028 e 1,04 respectivamente. Heitor et al., 1991, utilizando métodos fotográficos para medir o comprimento de chamas de múltiplos jatos, obtiveram resultados semelhantes para chamas de propano e metano. Os autores desenvolveram uma expressão empírica da mesma forma à Equação 2.7, porém c_1 e c_2 com o valor de 0,057 e 0,870 respectivamente.

Leite et al., 1996, obtiveram uma expressão empírica para múltiplas chamas de acetileno, apresentada na Equação 2.8. Esta é semelhante à equação utilizada por Menon e Gollahalli, 1985, e Heitor et al., 1991, porém um ajuste nesta expressão foi realizado para que os pontos se ajustassem aos dados experimentais do acetileno. Duas constantes foram introduzidas, f (função do diâmetro interno do queimador) e c_3 com valores de 1 e 1,368 respectivamente. As constantes c_1 e c_2 apresentam valores de 0,02 e 1,2 respectivamente.

$$\frac{L_M}{L_f} = f \frac{1}{[1 - c_1(n - 1)^{c_3}] \left[\left(1 - \left(\frac{d}{2S} \right)^{c_2} \right) \right]} \quad (2.8)$$

O comprimento visível de múltiplas chamas é uma função da distância de separação, S , bem como do número de queimadores, n , vazão volumétrica de combustível, Q_F , e razão

estequiométrica molar de ar/combustível para completar a reação de combustão, Z , Equação 2.9.

$$L_f = f(S, n, Q_F, Z) \quad (2.9)$$

2.1.3 Influência do número de Reynolds sobre o comprimento de chama

O comportamento do escoamento dentro de um tubo está diretamente ligado ao número de Reynolds, Equação 2.10. O escoamento em regime laminar ou turbulento é diretamente proporcional ao diâmetro do tubo, d , bem como a massa específica do fluido, ρ , e velocidade de escoamento, v . Além disso, este é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do fluido em escoamento, μ .

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (2.10)$$

Um escoamento é dito plenamente desenvolvido no interior de um tubo quando este atinge o seu perfil de velocidade completamente desenvolvida, Figura 2.1. Çengel e Ghajar, 2012, define o comprimento de entrada do escoamento laminar, C_e , através da Equação 2.11. O escoamento laminar plenamente desenvolvido tem início a partir da distância na qual o perfil de velocidade se mantém constante e com perfil parabólico.

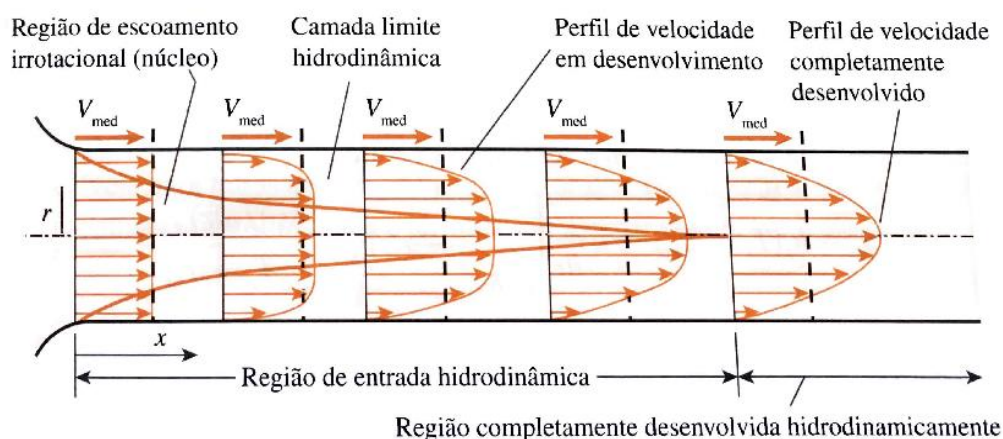


Figura 2.1 – Desenvolvimento do perfil de velocidade para escoamento laminar em um tubo circular [Çengel e Ghajar, 2012].

$$C_e = 0,05dRe \quad (2.11)$$

Diversos autores buscaram entender os efeitos do número de Reynolds na geometria e estabilidade de chamas não pré-misturadas. Hottel e Hawthorne, 1948, analisaram os efeitos da velocidade do jato de combustível na geometria e estabilidade de chamas laminares e turbulentas não pré-misturadas em queimadores circulares. O estudo mostrou que partindo do ponto em que a velocidade de jato é nula e incrementando-se a velocidade do jato gradativamente, o comprimento de chama aumenta até o ponto em que o limite crítico é atingido, apresentado na Figura 2.2. Até este ponto, a difusão é dita molecular e ocorre de forma lenta, e a chama se encontra no regime laminar ($Re < 2300$). Subseqüentes incrementos na velocidade do jato de combustível ultrapassam o ponto de ruptura (*jet break point*), na região de transição, causando um decréscimo abrupto no comprimento de chama. Nesta região, $Re > 2300$, dá-se início a difusão turbulenta ou transferência de massa de forma turbulenta. Incrementos na velocidade do jato no regime turbulento fazem com que o comprimento de chama cresça até onde o limite de extinção por escoamento seja ultrapassado e a chama se apague. A região de separação ou transição do escoamento em regime laminar para turbulento acontece relativamente perto do bocal do queimador.

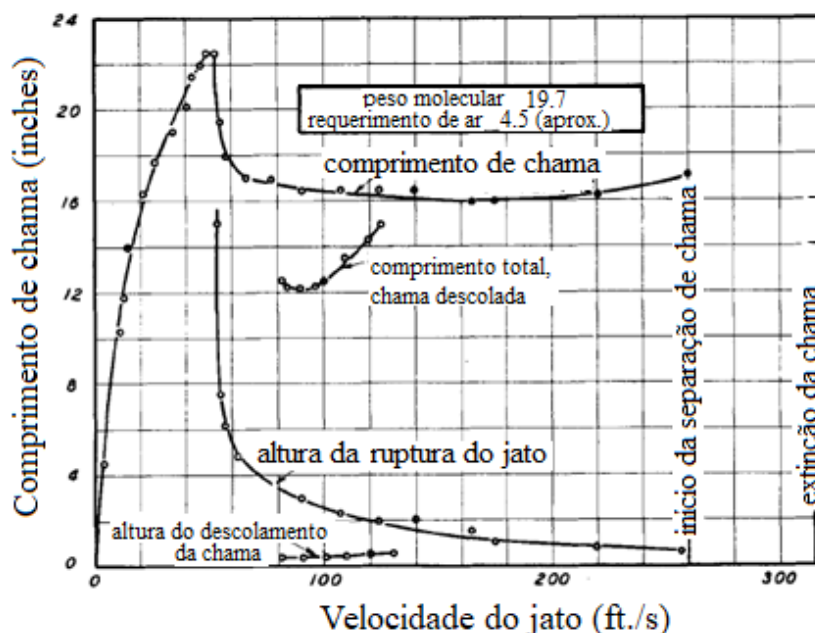


Figura 2.2 – Efeito da velocidade do jato na geometria da chama [Adaptado de Hottel e Hawthorne, 1948].

Lee et al., 1994, realizaram experimentos para avaliar os efeitos na altura de levantamento em chamas não pré-misturadas de propano diluído com N_2 . Os autores definiram que, dependendo do diâmetro do queimador e do grau de diluição do combustível, o comportamento do descolamento e extinção da chama pode ocorrer de três formas: o descolamento e extinção ocorrem no regime laminar, o descolamento ocorre no regime laminar enquanto a extinção no regime turbulento ou o descolamento e extinção ocorrem ambos no regime turbulento. A Figura 2.3, ilustra o comportamento da chama descolando do bocal no regime laminar e o decaimento abrupto no comprimento de chama quando a região de transição do regime laminar para turbulento acontece para $Re = 2300$ no interior do tubo circular.

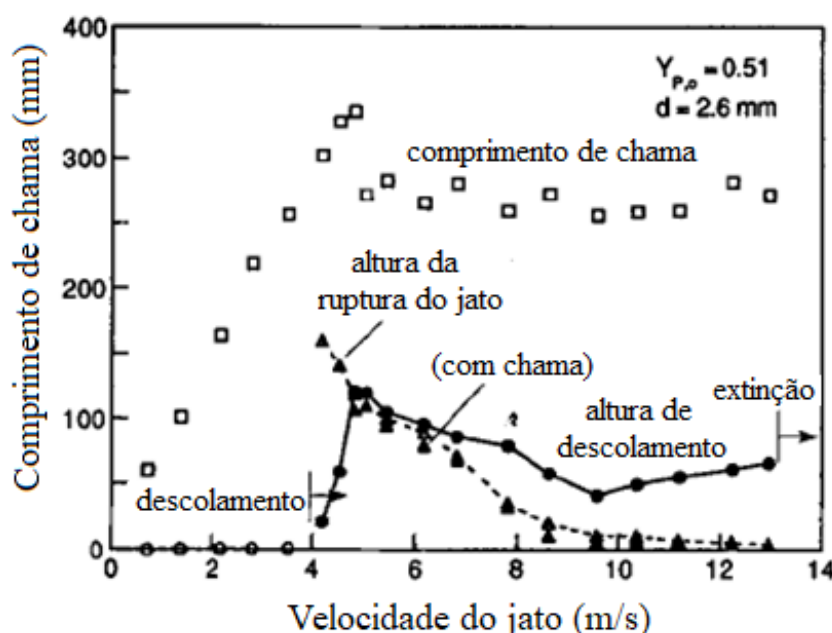


Figura 2.3 – Efeito da velocidade do jato no descolamento e geometria da chama [Adaptado de Lee et al., 1994].

2.2 Radiação térmica

A radiação eletromagnética pode ser classificada de acordo com um comprimento de onda e uma frequência de propagação. Ainda, as ondas eletromagnéticas podem sofrer três processos físicos: absorção, emissão e espalhamento em um meio. A absorção é descrita em termos da energia radiativa que é convertida em energia interna na matéria. A emissão de um corpo descreve a transmissão da energia em uma determinada direção. Um corpo é considerado ideal quando este transmite radiação uniformemente em todas as direções e em um mesmo

comprimento de onda. O espalhamento descreve o desvio da propagação da radiação em uma determinada direção e engloba os fenômenos de difração, reflexão e refração. Se um determinado meio altera a quantidade de radiação que alcança outra superfície, este é considerado como um meio participante. Este é comum em processos de combustão devido aos produtos mudarem a radiação ao longo do caminho pelos três processos descritos. A radiação térmica constitui um importante mecanismo de transporte de energia em chamas e este é descrito em função da fração radiante e do fluxo de calor radiante. Estes parâmetros estão diretamente ligados à composição do combustível, a velocidade na qual o combustível é ejetado do bocal do queimador e da temperatura de chama.

2.2.1 Fração radiante

Os métodos empregados para medir a fração radiante em múltiplos jatos seguem os mesmos princípios da estimativa de jatos únicos. No entanto, o posicionamento dos radiômetros difere significativamente, uma vez que é necessário obter valores semelhantes do fluxo de calor radiante proveniente de ambas as chamas durante a combustão, ou então isolar a medição do fluxo de calor proveniente de uma das chamas. O posicionamento dos sensores será abordado na seção subsequente.

A fração radiante representa a quantidade de calor emitida por uma chama na forma de radiação térmica. Esta é calculada através da razão entre a energia total radiada pelo calor total e ideal liberado durante o processo de combustão, Equação 2.12.

$$\chi_{RAD} = \frac{\dot{Q}_{RAD}}{\dot{Q}_{TOTAL}} = \frac{4\pi R_{esf}^2 q_r''}{\dot{m}_c \Delta H_r} \quad (2.12)$$

O fluxo total de calor radiante, \dot{Q}_{RAD} representa o calor emitido pela chama na forma de radiação e, \dot{Q}_{TOTAL} representa o calor total e ideal liberado pelo processo de combustão. Nesta equação q_r'' representa a fluxo de calor emitido pela chama assumindo uma esfera isotrópica de emissão de radiação com raio, R_{esf} , Figura 2.4, \dot{m}_c a vazão mássica de combustível utilizado na reação de combustão e ΔH_r o poder calorífico inferior do combustível.

Markstein, 1985, utilizou a Equação 2.12 para medir a fração radiativa proveniente de jatos simples de seis combustíveis de hidrocarbonetos em escoamento laminar e turbulento. Os resultados mostraram que a fração radiativa em regime laminar é dependente da vazão de

combustível. Em regime turbulento este valor se manteve constante e independente do incremento da vazão de combustível. A menor fração radiativa encontrada foi para o combustível com menor densidade, ou seja, para metano e este valor foi de 0,181. Ainda, a adição crescente de diluente no combustível causou uma redução gradativa da fração radiativa. Para concluir, o autor utilizou uma correlação para medir a fração radiante em regime turbulento em função do ponto de fumaça do comprimento de chama, L_s , Equação 2.13.

$$\chi_{RAD} = 0,429 - 0,908L_s \quad (2.13)$$

Turns, 1991, realizou estudos experimentais para determinar os efeitos do combustível e a fração radiante nas emissões de NO_x em jatos simples. O estudo consistiu da análise de quatro combustíveis: metano, etileno, propano e uma razão de 57% CO e 43% H_2 em volume de mistura. O fluxo de calor radiante proveniente das chamas foi medido através de radiômetros de amplo campo de visão. Os sensores foram posicionados verticalmente na metade do comprimento de chama, esta posição segundo o autor, corresponde à região em que o fluxo radiante da chama tem seu valor máximo. Os resultados mostraram que os efeitos do fluxo e do tipo de combustível na radiação emitida são parâmetros importantes para determinar a emissão de NO_x em jatos únicos.

2.2.2 Fluxo de calor radiante

Os modelos algébricos empregados neste trabalho para estimar o fluxo de calor radiante são o SPS e o WMPS. O modelo SPS, simples e de fácil utilização, não leva em consideração o formato da chama por assumir que a chama pode ser representada por uma fonte pontual. Este ponto, verticalmente, compreende a meia altura de chama ($L_f/2$), segundo Turns, 1991. A distância horizontal entre a fonte e o sensor não foi estabelecida claramente na literatura. Os modelos algébricos utilizados por Machado, 2015, e Llanos, 2017, apresentam boa distribuição do fluxo de calor radiante considerando a distância horizontal mínima de $2 L_f$. Na impossibilidade de isolar o fluxo de calor proveniente de cada chama em uma configuração de múltiplas chamas, a fração radiante proveniente de múltiplas chamas deve ser calculada obtendo-se o fluxo de calor radiante na posição central às duas chamas. Desta forma, garante-se que o fluxo de calor medido pelos sensores seja o mesmo para as duas chamas. A Figura 2.5,

mostra a diferença entre o posicionamento do sensor para os modelos SPS em jatos únicos e múltiplas chamas.

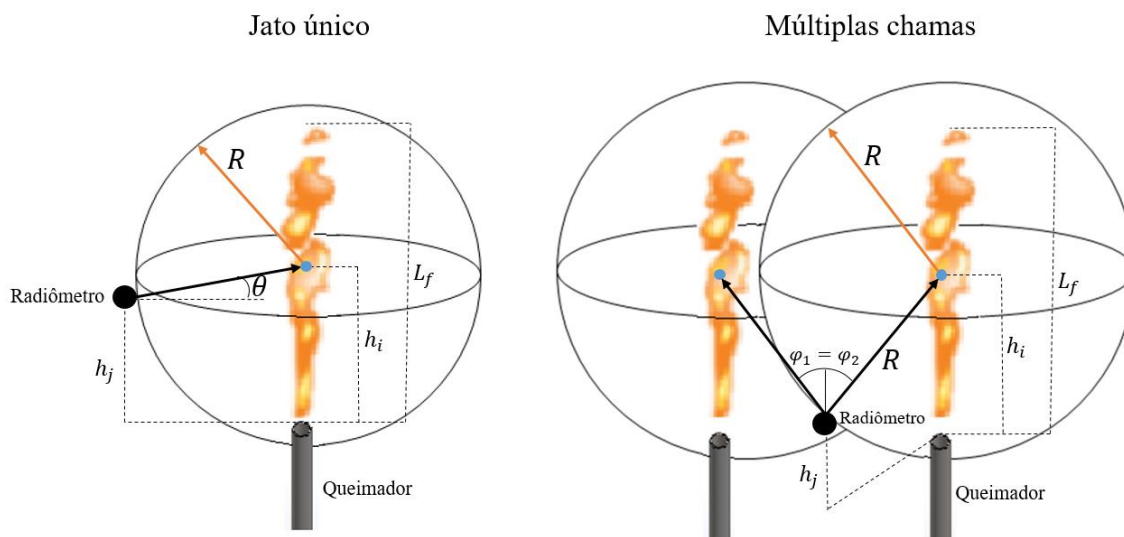


Figura 2.4 – Posicionamento do radiômetro no modelo SPS.

No modelo SPS aplicado a múltiplas chamas a distribuição do fluxo de calor radiante pode ser estimado ajustando-se a Equação 2.12, na qual obtem-se a Equação 2.14.

$$q_{r,SPS}'' = \frac{\tau_m \chi_{RAD} \dot{m}_c \Delta H_r}{2\pi R_{esf}^2} \cos\theta \quad (2.14)$$

O modelo WMPS, apresentado na Equação 2.15, modela o fluxo de calor radiante ao longo do comprimento da chama através de N pontos estabelecidos ao longo da chama. Estes N pontos distribuídos ao longo do comprimento de chama são espaçados por uma mesma distância e possuem um pico de intensidade que se encontra a $n = 0,75N$. O fluxo de calor radiante é dependente de N fatores de ponderação, w_i , na qual duas funções distintas e lineares atribuem intensidades de radiação ao longo do comprimento de chama, Hankinson e Lowesmith, 2012, Machado, 2015, e Llanos, 2017. O somatório dos n fatores de ponderação compreendem a unidade. A primeira função utilizada é crescente, apresentada pela Equação 2.16, e a outra compreende uma função decrescente, apresentada pela Equação 2.17. Hankinson e Lowesmith, 2012, mostraram que o termo transmissividade, τ_m , em escala laboratorial na qual a temperatura é baixa e distância é inferiores a 3 metros, pode ser desprezado devido a proximidade com a unidade.

$$q_{r,WMPs}'' = \sum_{i=1}^n q_{r,i}'' = \sum_{i=1}^n \frac{w_i \tau_m \chi_{RAD} \dot{m}_c \Delta H_r}{2\pi R_{esf}^2} \cos\theta \quad (2.15)$$

$$w_i = \frac{i w_1}{\sum_{i=1}^N w_i} , \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

$$w_i = \frac{\left[n - \frac{(n-1)(i-(n+1))}{N-(n+1)} \right] w_1}{\sum_{i=1}^N w_i} , \text{ para } i = n+1, n+2, \dots, N \quad (2.17)$$

A Figura 2.5 ilustra a diferença deste modelo WMPS utilizado em jatos únicos e múltiplos jatos.

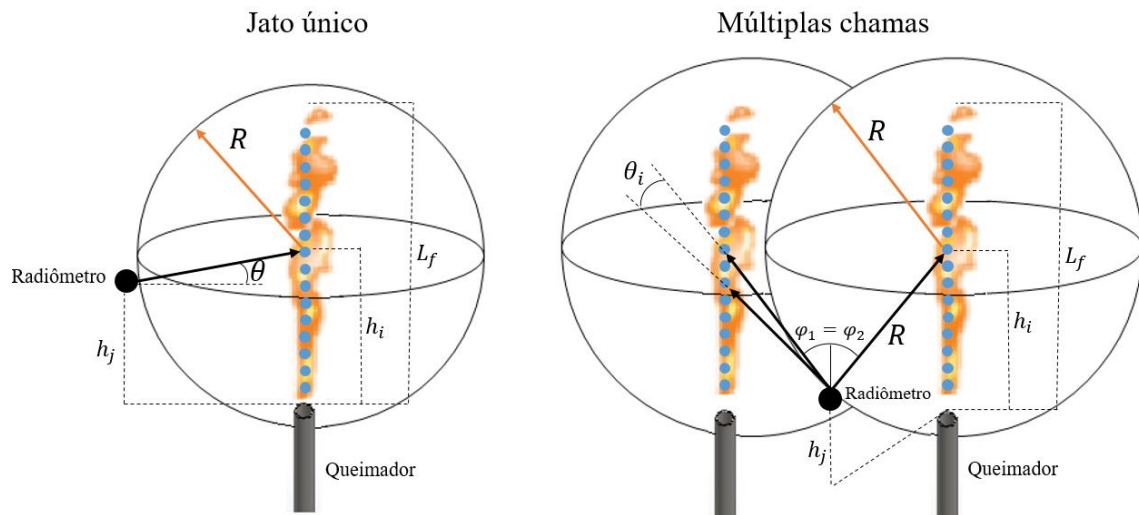


Figura 2.5 – Posicionamento do radiômetro no modelo WMPS.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a construção de uma bancada experimental para atender os objetivos estipulados sobre a medição do comprimento de chama e radiação térmica. Além disso, os métodos utilizados para obtenção de resultados com confiabilidade são comentados. Este capítulo divide-se em medição do comprimento visível de múltiplas chamas e medição da radiação térmica em múltiplas chamas.

3.1 Medição do comprimento visível de múltiplas chamas

Os principais parâmetros fotográficos envolvidos na captura de chamas não pré-misturadas de gás natural são evidenciados, bem como o método empregado para medir o comprimento visível de chama. Além disso, a validação e seleção do método são discutidas.

3.1.1 Bancada experimental

O presente trabalho consiste de um estudo experimental de dois queimadores compostos por uma liga metálica, latão fio máquina (Apêndice A), posicionados lado a lado com chamas laminares não pré-misturadas e com distância de separação variável. Os dois queimadores, pintados na cor preta, possuem a mesma área de seção transversal e geometria circular sem costura. O diâmetro interno dos tubos é de 2,76 mm e o comprimento longitudinal de 450 mm para garantir que o escoamento seja plenamente desenvolvido na saída de cada um dos queimadores. Estes tubos de latão são fixados em duas guias independentes, que são conectados a um trilho metálico de aço. Um dos queimadores é mantido em uma das extremidades do trilho e o outro move-se longitudinalmente para criar uma distância de separação entre as chamas de no máximo 400 mm, Figura 3.1.

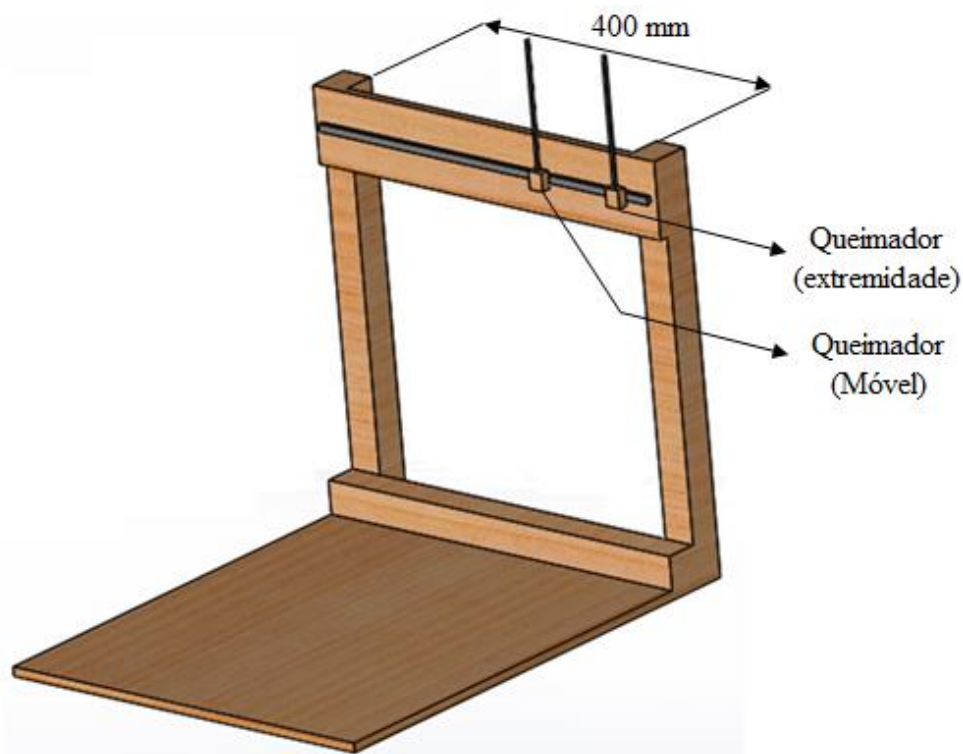


Figura 3.1 – Bancada experimental para medição do comprimento visível de chama.

O combustível utilizado para queima neste experimento é o gás natural e o diluente é CO_2 . Nos casos em que uma diluição é adicionada, o experimento é realizado para manter a vazão total da mistura constante, ou seja, a soma de combustível e diluente se mantém constante, de tal forma que a potência da chama é reduzida. A combustão ocorre de forma em que as chamas sejam sobreventiladas e em ar parado, onde ambos os queimadores possuem a mesma vazão mássica de mistura. A vazão mássica de combustível e diluente são controladas por quatro medidores de vazão de gás Bronkhorst®, que através da sua calibração com o equipamento DryCal® MesaLab Defender 530+ garantem uma precisão de $\pm 1\%$ da vazão volumétrica dos gases até a saída dos bocais (Figura 3.2). Os valores estipulados para vazão volumétrica de mistura deste experimento são de 1, 1,5, 2 e 2,5 L/min. A concentração de gás inerte varia de 0 a 50% de CO_2 na mistura em passos de 10% em volume para manter o escoamento no regime laminar. Quando desejada, a combustão inicia através de uma chama piloto que dá ignição ao gás natural que sai do queimador em um regime laminar plenamente desenvolvido.

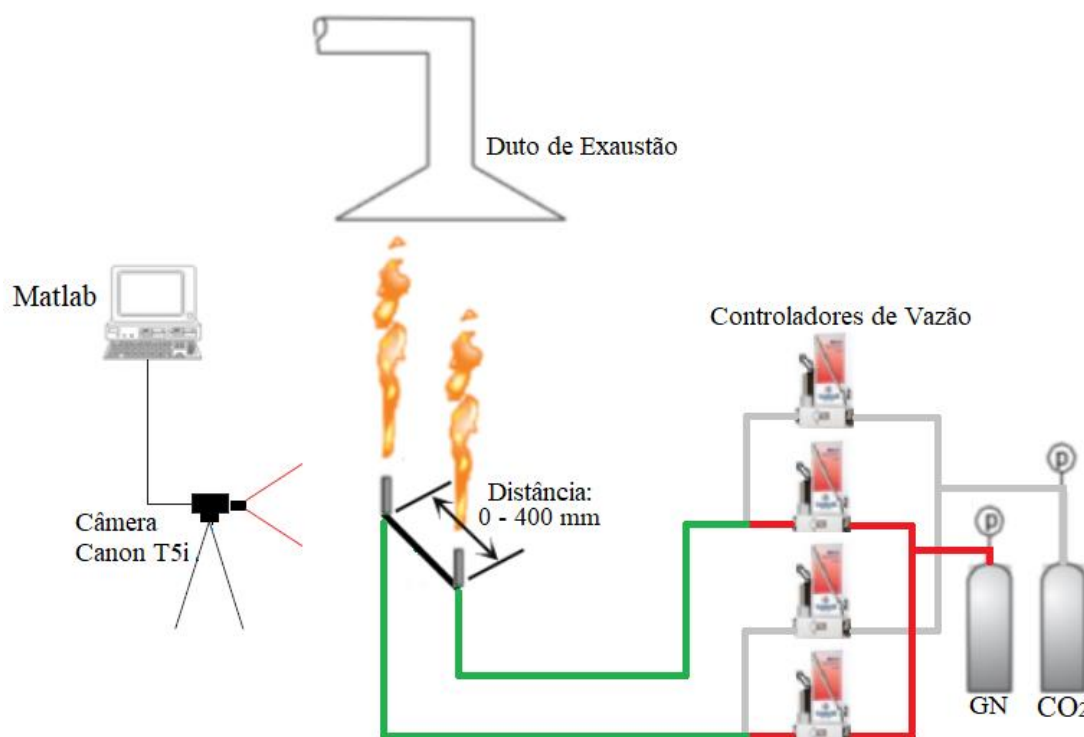


Figura 3.2 – Esquema para medição do comprimento de chama durante a combustão de gás natural.

A geometria da chama (comprimento e altura de descolamento) são analisadas para cada condição de vazão de combustível e concentração de diluição por uma câmera Canon T5i com métodos similares aos experimentos realizados na literatura de Llanos, 2017. Além disso, as imagens capturadas para medições do comprimento visível de chama foram realizadas contra um fundo de tecido preto. A distância de separação reportada neste estudo é realizada através de passos do diâmetro interno do queimador que se encontra fixo em uma das extremidades da bancada experimental, Apêndice B, e esta distância é considerada entre os centros dos queimadores. O número de medições utilizadas compreende 20 diferentes posições de separação, tendo como início dois diâmetros de separação devido à impossibilidade de medição inicial ser de um diâmetro devido à parede dos tubos, e consideram-se passos de um diâmetro. Além dos experimentos com duas chamas, são também executados testes com chama única, com o objetivo de comparar os resultados obtidos (chama única \times chamas duplas)

3.1.2 Parâmetros ópticos e regulagens da câmera digital

Os parâmetros ópticos e as regulagens da câmera digital para captura de imagens são os principais contribuintes para obtenção dos resultados com confiabilidade deste trabalho. Para obter as imagens das chamas difusivas laminares com diluição de CO₂, é necessário conhecer os efeitos que os parâmetros fundamentais das câmeras digitais têm no resultado final da fotografia, os quais são: o tempo de exposição, abertura do diafragma, sensibilidade à luz (ISO), forma de captura (disparo contínuo) e o formato de salvamento em disco.

3.1.2.1 Tempo de exposição

O tempo de exposição, t_{exp} ou também conhecido como tempo do obturador, representa o tempo na qual o sensor digital da câmera Canon T5i estará exposto à luz. O tempo em que o obturador permanecerá aberto é proporcional ao tempo de exposição selecionado pelo operador em modo manual. Neste caso, o modo manual pode ser ajustado para tempo de exposição entre 30 e 1/4000 segundos. Este parâmetro torna-se importante para captura de objetos em movimento, uma vez que um correto tempo de exposição resulta em imagens sem borrões ou rastros de movimento. Ao reduzir o tempo de exposição ou *shutter time* na câmera, o objeto que se encontra em movimento torna-se cada vez mais congelado na imagem, e assim imagens menos borradas do objeto em movimento são capturadas. Este parâmetro afeta diretamente a quantidade de luz presente na imagem e, portanto, o ISO deve ser regulado para compensar a quantidade de luz que entra pela lente.

No estudo de chamas não pré-misturadas, em constante movimento, o tempo de exposição deve ser baixo o suficiente para que a imagem da chama em alta velocidade seja congelada num determinado instante de tempo. Esta condição torna o pós processamento de dados menos corretiva, uma vez que pontos luminosos indesejados são evidenciados na imagem em sua forma binária.

3.1.2.2 Abertura do diafragma

A abertura do diafragma, também conhecida como *aperture*, é semelhante ao olho humano e representa o quanto as lentes estarão abertas ou fechadas para que a luz chegue ao sensor. Em ambientes escuros, uma abertura maior do diafragma é necessária para se obter a

quantidade ideal de luz nas imagens. Este é representado por *f/stops*, na qual este número aparece, por exemplo, na forma *f/5.6* e quanto maior este número, menor será a quantidade de luz que chegará aos sensores porque este estará menos exposto. Conseqüentemente, o campo de visão é alterado pela regulagem da abertura do diafragma e, assim, pode-se separar objetos do fundo das imagens que neste caso separa a chama das demais partes da imagem.

