

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

APLICAÇÃO DA ANÁLISE INVERSA PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DO
MODELO DE MÚLTIPLAS FONTES PONDERADAS PARA ESTIMAR O FLUXO DE
CALOR DE UMA CHAMA DO TIPO JATO LAMINAR DE METANO-AR

por

Rodrigo Brenner Miguel

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2015

APLICAÇÃO DA ANÁLISE INVERSA PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DO
MODELO DE MÚLTIPLAS FONTES PONDERADAS PARA ESTIMAR O FLUXO DE
CALOR DE UMA CHAMA DO TIPO JATO LAMINAR DE METANO-AR

por

Rodrigo Brenner Miguel
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Aprovada por:

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno Departamento Interdisciplinar/UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 29, outubro de 2015

Dedico este trabalho à Isabela e à Heloísa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Heloísa, por todo apoio e incentivo nas horas difíceis e de cansaço, e pela paciência e compreensão ao tempo dedicado ao mestrado, sua ajuda foi fundamental para esta conquista.

À minha filha Isabela que, apesar de não saber ainda, me traz muita alegria e faz com que eu me dedique mais.

Aos meus pais Alaidete e Homero, e minha irmã Paula pela compreensão nos momentos que tive que me ausentar da presença deles e me dedicar aos estudos.

Agradeço ao Professor Francis H. R. França, pela confiança depositada em mim, por me orientar neste trabalho e nos caminhos a seguir na formação acadêmica, pela amizade, paciência e dedicação.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Radiação Térmica, que me incentivaram e auxiliaram. Com enfoque ao colega Rogério pela grande ajuda na dissertação e por tornar o LRT um ótimo ambiente de trabalho. Ao colega Bruno pela amizade e discussões sobre o trabalho e sobre as mais variadas áreas da engenharia.

Ao colega Isaías por disponibilizar os dados cruciais para o trabalho, e a todos que contribuíram direta e indiretamente.

Aos membros da banca examinadora, pela atenção dada ao trabalho e sugestões indispensáveis para sua melhoria.

Ao CNPq pela bolsa de estudos.

RESUMO

A estimativa acurada do fluxo de calor radiativo na região próxima à chama do tipo jato não pré-misturada é necessária para garantir a segurança de pessoas e equipamentos em caso de vazamentos ou processo de descarte na indústria de petróleo e gás. A simulação computacional dos fenômenos físicos envolvidos na transferência de calor e combustão do processo tem alto custo computacional. No presente trabalho é apresentado um estudo para o emprego do modelo de múltiplas fontes ponderadas para a estimativa do fluxo de calor radiativo no campo próximo à chama. O modelo matemático simplificado tem baixo custo computacional e consiste em representar a transferência de calor radiativa por fontes pontuais distribuídas no eixo central da chama. Cada fonte tem um peso proporcional à contribuição de cada região discretizada da chama na transferência de calor por radiação. Para determinar o peso de cada fonte foi utilizada a análise inversa pelo método da Otimização Extrema Generalizada, no qual o fluxo de calor é dado de entrada enquanto o peso de cada fonte é dado de saída. Como dado de entrada foi utilizado o fluxo de calor radiativo medido experimentalmente de um conjunto de 12 chamas, com potência entre 0,139 e 0,554 kW. A análise inversa foi utilizada para recuperar os pesos, e a fração radiante, que geram o fluxo de calor radiativo com maior compatibilidade com os dados experimentais em três abordagens. A primeira abordagem consiste em aplicar a análise inversa em cada chama separadamente, e depois de obtidos os pesos correlaciona-los com a potência da chama. Na aplicação do método em cada chama individualmente, o desvio máximo do resultado do modelo com os dados experimentais é de 5%. Em uma segunda abordagem, foi utilizada a análise inversa para obter diretamente os coeficientes de uma função entre os pesos do modelo e a potência da chama e seu comprimento estimado, o desvio máximo encontrado é de 18,6%. Na terceira abordagem, a análise inversa foi utilizada novamente para encontrar os coeficientes da função que correlaciona a potência da chama com parâmetros do modelo, e neste caso foi utilizado o comprimento experimental da chama para posicionar as fontes pontuais. Para o caso em que sete fontes foram posicionadas a 2,25 vezes o comprimento da chama medido experimentalmente, o desvio máximo observado foi de 8,6% e o desvio médio de 2,9%.

Palavras-chave: análise inversa; modelo de radiação; chamas não pré-misturadas; múltiplas fontes ponderadas.

ABSTRACT

The accurate approximation of radiative heat flux on non-premixed flame in the region adjacent to the flame is required to guarantee the staff and machinery safety on oil and gas industry in cases of fuel leaking or disposal process. The physical phenomena involved on heat transfer and combustion has high computational cost in numerical simulation, in accidental leaking cases it is prohibitive. In the present study it is presented an application of Weighted Multi-Point Sources model to predict the radiative heat flux in the region adjacent to the flame. The simplified mathematical model has low computational cost and simulates the radiative heat transfer by punctual sources placed at the flame axis. Each source has the weight proportional to heat transfer contribution by each flame portion. To set each source's weight, it was used the inverse analysis by the Generalized Extremal Optimization. In inverse analysis the radiative heat fluxes are the input data while the weight of each source is the sought variable. As input data are used the radiative heat fluxes measured from a set of 12 flames, with power between 0.139 and 0.554 kW. The inverse analysis was used to recover the weights, and the fraction of heat radiated, which generate radiative heat fluxes with greater compatibility with the experimental data on three approaches. The first approach is to apply the inverse analysis in each flame separately, obtain the weights and then correlates them with the flame power. In method application for each flame, the maximum deviation between model outcome and experimental data was less than 5%. In a second approach, it was used the inverse analysis to directly obtain the coefficients of a function between the model's parameters and the flame's power. When used just the flame power as model input parameter to distributes the sources and predict the heat flux, the maximum deviation is 18.6%. In the third approach, the inverse analysis was again used to find the coefficients of the function which correlates the flame power with model parameters, in this case was used the experimental flame length for positioning the point sources. For the case in which seven sources are positioned at 2.25 times the experimental length of the flame, the maximum deviation observed was 8.6% and the mean deviation of 2.9%.

Keywords: Inverse Analysis, Radiation Model, Non Pre-Mixed Flames, Weighted Multi-Point Source Model

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Revisão Bibliográfica	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Organização do Trabalho.....	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1	Radiação Térmica	6
2.2	Parâmetros Característicos da Chama	9
2.3	Modelo de Fonte Pontual Única (SPS).....	11
2.4	Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas (WMP)	13
2.5	Fração Radiante	15
2.6	Análise Inversa	18
2.7	Dados Experimentais	21
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO	24
3.1	Definição do Problema	25
3.2	Detalhamento do Processo de Solução	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1	Avaliação do Método Inverso com o Modelo WMP.....	30
4.2	Determinação dos Parâmetros do Modelo	34
4.3	Correlação entre Pesos e Parâmetros das Chamas com Comprimento Estimado.....	40
4.4	Correlação entre Pesos e Parâmetros das Chamas com Comprimento Medido	45
5	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	APÊNDICE A – PESOS E FRAÇÃO RADIANTE SEM CORRELAÇÃO	64
	APÊNDICE B – ANÁLISE COM COMPRIMENTO ESTIMADO	68
	APÊNDICE C – ANÁLISE COM COMPRIMENTO EXPERIMENTAL	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Plataforma North Rankin A, North West Shelf Gas, Austrália [Freeimages, 2005]	2
Figura 2.1 – Espectro da radiação eletromagnética [Adaptada de Modest, 2003]	7
Figura 2.2 – Espectro da seção transversal de absorção do H ₂ O na temperatura de 1000 K e pressão parcial de 0,1 atm [Dorigon, 2012]	8
Figura 2.3 – Modelo de fonte pontual única	12
Figura 2.4 – Modelo de múltiplas fontes ponderadas	13
Figura 2.5 – Comprimento da distribuição das fontes	14
Figura 2.6 – Volume de controle cilíndrico	16
Figura 2.7 – Limites dos dados experimentais de C* [Sivathanu e Gore, 1993]	17
Figura 2.8 – Variáveis de projeto em uma sequência binária [adaptado De Sousa et al., 2003]	19
Figura 2.9 – Esquema construtivo da bancada experimental [adaptado de Machado, 2015]	22
Figura 2.10 – Vista em corte do queimador Santoro adaptado [Machado, 2015]	23
Figura 3.1 – Fluxo de calor radiativo medido da chama 1 [Machado, 2015]	26
Figura 4.1 – Distribuição dos pesos das fontes, w , caso com 7 fontes no método direto	31
Figura 4.2 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η	31
Figura 4.3 – Caso com 7 fontes; a) Fluxo de calor radiativo; b) Desvio	32
Figura 4.4 – Distribuição dos pesos das fontes, w , caso com 20 fontes no método direto	33
Figura 4.5 – Caso com 20 fontes; a) Fluxo de calor radiativo; b) Desvio	34
Figura 4.6 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η	35
Figura 4.7 – a) Fluxo de calor a 0,7 m do eixo da chama de 0,25 kW; b) Desvio	35
Figura 4.8 – Desvio para a chama de 0,25 kW com diferentes valores de β	36
Figura 4.9 – Distribuição do fluxo radiativo, chama de 0,25kW com β igual a 1,0 e 2,0	37
Figura 4.10 – a) Desvio médio b) Desvio máximo pelo número de fontes	38
Figura 4.11 – Tempo computacional normalizado com o modelo de 7 fontes	39
Figura 4.12 – w_1 em função da potência da chama	40
Figura 4.13 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η	42
Figura 4.14 – Desvio médio pelo desvio do comprimento de chama	45
Figura 4.15 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η	47
Figura 4.16 – Distribuição dos pesos das chamas 1,4,8 e 12	48