3.1.2.3 Sensibilidade à luz (ISO)

O ISO representa a sensibilidade do sensor à luz, ou seja, é a função na qual controla o brilho presente nas imagens. A medida que se seleciona um número maior de ISO, a imagem tornar-se mais clara/brilhante e o oposto escurece a imagem capturada. Esta regulagem é feita de acordo com as condições em que o objeto se encontra, no geral ambientes mais escuros requerem um ISO maior. Todas câmeras digitais apresentam um ISO de base (*base ISO*) que correspondem ao menor valor de ruído na imagem. Este ruído aparece na forma de grãos largos nas imagens mas pode ser compensado através da regulagem do tempo de exposição.

3.1.2.4 Modo contínuo de disparo

O modo contínuo de disparo, ou também conhecido como *burst mode* é ideal para condições em que a câmera se encontra parada e o objeto em movimento. A utilização do disparo contínuo torna-se vantajosa devido a não compactação (perda de pixels) das imagens extraídas de vídeos (a qual seria outra opção para obtenção de imagens da chama), ou seja, o modo contínuo de disparo captura imagens rapidamente com os parâmetros de tempo de exposição, ISO e abertura do diafragma preestabelecidos.

3.1.2.5 Formato dos arquivos salvos

Diversos formatos podem ser salvos pela câmera Canon T5i, como por exemplo, Portable Network Graphics (png), Joint Photographic Experts Group (jpeg) e Canon raw 2 (cr2). Cada formato apresenta algumas vantagens e desvantagens, a Tabela 3.1 ilustra algumas dessas características. Como as imagens capturadas serão processadas posteriormente, uma correta seleção do formato do arquivo torna-se essencial para garantir a qualidade dos resultados.

Tabela 3.1 – Formatos de armazenamento das imagens, requisitos e suas vantagens e desvantagens.

Formato	Compressão de dados	Espaço em disco	Edição sem perda	Qualidade do SD
.cr2	Não	Alto	Sim	Alta
.png	Não	Médio	Sim	Média
.jpeg	Sim	Baixo	Sim	Baixa

A captura de imagens em formato cru (*RAW*) exige uma grande qualidade do cartão SD, ou seja, alta velocidade de escrita de dados e alto espaço de armazenamento. O modo de disparo contínuo captura uma sequência de imagens em uma fração de segundos, assim se um formato de arquivo exigir mais do que a capacidade do cartão SD não será possível obter a qualidade desejada. Além disso, cada experimento requer uma grande quantidade de imagens, o que torna o formato *RAW* pouco desejado neste caso. Formatos comprimidos como jpeg, são desejados para casos onde não são feitos tratamentos de dados, como por exemplo, ajuste de luminosidade. Neste trabalho, o único tratamento realizado é um recorte na região de interesse (sem perda de dados), portanto, a escolha do formato jpeg torna-se mais atrativa entre as demais. Os requisitos deste trabalho são: alto número de imagens armazenadas, exigência de pós processamento de dados para selecionar uma região de interesse e exigência de não compactação de informações durante a captura.

3.1.3 Processamento da geometria das chamas

O comprimento visível de chama pode ser medido por diferentes métodos como, por exemplo, medição manual das imagens impressas com um comparador de escala, número de pixels contido nas imagens que são contabilizados por um software, através da média relativa entre o ponto máximo e mínimo referente a uma sequência de fotos, entre outros métodos. Os métodos computacionais são ferramentas eficientes que tornam o processamento de dados mais rápido quando se tem uma grande amostragem a ser avaliada. Um dos principais requisitos para medir o comprimento visível de chama está em adotar uma forma na qual garante-se que o comprimento observado seja o mais preciso e sem compactação de informações no processamento dos dados. Para tanto, pode-se avaliar o comprimento de chama através de vídeo com sequência temporal ou por imagens instantâneas. Durante testes iniciais, o tempo de

experimentação para cada distância de separação pelo método de imagens instantâneas foi de 1 minuto e 30 segundos e, por vídeo o tempo foi de 10 segundos (dados referentes ao tempo definido neste experimento). Porém, o processamento de dados torna-se o principal requisito para escolha do método a ser utilizado neste trabalho. Vídeos são realizados por uma sequência de imagens capturadas a uma taxa muito rápida, neste caso, a camera T5i captura a 30 frames por segundo. Assim, para medir o comprimento de chama é preciso extrair os frames dos vídeos que, conseqüentemente, acarretam em compactação de dados e os pixels das imagens mais grosseiros comparados com imagens instantâneas. Este método gera compactação de dados 5 vezes maior quando comparado com imagens instantâneas. Essa compactação acarreta em perda de precisão no processamento do comprimento da chama, bem como uma oscilação maior deste valor e faz com que a confiabilidade do método seja reduzida. O método das imagens instantâneas, apesar de ser mais lento, permite a captura das chamas em sequência ordenada, porém não existe compactação de dados e perda do número de pixels das imagens, assim a confiabilidade do método torna-se mais vantajosa. Como desvantagem, em sequência ordenada, é preciso avaliar o número de imagens necessárias para se obter um valor médio do comprimento de chama com pequenas oscilações entre esse valor.

Dois ferramentas computacionais foram utilizadas para seleção e validação do comprimento médio visível de chama, o software Matlab® e Photoshop®. Para tanto, uma câmera Canon T5i fixada a uma posição frontal aos queimadores fez a captura das imagens, onde os parâmetros utilizados para cada condição do experimento são ilustrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados na câmera nas condições impostas no experimento de múltiplas chamas.

Diluição	ISO	t_{exp}	$f/stops$	Distância focal
0%	800	1/1000	$f/4$	18 mm
10%	800	1/1000	$f/4$	18 mm
20%	800	1/1000	$f/4$	18 mm
30%	800	1/500	$f/4$	18 mm
40%	800	1/125	$f/4$	18 mm
50%	800	1/125	$f/4$	18 mm

Para evitar diferenças no arranjo de pixels no processamento dos dados, a câmera foi posicionada cuidadosamente no centro da bancada experimental, a uma altura de 110 cm do

chão e na mesma posição frontal estipulada de 85 cm para todas as vazões de gás natural e diluente. Os parâmetros da câmera foram definidos através de uma bateria de testes, onde os fatos observados foram:

- ✓ O ISO no valor de 800 garante um melhor processamento dos dados pelo Software, uma vez que se tem baixo *light scattering*; e
- ✓ O tempo de exposição de 1/1000 para 0, 10 e 20% permitem obter fotos instantâneas de alta qualidade e rapidamente. Para 30, 40 e 50% de diluição com CO₂, o tempo de exposição necessita ser aumentado para que a chama azulada possa ser capturada durante os experimentos.

A medição do comprimento visível de chama, L_f , foi realizada através da diferença entre o topo da chama e a saída do queimador. Para delimitar a saída do queimador, um laser com comprimento de onda entre 630 a 650 nm e potência 5 mW foi escolhido para marcar a posição inicial da chama (*attached flame height*). O laser foi mantido na mesma posição durante todo o experimento e livre de vibrações de manuseio. A utilização deste método torna-se útil em casos em que um baixo tempo de exposição torna difícil capturar a região de combustão estequiométrica (coloração azul emitida pelo início da chama).

3.1.3.1 Photoshop®

Para processar a medição do comprimento visível de chama pelo software Photoshop®, é necessário criar um comando de ação através do programa. A ação desejada constitui em abrir uma imagem do experimento, Figura 3.3a, em seguida seleciona-se uma região de interesse e corta-se delimitando o início do queimador, marcado por laser, Figura 3.3b. Uma vez que o comprimento de chama é variável, o recorte final é manual e delimita-se o topo da chama, Figura 3.3c. Estando os limites da chama previamente delimitados, o software retorna o número de pixels presente entre o limite mínimo, bocal, e o máximo que corresponde ao topo da chama.

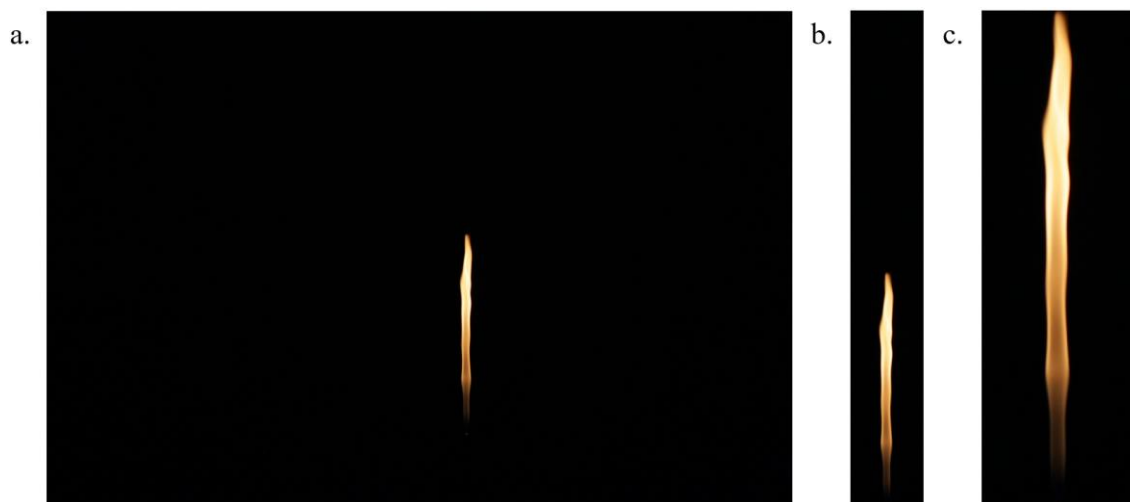


Figura 3.3 – Sequência para obtenção do comprimento visível de chama, caso com vazão de 1,5 L/min com 0% de CO₂. Parâmetros fotográficos: $t_{exp} = 1/1000$ s, f/4, ISO 800, resolução do sensor de 18 Megapixels.

A conversão do número de pixels presente ao longo do comprimento visível de chama para o sistema internacional de unidades foi um paquímetro na abertura de 100 mm. Este é fixado na saída do queimador ao término de cada bateria de testes e uma nova imagem é capturada. Através do número de pixels presente na região de interesse correspondente a 100 mm que é feita a conversão do comprimento visível de chama para milímetros.

Vantagens do software Photoshop®

- ✓ Garante precisão do limite inferior, saída do queimador, em todas as imagens;
- ✓ Garante que o limite superior, topo da chama, será delimitado corretamente; e
- ✓ Não requer conhecimento em linguagem de programação.

Desvantagens do software Photoshop®

- ✓ Recorte manual para delimitar o término da chama, assim torna-se um método lento devido ao alto número de dados experimentais;
- ✓ Não entrega os valores do número de pixel em uma matriz. Exige que o operador anote os resultados; e

- ✓ Pequenas oscilações na captura de imagens podem alterar o número de pixels presentes ao longo do comprimento da chama.

3.1.3.2 Matlab®

A ferramenta computacional utilizada para realizar o cálculo do comprimento médio visível de chama sem recorte manual é o software Matlab®. O método constitui em converter inicialmente uma imagem capturada pela câmera Canon T5i, Figura 3.4a, em escala de preto e branco, Figura 3.4b. Posteriormente, converte-se em sua forma binária, ou seja, atribuindo um valor de 0 para pontos pretos ou 1 para pontos brancos, Figura 3.4c. As imagens possuem 18 megapixels e, portanto, uma matriz com 18 milhões de pontos entre 0 e 1 são formados. Atribuído um sistema cartesiano de referência, com início no canto superior esquerdo, o software então delimita através de um retângulo o ponto máximo e mínimo do contorno da chama. O centro deste retângulo, ou região de interesse é marcado por um asterisco. Assim, ao rastrear esta região de interesse que se torna possível obter o comprimento visível de chama pela contagem do número de pixels presente nesta região, Figura 3.4d. A região de interesse corresponde ao ponto máximo (saída do queimador), $P_{máx}$, subtraído do ponto mínimo (topo da chama), $P_{mín}$, Figura, 3.4e. Esta expressão matemática, Equação 3.1, é utilizada para cada uma das imagens do experimento.

$$L_f = P_{máx} - P_{mín} \quad (3.1)$$

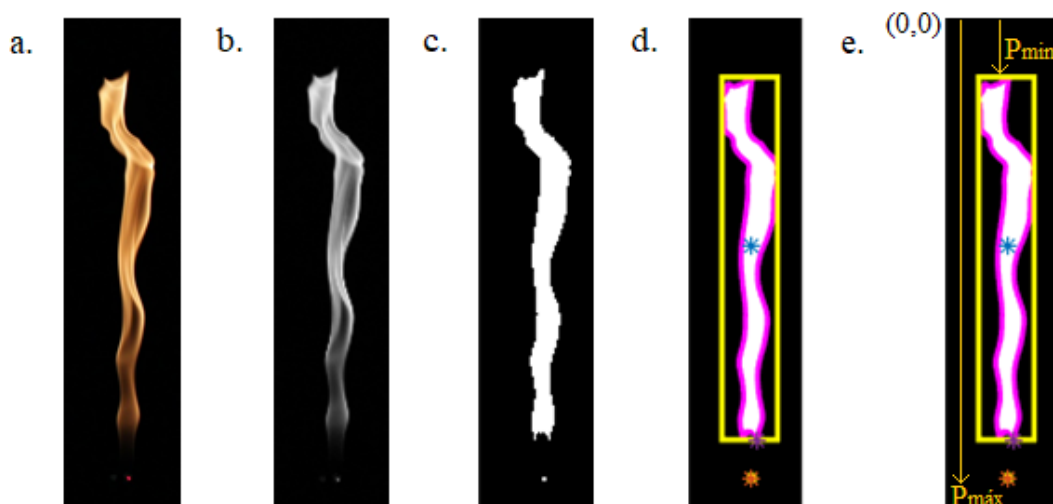


Figura 3.4 – Sequência de conversão da imagem para obtenção do comprimento visível de chama ancorada, caso com vazão de 2,5 L/min com 0% de CO₂. Parâmetros fotográficos:

$$t_{exp} = 1/1000 \text{ s, } f/4, \text{ ISO } 800, \text{ resolução do sensor de } 18 \text{ Megapixels.}$$

A conversão do número de pixels presente ao longo do comprimento visível de chama para o sistema internacional de unidades segue o mesmo método utilizado no software Photoshop®.

Vantagem software Matlab®

- ✓ Agilidade em processar um alto número de dados devido a não necessitar uma seleção manual de regiões de interesse;
- ✓ Entrega os resultados do número de pixels presentes nas ‘n’ imagens de chamas em uma matriz linha por coluna; e
- ✓ Livre de oscilações de manuseio devido ao software criar uma região de interesse na imagem.

Desvantagens software Matlab®

- ✓ Requer conhecimento avançado em linguagem de programação; e
- ✓ Pequenas quantidades de pontos da imagem binária podem ser suprimidas.

3.1.3.3 Validação e seleção da ferramenta computacional de processamento de imagens

O comprimento visível de chama não apresenta um valor constante ao longo do tempo e por este motivo deve ser feita uma análise do número de imagens necessárias para se garantir um valor aproximadamente constante da média do campo de amostragem. Testes iniciais mostraram que este valor corresponde a 150 imagens, nas quais mais dados coletados apenas aumentam o tempo de experimentação (Figura 3.5). O desvio padrão da média (*Standard deviation of the mean*), representado nesta figura, corresponde ao método utilizado para estimar o desvio referente à amostra de dados coletados neste trabalho. Este é mensurado através da razão entre o desvio padrão e a raiz quadrada do tamanho de amostra. Assim, o desvio entre o número de pixels do início da amostragem e os valores que são medidos subsequentes diminui ao decorrer que mais amostras são coletadas. A partir de 150 imagens analisadas, o desvio padrão da média do comprimento visível de chama corresponde a 1,5% e incrementos da amostra até 300 imagens reduzem este valor para 1,43%.

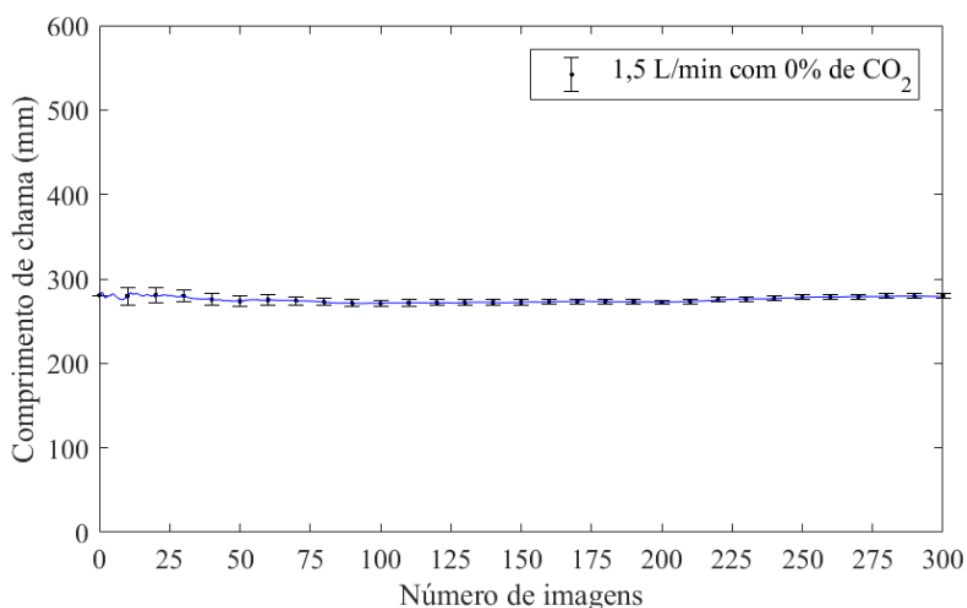


Figura 3.5 – Variação do comprimento visível de chama de jato simples em função do número de imagens.

O estudo experimental de medição do comprimento visível de chama, portanto, consta de 150 imagens para cada uma das 20 posições no trilho da bancada. Comparando-se ambos os softwares, Photoshop® e Matlab®, com estas condições, o comprimento médio visível de

chama apresenta resultados semelhantes com diferenças de 0,14% para este campo de amostragem, Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados de validação para cálculo do comprimento de chama.

Software	Número de amostras	Comprimento de chama (Pixels)	Diferença
Photoshop®	150	1613.187	0,14%
Matlab®	150	1633.433	

A diferença do resultado entre os métodos utilizados é baixa e, portanto, outro parâmetro é analisado para selecionar a ferramenta computacional de medição, este é o tempo de processamento de dados. Uma bateria de testes com 20 posições no trilho, resulta em 3000 imagens capturadas. Os estudos de comprimento visível de chama compreendem 4 baterias de testes com as vazões 1, 1,5, 2 e 2,5 L/min de mistura, bem como, 6 concentrações de CO₂ variando entre 0, 10, 20, 30, 40 e 50% na mistura. Desta forma, 20 baterias com 3000 imagens finalizam o estudo experimental. Como resultado, o número total de imagens deste estudo experimental está na ordem de 60000 e, conseqüentemente, a escolha do software mais rápido torna-se vantajoso. A Tabela 3.4, ilustra o tempo total de processamento das imagens por ambas as ferramentas computacionais.

Tabela 3.4 – Tempo de processamento de dados do experimento.

Software	Tempo por posição	Duração por bateria	Tempo de processamento	Equivalente
Photoshop®	3 horas	60 horas	1200 horas	50 dias
Matlab®	1/6 horas	≈ 3,5 horas	≈ 70 horas	≈ 3 dias

O software Photoshop® requer 50 dias ininterruptos de processamento de dados, enquanto o software Matlab® requer apenas 3 dias para processar 60000 imagens. A diferença entre os métodos corresponde então a 0,14% no comprimento médio visível de chama e o software Matlab® é 17 vezes mais rápido que o software Photoshop®. A ferramenta computacional selecionada para realizar o processamento do comprimento médio visível de chama neste trabalho é o software Matlab®.

3.2 Medição da radiação térmica em múltiplas chamas

A radiação térmica em chamas constitui um fenômeno de transporte de energia que está relacionado a presença de determinadas espécies químicas (como CO₂, H₂O e fuligem) e a temperatura dos produtos da combustão. Visando atender normas de segurança em plataformas de petróleo, inúmeros estudos foram conduzidos na literatura para avaliar os possíveis contribuintes para redução da radiação térmica emitida por chamas. Os estudos consistem, em grande maioria, da captação da energia térmica por radiômetros de amplo campo de visão que são posicionados frontalmente as chamas. A posição vertical e horizontal dos sensores estão relacionados à geometria de chama apresentada na seção anterior. O procedimento experimental utilizado para medir a radiação térmica será tratado nesta seção da presente dissertação.

3.2.1 Bancada experimental

O fluxo de radiação térmica é coletado por três radiômetros posicionados frontalmente e verticalmente as chamas, Figura 3.6. A realização da estimativa do fluxo de calor radiante consta de três radiômetros MEDTHERM no modelo 64-0.2-20/ZnSeW-1C que apresentam sinais específicos de saída proporcionais ao fluxo de calor radiante absorvido (Apêndice C). Possuindo janelas de seleneto de zinco e campo de visão de 150 graus, estes são resfriados a água, através de um banho d'água, e mantidos a uma temperatura constante de 30°C durante todo o experimento. Além disso, os sensores apresentam transmitância constante até um ângulo de incidência de 50 graus no espectro de 0,7 a 17 micrometros e espectro útil de 0,5 a 22 micrometros. O sinal captado pelos radiômetros foi coletado por um data logger Agilent que possui uma incerteza de medição inferior a 1%. A distância de separação entre os queimadores se mantem a mesma utilizada para estimar o comprimento visível de chama. Ainda, a vazão volumétrica também segue os mesmos princípios utilizados nos procedimentos experimentais adotados na seção anterior. Todos os testes são realizados em ar parado e de forma em que as chamas sejam sobreventiladas.

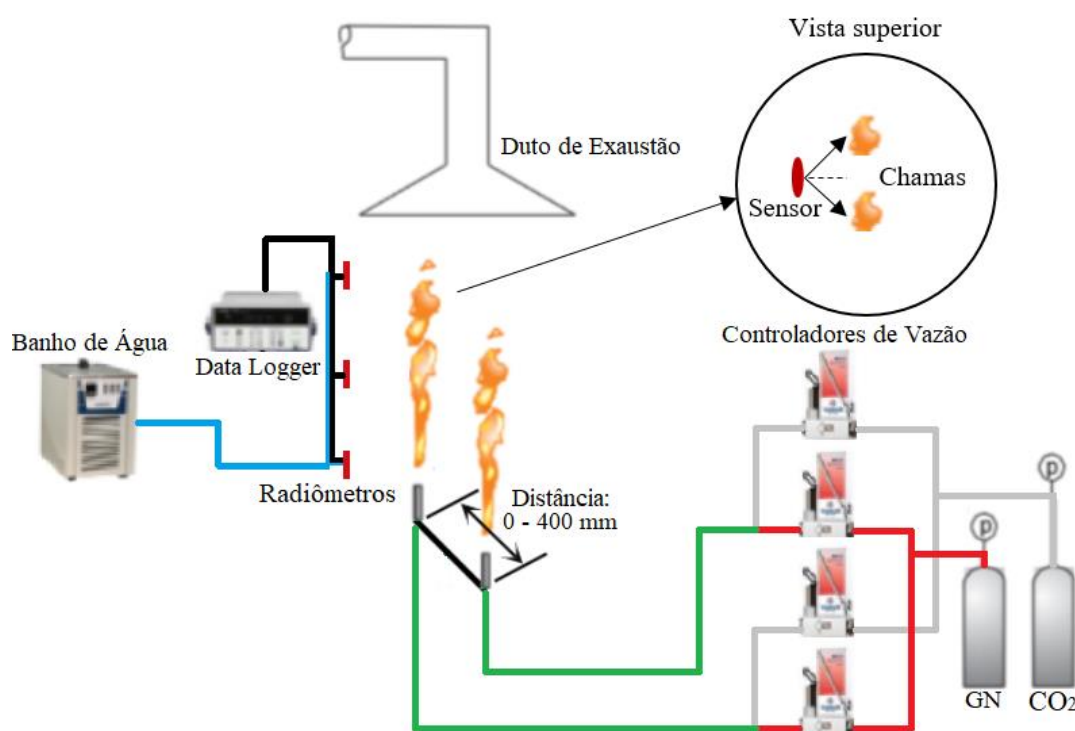


Figura 3.6 – Esquema para medição da radiação térmica durante a combustão de gás natural.

3.2.2 Procedimentos de medição

Para determinar o fluxo de calor radiante, duas medições sequenciais foram efetuadas, uma medição durante o processo de combustão e a outra efetuada sem a combustão com o intuito de descontar a radiação térmica de fundo (radiação que os sensores recebem do ambiente de trabalho). Este procedimento é realizado para todas as 20 posições do trilho da bancada experimental. Os radiômetros posicionados a uma distância equivalente a $2 L_f$ na direção frontal em relação aos queimadores fazem a leitura dos sinais emitidos pelas chamas. Os três sensores fixados na torre são separados verticalmente através da relação apresentado pela Equação 3.2. O primeiro sensor encontra-se sempre posicionado frontalmente a saída do queimador.

$$D_{vertical} = (L_{f,máx} - L_{f,mín})/4 \quad (3.2)$$

Este procedimento visa obter a média entre o comprimento mínimo de chama, jato simples, e o comprimento máximo de chama que compreende a distância mínima de separação entre os queimadores. O número de medições de radiação térmica emitida pela chama corresponde a 70 medidas a uma taxa de 1 medição a cada 0,45 segundos. A Figura 3.7

apresenta a escolha deste valor devido a corresponder ao ponto na qual a média do sinal se mantém constante e com desvio padrão da média inferior a 0,25%.

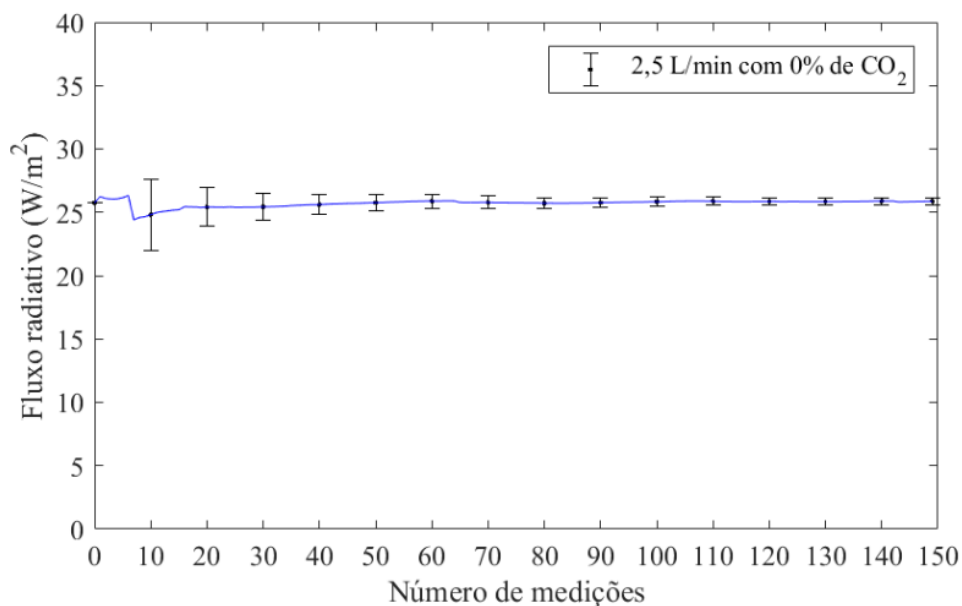


Figura 3.7 – Variação da radiação térmica emitida pela chama em função do número de medições.

Os resultados experimentais coletados no presente trabalho são comparados com o modelo WMPS (*Weighted Multi Point Source*), como mostrados nos estudos de Llanos, 2017, para chamas únicas, porém com o objetivo de descrever o fluxo de calor radiante proveniente de múltiplas chamas de gás natural diluído com CO₂.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos serão apresentados em duas seções. Na primeira seção serão discutidos os efeitos da distância de separação entre os queimadores, da vazão de combustível e do grau de diluição de CO₂ na mistura sobre a geometria de chama. Ainda, uma comparação dos dados experimentais com os modelos algébricos serão apresentados. Na segunda parte, serão discutidos os efeitos da distância de separação, da vazão de combustível e do grau de diluição de CO₂ na mistura sobre a radiação térmica de múltiplas chamas de gás natural. A fração radiativa da chama e o modelo WMPS finalizam o estudo deste trabalho através da previsão do fluxo de calor radiante em múltiplas chamas.

4.1 Geometria de chama

Os resultados experimentais de geometria são analisados quanto aos efeitos da distância de separação entre os queimadores, da vazão de combustível e da diluição de CO₂ na mistura. As chamas não pré-misturadas de jatos únicos são comparados com os resultados de chamas não pré-misturadas de múltiplos jatos através de uma análise estatística. As linhas horizontais apresentadas nos gráficos correspondem a condição de jato único, já os pontos com a mesma cor representam os dados obtidos para diferentes distâncias entre os queimadores em condição de múltiplos jatos. O comprimento visível de chama de jato único é mantido constante uma vez que seu valor é independente da posição em que a chama se encontra no trilho da bancada experimental. Em todos os cenários analisados as chamas se mantiveram na condição ancorada ao queimador.

Efeitos da distância de separação entre os queimadores

O comprimento visível de múltiplas chamas e a morfologia da chama são funções da distância de separação entre as linhas de centro dos jatos. Menon e Gollahalli, 1988, Leite et al., 1996 e Caldeira-Pires e Heitor, 1999, observaram que a distância de separação afeta a quantidade de ar disponível para cada uma das chamas completar a reação de combustão, o que exerce influência no comprimento visível de chama. Wan et al., 2016, Hu et al., 2017 e Changchun et al., 2019, observaram que a distância de separação altera o comprimento de chama, e também são alteradas as linhas de corrente do escoamento. Vórtices característicos

para cada distância de separação são criados e, quando aliados à frequência de oscilação das chamas, causam alteração na morfologia dessas chamas. Changchun et al., 2019, definiram, quatro regimes morfológicos de chama durante a combustão de hidrocarbonetos: regime imerso sinuoso e imerso varicoso, regime sinuoso simétrico, regime sinuoso alternado e regime independente.

O comprimento visível de múltiplas chamas em interação, ilustrado pela Figura 4.1, foi afetado pela competição pelo oxidante nas regiões de proximidades. Este comportamento se repete para todos os casos analisados neste trabalho. O comprimento visível de chama teve como máximo valor a região em que os queimadores encontraram-se na mínima distância de separação, ou seja, com dois diâmetros de separação entre as linhas de centro dos jatos. Lee et al., 2004, mostraram que na região de menor separação entre os jatos, a combustão ocorre através de chamas imersas uma na outra. Esta é a região na qual as chamas unem-se formando uma única chama na saída dos queimadores. Os incrementos impostos na distância de separação entre os jatos reduzem o comprimento visível de chama devido à maior área de exposição do combustível ao oxidante. A partir do ponto em que o comprimento visível de chama se torna constante, a interação de múltiplas chama cessa e, conseqüentemente ocorre a queima por jatos únicos ou independentes. Este comportamento foi observado pelo encontro dos pontos de mesma coloração com as linhas horizontais nas Figuras 4.8 a 4.13 que serão apresentadas na seção subsequente. A redução no comprimento visível de chama foi gradual até o seu mínimo valor na condição de jato único. A partir deste ponto nenhuma influência entre as chamas ocorreu e o comprimento visível de chama não sofreu influência devido a competição por oxidante ou devido a formação de vórtices.

O regime sinuoso é aquele que apresenta contrações estáveis perto da saída do queimador e as instabilidades do escoamento são desenvolvidas mais a jusante durante a reação de combustão. O regime varicoso é definido com sendo aquele na qual as oscilações são originadas perto da saída do queimador e a queima do combustível se dá em estrutura toroidal para formar as instabilidades das chamas.

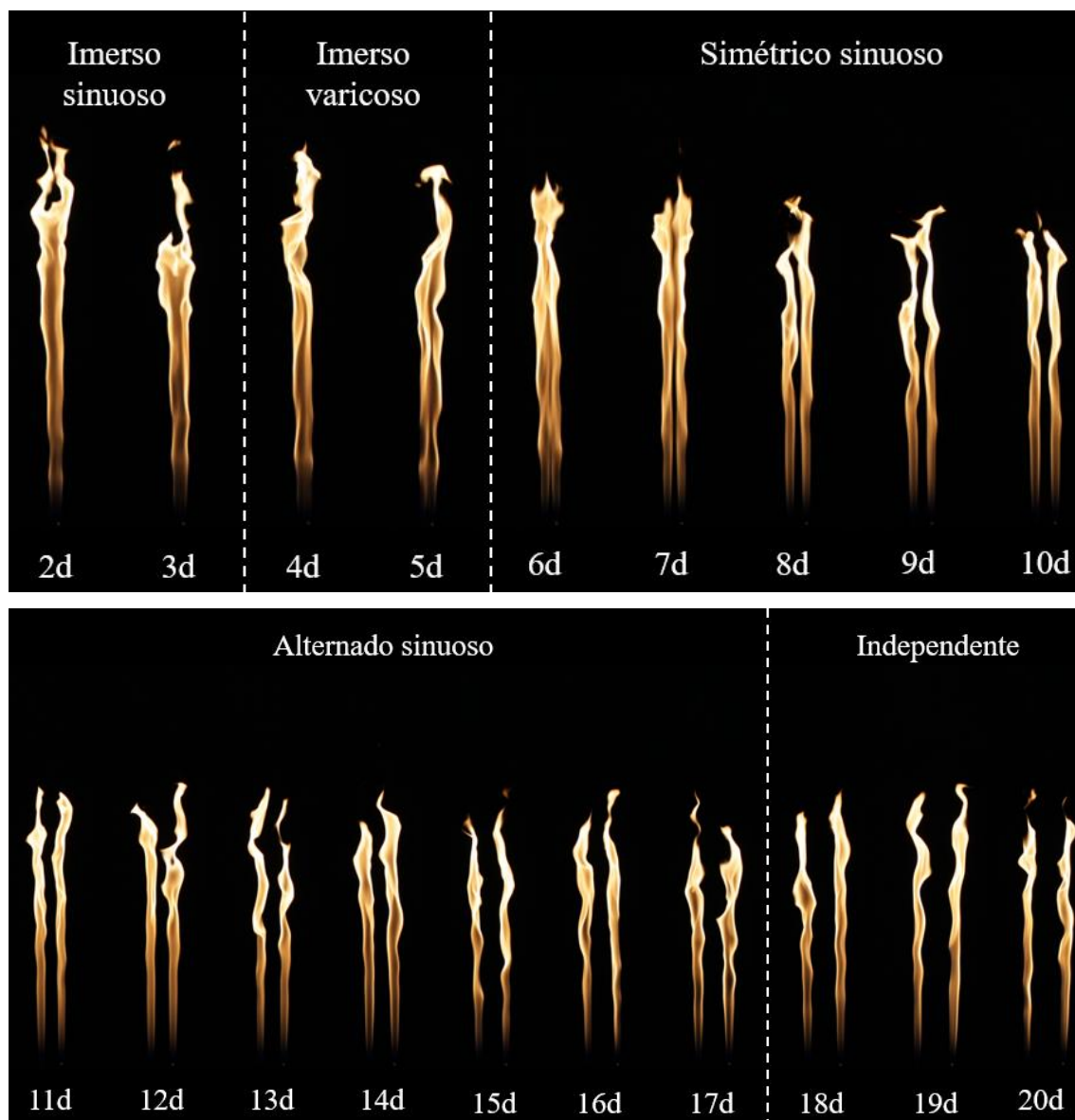


Figura 4.1 – Efeitos da distância de separação no comprimento de chama e regime morfológico. Dados para 2,5 L/min de gás natural e 0% de diluição com CO₂.

Os tipos de regimes morfológicos observados durante a reação de combustão de gás natural com o ar em repouso são ilustrados pelas Figuras 4.2 a 4.6, usando como exemplo imagens obtidas em experimentos com vazão de 1 L/min, 0% de CO₂ na mistura, e distâncias entre os queimadores variando entre 2d e 20d.

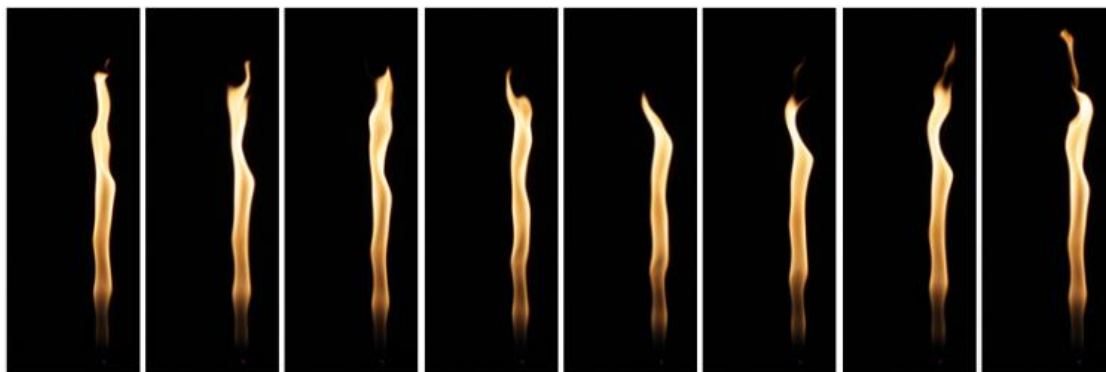


Figura 4.2 – Regime imerso sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO₂ na mistura em 2 diâmetros de separação.



Figura 4.3 – Regime imerso varicoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO₂ na mistura em 7 diâmetros de separação.



Figura 4.4 – Regime simétrico sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO₂ na mistura em 11 diâmetros de separação.

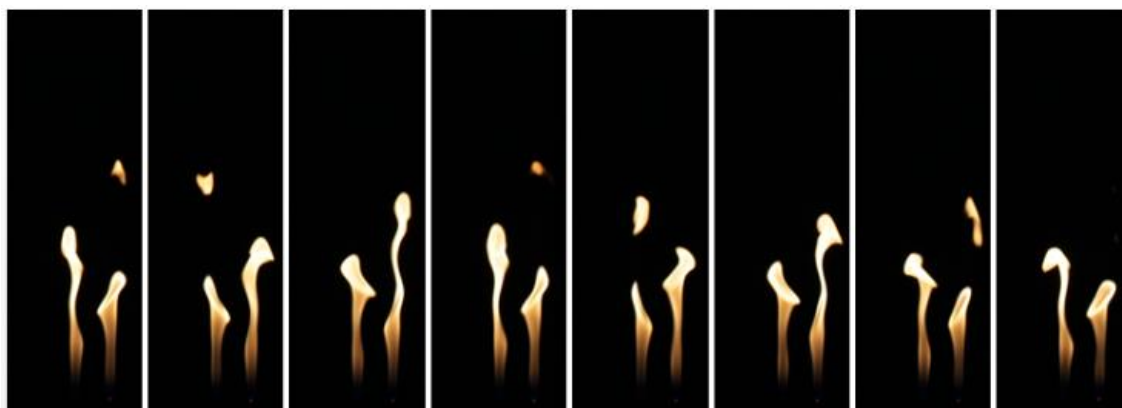


Figura 4.5 – Regime alternado sinuoso. Vazão de 1 L/min com 0% de CO₂ na mistura em 15 diâmetros de separação.

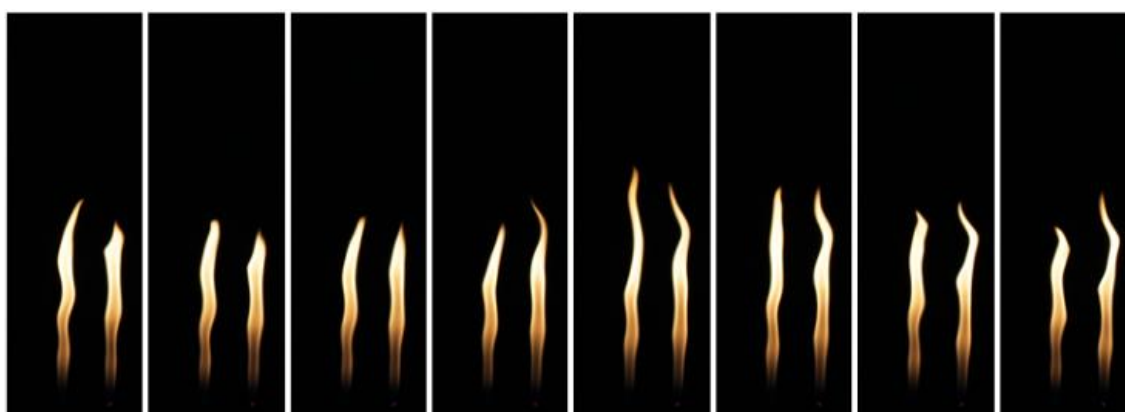


Figura 4.6 – Regime independente. Vazão de 1 L/min com 0% de CO₂ na mistura em 20 diâmetros de separação.

A distância de separação entre os queimadores causa uma oscilação nas chamas, provocando alterações na morfologia das chamas. Os quatro regimes morfológicos descritos por Changchun et al., 2019 também foram observados neste estudo, e uma possível explicação para a alteração na morfologia se dá pela formação de vórtices na base das chamas. Os autores sugerem que os vórtices são função da distância de separação entre os queimadores, o que explica a mudança na geometria das chamas.

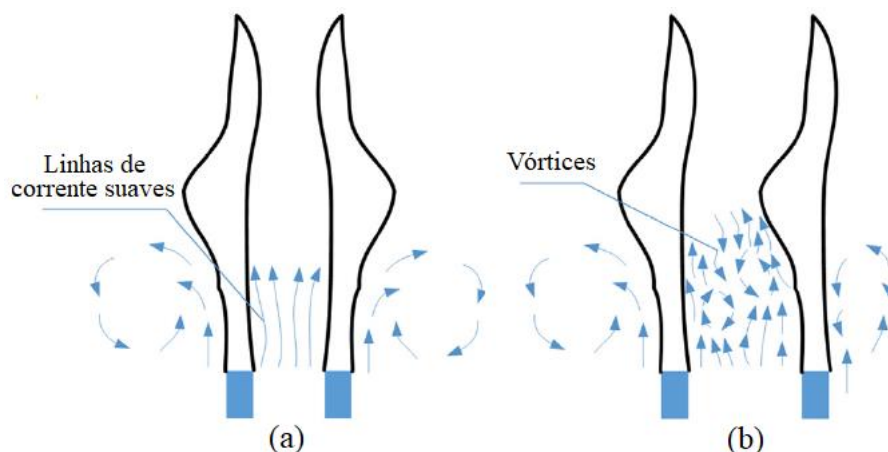


Figura 4.7 – Possíveis justificativas dos regimes morfológicos existentes durante a interação de duas chamas. (a) regime simétrico sinuoso e (b) alternado sinuoso [Adaptação de Changchun et al., 2019].

Na literatura, a região de término da interação de múltiplos jatos foi expressa através da razão S/d . Este valor depende do número de queimadores na região de interação. Lenze et al., 1975, Menon e Gollahalli, 1988, Leite et al., 1996 e Caldeira-Pires e Heitor, 1999, observaram que quanto maior o número de queimadores na região de interação de múltiplos jatos, maior será o valor da razão S/d para que ocorra a combustão por jatos únicos no regime independente. Neste trabalho, o estudo com duas chamas em interação demonstrou que o comprimento visível de chama atinge o valor de jato único no regime simétrico sinuoso, apresentando S/d de aproximadamente 10. O mínimo valor do comprimento de chama encontra-se no regime alternado sinuoso, S/d aproximadamente 15 onde as chamas ainda interagem uma com a outra. A interação persiste até que a combustão por jato único ocorra no regime independente, este fenômeno se dá na razão S/d aproximadamente 20. Entretanto, este valor é dependente da concentração de CO_2 na mistura. Os autores acima listados obtiveram como resultado para três chamas em interação sem diluente, a razão S/d equivalente a 20 e, para cinco chamas em interação e sem efeitos de diluente a razão S/d foi superior a 20. Através dos resultados obtidos por Leite et al., 1996, o diâmetro dos queimadores têm influência no tipo de decaimento até a região de jatos únicos, porém a razão S/d independe do diâmetro do queimador. O decaimento até a combustão por jato único pode assumir uma curva acentuada para oxidação de combustível com queimadores de maiores diâmetros internos. No entanto, os queimadores com menores diâmetros internos apresentam decaimento suave até a condição de jato único.

Efeitos da vazão de combustível

O comprimento visível de chama é uma função da vazão de combustível na saída do bocal do queimador, Figura 4.8, tal qual apresentado nos estudos de Burke e Schumann, 1928. No regime laminar, o comprimento de chama é proporcional à velocidade do jato de gás natural e inversamente proporcional à concentração de CO_2 . Assim, esta grandeza aumenta quanto maior for a velocidade dos gases na saída do queimador. A Figura 4.8 ilustra o comprimento visível de chama sobre influência única da vazão de gás natural. Esta proporcionalidade se mantém para a interação de múltiplos jatos, apresentado pelos pontos nos gráficos, como para jatos únicos, apresentados através de linhas horizontais. A velocidade do jato está atrelada a vazão volumétrica de combustível ou mistura, e é crescente com o incremento da vazão dos gases que deixam o bocal do queimador. A maior concentração de combustível sendo lançado no ar em repouso requer maiores quantidades de oxidante para completar a reação de combustão. Portanto, o comprimento visível de chama aumenta com o aumento da vazão de combustível, Figura 4.8 a Figura 4.12.

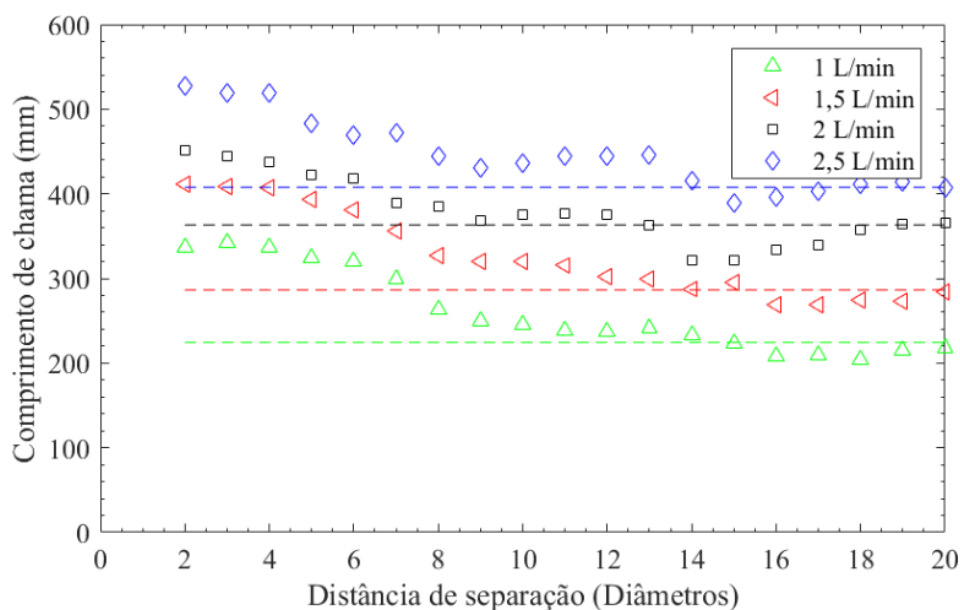


Figura 4.8 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 0% de CO_2 na mistura.

Estudos de Chigier e Apak, 1975, mostraram que múltiplas chamas são menos estáveis ao limite de extinção e podem descolar quando em presença de outras chamas. Além disso, Lee

et al., 1994, concluíram que o descolamento e extinção da chama podem ocorrer no regime laminar. Os autores mostraram que estes fenômenos ocorrem devido ao diâmetro do queimador e à diluição do combustível. Neste estudo experimental observou-se o limite de descolamento e extinção ocorrendo no regime laminar para as concentrações de 40% e 50% de CO_2 . Não foi possível a formação de chamas para diluição de 40% de CO_2 na mistura para a vazão de 2,5 L/min, Figura 4.12. Ainda, as chamas não se sustentaram sobre influência de 50% de CO_2 na mistura em todas as vazões, com exceção de 1 L/min, Figura 4.13. Com velocidades de jato elevadas e baixas concentrações de gás natural (devido à diluição com CO_2), chamas estáveis não foram formadas e, conseqüentemente, ocorrendo assim a extinção das mesmas. As oscilações do comprimento visível de chama, após as chamas já apresentarem o comprimento de jato único, ocorreram no regime alternado sinuoso, nas quais pequenas reduções além do limite mínimo do comprimento de jato único são observadas.

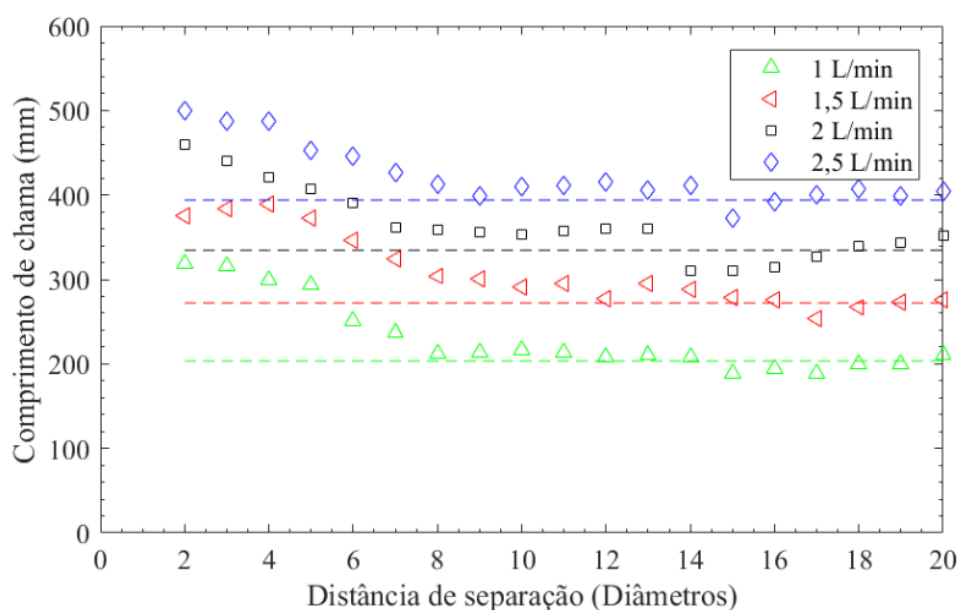


Figura 4.9 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 10% de CO_2 na mistura.

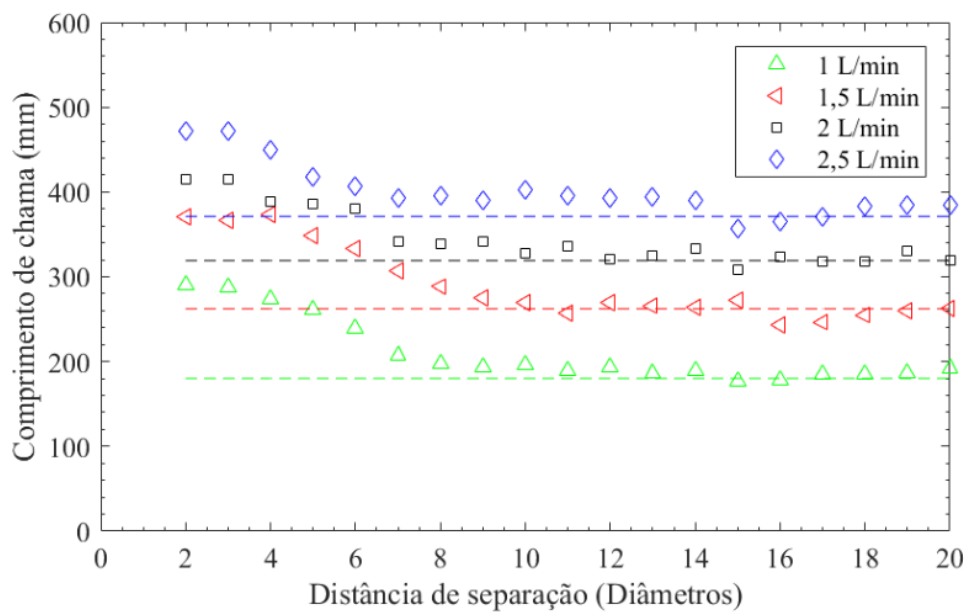


Figura 4.10 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 20% de CO_2 na mistura.

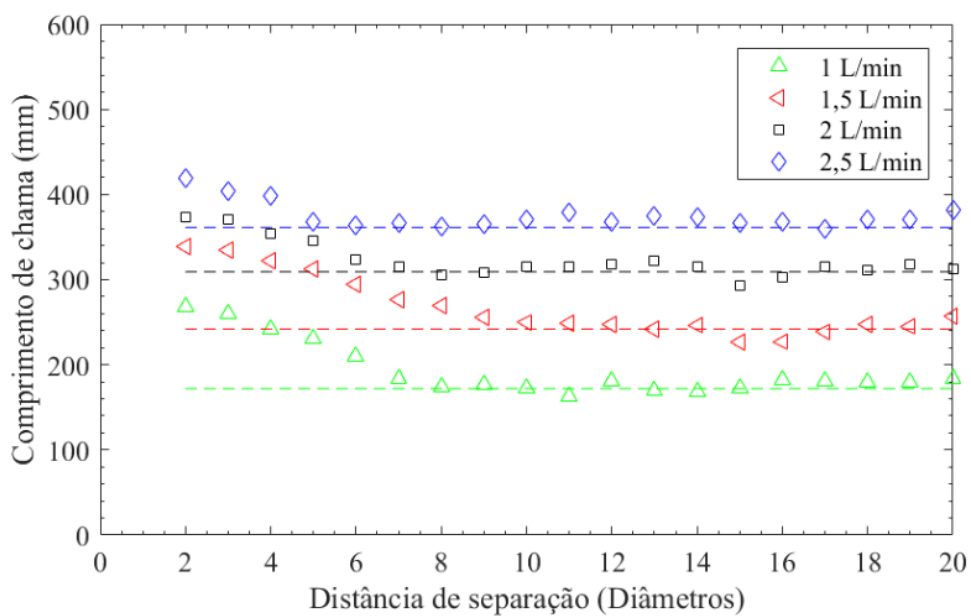


Figura 4.11 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 30% de CO_2 na mistura.

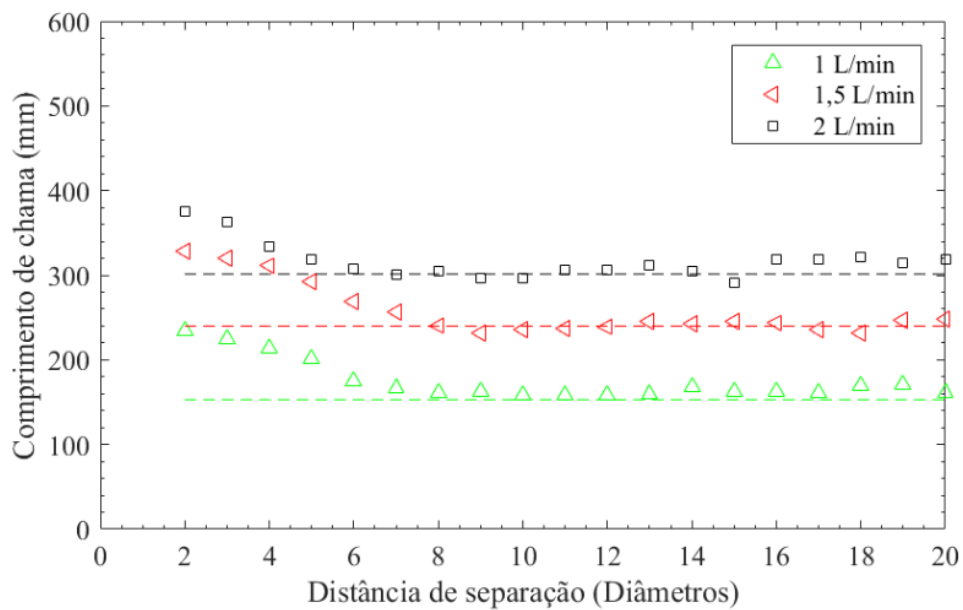


Figura 4.12 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 40% de CO_2 na mistura.

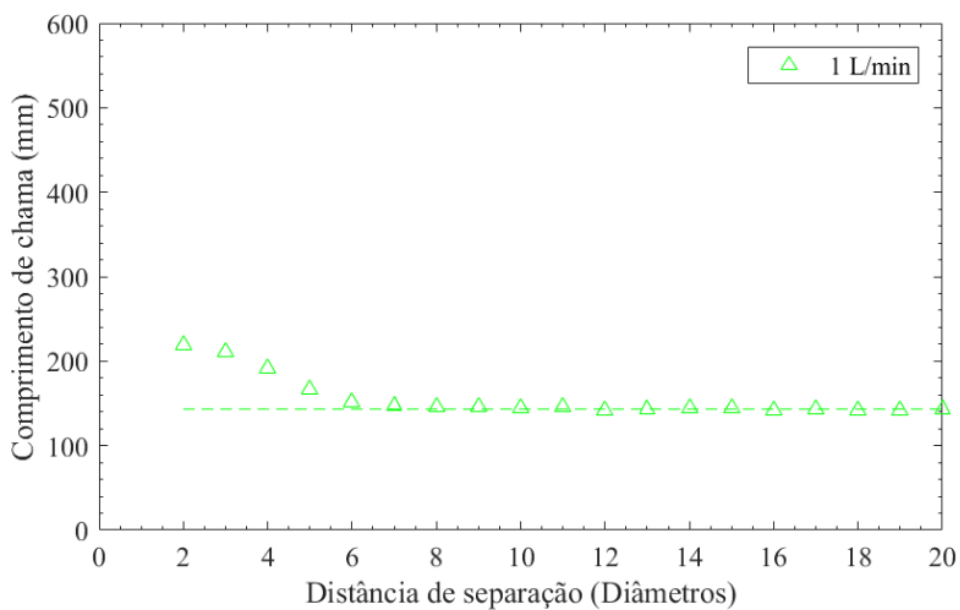


Figura 4.13 – Efeitos da vazão de combustível no comprimento visível de chama. Condição de 50% de CO_2 na mistura.

Efeitos da diluição com CO₂

O comprimento visível de múltiplas chamas também é função da concentração de CO₂ na mistura, sendo esta influência não estudada anteriormente na literatura. A diluição do gás natural com CO₂ acarreta em menores comprimentos visíveis de chama tanto em regiões de interação em múltiplas chamas como em combustão por jatos únicos, Figuras 4.14 a 4.17. A redução no comprimento visível de chama está ligada a menor concentração de gás natural durante a oxidação com o ar em repouso. Assim, os resultados experimentais indicam que maiores diluições de gás natural com CO₂ formam chamas com menores comprimentos visíveis. Além disso, independentemente da concentração de CO₂ na mistura, o comprimento de chama tende a ser máximo para a distância de separação mínima entre as linhas de centro entre os jatos.

Os resultados indicam que a concentração de diluente influencia a razão S/d na qual as chamas se comportam como jato único. A Figura 4.14 ilustra que a porcentagem de CO₂ faz com que as chamas sejam menores e a região de interação de múltiplas chamas seja mais curta. Após o término da região de interação de múltiplos jatos ser observada obtém-se os resultados de jatos únicos.

A frequência do *flickering* da chama foi mostrada na literatura como um fenômeno dependente da gravidade, da densidade do gás no ambiente e da velocidade do fluxo coaxial de ar, Changchun et al., 2019. Neste experimento, a diluição mostrou-se como um parâmetro forte na redução da oscilação do comprimento visível de chama em todos os regimes definidos na seção anterior. A adição de CO₂ em porcentagem de 40% proporcionou comprimento visível de chama com baixa oscilação quando comparado aos casos com diluição inferior a esta quantidade, Figura 4.12. Incrementos na concentração de CO₂ para 50% indicam que uma oscilação ainda menor no comprimento de chama é observada, Figura 4.13. Este fenômeno está ligado ao aumento da densidade da chama devido ao CO₂ e a menor temperatura dos gases que reduzem o empuxo. Nos casos de combustão com altas taxas de diluição, as chamas oscilam a baixos níveis e tendem a ter um formato mais definido durante a combustão, como apresentado pela Figura 4.18.

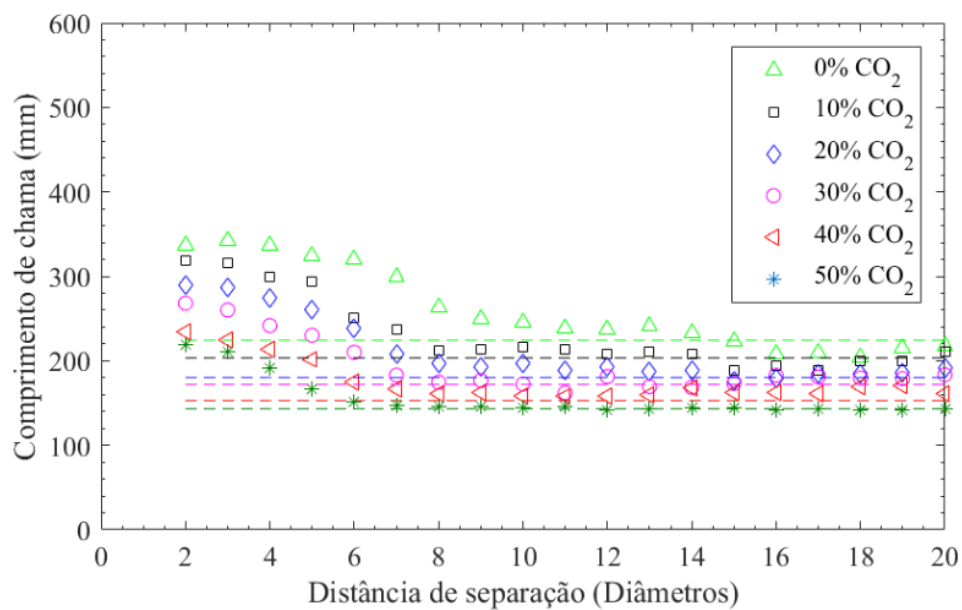


Figura 4.14 – Influência da concentração de CO₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 1 L/min na saída do queimador.