Figura 4.17 – Fração radiante em função da potência da chama.....	49
Figura 4.18 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 8	51
Figura 4.19 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 2	52
Figura 4.20 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 11	53
Figura 4.21 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 6	53
Figura 4.22 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 7	54
Figura A.1 – w_2 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	64
Figura A.2 – w_3 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	64
Figura A.3 – w_4 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	65
Figura A.4 – w_5 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	65
Figura A.5 – w_6 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	66
Figura A.6 – w_7 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	66
Figura A.7 – X_R em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente ...	67
Figura B.1 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 1	68
Figura B.2 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 2	68
Figura B.3 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 3	69
Figura B.4 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 4	69
Figura B.5 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 5	70
Figura B.6 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 6	70
Figura B.7 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 7	71
Figura B.8 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 8	71
Figura B.9 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 9	72
Figura B.10 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 10	72
Figura B.11 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 11	73
Figura B.12 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 12	73
Figura C.1 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 1 ...	74
Figura C.2 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 3 ...	75
Figura C.3 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 4 ...	75
Figura C.4 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 5 ...	76
Figura C.5 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 9 ...	76
Figura C.6 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 10 ...	77
Figura C.7 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 12 ...	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados experimentais do conjunto de chamadas [Machado, 2015]	26
Tabela 4.1 – Desvios entre resultados do modelo inverso e dados experimentais para o conjunto de doze chamadas	38
Tabela 4.2 – Coeficientes obtidos pela análise inversa com L_f estimado	42
Tabela 4.3 – Desvios médios dos modelos com os dados experimentais, L_f estimado	43
Tabela 4.4 – Desvio máximo do modelo WMP inverso, linear e SPS, L_f estimado.....	44
Tabela 4.5 – Comprimento de chamada experimental	46
Tabela 4.6 – Desvio máximo em função de J (linhas) e β (colunas)	46
Tabela 4.7 – Coeficientes obtidos pela análise inversa com L_f experimental.....	47
Tabela 4.8 – Desvios médios dos modelos com os dados experimentais, L_f experimental.....	50
Tabela 4.9 – Desvio máximo do modelo WMP inverso, linear e SPS, L_f experimental	51
Tabela C.1 – Desvio médio em função de J (linhas) e β (colunas).....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Instituto Americano de Petróleo
CW	Modelo do Número de Onda Acumulado
GEO	Método da Otimização Extrema Generalizada
SLW	Modelo da Soma Ponderada de Gases Cinzas Baseada em Linhas Espectrais
SPS	Modelo de Fonte Pontual Única
WMP	Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas
WSGG	Modelo da Soma Ponderada de Gases Cinzas
τ -EO	Método da Otimização Extrema com Parâmetro Ajustável
PCI	Poder Calorífico Inferior do Combustível [kJ/kg]
RAN	Número Aleatório

LISTA DE SÍMBOLOS

A_j	Coeficiente da Equação de Segunda Ordem
B_j	Coeficiente da Equação de Segunda Ordem
C	Configuração dos Bits na GEO
C^*	Coeficiente Adimensional para Corrigir a Fração Radiante Encontrada por SPS
C_j	Coeficiente da Equação de Segunda Ordem
d_0	Diâmetro do Injetor de Combustível [m]
D	Difusividade do Oxidante [m^2/s]
D_j	Coeficiente para Obtenção dos Pesos das Fontes
E	Poder Emissivo Total [W/m^2]
F	Número de Chamas
F_o	Função Objetivo
f_s	Fração de mistura estequiométrica
I	Número de Pontos de Medição
$I_{b\eta}$	Intensidade Espectral de Radiação de um Corpo Negro [$W/(m^2.sr.\mu m)$]
I_i	Número Inteiro Obtido da Transformação da Variável de Projeto
I_η	Intensidade Espectral de Radiação [$W/(m^2.sr.\mu m)$]
J	Número de Fontes
k	Posição do Bit de Acordo com a Adaptabilidade
k_n	Coeficiente de Absorção Espectral [$1/m$]
L	Número de Espécies do GEO
L_f	Comprimento Visível da Chama [m]
L_s	Comprimento de Distribuição das Fontes [m]
\dot{m}	Vazão Mássica de Combustível [kg/s]
m	Número de Bits
N	Número de Variáveis de Projeto
n	Posição do Valor de Pico dos Pesos das Fontes
P	Probabilidade de o Bit Sofrer Mutação

q''	Fluxo de Calor Radiativo [W/m ²]
Q_f	Potência da Chama [kW]
Q_R	Calor Total Transferido por Radiação [kW]
R	Raio [m]
\bar{S}_j	Distância entre a Fonte e o Ponto de Medição [m]
S_S	Fração Molar entre Oxidante e Combustível para Queima Completa [kmol/kmol]
T	Temperatura Absoluta [K]
u_0	Velocidade do Combustível [m/s]
V_0	Vazão Volumétrica do Combustível [m ³ /s]
W_f	Diâmetro da Chama [m]
w_j	Peso da Fonte j
x_i	Variável de Projeto
X_R	Fração Radiante [%]
Z	Altura em Relação à Ponta do Queimador [m]
Z_j	Posição da Fonte j no Eixo da Chama

SÍMBOLOS GREGOS

α	Constante para Estimar o Comprimento da Chama [$\text{m}/\text{kW}^{0,3728}$]
β	Comprimento Adimensional de Distribuição das Fontes
γ	Desvio [%]
ε	Emissividade
η	Número de Avaliações da Função Objetivo
λ	Comprimento de Onda [μm]
ν	Frequência [Hz]
ρ	Massa Especifica [kg/m^3]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^4$]
τ	Parâmetro ajustável do GEO
τ_G	Tempo de Residência Característico [s]
τ_S	Transmitância no Caminho S
φ	Ângulo de Incidência em Relação ao Vetor Normal da Superfície [Rad]

SUBÍNDICES

0	Referente ao Combustível
∞	Referente ao Meio Ambiente
<i>R</i>	Radiação Térmica
<i>b</i>	Corpo Negro
<i>exp</i>	Experimental
<i>f</i>	Referente à Chama
<i>i</i>	Referente ao Ponto de Medição
<i>inf</i>	Inferior
<i>j</i>	Referente à Fonte Pontual
<i>máx</i>	Máximo
<i>médio</i>	Médio
<i>med</i>	Medido Experimentalmente
<i>melhor</i>	Resultado com Menor Valor da Função Objetivo
<i>sup</i>	Superior
η	Número de Onda [cm^{-1}]

1 INTRODUÇÃO

A transferência de calor por radiação, diferente da condução e convecção, não necessita de meios materiais para ocorrer. Além disto, a transferência de calor por radiação é proporcional à temperatura na quarta potência, enquanto que os outros meios de transferência dependem aproximadamente de forma linear da temperatura, o que torna a radiação responsável por uma parte considerável da transferência de calor em processos com alta temperatura.

No processo de combustão, que envolve altas temperaturas, a troca de calor por radiação pode ser desejável em algumas aplicações, como em fornos ou aquecimento de ambientes. Nos casos em que a transferência de calor diminui a eficiência de ciclos térmicos, ou gera risco às pessoas e equipamentos, ela é indesejada.

O processo de *flaring* é usado tradicionalmente para eliminar com segurança grandes quantidades de gases e vapores não desejados na indústria petroleira pela queima dos mesmos. Nesse processo, as pessoas e equipamentos sensíveis devem ser protegidos da radiação intensa em casos de liberação de gases por emergência. Uma forma de fazer isto é isolar uma área ao redor da chama [Brzustowski, 1976]. A área isolada pode ser extremamente dispendiosa, principalmente nas estruturas em mar aberto, como plataformas petrolíferas. A Figura 1.1 mostra a chama a uma distância segura das pessoas e equipamentos em uma plataforma de extração de gás.

A habilidade de determinar a radiação térmica incidente, proveniente de chamas de grande porte, é essencial para a segurança das operações na indústria de petróleo e gás. Tanto para vazamentos acidentais, que podem formar uma chama com a ignição, como para o projeto de sistemas de *flaring*, o qual permite que válvulas de segurança e sistemas de purga façam um descarte seguro [Hankinson e Lowesmith, 2012].

Não existe uma superfície definida na chama; a troca de calor por radiação é gerada nos gases quentes, que se comportam como um meio participante. A radiação em meios participantes (gases que emitem, absorvem ou espalham a radiação) depende das propriedades dos mesmos, que são funções de pressão, temperatura e composição da mistura de gases. Pode haver partículas com os gases, como fuligem ou cinzas, que por sua vez emitem, absorvem e espalham a radiação. Isto torna as propriedades de gases participantes difíceis de serem definidas e dificulta a obtenção do fluxo de calor gerado por radiação na chama.



Figura 1.1 – Plataforma North Rankin A, North West Shelf Gas, Austrália [Freeimages, 2005]

O desenvolvimento de modelos matemáticos permite estimar o tamanho e o formato de chamas bem como, por consequência, a radiação térmica incidente em um objeto a certa distância. Isto possibilita que o risco associado a uma chama particular seja estimado, e proporciona projetos seguros e melhores planos de contingência [Cook et al., 1990].

Hankinson e Lowesmith, 2012, afirmam que as características da troca de calor por radiação de chamas livres pode ser expressa através da utilização da fração radiante. Embora seja uma propriedade importante, a fração radiante não apresenta o fluxo de calor radiativo na proximidade da chama. De acordo com Ekoto et al., 2014, as simulações de chama detalhadas fornecem informações úteis sobre a interação entre a dinâmica do escoamento e das reações químicas da combustão, mas são proibitivos para aplicações práticas de segurança devido aos altos custos computacionais.

Sivathanu e Gore, 1993, mostraram que é possível estimar a distribuição do fluxo de calor pelo método de múltiplos raios. No presente trabalho, uma abordagem com modelagem semelhante é adotada. Primeiro, para mostrar que a distribuição de fluxo de calor por radiação pode ser satisfatoriamente estimada, o que demonstra a capacidade do modelo em prever a distribuição de calor perto da chama do tipo jato. Em seguida relacionam-se as características da chama com a distribuição do calor radiativo. O modelo de múltiplas fontes ponderadas

(WMP - *Weighted Multi Point Source model*) proposto por Hankinson e Lowesmith, 2012, considera fontes pontuais com diferentes pesos, para simular a contribuição de cada porção discretizada da chama.