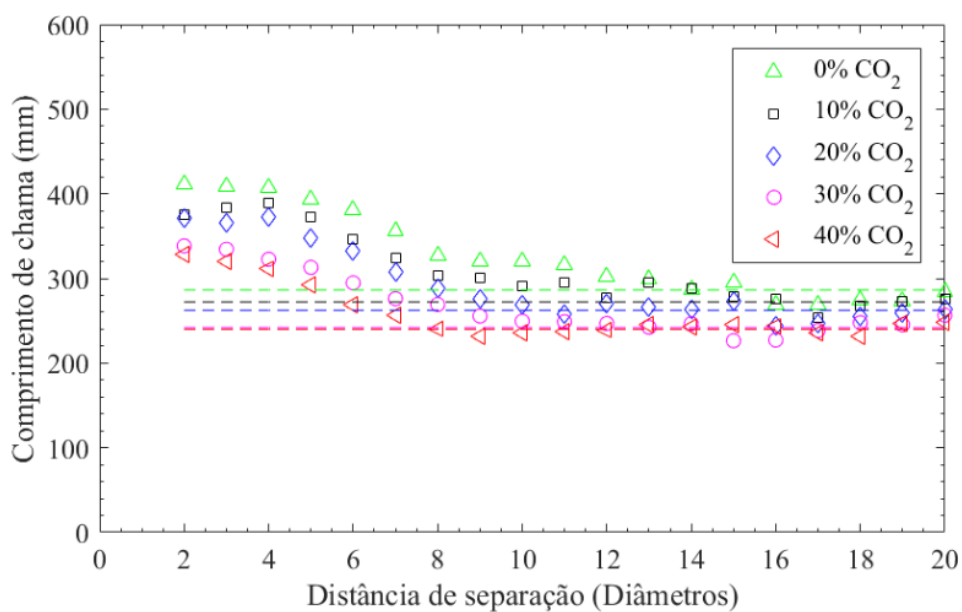


Figura 4.15 – Influência da concentração de CO₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 1,5 L/min na saída do queimador.

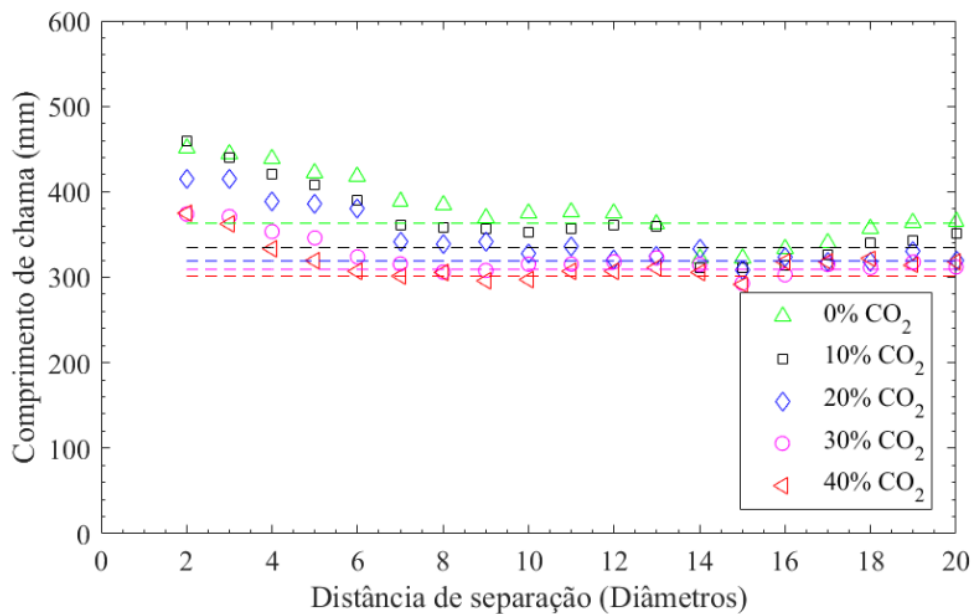


Figura 4.16 – Influência da concentração de CO₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 2 L/min na saída do queimador.

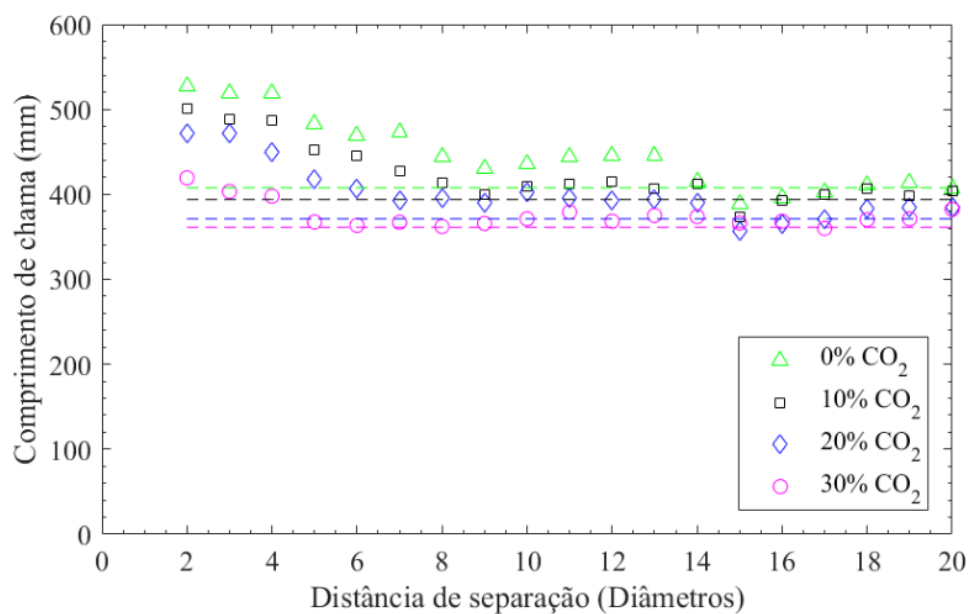


Figura 4.17 – Influência da concentração de CO₂ no comprimento visível de chama para a vazão de 2,5 L/min na saída do queimador.



Figura 4.18 – Efeito da diluição de CO_2 na geometria de chama com o aumento da distância de separação da esquerda para a direita. Vazão de 1 L/min com 50% de CO_2 .

Estabilidade de chama

A literatura relata que a estabilidade de chama é função do grau de diluição do combustível e do diâmetro do queimador. Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1966, mostraram que uma chama sem diluição somente descola do bico do queimador no regime turbulento. Porém, estudos de Lee et al., 1994, enfatizaram que no regime laminar pode existir descolamento e extinção devido à diluição do combustível e do diâmetro do queimador. Em um estudo com jatos únicos, Llanos, 2017, conduziu um estudo experimental que salienta a dependência do diâmetro do queimador e da diluição do combustível com CO_2 na estabilidade da chama. O incremento do diâmetro do queimador resulta em uma região de ancoramento e levantamento maiores, bem como acarreta na redução da região de extinção por escoamento. Llanos, 2017, também mostrou que para um determinado diâmetro de queimador, a diluição do combustível pode causar extinção antes que uma chama com levantamento possa ocorrer. A Figura 4.19 ilustra a dependência desses fatores nas chamas laminares deste estudo experimental. Para o diâmetro analisado, após 40% e 50% de diluição, a área de exposição do combustível reduz a um ponto em que uma chama estável não é formada. Ainda, a extinção ocorre sem a formação de uma chama descolada do bico do queimador.

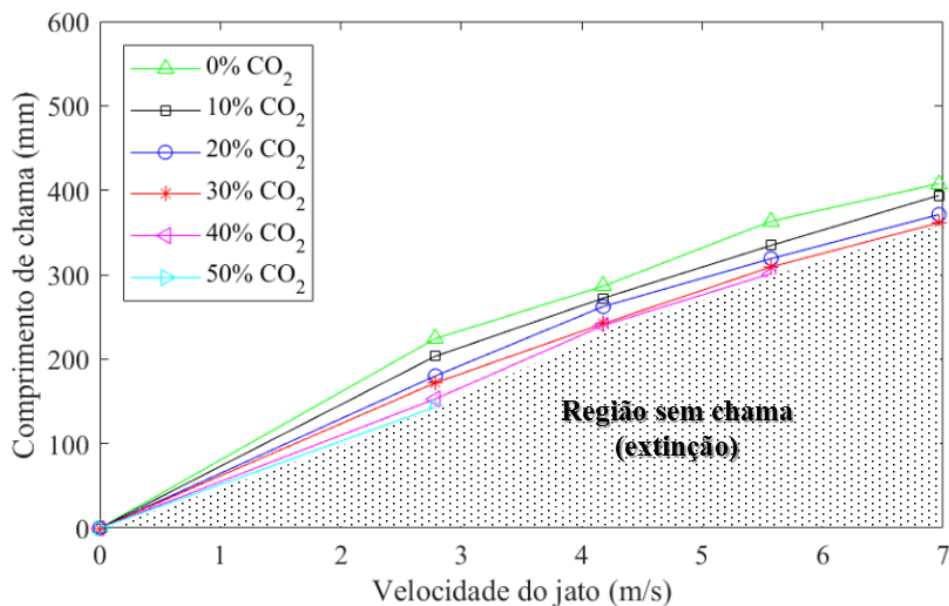


Figura 4.19 – Dependência do comprimento de chama em função da velocidade do jato e do grau de diluição com CO₂.

Comprimento de múltiplas chamas descritos por equações algébricas

A seção 2.2 deste trabalho enfatizou as principais equações algébricas que descrevem o comportamento de múltiplas chamas em interação. Embora a equação 2.6 proposta por Lenze et al., 1975, ter como objetivo prever o decaimento do jato central de múltiplas chamas, esta foi testada para prever o decaimento de duas chamas em interação. Após a adaptação para o combustível gás natural, esta apresentou discrepância com os dados experimentais de 10% a 30% nas regiões de interação entre as duas chamas. O decaimento do comprimento de chama proposta pela equação 2.6 é constante e não estabiliza para a região sem interação e, portanto, não descreve a interação de duas chamas com precisão, Figura 4.20 a 4.23.

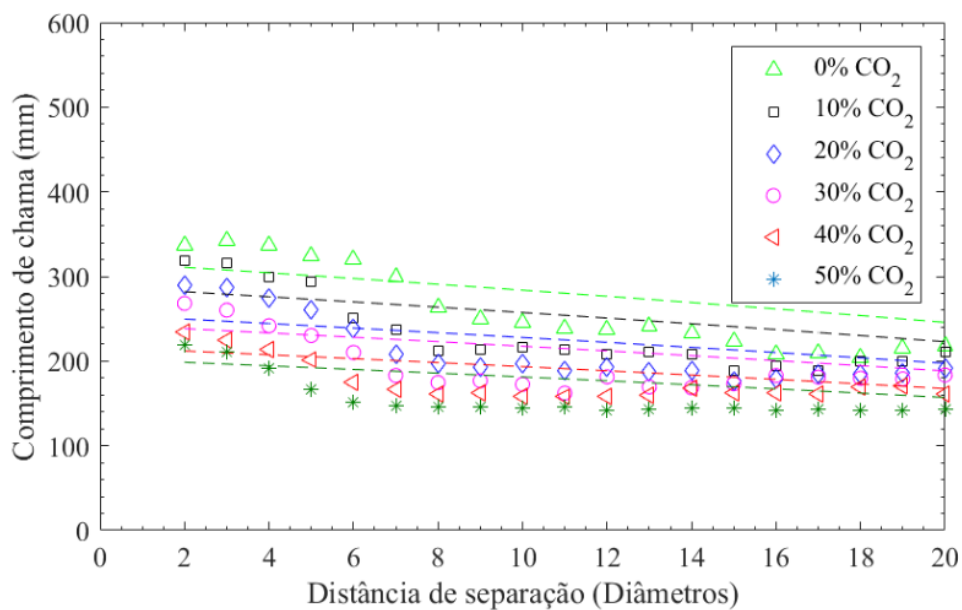


Figura 4.20 – Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 1 L/min.

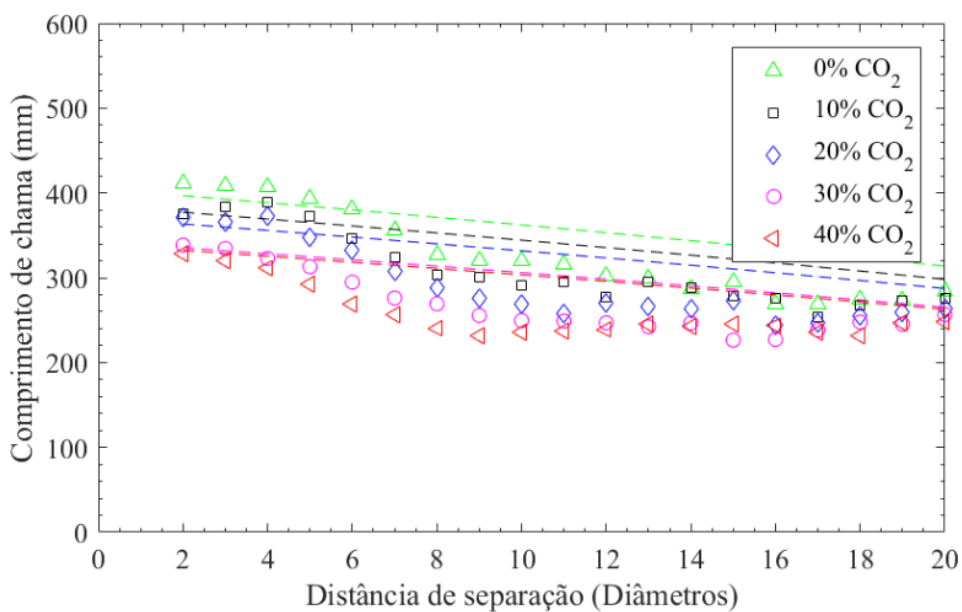


Figura 4.21 – Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 1,5 L/min.

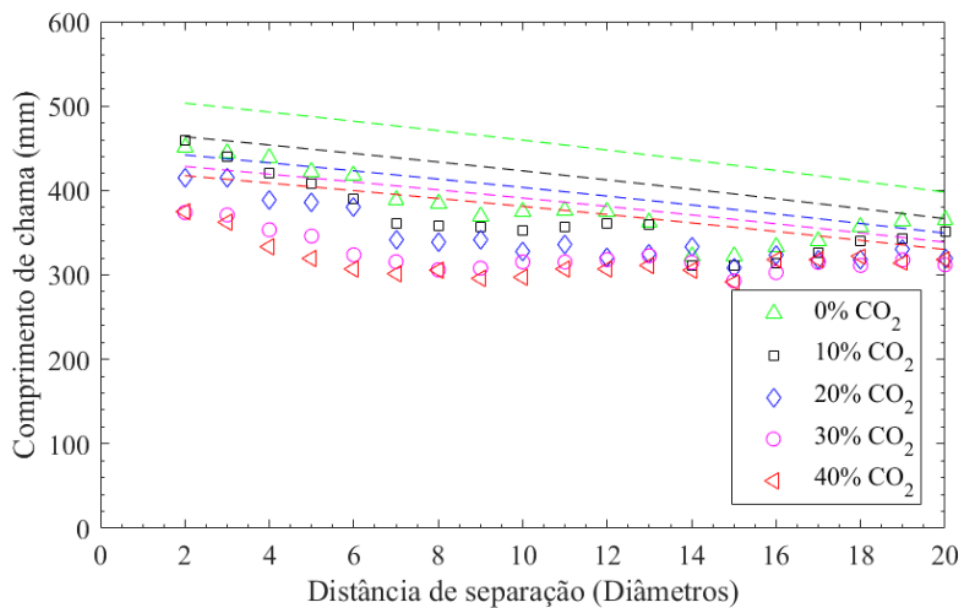


Figura 4.22 – Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 2 L/min.

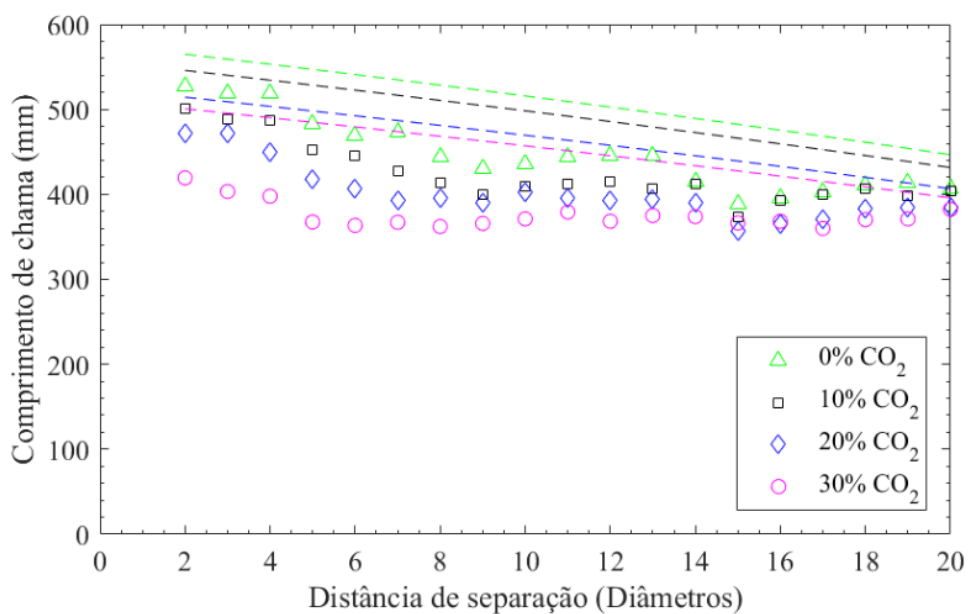


Figura 4.23 – Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Lenze et al., 1975, para 2,5 L/min.

A Equação 2.7 proposta por Menon e Gollahalli, 1985, descreve o comprimento de chama através de uma curva, a qual estabiliza a partir da região de combustão por jatos únicos. Duas constantes foram introduzidas, c_1 e c_2 com o objetivo de aproximar os dados teóricos

com os dados experimentais. As constantes dessa equação foram adaptadas para prever a interação de dois jatos de gás natural com e sem diluição de CO₂. Utilizando-se a equação para prever o decaimento de dois jatos laminares de gás natural diluído com CO₂ com c_1 e c_2 fixos em 0,015 e 1,1 respectivamente, obtem-se discrepância inferior a 30% com os dados experimentais de 1 L/min. No entanto, se c_1 manter-se fixo em 0,015 e c_2 for ajustado em função da vazão de combustível através da Equação 4.1 (desenvolvida neste trabalho), a discrepância passa a ser inferior a 15%, Figuras 4.24 a 4.27. A expressão empírica apresentou boa concordância e discrepâncias inferiores a 10% nas regiões de queima por jatos únicos.

$$c_2 = 0,2Q_f + 0,6 \quad (4.1)$$

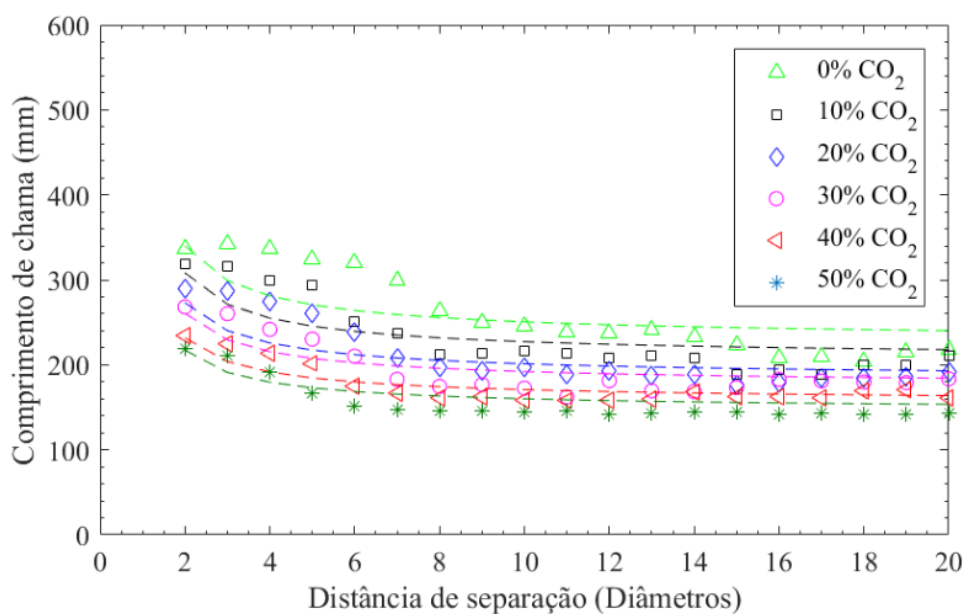


Figura 4.24 – Equação empírica de múltiplas chamas proposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 1 L/min.

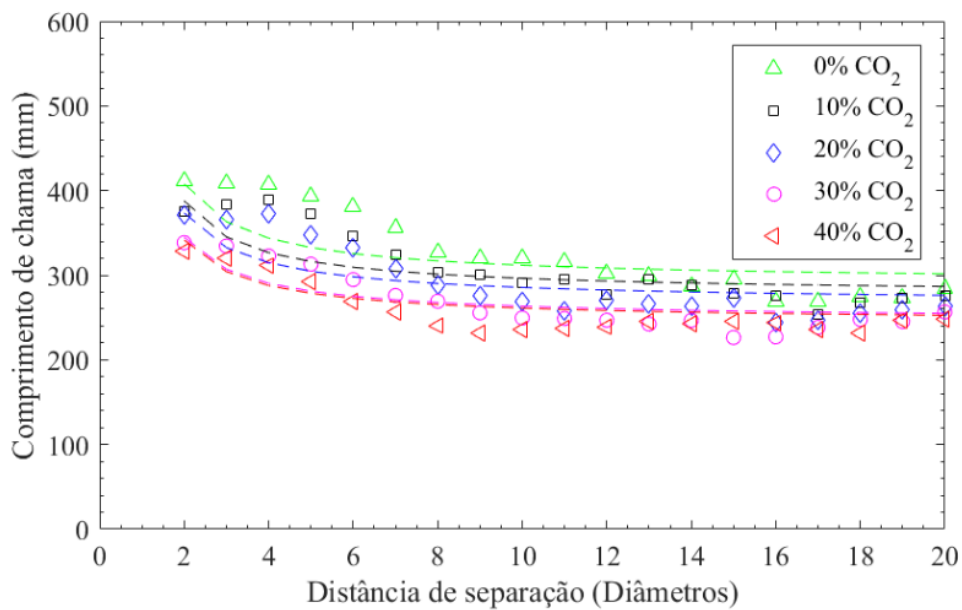


Figura 4.25 – Equação empírica de múltiplas chamas proposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 1,5 L/min.

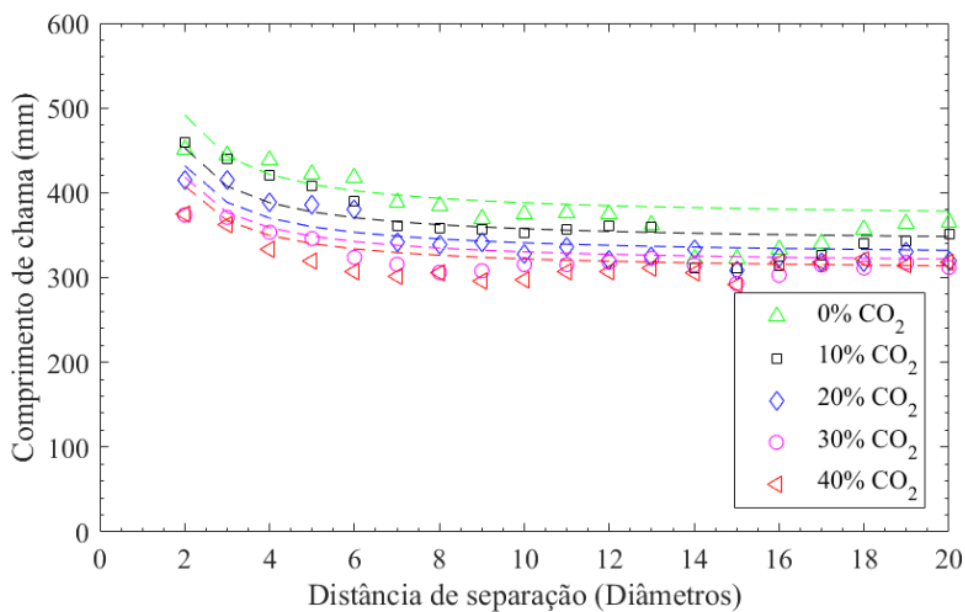


Figura 4.26 – Equação empírica de múltiplas chamas proposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 2 L/min.

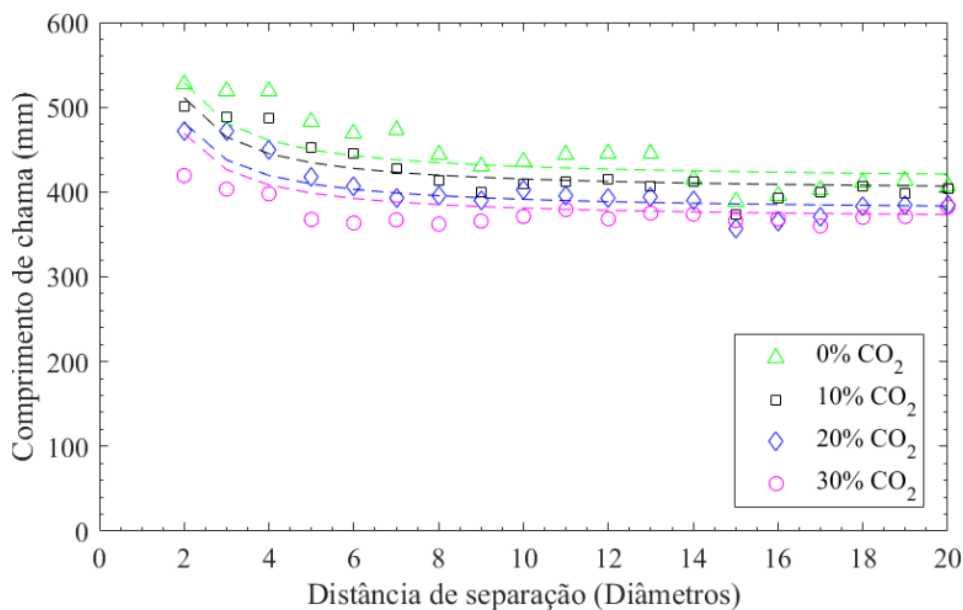


Figura 4.27 – Equação empírica de múltiplas chamas porposta por Menon e Gollahalli, 1985, com constantes variáveis para 2,5 L/min.

A Equação 2.8, com L_f experimental, proposta por Leite et al., 1996, é semelhante à equação proposta por Menon e Gollahalli, 1985, porém outras duas constantes foram introduzidas na expressão, nas quais são f e c_3 . A constante c_3 não apresenta mudança para prever o comprimento de chama com dois queimadores em interação uma vez que o expoente não altera o resultado (pois esta constante é usada como expoente da quantidade de queimadores, a qual é fixa no presente trabalho). A constante f está atrelada ao diâmetro interno do queimador. Sendo o decaimento do comprimento de chama função do diâmetro interno do queimador, esta constante foi introduzida para corrigir a mudança provocada pelo efeito da área do queimador. Assim, como estudaram-se apenas casos com mesmo diâmetro interno de queimador, os resultados apresentam os mesmos valores que a Equação 2.7. A Figura 4.28 ilustra os resultados obtidos pelas três equações empíricas avaliadas, para a condição de 2,5 L/min com 10% de CO₂ na mistura. A equação proposta por Roper, 1977 apresentou discrepância de 50% do valor experimental de jato único ao utilizar uma temperatura adiabática de chama (esta não foi medida experimentalmente neste trabalho).

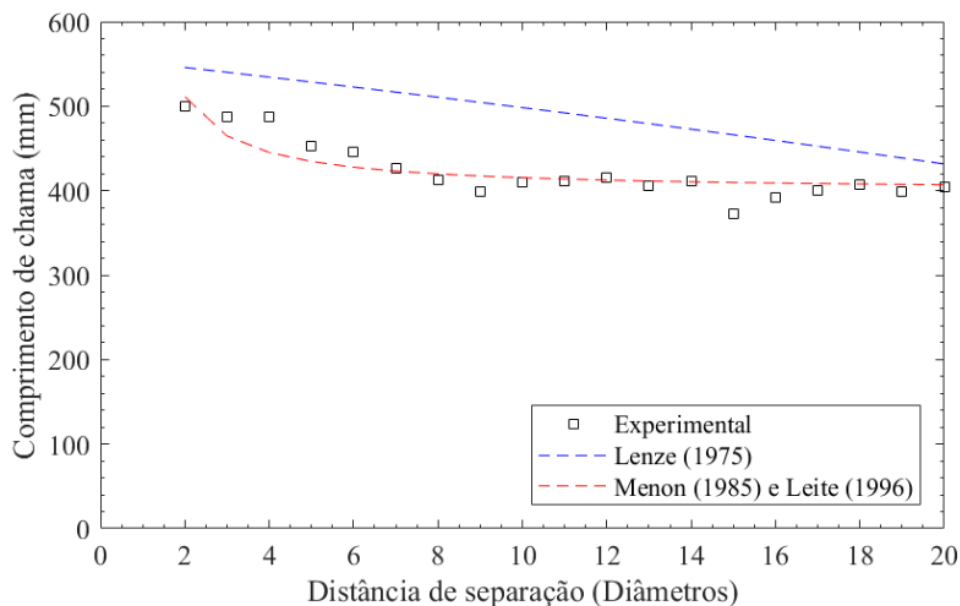


Figura 4.28 – Comparação entre as equações empíricas de múltiplas chamas. Dados para 2,5 L/min com 10% de CO₂ na mistura.

4.2 Radiação térmica

A segunda parte deste capítulo apresenta os efeitos da distância de separação, da vazão de combustível e da diluição com CO₂ da mistura sobre a radiação térmica de duas chamas de gás natural. Os resultados de geometria das chamas, apresentados na seção anterior, foram utilizados para posicionar os radiômetros no estudo experimental de radiação térmica. Os dados da seção anterior mostram que o comprimento de chama está ligado à relação S/d e, quando esta razão for igual a 10, o comprimento de chama atinge o valor de jato único, porém a interação ainda persiste e aproximadamente a partir da $S/d = 20$ não existe interação entre as chamas.

Efeitos da distância de separação entre os queimadores

Obtida pelo modelo SPS, a fração radiante proveniente de duas chamas difusivas e laminares apresenta seu máximo valor na metade da razão S/d em que se obtém o comprimento de jato único, ou seja, $S/d \approx 4$, Figura 4.29, efeito similar para demais vazões. Os dados analisados indicam que no regime imerso sinuoso com distância de separação de dois diâmetros obtém-se um valor similar à soma da radiação de ambas as chamas. Porém, devido a

impossibilidade de medição com distância de separação de um diâmetro, não foi possível verificar se a fração radiante neste ponto corresponde a fração de duas chamas sem interação. No entanto, a competição por oxidante mostrou-se como uma possível causa do incremento da radiação térmica emitida pelas chamas e sua intensidade é máxima na região em que esta competição deve ser mais intensa. Outras causas podem estar atreladas a formação de fuligem, temperatura dos gases e *flickering* da chama. Logo após a intensidade atingir seu máximo valor, novos incrementos na distância de separação fazem com que mais oxidante chegue ao encontro do combustível e, assim, este valor decai até onde nenhuma interação entre as chamas exista. Nos experimentos para medir radiação térmica observou-se que após o regime simétrico sinuoso, região onde o comprimento visível de chama atinge o valor de jato único, não existe mais interação. Portanto, a radiação térmica é a soma da radiação proveniente das duas chamas e desta forma a fração radiante estabiliza-se a partir desta posição.

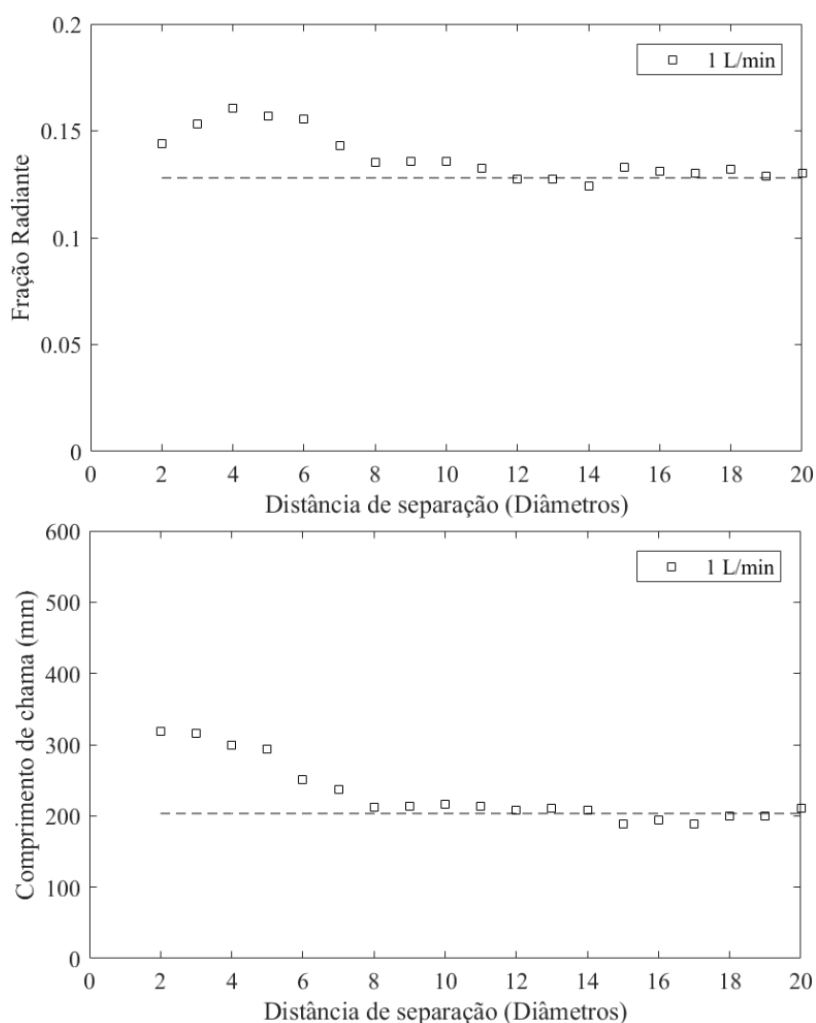


Figura 4.29 – Efeito distância de separação na radiação térmica e comprimento de chama.

Estudos experimentais de Markstein, 1977, com chamas difusivas de propano mostraram que o espaçamento entre os queimadores afetou a fração radiativa das chamas. Existe uma região onde o espaçamento reduz o acesso de oxidante fazendo com que as partículas de fuligem cresçam e a emissão de radiação seja incrementada. No entanto, estudos de Wang et al., 2016, com metano mostraram que a maior parte da radiação vem dos gases quentes e existe pouca contribuição da fuligem uma vez que este combustível não produz quantidades significativas de fuligem. Assim, pode-se salientar que na região de interação de múltiplas chamas com gás natural existe maior contribuição do aumento da temperatura das chamas do que a contribuição da formação das partículas de fuligem durante a combustão. Representado por χ_{rs} , a fração radiante proveniente das chamas no regime independente, e χ_{ri} pela fração radiante das chamas em interação pode-se observar o ganho percentual da fração radiativa pela distância de separação entre os queimadores, Figura 4.30. A porcentagem máxima do aumento de fluxo radiante de chamas de gás natural corresponde a 25% na região de interação entre as chamas.

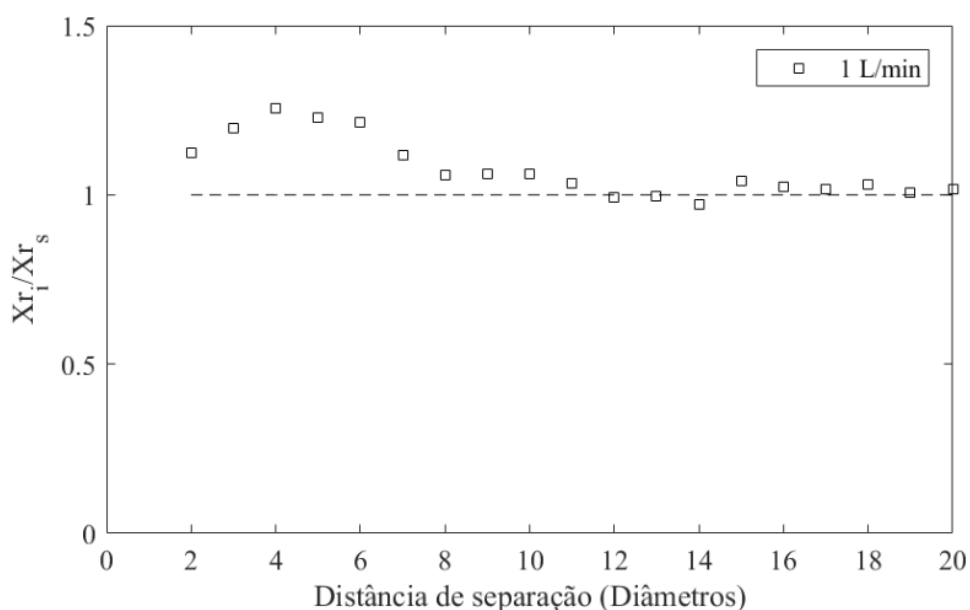


Figura 4.30 – Percentual da fração radiante em função da distância de separação entre os queimadores. Dados para 1 L/min com 10% de CO₂.

A intensidade luminosa presente nas imagens capturadas pela câmera digital durante os experimentos com diferentes vazões dos gases podem ser observadas para estimar a região na qual espera-se que a radiação seja máxima. Através da Figura 4.30 observa-se que a radiação

térmica tem seu máximo valor na razão S/d igual a 4, que representa a metade da razão para obter-se o comprimento visível de jato único. A Figura 4.31 ilustra a intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita na vazão de 1 L/min com 10% de CO_2 na mistura. Comparando-se as Figuras 4.29 e 4.31, nota-se que a intensidade luminosa sobe da esquerda para a direita e atinge seu auge na terceira chama. A partir deste ponto observa-se uma redução da intensidade luminosa até o ponto na qual a radiação térmica não se altera.



Figura 4.31 – Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 1 L/min com 10% de CO_2 .

O aumento da concentração de CO_2 na mistura facilita o processo de visualização da intensidade luminosa presente nas chamas. A Figura 4.32, condição de 1 L/min com 50% de CO_2 na mistura, mostra o ganho da intensidade luminosa devido a distância de separação entre os queimadores. Conforme mencionado anteriormente e aos estudos de Wang et al., 2016, o ganho de radiação térmica pode estar aliado a insuficiência de oxidante para completar a reação de combustão, o que acarreta no aumento da temperatura de chama e a pouca contribuição da formação de fuligem. Resultados similares podem ser observados para a vazão de 2 L/min com 30% de CO_2 na mistura, Figura 4.33.

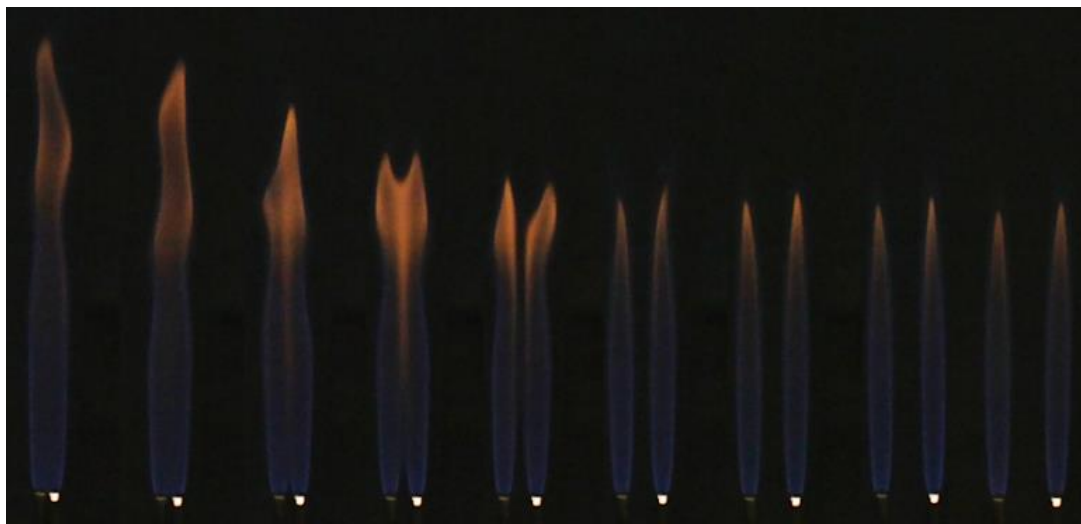


Figura 4.32 – Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 1 L/min com 50% de CO₂.



Figura 4.33 – Intensidade luminosa para distância de separação crescente da esquerda para direita. Dados para 2 L/min com 30% de CO₂.

Efeitos da vazão de combustível

Estudos experimentais de Delichatsios e Orloff, 1988, mostraram que a fração radiante decresce à medida que a potência de chama aumenta (incremento da vazão de combustível). Além disso, a coloração azul é proveniente dos gases, enquanto a amarelada é proveniente das partículas de fuligem. Os autores também comentam que a maior parte da radiação térmica do metano ocorre pelos gases quentes e existe pouca contribuição por parte da formação de

fuligem. No entanto, existem outros parâmetros que afetam a radiação térmica proveniente de chamas únicas e múltiplas.

Wang et al., 2016, sugerem que o aumento da pressão atmosférica afeta a fração radiante da chama em regime laminar e esta dependência é baixa no regime turbulento. Os autores mostraram que o incremento da pressão atmosférica reduz o volume de chama e os vórtices criados durante a combustão estão mais próximos da sua base os quais alteram a frequência de oscilação da chama. O incremento do empuxo devido ao aumento da pressão atmosférica faz com que as chamas oscilem mais e sua luminosidade seja mais intensa.

Outro efeito do incremento da vazão de combustível é o de afastar o pico de radiação térmica para uma distância de separação maior, Figura 4.34. Além disso, observou-se os mesmos efeitos descritos por Delichatsios e Orloff, 1988, na qual a fração radiante decai com o incremento da potência de chama devido ao menor volume de chama e tempo de residência. As Figuras 4.34 a 4.39 ilustram os efeitos do incremento da vazão de combustível na fração radiante. Pequenas flutuações são observadas após a razão de jato único ocorrer e a radiação térmica se dá através da soma da radiação das duas chamas.

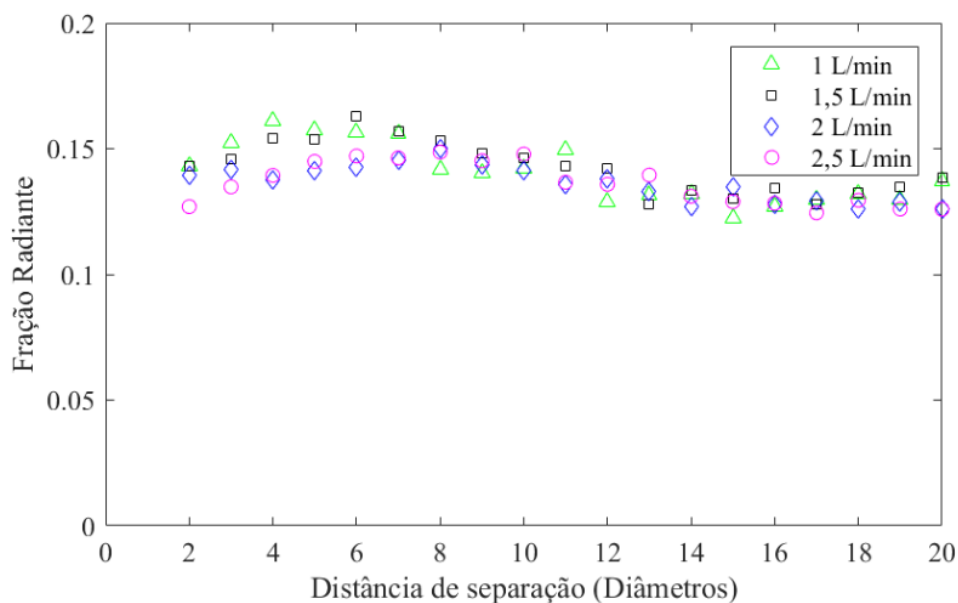


Figura 4.34 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 0% de CO₂ na mistura.

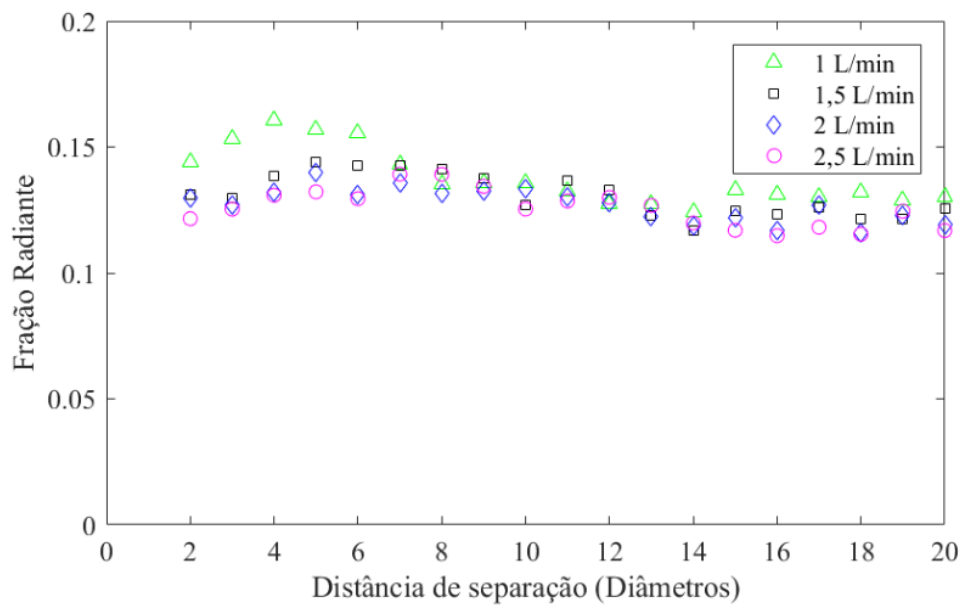


Figura 4.35 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 10% de CO₂ na mistura.

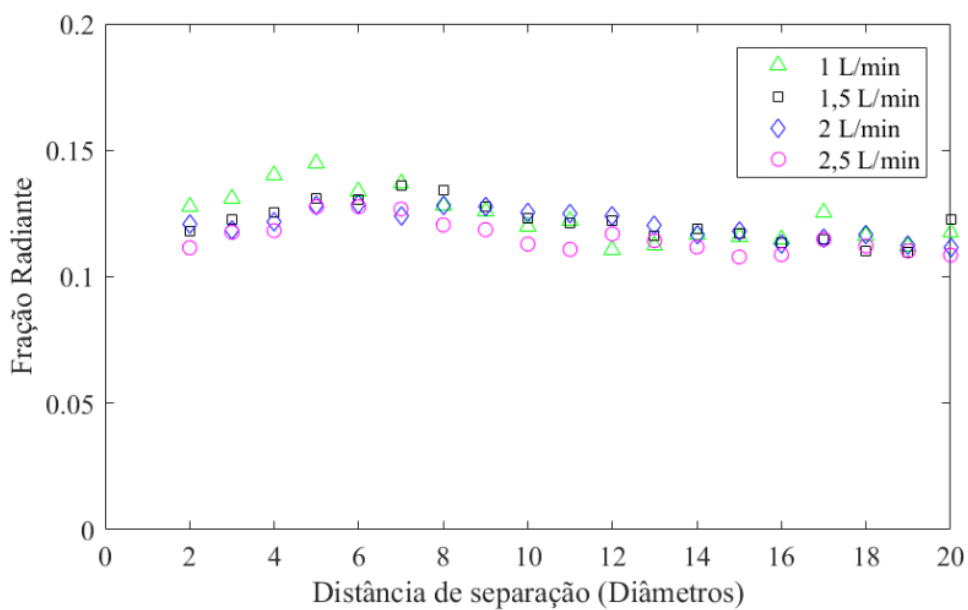


Figura 4.36 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 20% de CO₂ na mistura.

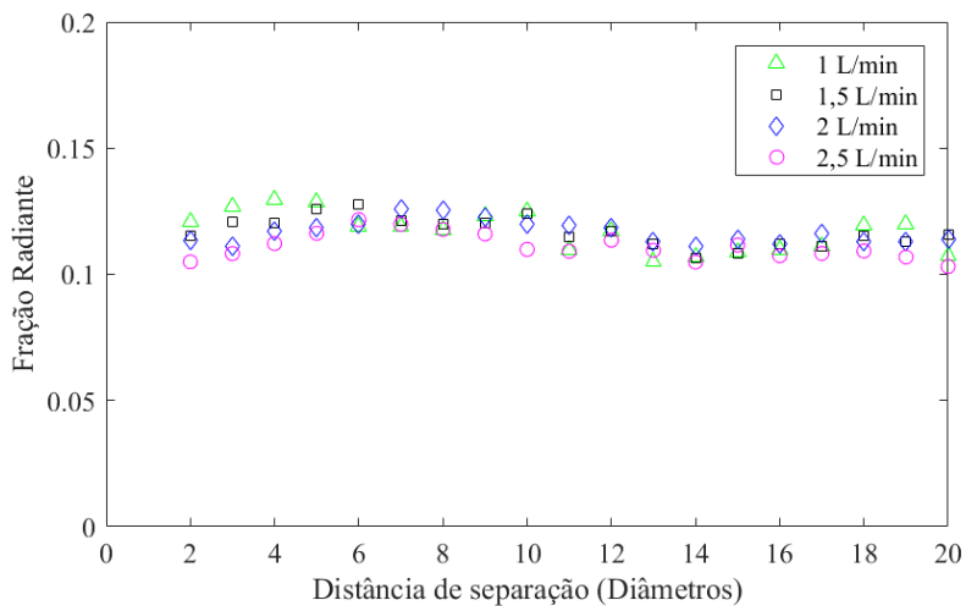


Figura 4.37 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 30% de CO₂ na mistura.

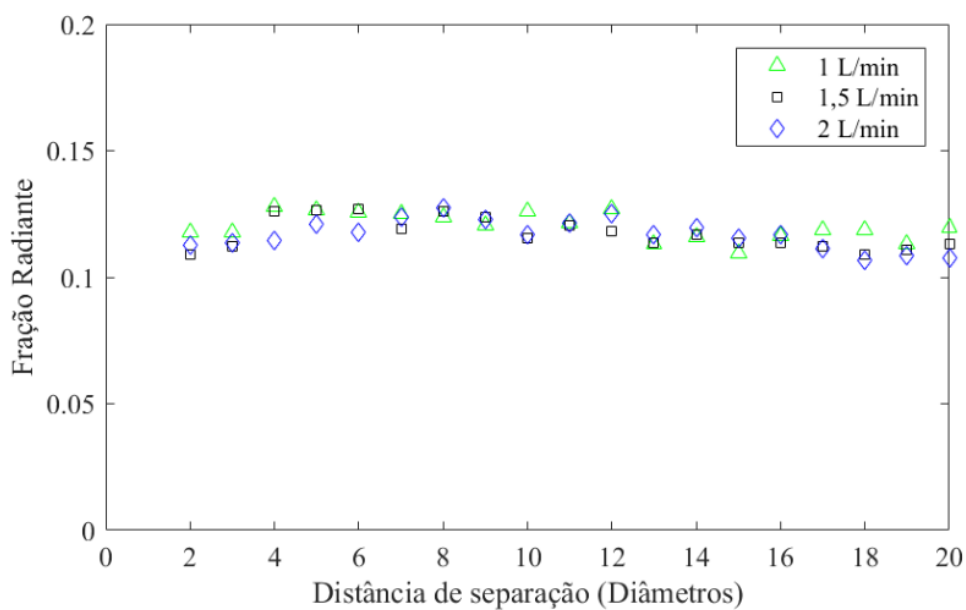


Figura 4.38 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 40% de CO₂ na mistura.

Instabilidades para medição e flutuações da radiação térmica foram observadas durante a experimentação das chamas de 1 L/min com 50% de CO₂. Pequenas oscilações causam a extinção da chama durante a experimentação.

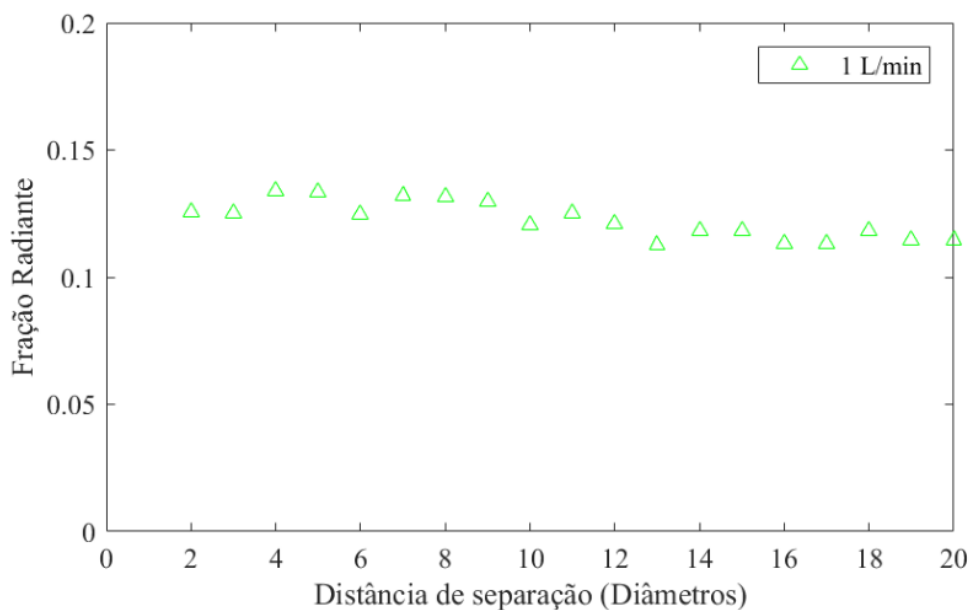


Figura 4.39 – Efeitos da vazão de combustível na fração radiante. Condição de 50% de CO_2 na mistura.

Efeitos da diluição com CO_2

Liu et al., 2001, mostraram que a adição de gás inerte na mistura resultou em menores temperaturas de chama e, portanto, a radiação térmica reduz com o incremento da concentração de CO_2 . Os experimentos realizados nesse trabalho com duas chamas em interação mostraram-se em concordância com esta condição, Figuras 4.40 a 4.43. Ainda, Liu et al., 2001, mostraram que a redução da temperatura suprime a nucleação de fuligem e, portanto, o incremento na concentração de CO_2 resulta em chamas azuladas e com menor formação de fuligem. Os experimentos realizados nesse trabalho com duas chamas em interação mostraram-se em concordância com esta condição, Figuras 4.31 a 4.32 (seção anterior). Além disso, a fração radiante tem seu valor máximo onde o fluxo de calor radiante é máximo. O aumento da concentração de diluente na mistura mostrou-se como forte influência dos gases participantes na fração radiativa. Observou-se que chamas com vazão de 1 L/min diluídas com CO_2 a 50% tem a fração radiativa aumentada e incrementos da diluição levam a extinção da chama.

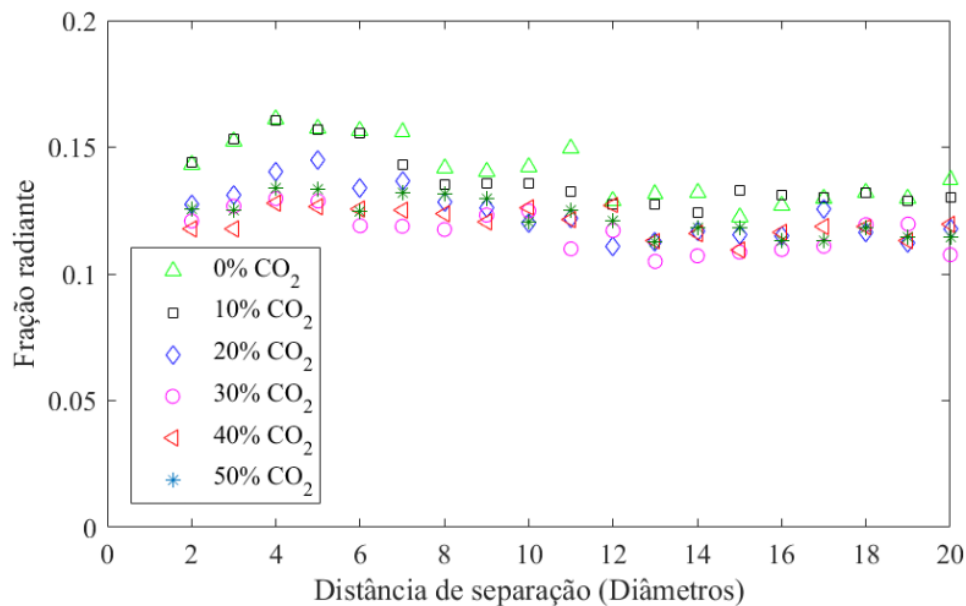


Figura 4.40 – Efeitos da diluição do combustível com CO₂ na fração radiante. Condição para vazão de 1 L/min.

Machado, 2017, mostrou experimentalmente através da combustão de metano diluído com CO₂ em jato único que a fração radiante diminuiu com o acréscimo de diluente até uma determinada concentração de CO₂. Após a fração radiante atingir seu valor mínimo, subsequentes incrementos na concentração de CO₂ fizeram com que a fração radiante da chama fosse aumentada. A hipótese sugerida pelo autor foi a maior contribuição na fração radiante por parte do CO₂ como um gás participante do que pela emissão de radiação térmica pela formação das partículas de fuligem. Os estudos com duas chamas em interação demonstram o comportamento do decaimento e crescimento da fração radiante para a vazão de 1 L/min apresentado pela Figura 4.40.

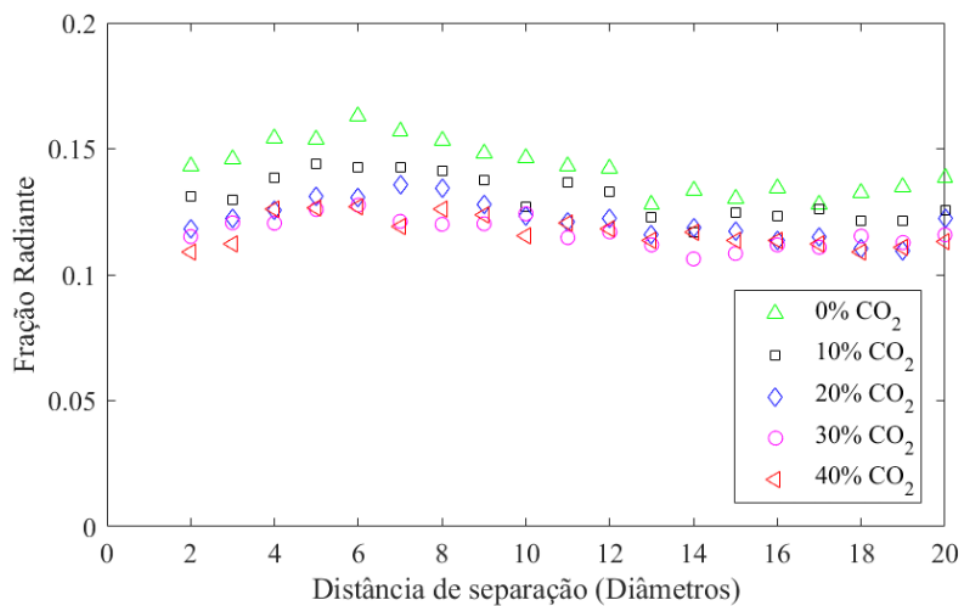


Figura 4.41 – Efeitos da diluição do combustível com CO₂ na fração radiante. Condição para vazão de 1,5 L/min.

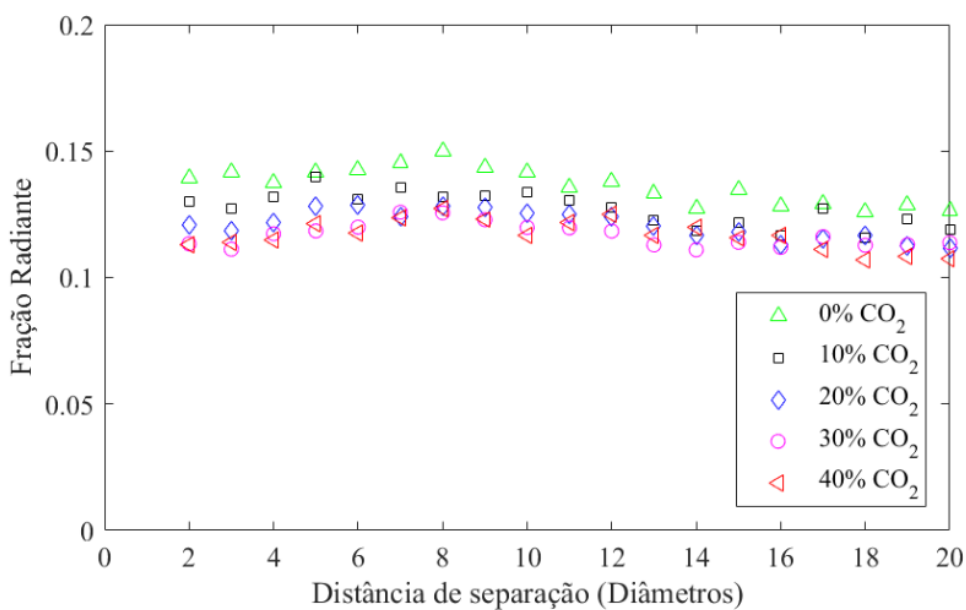


Figura 4.42 – Efeitos da diluição do combustível com CO₂ na fração radiante. Condição para vazão de 2 L/min.