Análises inversas de sistemas com transferência de calor por radiação podem ser tratados com o uso de tentativa e erro, uma técnica que demanda muito tempo para encontrar uma solução aproximada. Recentemente, tem-se adotado métodos de otimização e regularização. A metodologia de otimização resolve o problema inverso implicitamente, transformando-o em um problema de minimização ou maximização das funções objetivo, enquanto que os métodos de regularização resolvem-no explicitamente [Daun e Howell, 2005].

O problema inverso é formulado como um problema de otimização, que é resolvido pelo método da Otimização Extrema Generalizada (GEO - *Generalized Extremal Optimization*) proposto por De Sousa et al., 2003. Os algoritmos de otimização partem de uma determinada configuração de parâmetros, e dispendo do valor da função objetivo, fazem alterações de tal forma que, depois de certo número de avaliações da função objetivo, a solução seja ótima. Apesar disto, não há garantia de que seja o ótimo global. Os métodos estocásticos buscam o ótimo através de regras de probabilidade, abordando de forma “aleatória orientada”, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema, apenas com grande número de avaliações de uma função objetivo. O algoritmo GEO é um algoritmo evolucionário, idealizado como um melhoramento do método de otimização [Boettcher e Percus, 2001] desenvolvido para ser facilmente aplicável a diversos problemas de otimização.

1.1 Revisão Bibliográfica

Em uma primeira abordagem são descritos os estudos sobre modelos para prever o fluxo de calor de uma chama do tipo jato. Os trabalhos são principalmente em aplicações de modelos no processo de *flaring*. Em segundo, são discutidos trabalhos com aplicação da análise inversa para resolver sistemas radiantes.

Tan, 1967, usa o modelo de uma única fonte considerando que o fluxo de calor é distribuído uniformemente em uma esfera ao redor da chama. O Instituto Americano de Petróleo (API – *American Petroleum Institute*) recomenda o uso do modelo de fonte pontual

para calcular a distância mínima da chama [API 1997]. Segundo Chamberlain, 1987, o uso do modelo de uma única fonte pontual é limitado ao fluxo de calor distante da chama.

Brzustowski e Sommer, 1973, modificou o modelo de fonte pontual única para prever o fluxo de calor em objetos com orientação diferente da normal à fonte pontual.

McMurray, 1982, propôs um modelo baseado em análise de regressão, uma média ponderada entre radiação emitida por uma linha no eixo da chama, com emissividade constante, e a radiação emitida na superfície da chama. Os resultados obtidos para a chama proposta apresentaram a metade do erro em comparação ao modelo de fonte pontual única.

De Faveri et al., 1985, sugerem um modelo para prever a radiação no campo próximo à chama considerando a radiação emitida pela superfície da chama com desvios dos resultados até 30% menores do que os encontrados pelo modelo de fonte pontual única.

Sivathanu e Gore, 1993, propuseram um método para estimar o fluxo de calor radiativo de chamas do tipo jato turbulentas a partir da medição do fluxo de calor radiativo em um único ponto. Para isto, foi utilizada uma técnica de múltiplos raios acoplada à equação de transferência de médias de Planck.

Hankinson e Lowesmith, 2012, adaptaram o modelo de múltiplos raios propondo o modelo de múltiplas fontes pontuais ponderadas, WMP, modelo utilizado no presente trabalho, e obtiveram a distribuição do fluxo de calor radiativo para quatro distribuições de pesos pré-estabelecidas. As diferentes distribuições de pesos das fontes pontuais provocaram diferentes distribuições do fluxo de calor radiativo.

Por outro lado, a análise inversa tem sido amplamente utilizada na área de transferência de calor por radiação térmica, principalmente para evitar o método da tentativa e erro em problemas nos quais é desejada uma resposta específica do sistema. Daun e Howell, 2005, aplicam a metodologia inversa para projetos de sistemas com transferência de calor por radiação. Mossi et al., 2008, utilizaram o método inverso, em cavidades radiantes com convecção em regime turbulento, para encontrar a distribuição da potência de aquecedores, que satisfazem o fluxo de calor e temperatura prescrita em uma superfície de projeto.

Estudos utilizam-se do método GEO para a solução de sistemas com transferência de calor por radiação. Cassol et al., 2008, e Cassol et al., 2009, aplicaram com sucesso o método em problemas de iluminação. Tanto pela busca da potência, quanto a posição das fontes luminosas, foi encontrada pelo método de otimização. Brittes e França, 2013, utilizaram o método de otimização para posicionar aquecedores em uma cavidade radiante tridimensional.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo prover um modelo computacional para estimar a distribuição de calor radiativo na região próxima, menos de duas vezes o comprimento visível, à chama não pré-misturada laminar do tipo jato, com acuracidade e baixo custo computacional. O modelo utilizado é o WMP e os pesos de cada fonte pontual são correlacionados com as propriedades da chama, o que permite uma estimativa precisa da distribuição do fluxo de calor radiativo para cada chama. Enquanto os trabalhos anteriores utilizam uma abordagem de tentativa e erro para distribuir o peso das fontes, este trabalho propõe a obtenção da correlação, pesos com a potência da chama, através do método da análise inversa. Na análise inversa, os dados experimentais do fluxo de calor por radiação são os dados de entrada, enquanto que os pesos de cada fonte pontual e a fração radiante são os dados de saída, por terem relação direta com o fluxo de calor radiativo no modelo utilizado.

1.3 Organização do Trabalho

Primeiro são discutidos alguns fundamentos de radiação em chamas não pré-misturadas do tipo jato, assim como os modelos utilizados no trabalho para predizer o fluxo de calor radiativo no campo próximo a chama. O método de análise inversa é discutido, e também os dados experimentais utilizados. Depois de definido o problema inverso, são discutidos os resultados. A primeira parte deste trabalho consiste em avaliar a capacidade do método inverso em recuperar um conjunto de parâmetros pré-estabelecidos. Na segunda parte, os parâmetros que influenciam os resultados são avaliados e definidos. Com o conjunto de parâmetros é feito uma tentativa de correlacionar os pesos de cada fonte pontual do modelo, com as características de cada chama. Por último, é apresentada uma correlação em forma de equação polinomial de segunda ordem, tanto entre os pesos de cada fonte e as características das chamas, quanto à fração radiante do modelo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é mostrar um aspecto geral da fundamentação teórica que envolve o estudo de transferência de calor radiativa em chamas laminares não pré-misturadas do tipo jato. Neste capítulo são discutidas as dificuldades e a viabilidade de se obter o fluxo de calor radiativo de chamas, e os modelos simplificados utilizados no estudo para prever o fluxo de calor radiativo de chamas não pré-misturadas do tipo jato. Também é abordada a aplicação da análise inversa nos dados experimentais para a geração dos coeficientes do modelo das fontes pontuais para estimar o fluxo de calor radiativo.

2.1 Radiação Térmica

Em chamas não pré-misturadas do tipo jato, ou difusivas, as injeções do combustível e do oxidante ocorrem separadamente. A reação de combustão ocorre somente na interface entre o combustível e oxidante. A chama do tipo jato não pré-misturada é usada na maioria das aplicações industriais, principalmente por ser mais segura, pois não há o risco de explosão pelo retorno da chama. As chamas não pré-misturadas diferem do tipo de escoamento, que é laminar ou turbulento. As chamas adotadas no estudo são laminares. Apesar das chamas turbulentas serem o interesse final da aplicação do modelo, segundo Faeth et al., 1989, o estudo de chamas laminares é um passo importante, uma vez que as complexidades da dinâmica da turbulência são evitadas.

A combustão parcial dos hidrocarbonetos em ar forma fuligem, responsável pela cor amarela e alaranjada da chama. Segundo Faeth et al., 1989, é geralmente aceito que a radiação proveniente da fuligem, quando presente, domina a radiação da chama. Conforme Glassman, 1988, a formação de fuligem é uma característica do combustível associada com as condições em que ocorre a combustão, não existe um parâmetro que defina a quantidade de fuligem formada por quantidade de combustível queimada. O tipo de combustível permite estimar apenas a tendência à formação de fuligem do mesmo.

A propagação da energia radiante pode ser tratada tanto pela teoria eletromagnética clássica, quanto pela mecânica quântica. A sua caracterização, mostrada na Figura 2.1, é de acordo com o comprimento de onda, λ , ou da frequência, ν . Para a análise térmica, a região de interesse no espectro da radiação eletromagnética está compreendida no intervalo de

comprimento de onda entre 0,1 e 100 μm (radiação térmica), dentro do qual está a região da luz visível que se estende aproximadamente de 0,4 até 0,7 μm .

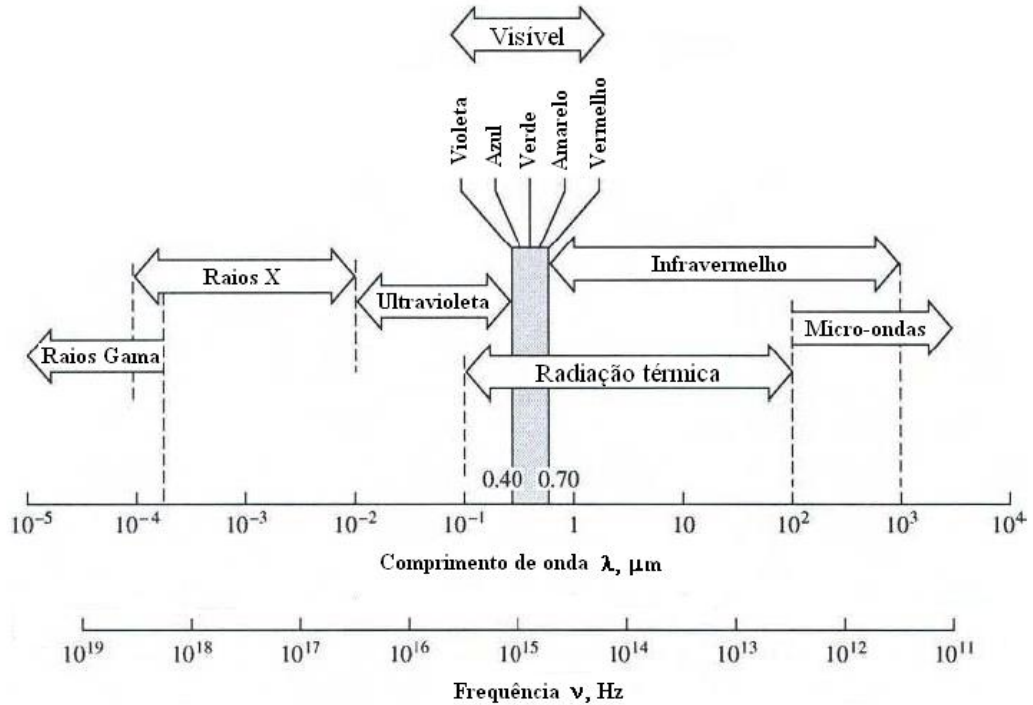


Figura 2.1 – Espectro da radiação eletromagnética [Adaptada de Modest, 2003]

A troca de calor por radiação não exige a presença de um meio material. Segundo Siegel e Howell, 2002, o calor emitido por uma superfície difusa e cinza é dado pelo poder emissivo, o qual é definido como a taxa de energia emitida por unidade de área da superfície emissora, como definido pela equação abaixo:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.1)$$

onde E é o poder emissivo da fonte, ε é a emissividade da fonte, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura absoluta da fonte.