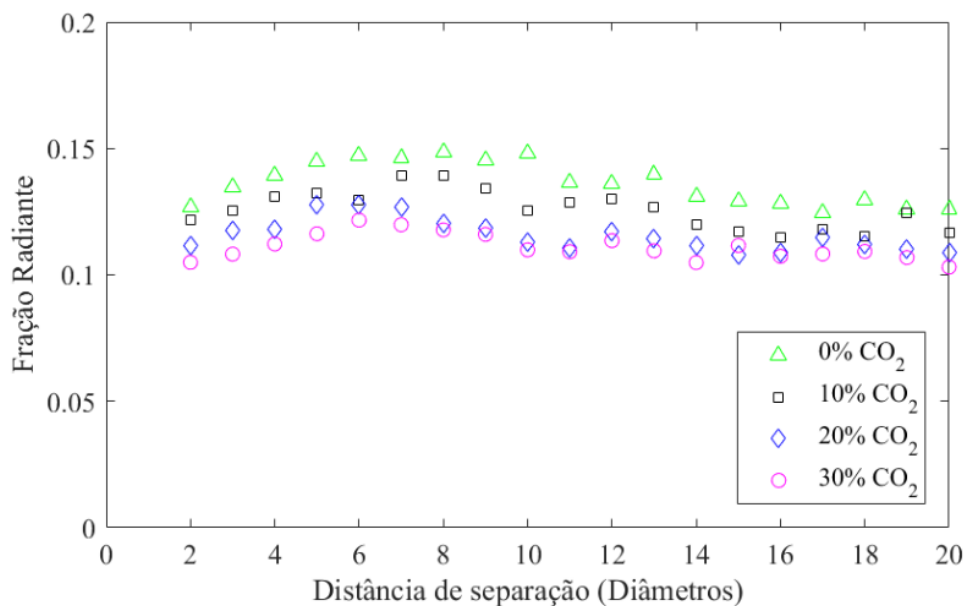


Figura 4.43 – Efeitos da diluição do combustível com CO₂ na fração radiante. Condição para vazão de 2,5 L/min.

Modelo Weighted Multi-Point Source (WMPS)

O modelo WMPS representado pela Figura 2.5 e calculado pela Equação 2.15 modela o fluxo de calor radiante emitido pela chama. Nesta seção do trabalho, os primeiros resultados foram obtidos levando em consideração os dados experimentais de geometria de chama, potência de chama e fração radiante para implementação do modelo WMPS. Os resultados seguintes do WMPS consideram o uso de correlações empíricas para a geometria de chama e fração radiante. Além disso, através de fatores de ponderação adotados, obtêm-se uma estimativa da distribuição do fluxo de calor radiante, apresentado na Figura 4.44 para o caso em que dados experimentais (L_f e χ_{RAD}) são usados para implementação no modelo WMPS. Quarenta pontos igualmente espaçados com intensidade máxima representada a $n = 0,75N$, conforme recomendado em Hankinson e Lowesmith, 2012, ao longo do comprimento da chama foram adotados. Para todas as chamas analisadas, o sensor encontra-se igualmente espaçado entre as chamas e a distância entre os radiômetros e as chamas são duas vezes o comprimento de chama observado na posição de dois diâmetros de separação. Esta condição garante que os pontos estarão compreendidos dentro da esfera imaginária apresentada na seção 2.2.2. Assim, adotando os fatores de ponderação de Hankinson e Lowesmith, 2012, e uma distribuição de 40 pontos, o modelo utilizado com entrada experimental representa com precisão de 89% ou

superior o fluxo de calor radiante de múltiplas chamas, quando comparado aos dados coletados experimentalmente. Valores inferiores a 40 pontos ao longo do comprimento da chama alteram muito pouco a precisão do método, utilizam 36 pontos, esta torna-se 88%. Para valores superiores a 40 pontos como, por exemplo, 52 pontos igualmente espaçados acarretam também em uma precisão do método de 88%. Os demais resultados para vazões e concentrações de CO₂ obtidos pelo modelo WMPS para distribuição com 40 pesos encontram-se no Apêndice D.

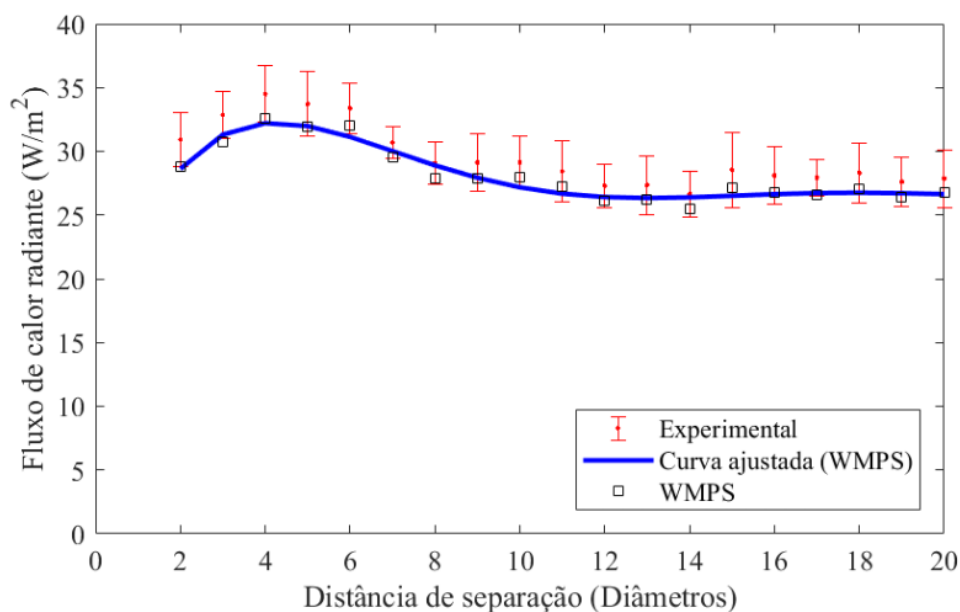


Figura 4.44 – Fluxo de calor radiante obtido com o modelo WMPS considerando χ_{RAD} experimental, comparado aos dados coletados experimentalmente para vazão 1 L/min e 10% de CO₂ na mistura.

Os valores obtidos levando em consideração os dados experimentais como entrada no modelo WMPS, comparados aos dados coletados experimentalmente, apresentam desvio relativo máximo inferior a 11% para todas as distâncias de separação entre os queimadores analisadas, Tabela 4.1. Ainda, o desvio relativo médio para todas as distâncias de separação analisadas é inferior a 9%. Assim, este modelo descreve o fluxo de calor radiante de múltiplas chamas com boa precisão.

Este, adimensionaliza os dados experimentais da fração radiante em relação aos dados de jato único em função da respectiva vazão e diluição. Espera-se estimar no regime laminar a interação de duas chamas através de uma única curva, porém nota-se uma dependência da função da vazão de combustível, Q_f , e concentração de CO_2 . No entanto, observa-se através da Figura 4.45 que a curva ajustada indica que a região na qual as chamas influenciam a emissão de radiação térmica compreende a faixa da razão S/d inferior a 14. A partir deste ponto a radiação térmica não sofre interferência devido à distância crescente entre os queimadores.

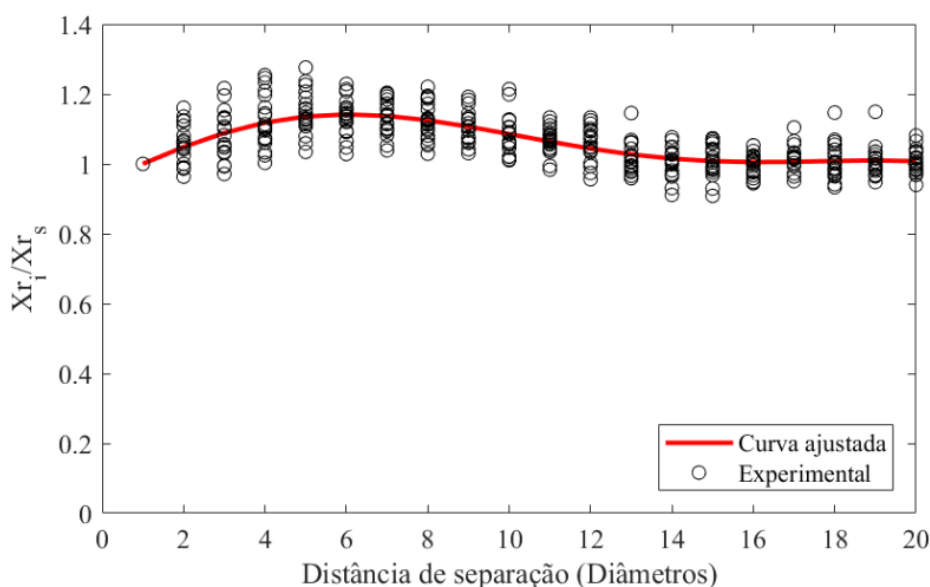


Figura 4.45 – Razão entre as frações radiantes de múltiplos jatos (χ_{ri}) e jato único (χ_{rs}) para todos os dados experimentais em função da separação.

Com a adimensionalização dos dados experimentais, obteve-se uma curva ajustada para descrever o comportamento da interação das duas chamas pela distância de separação. Descrita por um polinômio de sexta ordem e sendo função da razão S/d , esta equação foi utilizada como uma tentativa de descrever a fração radiante de duas chamas em regime laminar, Equação 4.2. A fração radiante, mostrou-se dependente da concentração de CO_2 , Equação 4.3 e vazão de combustível, Equação 4.4, distância de separação, Equação 4.5, assim estes são levados em consideração durante os cálculos. As constantes desta equação empírica são apresentadas na Tabela 4.2.

$$X_r = [\alpha(CO_2) + \beta(Q_F)][\gamma(S/d)] \quad (4.2)$$

$$\alpha(CO_2) = [-C_1(CO_2)^4 + C_2(CO_2)^3 - C_3(CO_2)^2 + C_4(CO_2)] \quad (4.3)$$

$$\beta(Q_F) = [C_5 - 0,001Q_f] \quad (4.4)$$

$$\gamma(S/d) = [C_6(S/d)^6 - C_7(S/d)^5 + C_8(S/d)^4 - C_9(S/d)^3 + C_{10}(S/d)^2 + C_{11}(S/d) + C_{12}] \quad (4.5)$$

Tabela 4.2 – Valores das constantes na equação da fração radiante (Eq. 4.2).

Constante	Valor
C_1	$8,3601352 \times 10^{-8}$
C_2	$8,624031411 \times 10^{-6}$
C_3	$2,56130238297 \times 10^{-4}$
C_4	$1,225279573981 \times 10^{-3}$
C_5	$1,34349320321091 \times 10^{-1}$
C_6	$5,2490885 \times 10^{-8}$
C_7	$4,673394084 \times 10^{-6}$
C_8	$1,4147156941 \times 10^{-4}$
C_9	$1,635576189695 \times 10^{-3}$
C_{10}	$2,79690905176 \times 10^{-3}$
C_{11}	$4,9194636121588 \times 10^{-2}$
C_{12}	$9,49676727377119 \times 10^{-1}$

A Equação 4.2, utilizada para regime laminar, apresenta boa concordância para todas as vazões de combustível, concentrações de CO_2 e distâncias de separação entre os queimadores S/d , ao comparar os resultados do modelo WMPS usando como χ_{RAD} os valores calculados pela Equação 4.2 e os dados experimentais de fluxo de calor radiante, conforme se observa na Figura 4.46. O desvio relativo máximo é inferior a 17,5% e este valor ocorre para apenas um dos casos analisados, já o desvio relativo médio é inferior a 10%. Esta equação leva em consideração o decréscimo e acréscimo na fração radiante devido a diluição. Os demais resultados obtidos através da sugestão da Equação 4.2 no modelo WMPS encontram-se no Apêndice E e no Apêndice F. Além disso, os dados experimentais deste trabalho são comparados pela correlação de Markstein, 1985, que prevê a fração radiante através do ponto de fumaça, Figura 4.46. A correlação de Markstein, 1985, leva em consideração o ponto de fumaça do combustível, porém o autor salienta que não é possível estabilizar uma chama de metano em regime laminar que produza uma quantidade de fuligem. A estimativa do valor do comprimento do ponto de fumaça em função da fração radiante foi calculada utilizando o valor da fração radiante do metano na Figura 4.47, este valor corresponde a aproximadamente 277 mm na correlação utilizada pelo autor. Os resultados obtidos usando esta correlação para o valor

de χ_{RAD} no modelo WMPS não apresentam boa concordância devido ao desvio relativo máximo estar entre 24% e 40%, bem como o desvio relativo médio estar entre 20% e 38%.

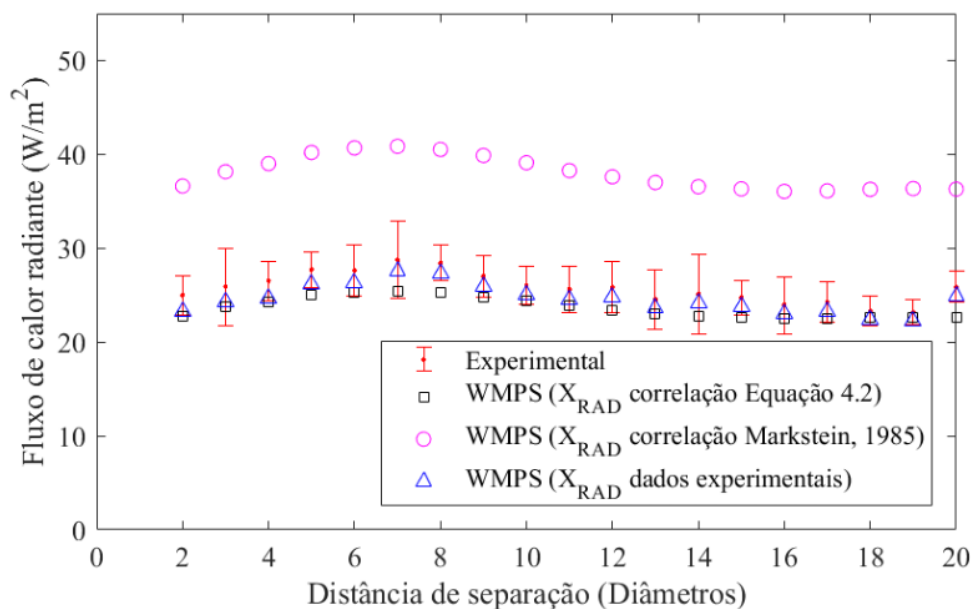


Figura 4.46 – Fluxo de calor radiante para vazão 1,5 L/min e 20% de CO₂ na mistura: dados experimentais e resultados do modelo WMPS usando χ_{RAD} experimental, χ_{RAD} ajustado pela Eq. 4.2, e χ_{RAD} conforme correlação de Markstein, 1985.

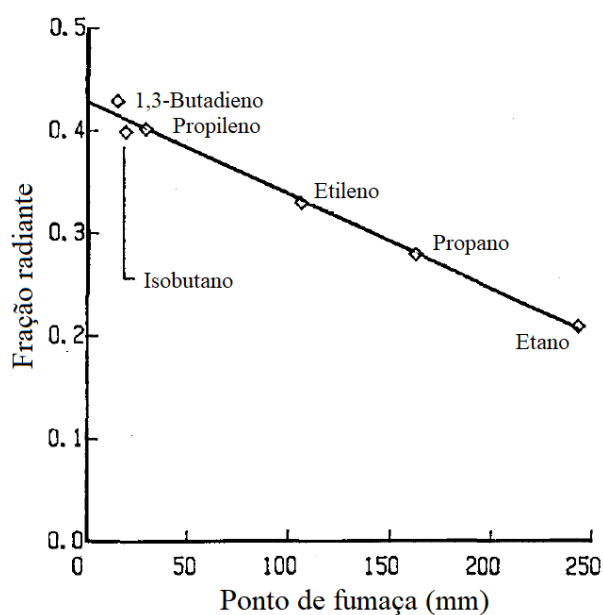


Figura 4.47 – Fração radiante em função do ponto de fumaça [Adaptado de Markstein, 1985].

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a influência da interação de múltiplas chamas em termos da vazão de combustível, da adição de gás inerte (CO_2) e da distância de separação entre os queimadores. O trabalho foi dividido em duas partes: estudo do comprimento visível de chama e radiação térmica. Na primeira parte foi analisado o impacto da vazão de combustível, diluição de CO_2 e distância de separação entre os queimadores no comprimento visível de múltiplas chamas. Na segunda parte o estudo foi dirigido aos impactos dessas mesmas condições aplicadas à radiação térmica e à utilização do modelo WMPS para prever o fluxo radiativo ao longo de duas chamas em interação.

Na primeira parte conclui-se que:

1. O comprimento visível de chamas laminares na configuração de múltiplos jatos nos regimes imerso sinuoso, imerso varicoso e simétrico sinuoso é uma grandeza que aumenta com o incremento da vazão de combustível e decai com o aumento da distância de separação entre os queimadores e da concentração do diluente CO_2 ;
2. O comprimento visível de chama é máximo no regime imerso sinuoso, que corresponde à região em que os queimadores encontram-se na menor distância de separação;
3. Para configurações de múltiplos jatos, com dois queimadores em regime laminar, o comprimento visível de chama atinge o valor de jato único após o regime simétrico sinuoso na razão S/d igual a 10, porém as chamas ainda estão em interação;
4. No regime alternado sinuoso as chamas interagem da forma em que o comprimento visível de chama é inferior ao comprimento de jato único;
5. A interação entre as chamas cessa no regime independente e o comprimento visível de chama não sofre mais alterações, o que ocorre a aproximadamente na razão S/d igual a 20;
6. A diluição do combustível com CO_2 reduz o comprimento visível de chama devido a menor concentração de gás natural na mistura;
7. A região de interação de múltiplas chamas até a razão S/d de jato único são reduzidas com o incremento da concentração de CO_2 na mistura;

8. A diluição do combustível com CO₂ afeta os regimes morfológicos das chamas e as oscilações criadas no regime alternado sinuoso são suavizadas com o incremento da concentração de diluente;
9. A diluição do combustível afeta diretamente a estabilidade da chama e o incremento dessa concentração faz com que a região de extinção das chamas seja aumentada; e
10. A Equação 2.7, ajustada para o gás natural e por uma função da vazão de combustível, descreve a interação do comprimento de múltiplas chamas com discrepância inferior a $\pm 15\%$.

Na segunda parte, as principais conclusões foram:

1. A radiação térmica proveniente de duas chamas em interação tem seu máximo no valor em regiões próximas a razão S/d de jato único devido a maior competição por oxidante nesta região;
2. A radiação térmica a partir de S/d de jato único se mantém constante e se dá através da soma da radiação térmica das duas chamas;
3. O incremento da vazão de combustível faz com que potência de chama aumente e, conseqüentemente, reduz a fração radiante das chamas;
4. Incrementos da vazão de combustível distanciam a intensidade máxima da radiação térmica proveniente da interação de duas chamas;
5. A diluição do combustível com CO₂ reduz a intensidade de radiação emitida até um certo grau de diluição devido à menor concentração de combustível e potência da chama;
6. O incremento da diluição do combustível faz com que as chamas tornem-se mais azuladas e com menor fração radiante até certo grau de diluição;
7. Para a diluição com 50% de CO₂, pré-extinção, a fração radiante sobe devido a participação do CO₂ e novos incrementos fazem com que o combustível não entre em ignição;
8. A discrepância entre os dados experimentais e o modelo WMPS é inferior a 11% em todos as vazões e distâncias de separação entre os queimadores analisadas;
9. A equação empírica 4.2 descreve a fração radiante com boa concordância a interação de duas chamas laminares para todas as vazões de combustível e concentrações de CO₂ na mistura; e

10. Os resultados da fração radiante confirmam que após o comprimento de chama atingir o valor de jato único, a radiação térmica tende a ser constante e a oscilação é baixa no regime alternado sinuoso.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

1. Analisar a interação do número de queimadores em regiões de proximidades para determinar a influência no comprimento visível de chama e radiação térmica;
2. Avaliar a influência no comprimento de chama e radiação térmica para diferentes tipos de combustíveis;
3. Avaliar a interação de múltiplas chamas turbulentas em termos da distância de separação entre os queimadores e o grau de diluição com gases inertes; e
4. Avaliar os efeitos da geometria e radiação térmica em múltiplas chamas sobre efeitos de fluxo cruzado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burke, S. P. e Schumann, T. E. W. **Diffusion Flames**. Industrial & Engineering Chemistry, vol. 20(10), p. 998-1004, 1928.

Caldeira-Pires, A. e Heitor, M. V. **On the Analysis of Propane Jet Flames in Mutual Interaction**. Combustion Science and Technology, vol 141(1-6), p. 37-57, 1999.

Changchun L., Xinlei, L., Hong, G., Jun, D., Shasha, Z., Xueyao, W. e Fangming, C. (2019) **On the Influence of Distance Between Two Jets on Flickering Diffusion Flame**. Combustion and Flame, vol. 201, p. 23-30, 2019.

Chigier, N. A. e Apak, G. **Interaction of Multiple Turbulent Diffusion Flames**. Combustion Science and Technology, vol. 10(5-6), p. 219-231, 1975.

Çengel, Y. A e Ghajar, A. J. **Transferência de Calor e de Massa: Uma Abordagem Prática**. Porto Alegre, Mc Graw Hill, 4th edition, 2012.

Delichatsios, M. A. e Orloff, L. **Effects of Turbulence on Flame Radiation from Diffusion Flames**. The Combustion Institute, p. 1271-1279, 1988.

Fay, J. A. **The Distributions of Concentration and Temperature in Laminar Jet Diffusion Flame**. Journal of Aeronautical Sciences, vol. 21, p. 681-689, 1954.

Gautam, T. **Blow-Out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames. Part I: In Still Air**. Combustion Science and Technology, vol. 26(5-6), p. 233-239, 1981.

Gautam, T. Kalghatgi. **Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air**. Combustion Science and Technology, vol. 41(1-2), p. 17-29, 1984.

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.

Hongsheng G. e Gregory J. Smallwood. **A Numerical Study on the Influence of CO₂ Addition on Soot Formation in an Ethylene/Air Diffusion Flame**. *Combustion Science and Technology*, vol. 180(10-11), p. 1695-1708, 2008.

Hottel, H. C. e Hawthorne, W. R. **Diffusion in Laminar Flames Jets**. *Symposium on Combustion and Flames, Explosion Phenomena*, vol. 3(1), p. 254-266, 1948.

Howell, J. R., Mengüç, M. P. e Siegel, R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. CRC Press, 6th edition, 2016.

Hu, L., Huang, L., Wang, Q. e Kuwana, K. **Experimental Study and Analysis on the Interaction Between Two Slot-Burner Buoyant Turbulent Diffusion Flames at Various Burner Pitches**. *Combustion and Flame*, vol. 186, p. 105-113, 2017.

Kwang Chul Oh e Hyun Dong Shin. **The Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentration on Soot Formation in Non-Premixed Flames**. *Fuel*, vol. 85(5-6), p. 615-624, 2006.

Lee, B. J., Kim, J. S. e Chung, S. H. **Effects of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames**. *Symposium (International) on Combustion*, vol. 25(1), p. 1175-1181, 1994.

Lee, B. J., Kim, J. S. e Lee, S. **Enhancement of Blowout Limit by the Interaction of Multiple Nonpremixed Jet Flames**. *Combustion Science and Technology*, vol. 176(4), p. 481-497, 2004.

Leite, A.O.P., Ferreira, M.A. e Carvalho, J. A. **An Investigation of Multiple Jet Acetylene Flames**. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol. 27(7), p. 959-970, 1996.

Lenze, B., Milano, M.E. e Guenther, R. **The Mutual Influence of Jet Diffusion Flames**. *Combustion Science and Technology*, vol. 11, p. 1-8, 1975.

Lin, K.-C, Faeth, G. M., Sunderland, P. B., Urban, D. L. e Yuan, Z.-G. **Shapes of Non-buoyant Round Luminous Hydrocarbon/Air Laminar Jet Diffusion Flames**. Combustion and Flame, vol. 116, p. 415-431, 1999.

Llanos, L. A. Q. **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.

Machado, I. M. **Caracterização Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas não Pré-Misturadas de Metano Diluídas com CO₂**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Markstein, G. H. **Radiative Energy Transfer from Turbulent Diffusion Flames**. Combustion and Flame, vol. 27, p. 51-63, 1976.

Markstein G. H. **Relationship Between Smoke Point and Radiant Emission from Buoyant Turbulent and Laminar Diffusion Flames**. Symposium (International) on Combustion, vol. 20(1), p. 1055-1061, 1985.

Menon, R. e Gollahalli, S. R. **Combustion Characteristics of Interacting Multiple Jets in Cross Flow**. Combustion Science and Technology, vol. 60(4-6), p. 375-389, 1988.

Min, J., Baillot, F., Wyzgolik, A., Domingues, E., Talbaut, M., Rouland, B. P. e Galizzi, C. **Impact of CO₂/N₂/Ar Addition on the Internal Structure and Stability of Nonpremixed CH₄/Air Flames at Lifting**. Combustion Science and Technology, vol. 182(11-12), p. 1782-1804, 2010.

Orloff, L., Ris, J. D. e Delichatsios, M. A. **Radiation from Buoyant Turbulent Diffusion Flames**. Combustion Science and Technology, vol. 84(1-6), p. 177-186, 1992.

Pagot, P. R. **Cold and Hot Model Investigation of Flow and Mixing in a Multi-Jet Flare**. Tese de doutorado, Queen's University, Kingston, 2002.

Petrobras, **Exploração e Produção de Petróleo**.
<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>, Acesso em 26-10-2018.

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.

Roper, F. G. **The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part I, Theoretical Model**. Combustion and Flame, vol. 29, p. 219-226, 1977.

Roper, F. G., Smith, C. e Cunningham, A. A. **The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part II, Experimental Verification**. Combustion and Flame, vol. 29, p. 227-234, 1977.

Spalding, D. B. **Combustion and Mass Transfer**. Pergamon, New York, 1979.

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, 1991.

Turns, S. R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**. Boston, Mc Graw Hill, 2nd edition, 2000.

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

Wan, H., Ji, J., Li, K., Huang, X., Sun, J. e Zhang, Y. **Effect of Air Entrainment on the Height of Buoyant Turbulent Diffusion Flames for Two Fires in Open Space**. Proceedings of the Combustion Institute, p. 1-8, 2016.

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 Pressure**. Fuel, vol. 167, p. 82-88, 2016.

Weber, E. J. e Vandaveer, F. E. **Gas Burner Design**. Chap. 12 in Gas EngineerS Handbook, The Industrial Press, New York, 1965.

APÊNDICE A – Características dos Queimadores

Tabela A. 1 – Características dos queimadores.

Principais ligas de metais														
Denominação	Composição Química Nominal							Normas Equivalentes		Formas Fabricadas				
	Cu	Zn	Sn	Pb	Al	Outros	UNS	ASTM	Laminado	Barra	Fio	Tubo	Bucha	
Cobre														
Cobre Elox	99,95					Ag - 0,03	10200	B-152	X	X	X	X		
Cobre Prata Elox Zero Três	99,95						10500	B-152	X	X	X	X		
Cobre Elétrico	99,9						11000	B-152	X	X	X	X		
Cobre Prata Elétrico Zero Três	99,9					Ag - 0,03	11300	B-152	X	X	X	X		
Cobre Fosforado	99,9					P - 0,03	12200	B-152	X				X	
Cobre Arsenical	99,67					As - 0,30 + P - 0,03	14200	B-152					X	
Cobre Telúrio	99,5					Te - 0,50	14500	B-124		X				
Cobre Zircônio	99,8					Zr - 0,20	15000	B-747		X				
Cobre Cádmio	99,0					Cd - 1,00	16200	-		X				
Cobre Cromo	99,1					Cr - 0,85	18400	-		X				
Solda de Cobre	98,8		0,50			Mn - 0,40 + Si - 0,30	18900	-		X	X			
Latões														
Tomback 85 - 15	85	15					23000	B-36	X		X	X		
Tomback 80 - 20	80	20					24000	B-36	X		X	X		
Cartucho 70 - 30	70	30					26000	B-36	X		X	X		
Latão 67 - 33	67	33					26800	B-36	X		X	X		
Fio Máquina	63	37					27000	B-36	X		X	X		
Latão 60 - 40	60	40					28000	B-36	X		X	X		
Fio Máquina ao Chumbo	66,5	33			0,5		33000	B-135				X		
Latão Chave	64	34			1,8		34200	B-121	X		X	X		
Forjaflex	61	37			2		35300	B-121	X	X	X			
Latão Corte Livre Americano	61,5	35,5			3		36000	B-16		X				
Latão Corte Livre Estampável	61	38			1		37000	B-432		X				
Latão Forja	58,5	39,5			2		37700	B-124		X				
Latão Corte Livre Europeu	57,5	39,5			3		38500	B-455		X				
Almirantado Arsenical	71,5	27,3	1,1			As - 0,04	44300	B-111				X		
Almirantado Fosforado	71,5	27,3	1,1			P - 0,04	44500	B-111				X		
Latão Naval	61,5	37,5	1				46400	B-124		X				
Latão Solda	62	37	0,5				47100	-		X	X			
Forjaduro	60	37,4	0,8	1,8			48500	B-124		X				
Super Liga 3	62	31			3	Mn - 2,5 + Fe - 1,5	67030	B-138		X				
Super Liga 5	64	25			5	Mn - 3,5 + Fe - 2,5	67050	B-138		X				
Super Liga 7	65	20,5			7	Mn - 4,0 + Fe - 3,5	67070	B-138		X				
Latão Alumínio Ferro	58	37,5		0,5	2	Fe - 0,5 + Mn - 1,5	67200	-		X		X		
Forja B	61	36		1,5	0,5	Fe - 0,5 + Mn - 0,5	67800	-		X				
Latão Aluminado	77,5	20,3			2,1	As - 0,04	68700	B-111				X		
Latão Silício	68	31				Si - 1	87900	B-176				X		

TUBOS - peso em kg por metro																
Diâmetro Externo		Espessura de Parede														
Polegada	mm	1/32" - 0,79mm			1,00mm			1/16" - 1,58mm			3/32" - 2,38mm			1/8" - 3,17mm		
		Alumínio	Cobre	Latão	Alumínio	Cobre	Latão	Alumínio	Cobre	Latão	Alumínio	Cobre	Latão	Alumínio	Cobre	Latão
1/8	3,17	0,016	0,053	0,050	0,018	0,061	0,059	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/32	3,96	0,021	0,070	0,067	0,025	0,083	0,080	0,032	0,105	0,101	-	-	-	-	-	-
3/16	4,76	0,027	0,088	0,084	0,032	0,105	0,101	0,043	0,141	0,135	-	-	-	-	-	-
1/4	6,35	0,037	0,123	0,118	0,045	0,150	0,143	0,064	0,212	0,203	0,080	0,264	0,253	-	-	-
5/16	7,93	0,048	0,158	0,151	0,059	0,194	0,186	0,086	0,282	0,271	0,112	0,370	0,355	0,128	0,422	0,400
3/8	9,52	0,059	0,193	0,185	0,072	0,238	0,228	0,107	0,353	0,338	0,144	0,475	0,455	0,171	0,563	0,510
7/16	11,11	0,069	0,228	0,218	0,086	0,283	0,271	0,128	0,423	0,406	0,176	0,581	0,557	0,213	0,704	0,590
1/2	12,70	0,080	0,263	0,252	0,099	0,327	0,314	0,150	0,494	0,473	0,208	0,687	0,658	0,256	0,844	0,825
9/16	14,28	0,090	0,298	0,286	0,113	0,372	0,356	0,171	0,565	0,541	0,240	0,793	0,760	0,299	0,985	0,962
5/8	15,87	0,101	0,333	0,319	0,126	0,416	0,399	0,193	0,635	0,609	0,272	0,898	0,860	0,341	1,130	1,100
3/4	19,05	0,122	0,403	0,387	0,153	0,505	0,484	0,235	0,776	0,744	0,337	1,110	1,060	0,427	1,410	1,350
7/8	22,22	0,144	0,473	0,454	0,180	0,593	0,569	0,278	0,918	0,879	0,401	1,320	1,270	0,512	1,609	1,620
1	25,40	0,165	0,544	0,521	0,207	0,682	0,654	0,321	1,060	1,010	0,465	1,530	1,470	0,597	1,970	1,890
1 1/8	28,57	0,186	0,614	0,588	0,234	0,771	0,739	0,374	1,200	1,150	0,553	1,740	1,670	0,683	2,250	2,160
1 1/4	31,75	0,207	0,684	0,655	0,261	0,860	0,824	0,407	1,340	1,290	0,593	1,950	1,870	0,768	2,530	2,430
1 3/8	34,92	0,229	0,754	0,723	0,288	0,948	0,909	0,450	1,480	1,420	0,657	2,170	2,080	0,854	2,810	2,700
1 1/2	38,10	0,250	0,824	0,790	0,315	1,040	0,994	0,492	1,620	1,560	0,721	2,380	2,280	0,939	3,100	2,970
1 5/8	41,27	0,271	0,893	0,857	0,342	1,130	1,080	0,535	1,760	1,690	0,785	2,590	2,480	1,020	3,380	3,240
1 3/4	44,45	0,293	0,964	0,924	0,369	1,210	1,160	0,578	1,910	1,830	0,849	2,800	2,680	1,110	3,660	3,510
1 7/8	47,62	0,314	1,030	0,991	0,395	1,300	1,250	0,621	2,050	1,960	0,913	3,010	2,890	1,200	3,940	3,780
2	50,80	0,335	1,100	1,060	0,422	1,390	1,330	0,664	2,190	2,100	0,977	3,220	3,090	1,280	4,220	4,050
2 1/8	53,97	0,356	1,170	1,130	0,449	1,480	1,420	0,706	2,330	2,230	1,040	3,430	3,290	1,370	4,500	4,320
2 1/4	57,15	0,378	1,240	1,190	0,476	1,570	1,500	0,749	2,470	2,370	1,110	3,640	3,490	1,450	4,780	4,580
2 3/8	60,33	0,399	1,310	1,260	0,503	1,660	1,590	0,792	2,610	2,500	1,170	3,860	3,700	1,540	5,070	4,850
2 1/2	63,50	0,420	1,390	1,330	0,530	1,750	1,670	0,835	2,750	2,640	1,230	4,060	3,900	1,620	5,350	5,120
2 5/8	66,67	0,442	1,460	1,390	0,557	1,840	1,760	0,878	2,890	2,770	1,300	4,280	4,100	1,710	5,630	5,390
2 3/4	69,85	0,463	1,530	1,460	0,584	1,930	1,850	0,921	3,030	2,910	1,360	4,490	4,300	1,790	5,910	5,660
3	76,20	0,505	1,670	1,600	0,638	2,100	2,020	1,010	3,320	3,180	1,490	4,910	4,710	1,960	6,470	6,200
3 1/4	82,55	0,549	1,807	1,728	0,693	2,305	2,177	1,091	3,599	3,441	1,619	5,392	5,212	2,133	7,111	6,874
3 1/2	88,90	0,592	1,955	1,862	0,747	2,485	2,347	1,173	3,881	3,709	1,800	5,910	5,680	2,250	7,830	7,450
3 3/4	95,25	0,634	2,088	1,996	0,801	2,664	2,516	1,258	4,162	3,977	1,974	6,243	6,038	2,550	8,300	7,969
4	101,60	0,677	2,237	2,130	0,855	2,844	2,686	1,344	4,444	4,245	2,020	6,673	6,451	2,610	8,719	8,250

APÊNDICE B – Distância de Separação no Trilho

Tabela A. 2 – Distâncias de separação no trilho.