Corpos que apresentam emissividade constante ao longo do espectro eletromagnético são denominados corpos cinza. Superfícies com emissividade constante emitem radiação ao longo do espectro eletromagnético conforme a distribuição de Planck [Siegel e Howell, 2002].

O metano, considerado no presente trabalho, tem uma baixa tendência de formação de fuligem, sendo assim, a radiação térmica de uma chama de metano ocorre principalmente dos gases participantes, como o dióxido de carbono e o vapor de água. Segundo Siegel e Howell,

2002, uma solução completa da troca de calor por radiação em meios participantes requer o conhecimento da intensidade de radiação, temperatura e propriedades físicas em todo o meio. A matemática para descrever o campo de radiação é complexa por natureza. Além disto, os efeitos espectrais são geralmente muito mais pronunciados em gases do que em sólidos, sendo assim é requerida uma análise detalhada da dependência espectral. A Figura 2.2 exemplifica a complexidade da dependência espectral do vapor de água. Como os gases emitem radiação e também absorvem, a radiação emitida por um gás pode ser absorvida por outro, aumentando a complexidade da transferência de calor em chamas.

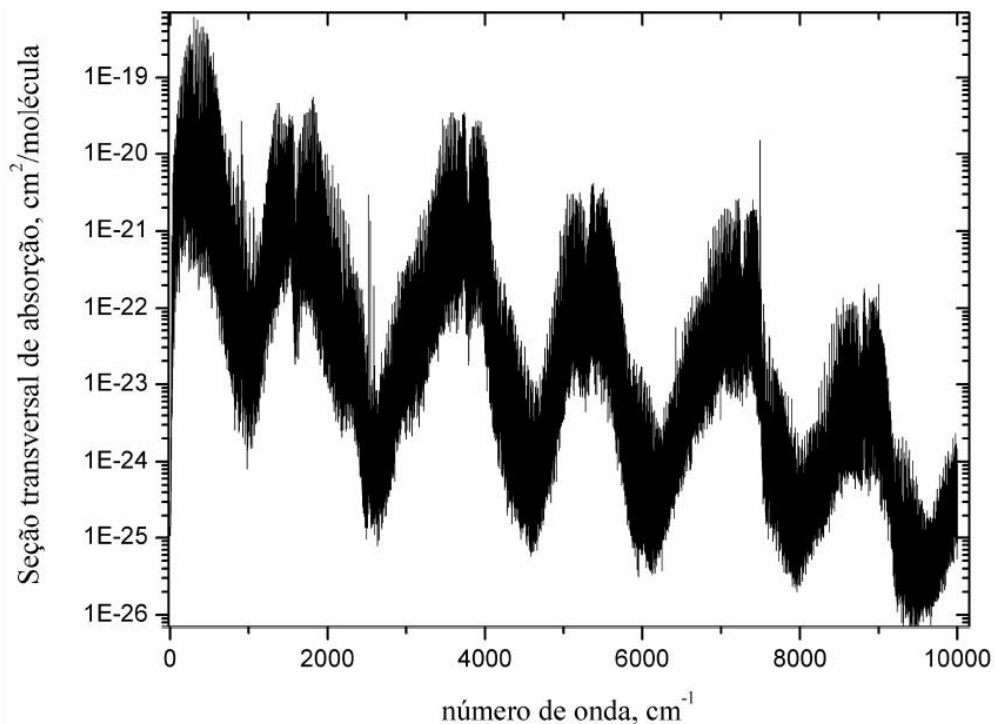


Figura 2.2 – Espectro da seção transversal de absorção do H₂O na temperatura de 1000 K e pressão parcial de 0,1 atm [Dorigon, 2012]

A equação de transferência radiativa para meios que não espalham radiação pode ser dada por [Modest, 2003]:

$$\frac{dI_{\eta}}{dS} = -\kappa_{\eta}I_{\eta} + \kappa_{\eta}I_{b\eta} \quad (2.2)$$

onde I_η é a intensidade espectral de radiação, $I_{b\eta}$ é a intensidade espectral de radiação de um corpo negro, η é o número de onda, e κ_η é o coeficiente de absorção espectral que é função da pressão, temperatura local e fração molar de cada gás.

Além do método de integração direcional dos feixes de radiação, a Equação (2.2) tem que ser integrada em relação ao espectro de comprimento de onda para determinar os coeficientes de absorção para cada ponto do domínio. Para isto, podem ser utilizados modelos simplificados, como os modelos de gás cinza, soma-ponderada-de-gases-cinzas (WSGG) [Hottel e Sarofim, 1967], WSGG baseado em linhas espectrais (SLW) [Denison e Webb, 1993] ou número de onda acumulado (CW) [Solovjov e Webb, 2002], entre outros. A equação também pode ser resolvida para todas as linhas de espectro, a integração linha-por-linha [Hartmann et al., 1983], que envolve um alto custo computacional. Mesmo com um modelo de baixo custo computacional, como o WSGG, a solução depende de um modelo acurado das reações químicas da combustão e do campo de temperaturas em todo o domínio, que por sua vez depende da solução da radiação e necessita de um número grande de iterações, o que gera um aumento significativo do custo computacional.

O alto custo computacional levou à implementação de modelos simplificados da distribuição do fluxo de calor radiativo, os quais não consideram toda a complexidade das reações químicas da combustão, escoamento do tipo jato, e radiação em meios participantes, o que simplifica a obtenção do fluxo de calor por radiação em chamas. A criação dessas ferramentas possibilita prever o fluxo de calor com precisão e custo computacional condizente com as aplicações de engenharia. Os modelos consistem em simplificar a emissão volumétrica dos gases quentes e fuligem, com a criação de fontes ou uma superfície da chama que emite a radiação térmica de uma forma equivalente.

2.2 Parâmetros Característicos da Chama

Os modelos mesmo simplificados dependem das características da chama, como o comprimento da chama e o tempo de residência. Existem diversos modelos para prever o comprimento da chama, L_f , como o modelo proposto por Roper, 1977, para estimar o comprimento de chamas laminares, mostrado na equação abaixo:

$$L_f = \frac{V_0(T_\infty/T_0)}{4\pi D_\infty \ln(1 + 1/S_s)} \left(\frac{T_\infty}{T_f} \right)^{2/3} \quad (2.3)$$

sendo V_0 a vazão do jato de combustível na saída do injetor, T_∞ é temperatura do meio onde o combustível é injetado, T_0 é temperatura do combustível antes da queima, T_f é temperatura característica da chama, \mathcal{D}_∞ é a difusividade do oxidante avaliada na temperatura T_∞ e S_s é a fração molar entre oxidante e combustível para queima completa. Apesar de este modelo ter resultados satisfatórios para chamas laminares, a dificuldade está em estimar os parâmetros T_f e \mathcal{D}_∞ , que afetam diretamente o comprimento da chama.

Lowesmith et al., 2007, propôs um modelo baseado em uma grande quantidade de dados, principalmente de chamas de grandes escalas. Esse modelo é dado pela seguinte equação:

$$L_f = \alpha \times Q_f^{0,3728} \quad (2.4)$$

onde a constante α é igual a $0,22 \frac{m}{kW^{0,3728}}$ e Q_f é a potência da chama dada pela equação abaixo.

$$Q_f = \dot{m}PCI \quad (2.5)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica de combustível e PCI é o poder calorífico inferior do combustível.

Apesar de o modelo ser para a faixa de potência acima de 1 MW, ele será utilizado, pois este é um modelo simples que emprega somente a potência da chama para prever o seu comprimento, e a aplicação futura do modelo visa a utilização em *flares* nos quais a faixa de potência é condizente com a faixa de potência da Equação (2.4). Em se tratando de soluções inversas, o comprimento de chama visível desta faixa de escoamento laminar é uma das soluções possíveis do método, fontes acima do comprimento da chama podem ter o peso igualado à zero.

Outro parâmetro que demonstra ter influência nas características da chama é o tempo de residência característico, τ_G , definido por Turns e Myhr, 1991, pela equação:

$$\tau_G = \frac{\rho_f W_f^2 L_f f_s}{3\rho_0 d_0^2 u_0} \quad (2.6)$$

onde ρ_f é a massa específica da chama, W_f é o diâmetro da chama que pode ser aproximado por $0,17 L_f$, f_s é a fração de mistura estequiométrica, ρ_0 é a massa específica do combustível, d_0 é o diâmetro do injetor de combustível e u_0 é a velocidade do jato de combustível na saída do injetor.

Como alternativa à Equação (2.6), Santos e Costa, 2005, definiram o tempo de residência característica através de:

$$\tau_G = \frac{L_f^3}{d_0^2 u_0} \quad (2.7)$$

O tempo de residência é proporcional ao comprimento da chama, e inversamente proporcional à vazão de combustível. No caso específico, é utilizado somente um diâmetro do injetor de combustível, e o comprimento visível é proporcional à potência da chama, que por sua vez depende da vazão de combustível. Como não pode ser observada a dependência dos parâmetros do modelo com o diâmetro do injetor, pois todas as chamas estudadas foram obtidas com o mesmo diâmetro, no estudo os parâmetros do modelo simplificado são relacionados apenas à potência da chama. A potência da chama tem relação com a velocidade do combustível na saída do injetor e com o comprimento visível da chama, mas é uma grandeza mais fácil de ser estimada, por este motivo, mais utilizada na indústria.

2.3 Modelo de Fonte Pontual Única (SPS)

O método mais simples de estimar o fluxo de calor radiativo proveniente de uma chama consiste em considerar que todo o calor é gerado por uma fonte pontual no centro da chama. O Instituto Americano de Petróleo [API, 1997] indica este modelo para estimar a radiação e assim definir o posicionamento de *flares*. Brzustowski, 1976, afirma que este modelo é amplamente utilizado na indústria pela facilidade de implementação. Por esses motivos, esse modelo é utilizado para a comparação dos resultados do modelo proposto neste estudo. O modelo é apresentado na forma da distância da chama, R , para um dado fluxo de calor radiativo q'' pela equação abaixo:

$$R = \sqrt{\frac{X_R Q_f}{4\pi q''}} \quad (2.8)$$

onde X_R é a fração radiante, que é discutida posteriormente na Secção 2.5. O modelo considera que a radiação térmica é distribuída uniformemente em uma esfera, de raio R , ao redor da chama, como mostrado na Figura 2.3.

Rearranjando a equação (2.8) e acrescentando o termo da transmitância atmosférica, τ_S , e o termo que ajusta a o fluxo calor em relação ao ângulo de incidência na superfície de medição φ , o fluxo de calor é dado pela equação a seguir:

$$q'' = \frac{X_R Q_f \tau_S}{4\pi R^2} \cos\varphi \quad (2.9)$$

Este modelo consegue prever o fluxo de calor para grandes distâncias, mais de duas vezes o comprimento da chama. Isto ocorre porque as distâncias de todos os pontos da chama, para um ponto de medição fora da chama tendem ao mesmo comprimento com o aumento da distância de medição. Segundo McMurray, 1982, em aplicações onde o fluxo de calor nas proximidades da chama é importante, a exemplo de plataformas petrolíferas, a aplicação do modelo é inadequada.

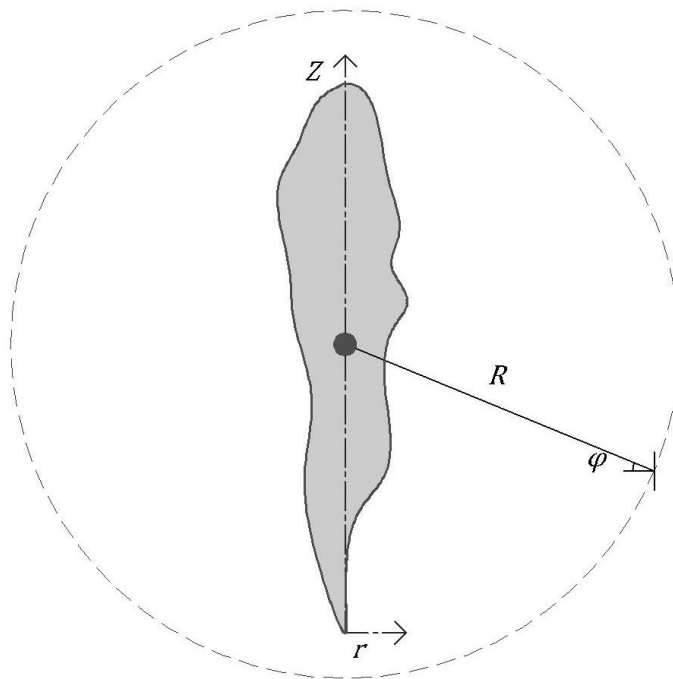


Figura 2.3 – Modelo de fonte pontual única

2.4 Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas (WMP)

O modelo matemático adotado neste trabalho é o modelo de múltiplas fontes ponderadas (WMP - *Weighted Multi-Point Source*). Nesse modelo, a radiação térmica é emitida por múltiplas fontes pontuais distribuídas ao longo do eixo da chama, como mostrado na Figura 2.4. Segundo Hankinson e Lowesmith, 2012, a radiação incidente em uma posição fora da chama é dada pela soma vetorial:

$$q'' = \sum_{j=1}^J \overrightarrow{q''_j} = \sum_{j=1}^J \frac{w_j X_R Q_f \tau_j}{4\pi \bar{S}_j^2} \cdot \cos \varphi_j \quad (2.10)$$

onde J é o número de fontes pontuais, w_j é o peso de cada fonte, τ_j é a transmitância do meio na distância, \bar{S}_j , da fonte pontual até a posição de medição, e φ_j é o ângulo entre a normal da superfície de medição e a direção da fonte.

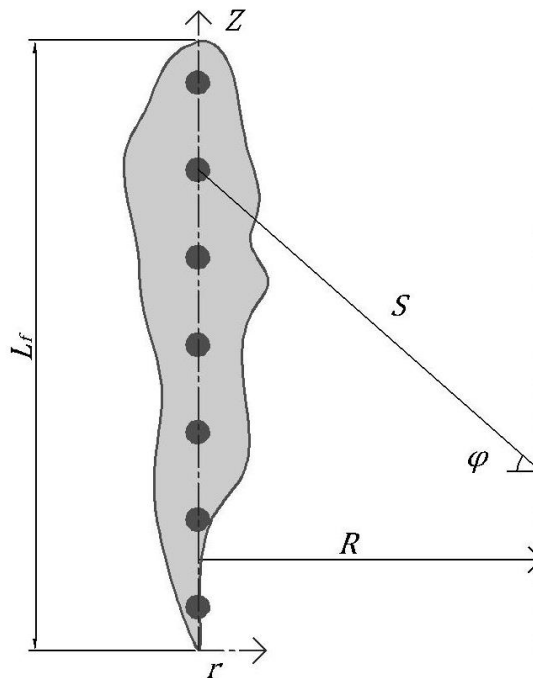


Figura 2.4 – Modelo de múltiplas fontes ponderadas

As fontes pontuais são distribuídas com espaçamento constante. Para distribuir as fontes ao longo da chama, o seu comprimento deve ser estimado. Para isto, pode ser utilizada a correlação dada pela Equação (2.4). Outra alternativa é utilizar o próprio comprimento

medido da chama. As duas abordagens serão empregadas. Como os gases quentes contribuem para a emissão de radiação térmica, a região logo acima da chama emite radiação. Isto ocorre em comprimentos de onda maiores que $0,7 \mu\text{m}$, na região do infravermelho. Para contabilizar a transferência de calor nesta região, as fontes podem ser distribuídas em um comprimento maior que o comprimento da chama, Figura 2.5, na forma da equação a seguir:

$$L_S = \beta \times L_f \quad (2.11)$$

sendo L_S é o comprimento da distribuição das fontes, β é uma constante.

De acordo com Hankinson e Lowesmith, 2012, este modelo se aproxima do modelo de fonte pontual única, SPS, a uma distância maior que cinco vezes o comprimento da chama, e pode prever o fluxo de calor radiativo com uma precisão de 20% em relação a valores medidos. Além disso, este modelo também pode estimar a radiação na região próxima a chama.

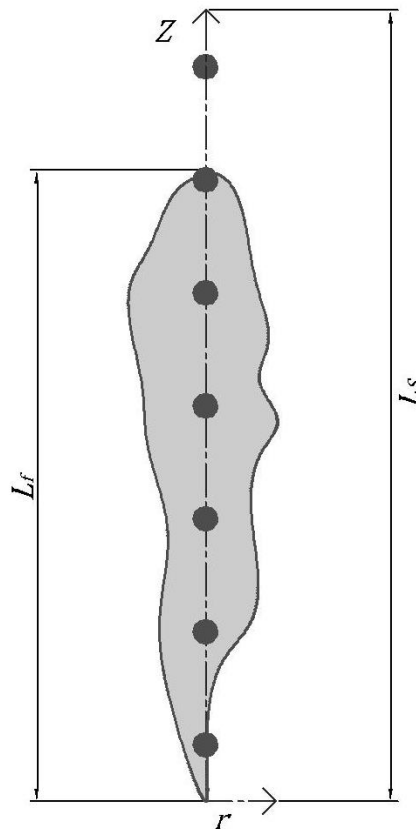


Figura 2.5 – Comprimento da distribuição das fontes

2.5 Fração Radiante

A fração radiante é a parcela da transferência total de calor da chama que é transferida por radiação. É definida pela equação abaixo:

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_f} \quad (2.12)$$

onde Q_R é o calor total transferido por radiação térmica.

A fração radiante depende principalmente do combustível e das condições do escoamento, que varia de uma porcentagem baixa podendo chegar a mais de 50 % [Turns, 2000]. A tendência é que a fração radiante aumente com o comprimento da chama mantendo-se a potência da chama fixa, e que diminua com o aumento da potência da chama para o mesmo comprimento de chama.

Para quantificar o calor trocado por radiação é possível delimitar um cilindro de raio R ao redor da chama, Figura 2.6, onde a distribuição do fluxo de calor pode ser integrada espacialmente. Assim, a fração radiante pode ser descrita pela equação abaixo:

$$X_R = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} q''_{med} 2\pi R dz}{Q_f \tau_S} \quad (2.13)$$

em que q''_{med} é o fluxo de calor medido na superfície imaginária do cilindro, e τ_S é a transmitância atmosférica. Neste caso, a transmitância aparece somente como um termo de ajuste para mostrar que a quantidade de calor trocado por radiação pode ser reduzida pela diminuição da transmitância no meio, com o acréscimo de água ou pela formação de fumaça na chama. Como a transmitância depende do comprimento em que o feixe percorre, o caminho depende da posição de medição, e assim, teria que fazer parte da integração. Por outro lado, o calor que não é transmitido por radiação até o volume de controle cilíndrico que engloba a chama é absorvido pelo meio participante, sendo transportado pelos mecanismos de advecção ou difusão. Para essa aplicação, a fração radiante da chama é aproximada pela fração de calor radiativo que deixa o volume de controle cilíndrico. Por isso, o calor absorvido não é contabilizado na fração radiante. Contudo, a transmitância deve ser considerada no caso

de estimar o fluxo de calor em distâncias diferentes que o raio do volume de controle considerado na obtenção da fração radiante.