Posição	Distância (mm)
0d	Jato único
1d	1,38
2d	2,76
3d	4,14
4d	5,52
5d	6,9
6d	8,28
7d	9,66
8d	11,04
9d	12,42
10d	13,8
11d	15,18
12d	16,56
13d	17,94
14d	19,32
15d	20,7
16d	22,08
17d	23,46
18d	24,84
19d	26,22
20d	27,6

APÊNDICE C – Características dos Sensores de Radiação

Tabela A. 3 – Características dos radiômetros.

Radiômetro #1	
Empresa	MEDTHERM CORPORATION
Modelo	64-0.5-20/ZnSeW-1C-150
Ângulo de visão	150 graus
Janela	ZnSe
Absortividade	0,94
Incerteza	± 3%
Nível de saída em escala completa	8,37 mV a 2 kW/m ²
Responsividade	0,239 kW/m ² por mV
Funcionamento	Termopilha Schmidt-Boelter

Radiômetro #2	
Empresa	MEDTHERM CORPORATION
Modelo	64-0.5-20/ZnSeW-1C-150
Ângulo de visão	150 graus
Janela	ZnSe
Absortividade	0,94
Incerteza	± 3%
Nível de saída em escala completa	8,09 mV a 2 kW/m ²
Responsividade	0,2472 kW/m ² por mV
Funcionamento	Termopilha Schmidt-Boelter

Radiômetro #3	
Empresa	MEDTHERM CORPORATION
Modelo	64-0.5-20/ZnSeW-1C-150
Ângulo de visão	150 graus
Janela	ZnSe
Absortividade	0,94
Incerteza	± 3%
Nível de saída em escala completa	7,50 mV a 2 kW/m ²
Responsividade	0,2667 kW/m ² por mV
Funcionamento	Termopilha Schmidt-Boelter

APÊNDICE D – Resultados WMPS (Entrada: dados experimentais)

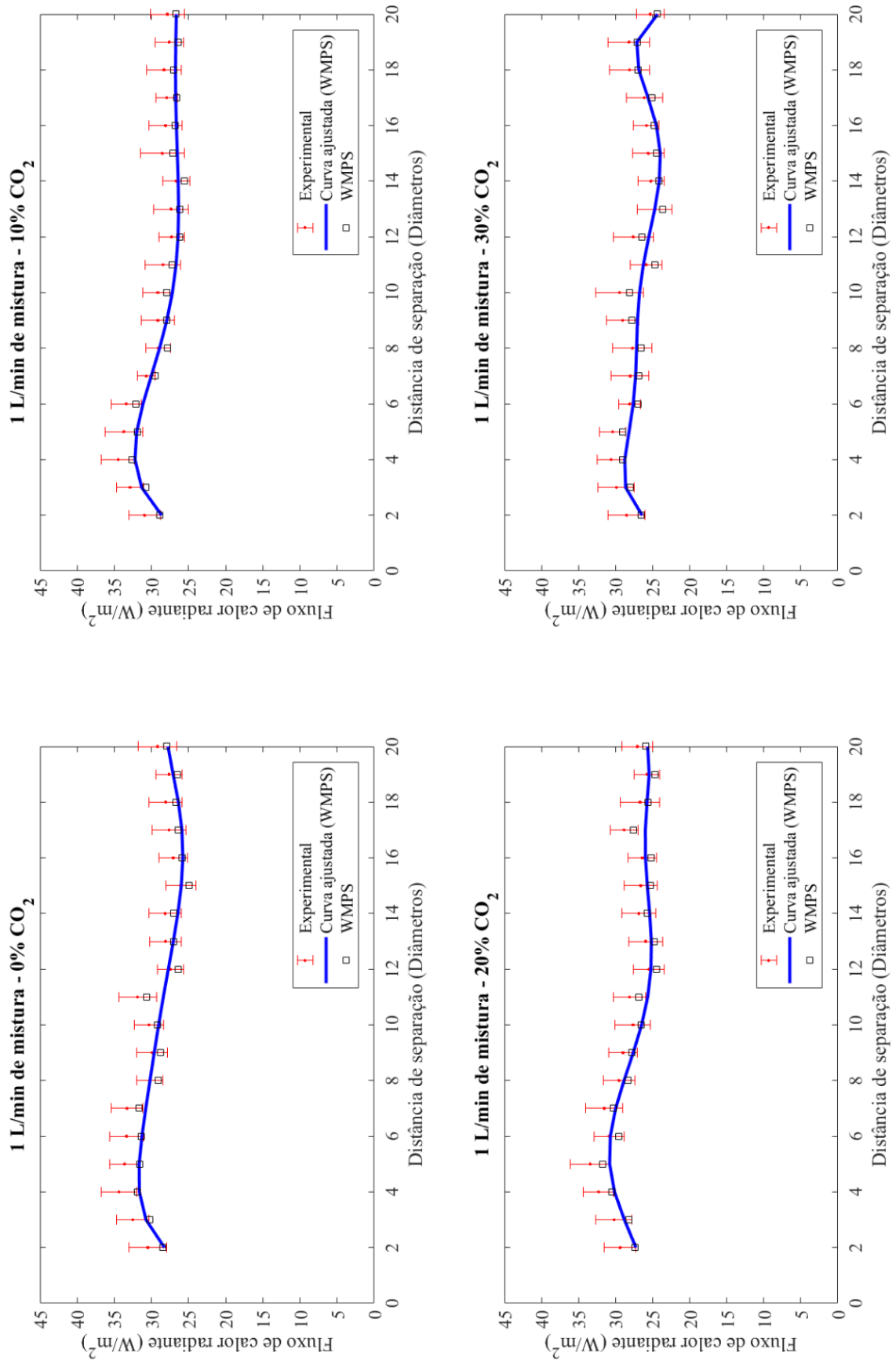


Figura A. 1 – Resultados do modelo WMPS (Entrada: dados experimentais).

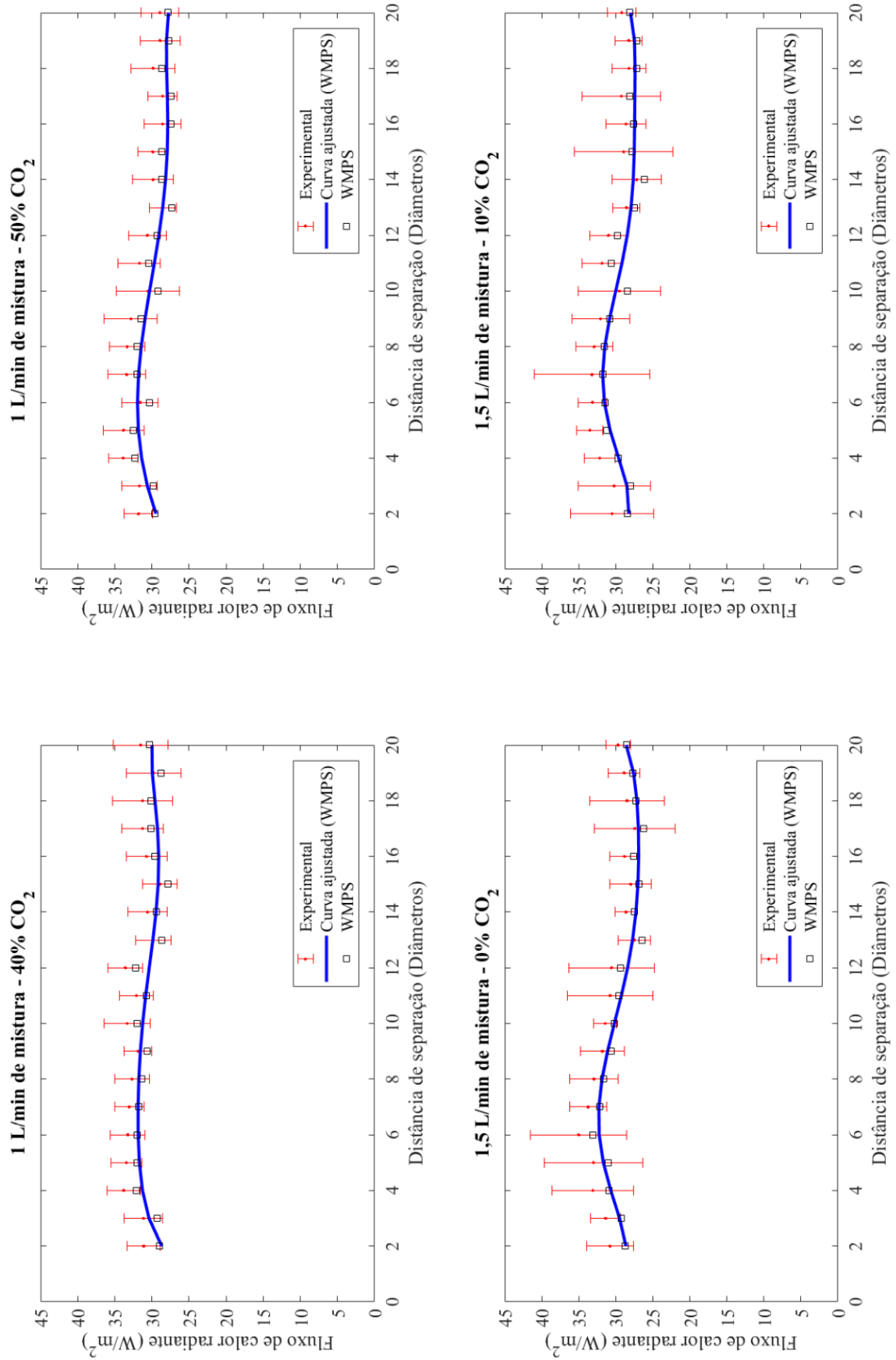


Figura A. 2 – Resultados do modelo WMPS (Entrada: dados experimentais).

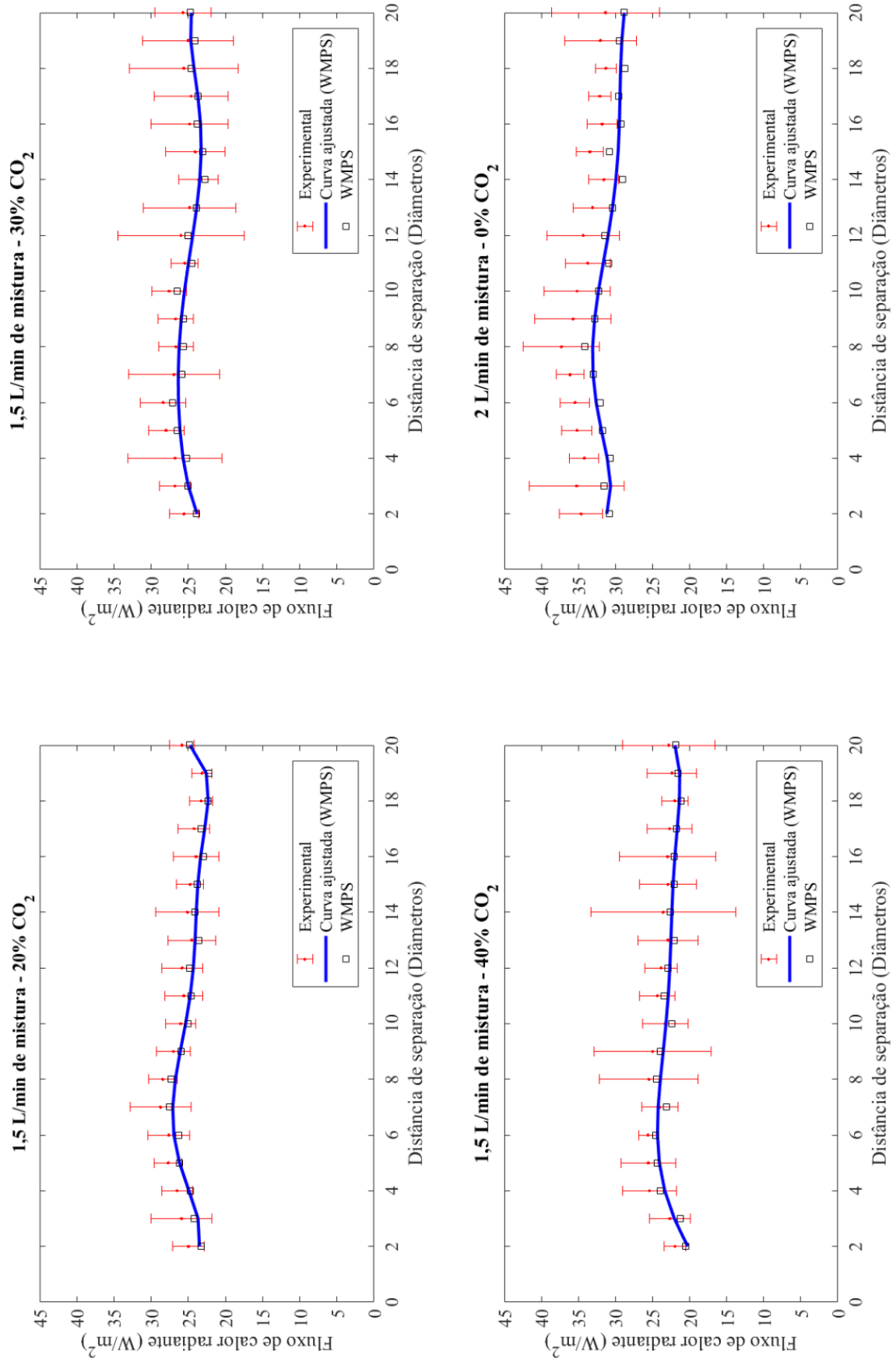


Figura A. 3 – Resultados do modelo WMPs (Entrada: dados experimentais).

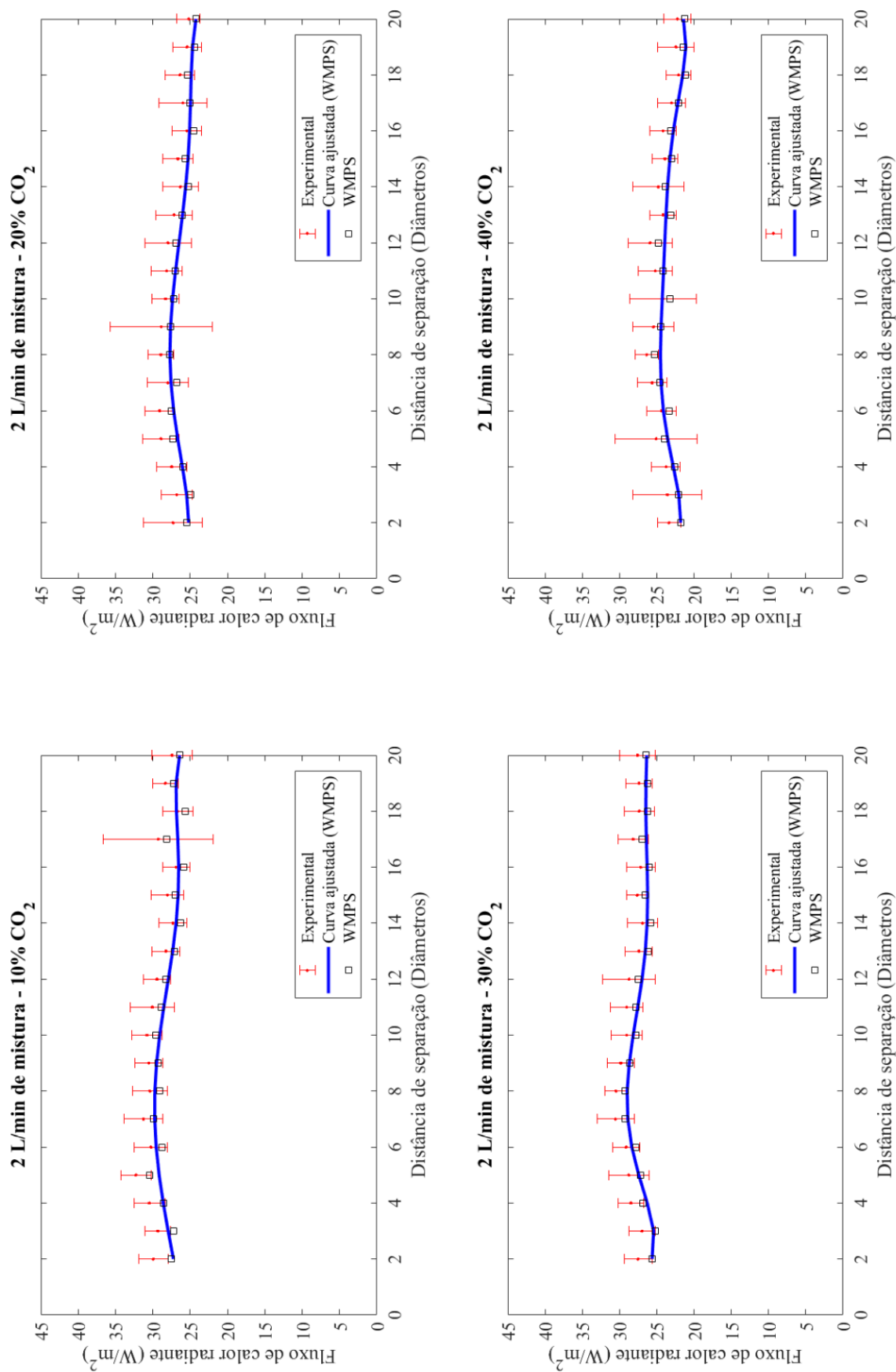


Figura A. 4 – Resultados do modelo WMPS (Entrada: dados experimentais).

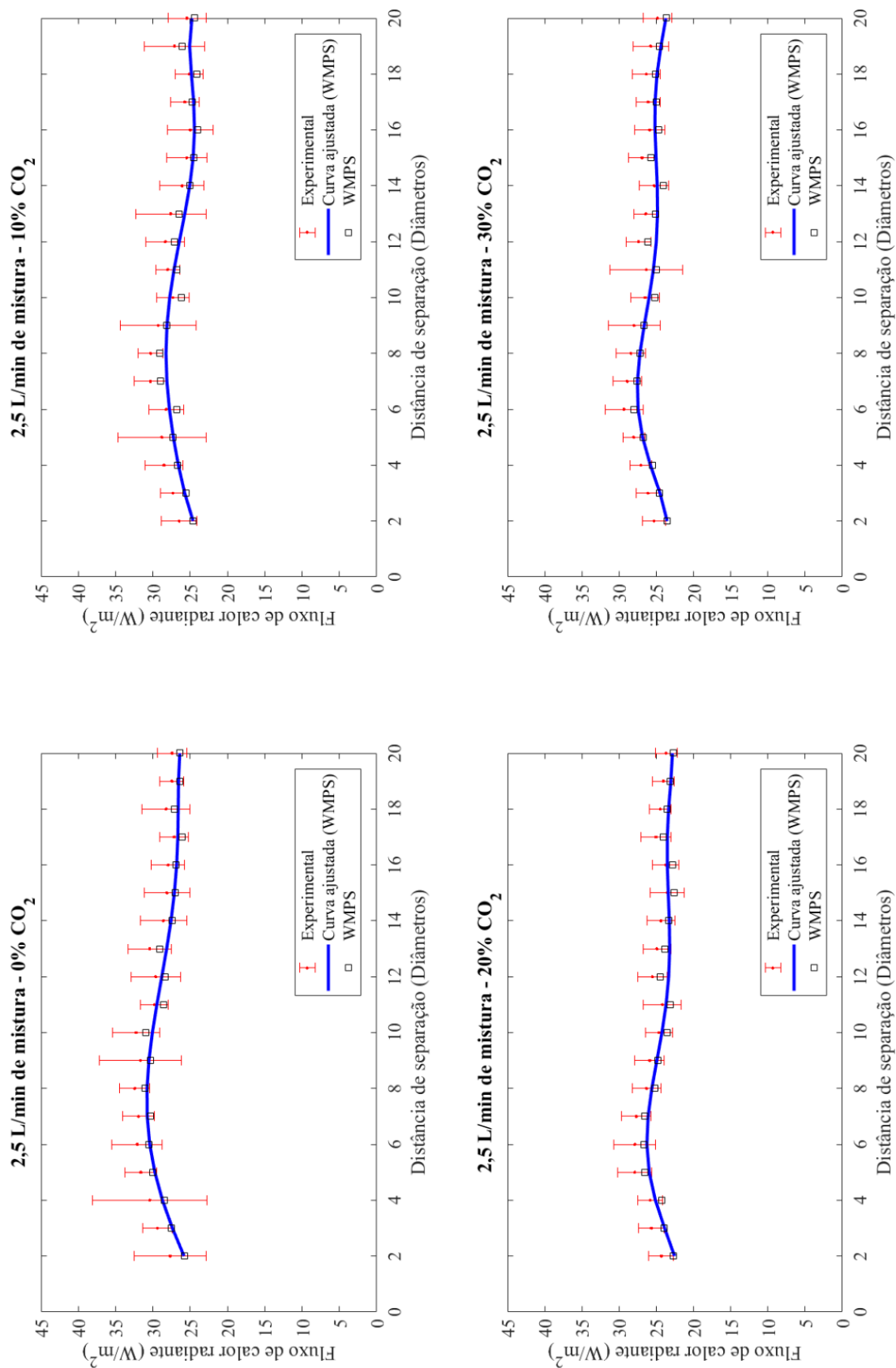


Figura A. 5 – Resultados do modelo WMPS (Entrada: dados experimentais).

APÊNDICE E – Resultados WMPS (Comparação entre modelos)

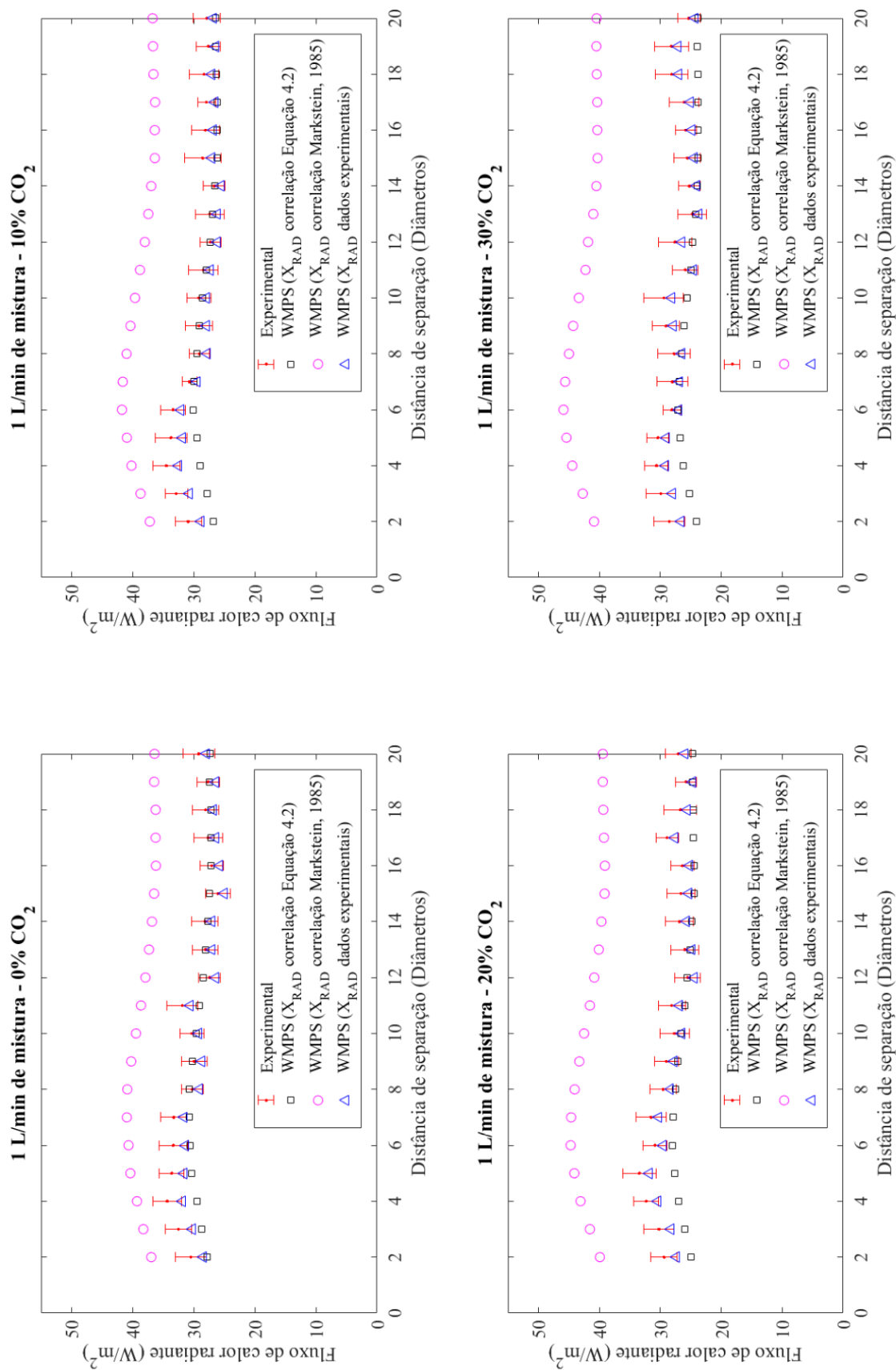


Figura A. 6 – Comparação entre os resultados dos modelos WMPS.

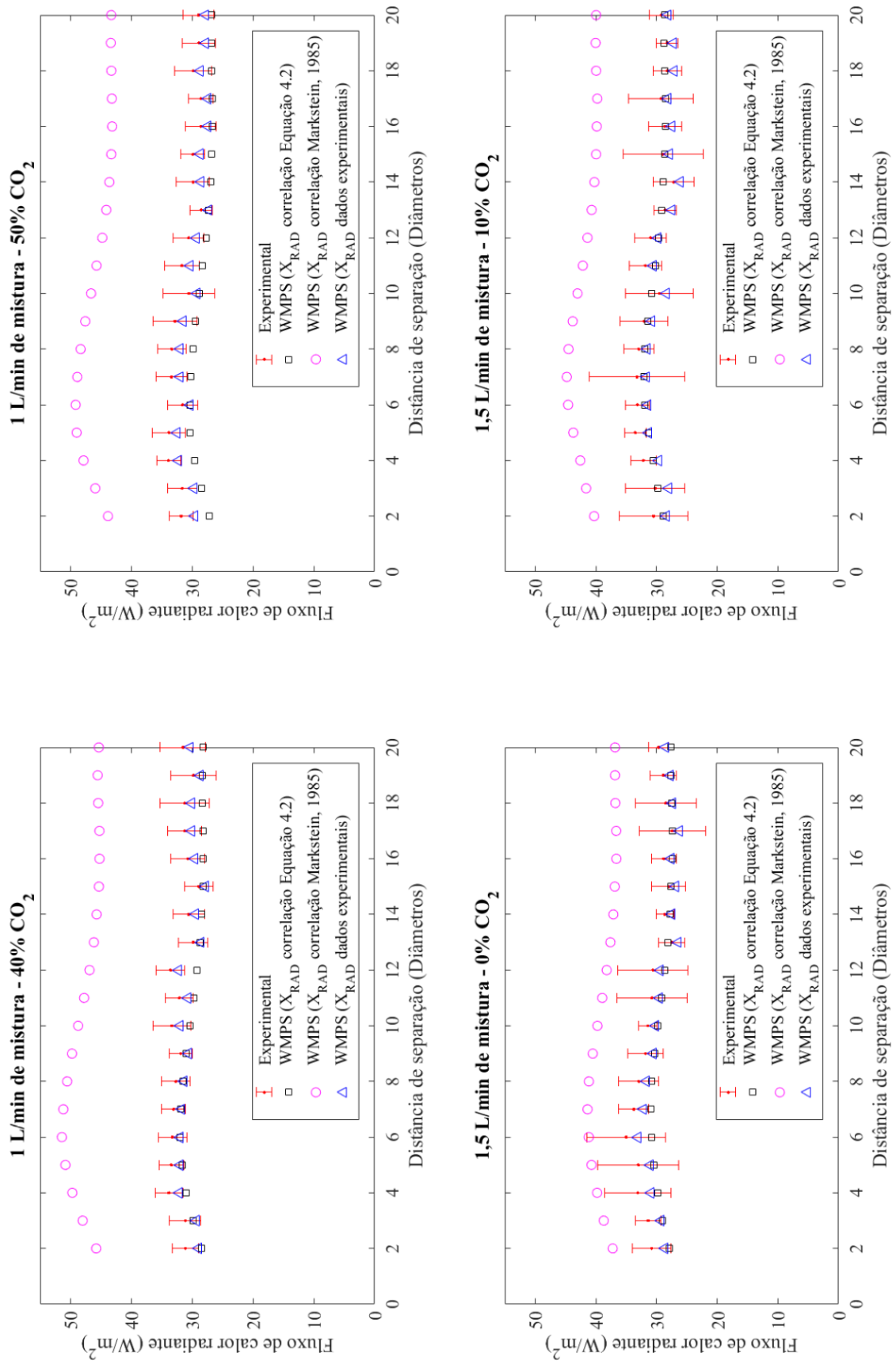


Figura A. 7 – Comparação entre os resultados dos modelos WMPS.