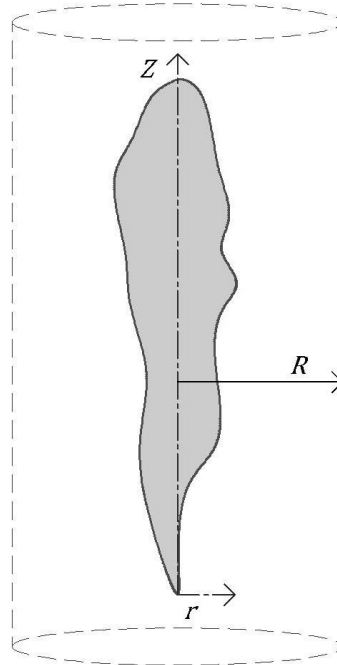


Figura 2.6 – Volume de controle cilíndrico

A altura do volume de controle cilíndrico é limitada pela possibilidade de medição do fluxo de calor radiativo. Sivathanu e Gore, 1993 adotaram que o cilindro imaginário estende-se até a posição em que a radiação medida é inferior a 5 % do pico medido para a chama. Normalmente, a posição inferior é limitada pelo sombreamento causado pelo queimador.

Outro meio de se estimar a fração radiante é com a utilização de um modelo para prever o fluxo de calor radiativo. Como discutido na Seção 2.3, o modelo de fonte pontual única (SPS) consiste em considerar o fluxo de calor constante em uma esfera de raio R com o centro no meio do comprimento da chama. Na equação abaixo, os termos da Equação (2.9) estão rearranjados para encontrar a fração radiante:

$$X_R = \frac{q''_{med} 4\pi R^2}{Q_f \tau_S} \quad (2.14)$$

onde R é a distância entre o receptor e a fonte pontual, τ_S é a transmitância da atmosfera avaliada para a distância R levando em consideração as condições atmosféricas, composição e temperatura do ambiente. A transmitância deve ser considerada entre a distância em que a

fração radiante foi calculada pelo modelo e a distância em que a fração radiante é empregada para prever o fluxo de calor radiativo.

Esse modelo é amplamente utilizado para prever a fração radiante através da medição do fluxo de calor radiativo em um único ponto no meio do comprimento da chama. Em chamas de piscina em Hamins et al., 1991, e chamas do tipo jato em Cook et al., 1987, Lowesmith et al., 2007, Turns e Myhr, 1991; Turns et al., 1993; Santos e Costa, 2005, e Mishra e Kumar, 2010.

Como o modelo SPS não tem bom desempenho na região próxima da chama, para a obtenção da fração radiante através da medição do fluxo de calor radiativo em um único ponto na região próxima da chama, Sivathanu e Gore, 1993, propuseram um coeficiente adimensional, C^* , que independe das características da chama, mas depende da posição da medição, mostrado na Figura 2.7. Com o emprego desse coeficiente, a fração radiante é dada pela equação abaixo:

$$X_R = \frac{q''_{med} 4\pi R^2}{Q_f C^*} \quad (2.15)$$

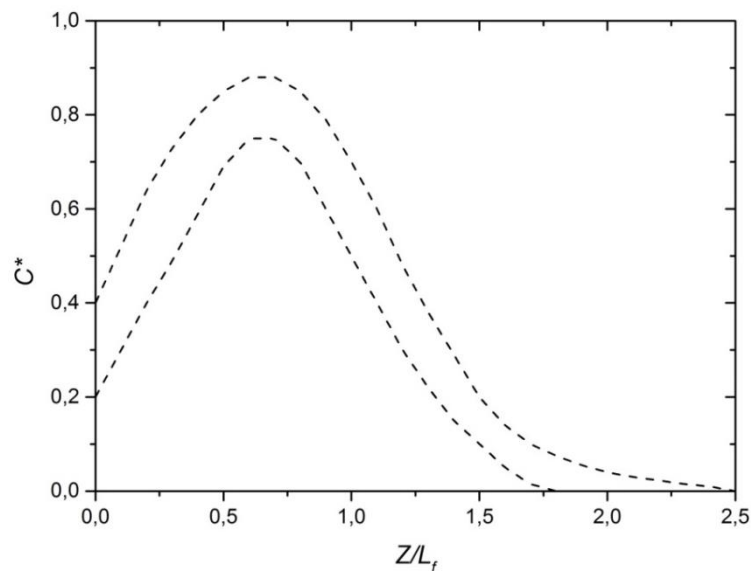


Figura 2.7 – Limites dos dados experimentais de C^* [Sivathanu e Gore, 1993]

A fração radiante pode ser estimada com a medição do fluxo de calor radiativo em um ponto a uma distância de 0,5 vezes o comprimento da chama em relação ao eixo central. A desvantagem do coeficiente é que ele somente pode ser utilizado na distância de meio comprimento da chama, uma vez que os dados para se obter o coeficiente foram obtidos nesta

distância. Houf e Schefer, 2007, Schefer et al., 2006 e Schefer et al., 2007, utilizaram o coeficiente para obter a fração radiante.

McMurray, 1982, afirma que a utilização de diferentes modelos leva a obtenção de diferentes frações radiantes, mesmo com os mesmos dados experimentais. Isto demonstra que fração radiante pode ser empregada como um parâmetro do modelo utilizado para prever o fluxo de calor radiativo.

2.6 Análise Inversa

O problema inverso consiste em encontrar a causa que produz um determinado efeito. Para a solução do problema inverso são necessários dados conhecidos, que podem ser experimentais ou numéricos, a partir dos quais é determinada a causa que os produz. A análise inversa é aplicada em problemas mal postos, caracterizados por possuir números desiguais de equações e variáveis, o que impede a solução única e exata do problema. Sendo assim, a solução se torna instável; pequenas alterações nos dados resultam em mudanças significativas na solução, o que é comum em dados experimentais. Em problemas inversos, busca-se minimizar a diferença entre as soluções, inversa e direta ou experimental, pois as características do problema permitem somente certo grau de aproximação.

Os problemas inversos podem ser classificados em dois grupos, de acordo com os métodos desenvolvidos para a solução. O primeiro é formulação explícita, no qual, as equações do modelo matemático são manipuladas para as incógnitas a serem determinadas aparecerem explicitamente. Na formulação implícita, o problema inverso é resolvido através da minimização de uma função objetivo, podendo portanto ser entendido como um problema de otimização.

A solução de um problema inverso implícito pode ser obtida através de diversos métodos de otimização, entre determinísticos, estocásticos e híbridos. Segundo Silva Neto, 2012, métodos determinísticos usualmente são baseados na derivação da função objetivo. Genericamente, pode-se dizer que são métodos de programação matemática e, quando convergem, rapidamente obtêm a solução do problema inverso, mas frequentemente a solução corresponde ao mínimo local mais próximo. No caso dos métodos estocásticos o procedimento de solução envolvem passos com a inserção de sequencias aleatórias, ou seja, são métodos probabilísticos. Métodos estocásticos apresentam boas aproximações para o mínimo global quando adequadamente implantados, mas o custo computacional é

normalmente elevado [Silva Neto e Becceneri, 2009]. Os métodos híbridos se baseiam na utilização dos métodos determinístico e estocástico em conjunto, unindo a possibilidade de escapar de mínimos locais com um baixo custo computacional.

A escolha do método de otimização depende do tipo do problema, uma técnica adapta-se melhor que outra em função do problema. Não há um método definitivo que é a melhor escolha para todos os problemas. No presente estudo, o método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) é utilizado por ter mostrado bons resultados em trabalhos anteriores [Brites e França, 2010, Cassol et al., 2009, De Sousa et al., 2007, Galski et al., 2009, e Schneider et al., 2009] em problemas de radiação térmica.

O método GEO [De Sousa et al., 2003] foi desenvolvido usando a mesma lógica do modelo evolucionário de Bak e Sneppen, 1993. Uma particularidade do método GEO é que este aplica a aproximação τ -EO para a mutação das espécies. De acordo com Bak e Sneppen, 1993, L espécies são alinhadas; associa-se a cada uma delas um número de adaptabilidade, o qual determinará aquelas que têm maior probabilidade de sofrer mutação. Pode-se imaginar as espécies como bits que assumem valores de zero ou um. Desta forma, toda a população será representada por uma única sequência binária que codifica todas as variáveis do projeto de otimização. Essa representação é similar a um cromossomo no Algoritmo Genético com representação binária (na Figura 2.8 cada variável é representada por seis bits).

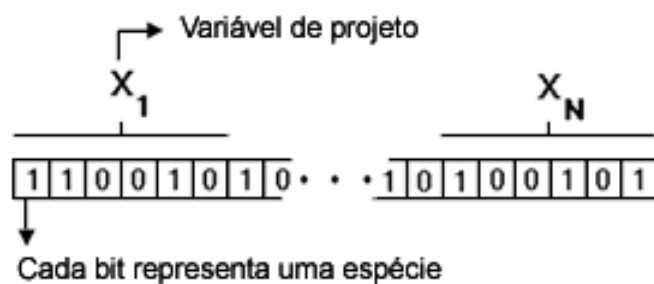


Figura 2.8 – Variáveis de projeto em uma sequência binária [adaptado De Sousa et al., 2003].

Para cada espécie (bit) é associado um número de adaptabilidade, que é proporcional ao ganho (ou perda) em uma função objetivo ao inverter-se um bit. Pode-se definir a função objetivo de várias formas, neste trabalho optou-se por uma baseada na soma das diferenças entre valores obtidos pelo modelo matemático e dados experimentais.

Todos os bits são distribuídos em níveis de acordo com a adaptabilidade. O bit menos adaptado é colocado no nível um e o mais adaptado no nível L . A inversão (mutação) dos bits

é controlada pela distribuição de probabilidades dada pela equação abaixo, onde k é o nível em que o bit foi posicionado e τ é um parâmetro ajustável positivo. Utilizando-se a linguagem de estatística, se $\tau \rightarrow 0$, o algoritmo torna-se um passeio aleatório, enquanto que para $\tau \rightarrow \infty$, tem-se uma busca determinística. A introdução do parâmetro τ permite que o algoritmo selecione qualquer variável para sofrer mutação, mas privilegia aquelas com menor adaptabilidade.

$$P(k) \propto k^{-\tau}, \quad 1 \leq k \leq L \quad (2.16)$$

O processo descrito anteriormente é repetido até que seja atingido um determinado critério de parada. A melhor configuração de bits será aquela que fornecer o melhor valor para a função objetivo.

Para cada variável de projeto, calcula-se o número mínimo de bits, m , necessários, a fim de garantir certa precisão, p . As variáveis serão codificadas pelo maior valor de m . O comprimento da sequência binária é dado pelo produto do número de variáveis, N , pelo número de bits ($L = Nm$).

$$2^m \geq \left\lceil \frac{x_{i,sup} - x_{i,inf}}{p} + 1 \right\rceil \quad (2.17)$$

Na Equação (2.17), $x_{i,sup}$ e $x_{i,inf}$ são os limites superior e inferior, respectivamente, da variável de projeto x_i , com $i = 1, N$. O valor físico de cada variável de projeto é definido pela equação abaixo:

$$x_i = x_{i,inf} + (x_{i,sup} - x_{i,inf}) \frac{I_i}{(2^m - 1)} \quad (2.18)$$

sendo I_i um número inteiro obtido na transformação da variável x_i da representação binária para decimal.

Para aplicação do algoritmo GEO, são adotadas as seguintes etapas:

- 1) Inicializa-se aleatoriamente uma sequência binária de comprimento L que codifique todas as N variáveis de projeto ($L = Nm$). Calcula-se o valor da função objetivo, F_o , para a configuração inicial dos bits, C . Fazer $C_{melhor} = C$ e $F_{o,melhor} = F_o$.

- 2) Para cada bit j ($1 \leq j \leq L$) da sequência binária, em uma dada iteração: a) Inverte-se o bit (de 0 para 1 ou 1 para 0) e calcula-se o valor da função objetivo $F_{o,j}$ para a configuração C_j ; b) Associa-se um valor correspondente a adaptabilidade (variação no valor da função objetivo) $\Delta F_{o,j} = F_{o,j} - F_{o,melhor}$, que indica o ganho relativo (ou perda) quando o bit é invertido, e compara-se com o melhor valor da função objetivo encontrado até aqui; c) Retorna-se o bit para seu valor inicial.
- 3) Ordenam-se os bits de acordo com seus valores de adaptabilidade, $k = 1$ para o menos adaptado e $k = L$ para o mais adaptado. Em problemas de minimização, os bits com maiores valores de $\Delta F_{o,j}$ ocuparão níveis mais altos, e vice-versa para problemas de maximização. Se dois ou mais bits possuírem o mesmo valor para adaptabilidade, deve-se distribuí-los aleatoriamente com distribuição uniforme.
- 4) Escolhe-se um bit para sofrer mutação (inverter de 0 para 1 ou de 1 para 0). Gera-se um número aleatório RAN, com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$. Se $k^{-\tau}$ for maior ou igual à RAN, confirma-se a inversão do bit. Caso contrário, escolhe-se outro bit e repete-se o processo até se obter a mutação.
- 5) Quando for confirmada a alteração do bit j na etapa anterior, faz-se $C = C_j$ e $F_o = F_{o,j}$.
- 6) Se $F_o < F_{o,melhor}$, para problemas de minimização, ou $F_o > F_{o,melhor}$, para problemas de maximização, faz-se: $F_{o,melhor} = F_o$ e $C_{melhor} = C$.
- 7) Repetem-se as etapas de (2) a (6) até que o critério de parada adotado seja atingido.
- 8) Retornam-se os valores de C_{melhor} e F_{melhor} .

2.7 Dados Experimentais

A distribuição do fluxo de calor radiativo e o comprimento de chama visível foram obtidos experimentalmente por Machado, 2015. O fluxo de calor radiativo foi obtido a uma distância radial em relação ao eixo da chama, R , em diversas alturas em relação à ponta do queimador, Z , como no esquema construtivo mostrado na Figura 2.9.

Foi utilizado um transdutor de fluxo de calor do tipo Schmidt-Boelter modelo MEDTHERM 64-0.5-20/ZnSeW-1C-150. Para a medição somente do fluxo de calor radiativo, foi adicionada uma janela de seleneto de zinco a frente do transdutor. O material da

janela tem a transmissividade praticamente constante de 0,7 entre $0,7 \mu\text{m}$ até $17 \mu\text{m}$, região do infravermelho mostrado na Figura 2.1, fora deste intervalo a transmissividade declina abruptamente para zero. O seleneto de zinco tem a absorvidade baixa, a energia que não é transmitida através do material é refletida reduzindo o ruído causado pela radiação emitida pela janela.

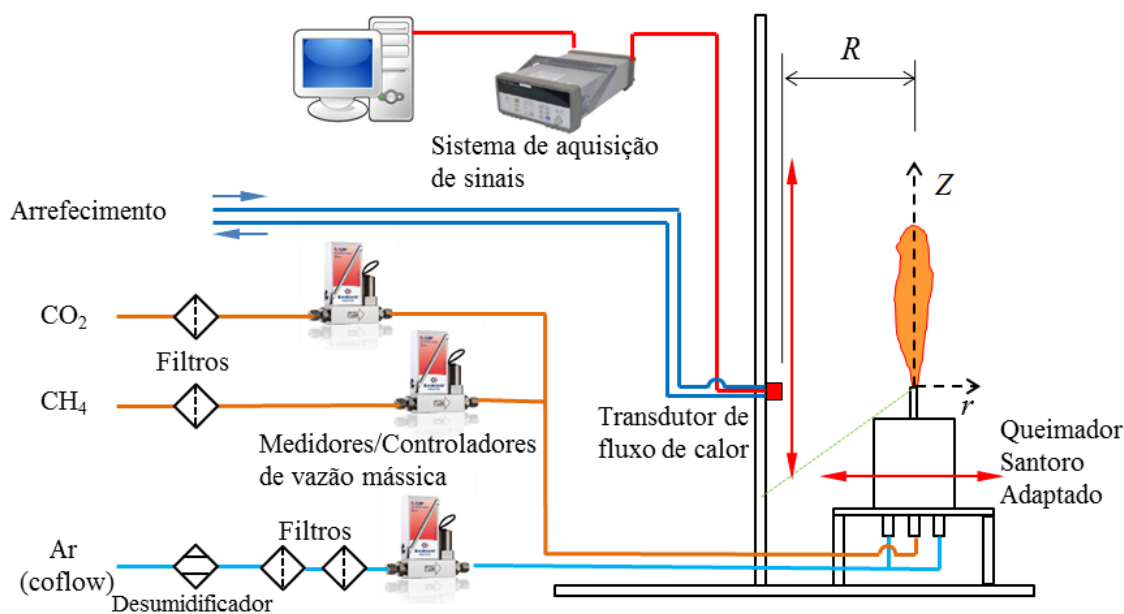


Figura 2.9 – Esquema construtivo da bancada experimental [adaptado de Machado, 2015]

O transdutor do calor por radiação foi calibrado pelo fabricante com um simulador de corpo negro, e apresenta incerteza de 3% do sinal de resposta com confiabilidade de 95% e repetibilidade de 1%. O sistema de aquisição dos sinais utilizado é da marca Agilent, modelo 34972A. A incerteza associada ao sistema de aquisição é de 0,003% da leitura mais 0,0035% da faixa de medição utilizada, 100 mV. O tratamento das incertezas é mostrado em Machado et al., 2014.

Os experimentos foram obtidos com o queimador Santoro proposto por Santoro et al., 1983, para realização de medições de fração volumétrica de fuligem por diferentes técnicas. O queimador é composto por um tubo interno de 11,1 mm de diâmetro interno, onde é injetado o combustível, com 12,7 mm de diâmetro externo. Um tubo concêntrico de 101,6 mm de diâmetro interno é colocado por fora deste tubo, conforme Figura 2.10. O escoamento paralelo (*coflow*) de ar atmosférico no duto formado pelos dois tubos concêntricos é utilizado para estabilizar a chama e fornecer o oxidante para a reação. Para possibilitar a medição do

fluxo de calor radiativo na região abaixo da saída do injetor, o duto injetor de combustível foi prolongado em 60 mm em relação ao projeto original de Santoro et al., 1983.

Os dados utilizados foram obtidos de doze chamas laminares não pré-misturadas de metano com 99,5% de pureza e ar atmosférico. Para variar a potência das chamas, a vazão foi alterada em uma faixa entre 0,25 e 1,0 L/min, o que gerou chamas com potência entre 0,139 e 0,554 kW. O sistema de *coflow* foi alimentado com ar atmosférico filtrado e desumidificado com vazão constante de 100 L/min para todas as chamas, o que resulta em uma velocidade média de 0,21 m/s.