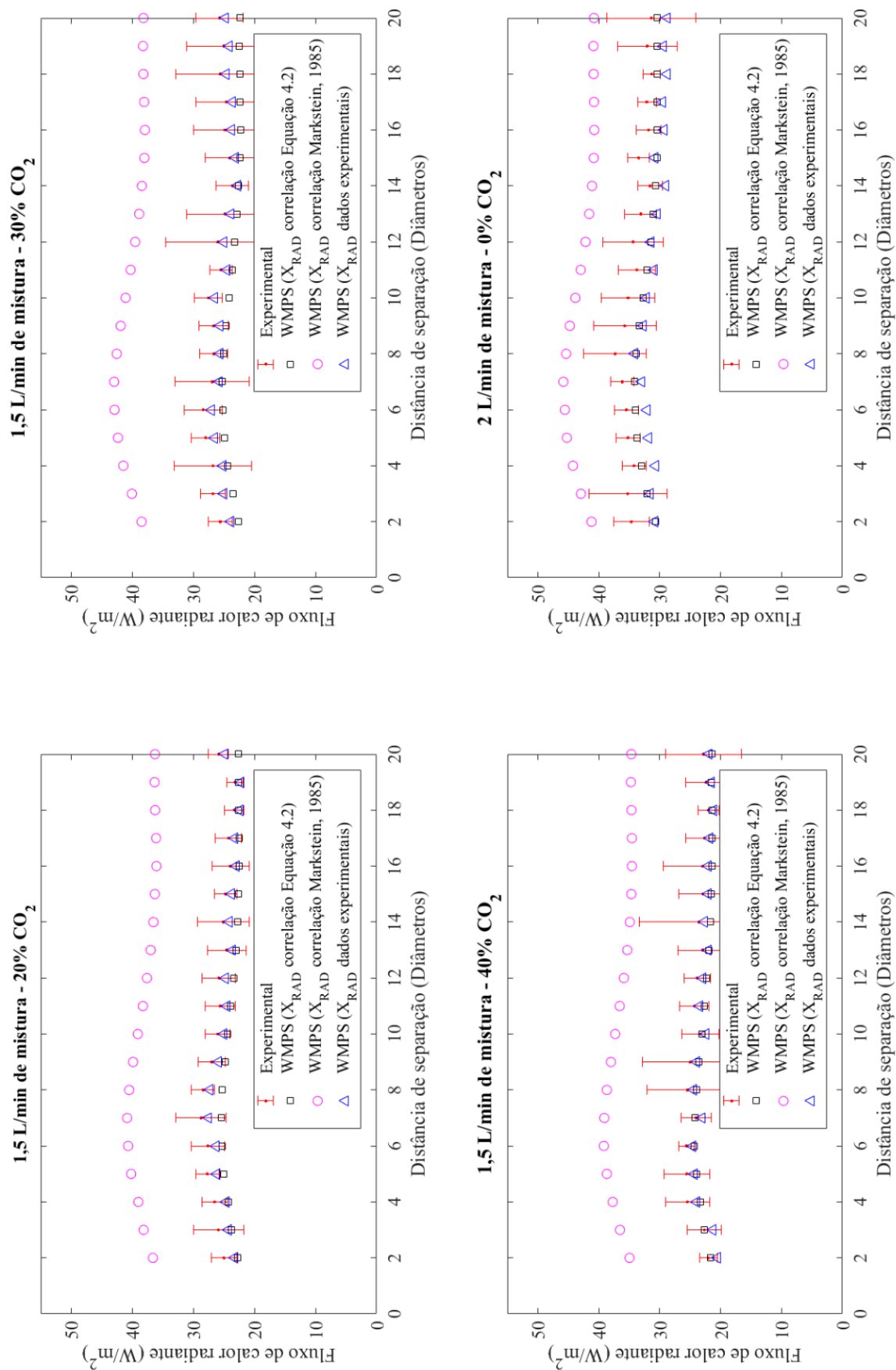


Figura A. 8 – Comparação entre os resultados dos modelos WMPS.

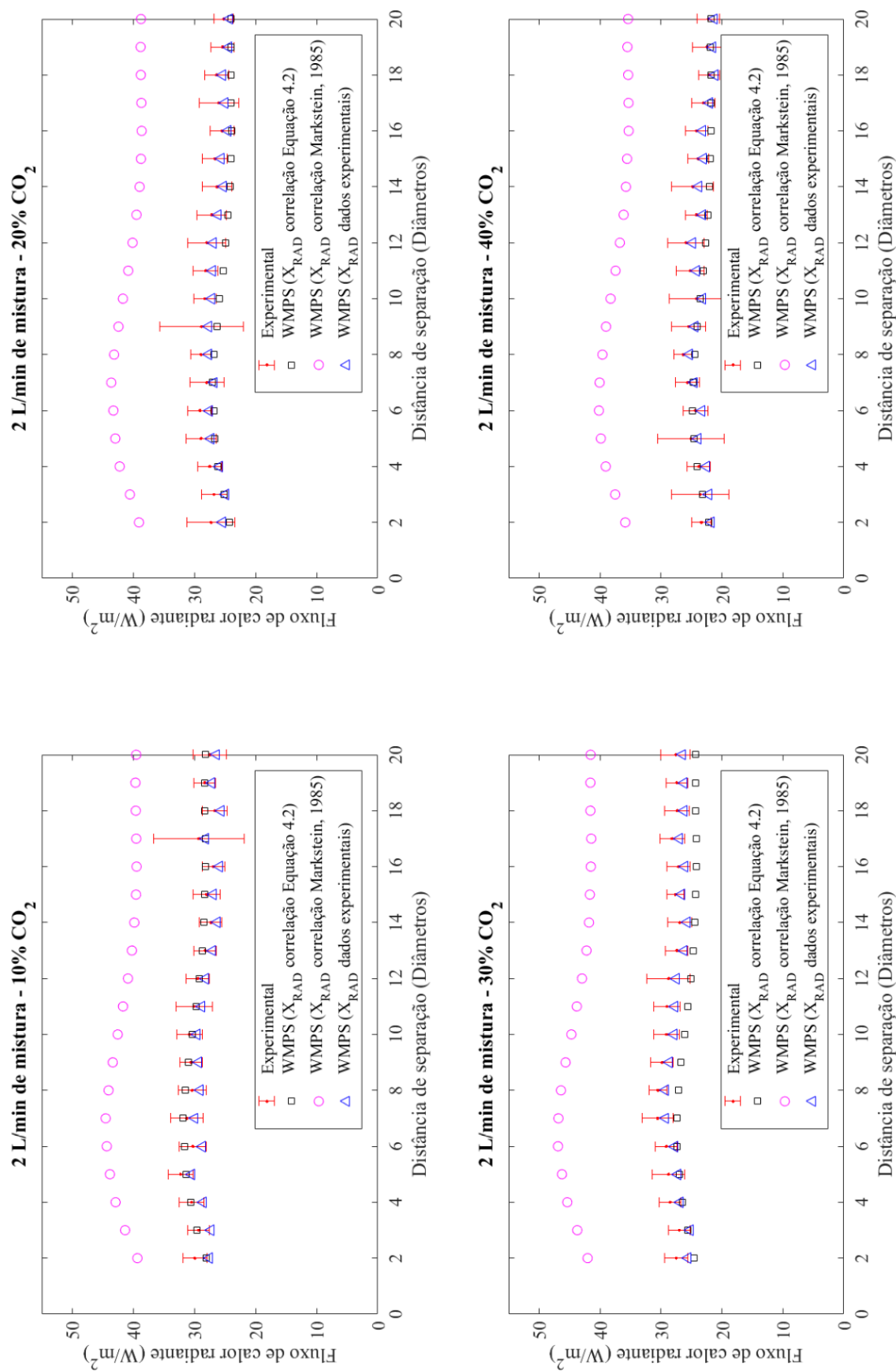


Figura A. 9 – Comparação entre os resultados dos modelos WMPS.

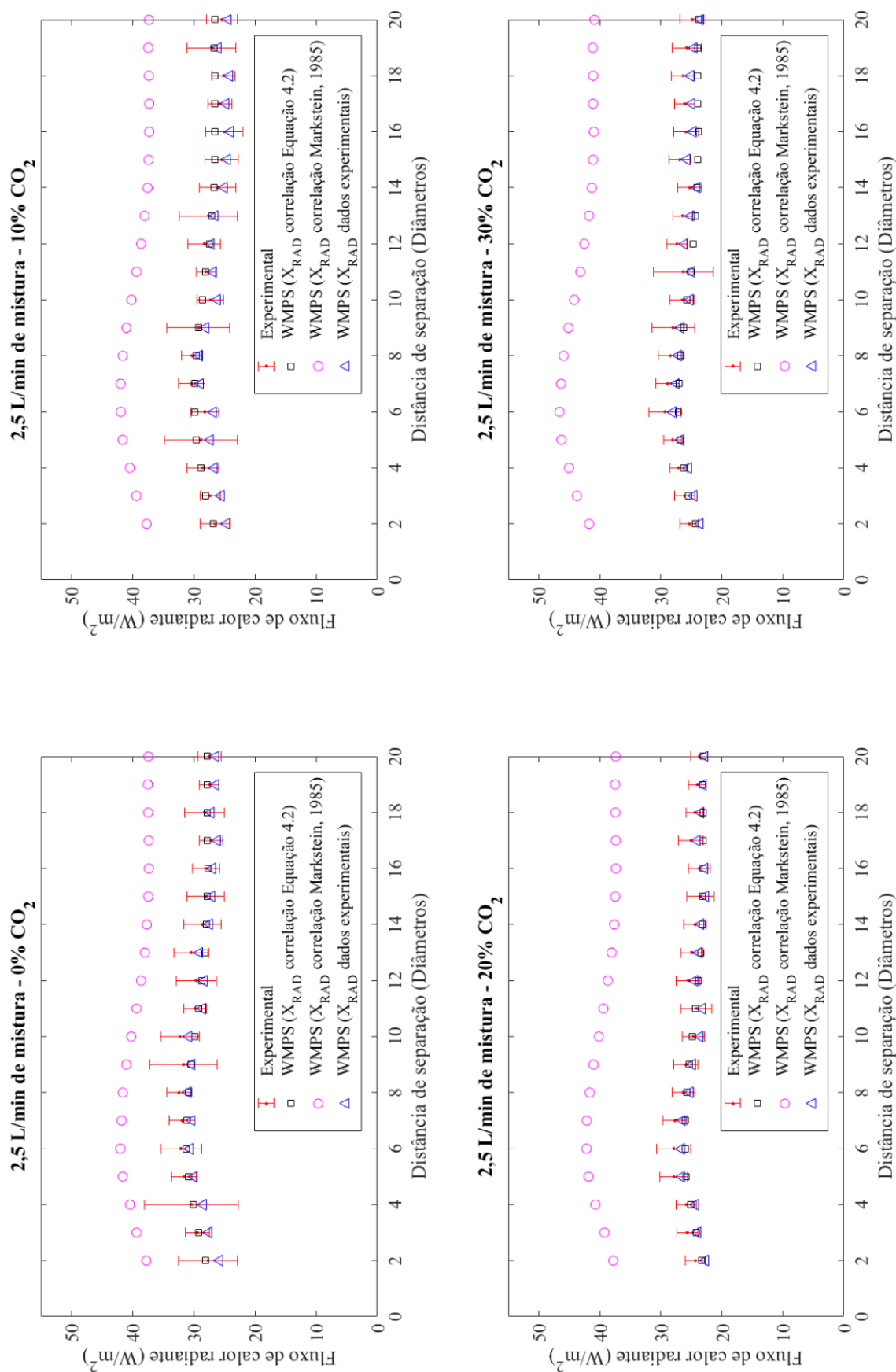


Figura A. 10 – Comparação entre os resultados dos modelos WMPS.

APÊNDICE F – Tabelas para WMPS modelados

Tabela A. 4 – Resultados do modelo WMPS utilizando a Equação 4.2.

WMPS (Fração radiante: Equação 4.2)

Vazão % CO ₂		Distância de separação entre os queimadores																				$\Delta_{\text{máximo}}$	$\Delta_{\text{médio}}$
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
1 l/min	WMPS	27,76	28,74	29,52	30,34	30,56	30,77	30,71	30,23	29,65	29,03	28,48	28,04	27,68	27,42	27,20	27,23	27,23	27,41	27,37	14,1%	4,20%	
	Exp.	30,49	32,52	34,36	33,62	33,35	33,28	30,25	29,91	30,32	31,87	27,44	28,10	28,14	26,05	27,07	27,62	28,08	27,63	29,18	16,1%	6,20%	
	WMPS	26,78	27,87	28,93	29,48	30,06	29,97	29,51	29,05	28,52	27,93	27,36	26,95	26,61	26,19	26,20	26,15	26,35	26,40	26,45	17,5%	9,29%	
	Exp.	30,92	32,87	34,49	33,72	33,39	30,70	29,08	29,14	28,44	27,30	27,36	26,66	26,55	28,10	27,94	28,31	27,62	27,87	15,7%	9,37%		
	WMPS	24,96	25,99	26,95	27,59	27,96	27,91	27,55	27,07	26,58	24,99	25,54	25,07	24,80	24,48	24,45	24,54	24,61	24,66	24,66	8,5%	6,66%	
	Exp.	29,38	30,21	32,30	33,42	30,87	31,53	29,54	29,00	27,66	28,11	25,49	25,95	26,86	26,61	26,40	28,87	26,71	25,76	27,07	14,7%	9,03%	
	WMPS	24,11	25,21	26,22	26,78	27,07	26,91	26,54	26,13	25,59	24,94	24,69	24,18	23,89	23,77	23,80	23,80	23,85	23,89	23,87	12,0%	5,75%	
	Exp.	28,51	29,90	30,63	30,40	28,09	28,03	27,72	29,06	29,44	25,89	27,61	24,72	25,24	25,59	25,83	26,13	28,12	28,18	25,32	6,4%	1,69%	
	WMPS	28,49	29,88	30,94	31,64	32,00	31,86	31,47	30,97	30,34	29,73	29,18	28,73	28,45	28,22	28,15	28,16	28,29	28,34	28,23	12,6%	8,14%	
	Exp.	31,11	31,13	33,82	33,44	33,25	33,05	32,69	31,86	33,35	32,09	33,58	29,81	30,58	28,92	30,72	31,27	31,25	29,79	31,52	12,8%	9,57%	
WMPS	27,12	28,41	29,60	30,30	30,40	30,24	29,90	29,43	28,83	28,28	27,70	27,29	26,98	26,78	26,69	26,72	26,78	26,83	26,79	8,3%	4,84%		
Exp.	31,80	31,65	33,88	33,82	31,58	33,41	33,34	32,83	30,52	31,69	30,59	28,52	29,85	29,89	28,59	28,56	28,59	28,89	28,92	11,3%	6,03%		
WMPS	27,86	28,97	29,78	30,48	30,81	30,96	30,80	30,32	29,74	29,15	28,61	28,15	27,78	27,61	27,41	27,43	27,53	27,57	27,57	6,2%	0,83%		
Exp.	30,79	31,38	33,08	33,01	35,01	33,74	32,95	31,81	31,46	30,76	30,58	27,51	28,62	27,98	28,82	27,42	28,48	28,88	29,69	11,2%	7,81%		
WMPS	28,89	29,83	30,52	31,35	31,97	32,12	31,92	31,42	30,85	30,22	29,67	29,18	28,86	28,65	28,58	28,52	28,65	28,71	28,65	12,0%	5,75%		
Exp.	30,49	30,22	32,16	33,50	33,16	33,22	32,92	32,05	29,53	31,84	30,97	28,56	27,19	28,94	28,63	29,27	28,22	28,26	29,22	8,3%	4,84%		
WMPS	22,80	23,75	24,29	25,03	25,33	25,44	25,23	24,83	24,35	23,83	23,42	23,04	22,76	22,61	22,45	22,48	22,58	22,64	22,60	11,3%	6,03%		
Exp.	24,99	25,91	26,52	27,72	27,62	28,74	28,43	27,01	26,02	25,60	25,82	24,55	25,11	24,76	23,95	24,24	23,28	23,15	25,86	6,2%	0,83%		
WMPS	22,60	23,53	24,35	24,87	25,20	25,23	24,99	24,61	24,14	23,65	23,21	22,83	22,57	22,33	22,28	22,35	22,43	22,46	22,42	11,2%	7,81%		
Exp.	25,59	26,80	26,78	27,99	28,38	26,94	26,68	26,72	27,59	25,49	25,98	24,84	23,60	24,06	24,82	24,62	25,60	25,03	25,72	12,0%	10,09%		
WMPS	21,65	22,62	23,37	23,96	24,26	24,22	23,96	23,55	23,11	22,65	22,23	21,88	21,62	21,47	21,41	21,42	21,46	21,52	21,47	12,4%	5,00%		
Exp.	21,99	22,67	25,43	25,57	25,61	24,03	25,47	25,00	23,31	24,34	23,85	22,94	23,57	22,92	22,97	22,68	22,01	22,38	22,81	7,4%	2,05%		
WMPS	30,71	32,01	32,98	33,73	33,97	34,15	33,81	33,37	32,69	32,03	31,44	31,00	30,65	30,43	30,37	30,40	30,45	30,48	30,40	5,8%	1,64%		
Exp.	34,64	35,24	34,20	35,19	35,45	36,13	37,31	35,73	35,19	33,75	34,36	33,09	31,58	33,46	31,80	32,11	31,31	32,02	31,35	7,9%	4,14%		
WMPS	28,10	29,54	30,65	31,32	31,68	31,81	31,48	30,98	30,40	29,78	29,20	28,74	28,46	28,26	28,19	28,23	28,29	28,33	28,24	12,0%	10,09%		
Exp.	29,95	29,32	30,47	32,26	30,25	31,27	30,38	30,55	30,80	30,07	29,45	28,24	27,32	28,05	26,89	29,27	26,69	28,32	27,45	12,0%	10,09%		
WMPS	24,22	25,15	26,18	26,63	26,82	27,04	26,75	26,30	25,85	25,31	24,87	24,47	24,16	24,02	23,95	23,98	24,04	24,06	24,02	12,4%	5,00%		
Exp.	27,29	26,79	27,49	28,91	29,10	27,99	28,93	28,86	28,29	28,16	27,97	27,17	26,32	26,65	25,46	25,99	26,35	25,42	25,20	7,4%	2,05%		
WMPS	24,56	25,56	26,51	27,03	27,40	27,36	27,12	26,68	26,12	25,60	25,10	24,67	24,43	24,35	24,26	24,22	24,30	24,30	24,28	5,8%	1,64%		
Exp.	27,51	26,99	28,48	28,75	29,11	30,54	30,48	29,82	29,07	29,04	28,72	27,40	26,92	27,63	27,15	28,17	27,35	27,39	27,59	7,9%	4,14%		
WMPS	22,12	23,14	24,09	24,58	24,78	24,71	24,42	24,06	23,60	23,10	22,66	22,28	22,05	21,93	21,77	21,79	21,82	21,90	21,83	11,2%	7,81%		
Exp.	23,36	23,58	23,76	25,08	24,35	25,63	26,35	25,45	24,16	25,19	25,89	24,17	24,80	23,91	24,16	23,03	22,09	22,44	22,24	12,4%	5,00%		
WMPS	28,06	29,24	30,04	30,92	31,21	31,05	30,92	30,48	29,88	29,24	28,69	28,23	28,00	27,82	27,75	27,77	27,83	27,87	27,82	7,4%	2,05%		
Exp.	27,69	29,42	30,41	31,62	32,10	31,93	32,44	31,68	32,26	29,81	29,63	30,44	28,59	28,11	27,97	27,15	28,23	27,47	27,45	5,8%	1,64%		
WMPS	26,84	28,03	28,79	29,63	29,85	29,87	29,62	29,19	28,60	28,02	27,47	27,07	26,73	26,61	26,53	26,53	26,58	26,65	26,57	7,9%	4,14%		
Exp.	26,48	27,31	28,51	28,81	28,22	30,33	30,31	29,28	27,31	28,01	28,32	27,62	26,10	25,46	25,00	25,73	25,13	27,11	25,44	11,2%	7,81%		
WMPS	23,32	24,21	25,13	25,82	26,02	26,00	25,70	25,31	24,77	24,31	23,87	23,48	23,22	23,12	23,06	23,07	23,10	23,13	23,08	12,4%	5,00%		
Exp.	24,32	25,66	25,81	27,89	27,87	27,67	26,30	25,89	24,65	24,31	23,87	23,48	23,32	23,32	23,32	23,32	23,32	23,32	23,32	7,9%	4,14%		
WMPS	24,29	25,44	26,20	26,92	27,10	26,96	26,71	26,25	25,71	25,12	24,74	24,30	24,02	23,90	23,83	23,91	23,89	23,93	23,78	11,2%	7,81%		
Exp.	25,32	26,11	27,07	28,05	29,35	28,91	28,42	27,98	26,50	26,33	27,38	26,41	25,28	26,92	25,89	26,10	26,34	25,76	24,85	6,28%			

Tabela A. 5 – Resultados do modelo WMPS utilizando a correlação de Markstein, 1985.

WMPS (Fração radiante: Markstein, 1985)

		Distância de separação entre os queimadores																				$\Delta_{máximo}$	$\Delta_{médio}$
Vazão % CO ₂		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
0	WMPS	36,95	38,25	39,29	40,38	40,67	40,96	40,88	40,24	39,46	38,64	37,91	37,33	36,84	36,49	36,20	36,25	36,24	36,48	36,43	28,6%	21,58%	
	Exp.	30,49	32,52	34,36	33,62	33,35	33,28	30,25	29,91	30,32	31,87	27,44	28,10	28,14	26,05	27,07	27,62	28,08	27,63	29,18	29,1%	23,25%	
	WMPS	37,20	38,71	40,19	40,95	41,76	41,62	41,00	40,36	39,62	38,80	37,43	36,96	36,37	36,39	36,33	36,30	36,60	36,67	36,74	37,6%	31,04%	
	Exp.	30,92	32,87	34,49	33,72	33,39	30,70	29,08	29,14	29,14	29,14	28,44	27,30	26,66	28,55	28,10	27,94	28,31	27,62	27,87	39,7%	34,90%	
	WMPS	39,91	41,55	43,08	44,10	44,70	44,63	44,05	43,28	42,50	41,55	40,83	40,08	39,65	39,14	39,08	39,24	39,34	39,43	39,42	36,2%	33,32%	
	Exp.	29,38	30,21	32,30	33,42	30,87	31,53	29,54	29,00	27,66	28,11	25,49	25,95	26,86	26,61	26,40	28,87	26,71	25,76	27,07	35,8%	32,01%	
	WMPS	40,86	42,72	44,44	45,39	45,88	45,61	44,97	44,29	43,37	42,27	41,85	40,99	40,49	40,29	40,33	40,34	40,43	40,49	40,46	24,1%	20,58%	
	Exp.	28,51	29,90	30,63	30,40	28,09	28,03	27,72	29,06	29,44	25,89	27,61	24,72	25,24	25,59	25,83	26,13	28,12	28,18	25,32	31,4%	27,06%	
	WMPS	45,78	48,00	49,70	50,84	51,42	51,18	50,55	49,75	48,75	47,76	46,88	46,16	45,71	45,33	45,23	45,24	45,45	45,54	45,35	36,3%	32,22%	
	Exp.	31,11	31,13	33,82	33,44	33,25	33,05	32,69	31,86	33,35	32,09	33,58	29,81	30,58	28,92	30,72	31,27	31,25	29,79	31,52	38,6%	35,06%	
10	WMPS	43,85	45,92	47,86	48,99	49,15	48,89	48,34	47,57	46,61	45,72	44,77	44,12	43,61	43,30	43,16	43,20	43,29	43,38	43,31	38,5%	34,89%	
	Exp.	31,80	31,65	33,88	33,82	31,58	33,41	33,34	32,83	30,52	31,69	30,59	28,52	29,85	29,89	28,59	28,56	29,85	28,89	28,92	23,3%	20,65%	
	WMPS	37,21	38,70	39,79	40,72	41,16	41,36	41,14	40,51	39,73	38,95	38,22	37,60	37,11	36,88	36,62	36,64	36,78	36,84	36,83	32,6%	29,16%	
	Exp.	30,79	31,38	33,08	33,01	35,01	33,74	32,95	31,81	31,46	30,76	30,58	27,51	28,62	27,98	28,82	27,42	28,48	28,88	29,69	35,8%	32,01%	
	WMPS	40,29	41,60	42,56	43,72	44,58	44,79	44,51	43,82	43,02	42,15	41,38	40,70	40,24	39,96	39,85	39,77	39,95	40,04	39,96	24,1%	20,58%	
	Exp.	30,49	30,22	32,16	33,50	33,16	33,22	32,92	32,05	29,53	31,84	30,97	28,56	27,19	28,94	28,63	29,27	28,22	28,26	29,22	31,4%	27,06%	
	WMPS	36,62	38,15	39,01	40,19	40,68	40,86	40,52	39,88	39,10	38,26	37,60	36,99	36,55	36,32	36,05	36,11	36,27	36,35	36,29	36,3%	32,22%	
	Exp.	24,99	25,91	26,52	27,72	27,62	28,74	28,43	27,01	26,02	25,60	25,82	24,55	25,11	24,76	23,95	24,24	23,28	23,15	25,86	38,6%	35,06%	
	WMPS	38,48	40,08	41,47	42,35	42,91	42,97	42,55	41,91	41,10	40,28	39,52	38,87	38,43	38,03	37,94	38,06	38,19	38,25	38,18	38,5%	34,89%	
	Exp.	25,59	26,80	26,78	27,99	28,38	26,94	26,68	26,07	27,50	26,56	35,88	35,32	34,90	34,65	34,52	34,62	34,56	34,63	34,72	34,64	23,3%	20,65%
20	WMPS	34,95	36,51	37,71	38,67	39,16	39,09	38,66	38,00	37,30	36,56	35,88	35,32	34,90	34,65	34,52	34,62	34,56	34,63	34,72	34,64	32,6%	29,16%
	Exp.	21,99	22,67	25,43	25,57	25,61	24,03	25,47	25,00	23,31	24,34	23,85	22,94	23,57	22,92	22,92	22,68	22,01	22,38	22,81	35,8%	32,76%	
	WMPS	41,18	42,93	44,23	45,23	45,55	45,80	45,35	44,75	43,84	42,96	42,16	41,57	41,10	40,81	40,73	40,77	40,84	40,88	40,77	38,3%	35,00%	
	Exp.	34,64	35,24	34,20	35,19	35,45	36,13	37,31	35,73	35,19	33,75	34,36	33,09	31,58	33,46	31,80	32,11	31,31	32,02	31,35	39,4%	35,07%	
	WMPS	39,34	41,35	42,91	43,84	44,35	44,53	44,06	43,37	42,56	41,69	40,88	40,23	39,85	39,56	39,47	39,52	39,60	39,66	39,53	27,4%	24,16%	
	Exp.	29,95	29,32	30,47	32,26	30,25	31,27	30,38	30,55	30,80	30,07	29,45	28,24	27,32	28,05	26,89	29,27	26,69	28,32	27,45	33,0%	30,02%	
	WMPS	39,08	40,57	42,24	42,95	43,27	43,62	43,15	42,43	41,71	40,84	40,13	39,48	38,98	38,76	38,64	38,68	38,78	38,81	38,76	38,6%	35,63%	
	Exp.	27,29	26,79	27,49	28,91	29,10	27,99	28,93	28,86	28,29	28,16	27,97	27,17	26,32	26,65	25,46	25,99	26,35	25,42	25,20	40,0%	37,94%	
	WMPS	42,03	43,73	45,37	46,24	46,89	46,82	46,41	45,65	44,70	43,81	42,95	42,21	41,81	41,66	41,50	41,44	41,58	41,58	41,55	27,4%	24,16%	
	Exp.	27,51	26,99	28,48	28,75	29,11	30,54	30,48	29,82	29,07	29,04	28,72	27,40	26,92	27,63	27,15	28,17	27,35	27,39	27,59	33,0%	30,02%	
30	WMPS	35,86	37,51	39,06	39,86	40,18	40,07	39,60	39,01	38,27	37,45	36,75	36,13	35,74	35,55	35,30	35,33	35,38	35,51	35,39	38,3%	35,00%	
	Exp.	23,36	23,58	23,76	25,08	24,35	25,63	26,35	25,45	24,16	25,19	25,89	24,17	24,80	23,91	24,16	23,03	22,09	22,44	22,24	39,4%	35,07%	
	WMPS	37,77	39,35	40,44	41,62	42,01	41,80	41,62	41,03	40,22	39,36	38,62	38,00	37,69	37,45	37,35	37,38	37,46	37,52	37,44	27,4%	24,16%	
	Exp.	27,69	29,42	30,41	31,62	32,10	31,93	32,44	31,68	32,26	29,81	29,63	30,44	28,59	28,11	27,97	27,15	28,23	27,47	27,45	33,0%	30,02%	
	WMPS	37,72	39,39	40,47	41,64	41,95	41,98	41,62	41,02	40,19	39,38	38,62	38,05	37,57	37,40	37,29	37,29	37,35	37,45	37,34	38,6%	35,63%	
	Exp.	26,48	27,31	28,51	28,81	28,22	30,33	29,28	27,31	28,01	28,32	27,62	26,10	25,46	25,00	25,73	25,13	25,11	25,44	40,0%	37,94%		
	WMPS	37,79	39,24	40,72	41,84	42,17	42,14	41,65	41,02	40,15	39,40	38,68	38,05	37,63	37,47	37,37	37,38	37,43	37,48	37,40	27,4%	24,16%	
	Exp.	24,32	25,66	25,81	27,89	27,87	27,67	26,30	25,89	24,65	24,18	25,52	24,93	24,39	23,52	23,72	25,05	24,46	24,05	23,69	33,0%	30,02%	
	WMPS	41,76	43,74	45,05	46,29	46,59	46,36	45,92	45,14	44,20	43,20	42,54	41,77	41,30	41,10	40,97	41,10	41,08	41,14	40,88	38,6%	35,63%	
	Exp.	25,32	26,11	27,07	28,05	29,35	28,91	28,42	27,98	26,50	26,33	27,38	26,41	25,28	26,92	25,89	26,10	26,34	25,76	24,85	40,0%	37,94%	