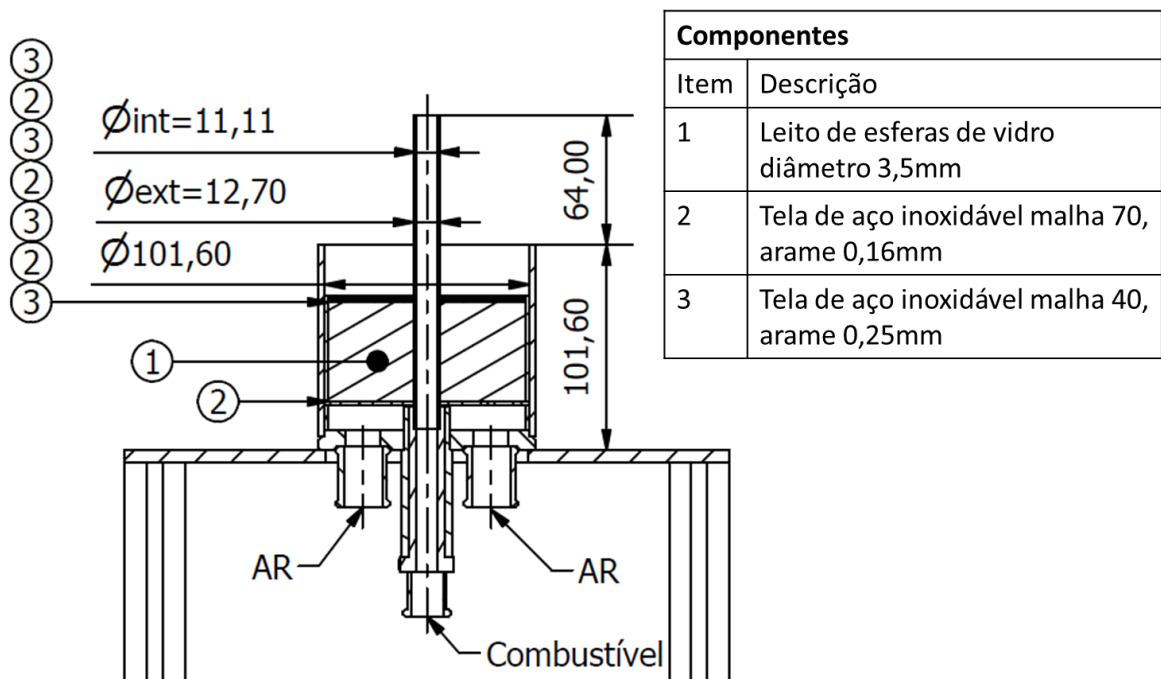


Figura 2.10 – Vista em corte do queimador Santoro adaptado [Machado, 2015]

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

O problema abordado no estudo consiste em resolver o fluxo de calor radiativo na região próxima a chamas não pré-misturadas de metano e ar. Para isto, é utilizado o modelo WMP com o peso de cada fonte e a fração radiante obtidos pelo método inverso. Com a solução de um conjunto de chamas é possível correlacionar o peso das fontes com as características das chamas. Nesta etapa, a abordagem inversa tem um papel fundamental, visto que as correlações envolvem um número maior de coeficientes, que devem ser obtidos pela análise inversa do problema.

Na implementação do modelo WMP para prever o fluxo de calor radiativo no campo próximo a chama, através da Equação (2.10), é necessário definir o peso correspondente a cada fonte pontual w_j . Em trabalhos anteriores [Hankinson e Lowesmith, 2012; Ekoto et al., 2014] isto foi feito com uma distribuição linear, conforme abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_j = jw_1 \quad \text{para } j = 1, \dots, n \\ w_j = \left[n - \frac{n-1}{(J-(n+1))} \cdot (j-(n+1)) \right] \cdot w_1 \quad \text{para } j = n+1, \dots, J \\ \sum_{j=1}^J w_j = 1 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Na equação acima, o peso de cada fonte cresce linearmente até um valor de pico n . Depois deste valor é prescrito uma fonte com o mesmo peso da fonte n , e o peso volta a decrescer linearmente para fontes acima de $n+1$. O termo J é o número de fontes e n é a posição do pico dado por $0,75 \cdot J$. Apesar da distribuição linear apresentar resultados melhores que o modelo SPS no campo próximo da chama, o que mostra a capacidade do modelo, os resultados de estudos anteriores sugerem que outras distribuições podem gerar resultados com maior acuracidade.

Para evitar o uso de tentativa e erro, a análise inversa é utilizada para definir a distribuição dos pesos das fontes pontuais. O fluxo de calor radiativo obtido experimentalmente por Machado, 2015, é utilizado como dado de entrada, e por otimização da função objetivo é encontrado o conjunto de pesos, e a fração radiante, que geram a solução mais próxima dos dados medidos. Isto é, o fluxo de calor é o efeito do problema inverso, enquanto que a distribuição dos pesos das fontes pontuais é a causa. A utilização de um

conjunto de chamas com potências entre 0,139 a 0,554 kW possibilita determinar correlações entre as características das chamas e parâmetros do modelo que geram resultados satisfatórios.

Em conjunto com a determinação dos pesos das fontes, a fração radiante, que é considerada como um parâmetro do modelo, também é encontrada pela análise inversa. A fração radiante tem relação direta com a quantidade de calor que é transferido por radiação térmica, e também é um parâmetro de ajuste, com influência direta no fluxo e calor de todos os pontos de medições de uma chama.

3.1 Definição do Problema

Para a aplicação da análise inversa é necessário definir alguns parâmetros do problema direto, como o número de fontes utilizadas no modelo WMP, e como estas fontes estão distribuídas no eixo da chama. As fontes são distribuídas no eixo da chama com espaçamento ΔZ igual entre si no comprimento L_s definido pela Equação (2.11). A posição Z_j de cada fonte j é definida pelas relações abaixo:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{\Delta Z}{2} \\ Z_j = Z_{j-1} + \Delta Z \\ \Delta Z = \frac{L_s}{J} \end{cases} \quad (3.2)$$

onde $Z = 0$ corresponde à posição na saída do queimador, como mostrado na Figura 2.9. Por outro lado, as posições e a quantidade dos pontos de medições dependem da chama estudada. A Tabela 3.1 mostra a distância do ponto de medição até o eixo da chama, R , e o número de pontos de medições, I , para o conjunto de chamas utilizado no estudo. A Figura 3.1 mostra o fluxo de calor radiativo nos 19 pontos de medições obtido experimentalmente da chama 1, os dados experimentais das outras chamas podem ser observados no apêndice B.

Na Tabela 3.1, Q_f é a potência da chama obtida pela Equação (2.5), e $X_{R,exp}$ é a fração radiante obtida pela integração numérica da Equação (2.13). As chamas 6 e 7 tem a mesma potência, apesar da distância R ser maior para a chama 7, não há uma alteração significativa da fração radiante, menor que 1,5%. A incerteza associada à fração radiante calculada pelo método apresentado em Machado, 2015, é de 1% para ambas as chamas. A diferença negligenciável entre a medição da fração radiante com diferentes distâncias de medições, R , e

as considerações da transmitância descritas na Seção 2.5, permitem a hipótese de que a transmitância pode ser considerada com valor unitário para as dimensões consideradas, pois o meio entre a chama e a medição é constituído por ar, um meio transparente à radiação térmica nas condições do experimento.

Tabela 3.1 – Dados experimentais do conjunto de chamas [Machado, 2015]

Chama f	Q_f [kW]	R [m]	$X_{R,exp}$	I
1	0,139	0,054	0,115	19
2	0,166	0,054	0,125	20
3	0,194	0,054	0,133	20
4	0,222	0,054	0,141	20
5	0,250	0,054	0,146	21
6	0,277	0,054	0,154	22
7	0,277	0,114	0,151	28
8	0,333	0,114	0,155	19
9	0,388	0,114	0,161	20
10	0,444	0,114	0,162	20
11	0,499	0,114	0,167	21
12	0,554	0,114	0,168	21

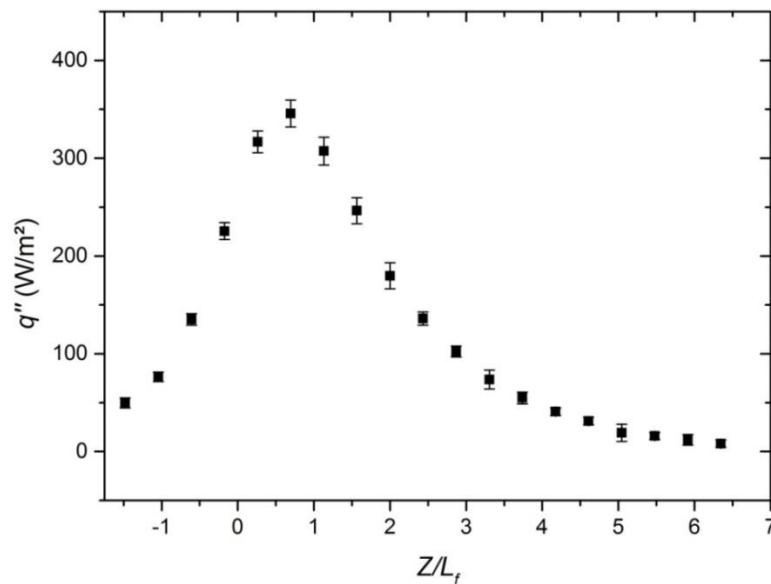


Figura 3.1 – Fluxo de calor radiativo medido da chama 1 [Machado, 2015]

A distribuição do fluxo de calor radiativo tem o mesmo comportamento que a distribuição proposta por Sivathanu e Gore, 1993, mostrada na Figura 2.7. A distribuição do fluxo de calor obtido das outras chamas listadas na Tabela 3.1 tem comportamento similar.

A medição do fluxo de calor radiativo é feita com a superfície do transdutor de calor em paralelo com o eixo da chama. Isto permite reescrever a Equação (2.10) para obter o fluxo de calor no ponto de medição i da chama f com a consideração da transmitância com o valor igual a 1 e através da trigonometria do triângulo retângulo formado pela distância entre o ponto de medição e o eixo da chama com a distância entre a fonte j e o ponto de medição i é possível substituir $\cos\varphi_j$ por R/S_j .

$$q''_{i,f} = \frac{Q_f X_{RR}}{4\pi} \sum_{j=1}^J \frac{w_j}{S_j^3} \quad (3.3)$$

Como a solução do problema inverso consiste em otimização, é necessário definir a função objetivo que deve ser minimizada ou maximizada. No caso, a equação abaixo é um somatório das diferenças entre os fluxos de calor medidos, $q''_{med,i,f}$ e obtidos pelo modelo, $q''_{i,f}$, no ponto de medição i , da chama f :

$$F_o = \sqrt{\sum_f^F \sum_i^I [q''_{med,i,f} - q''_{i,f}]^2} \quad (3.4)$$

sendo F o número de chamas e I o número de pontos de medições em cada chama.

Para medir a acuracidade do modelo, é proposto o cálculo do desvio, $\gamma_{i,f}$, entre os dados obtidos pelo método inverso e os dados obtidos experimentalmente.

$$\gamma_{i,f} = \left| \frac{q''_{i,f} - q''_{med,i,f}}{\max_i q''_{med,i,f}} \right| \times 100\% \quad (3.5)$$

$$\gamma_{f,m\u00e9dio} = \frac{\sum_{i=1}^I \gamma_{i,f}}{I} \quad (3.6)$$

$$\gamma_{f,m\u00e1x} = \max_i \gamma_{i,f} \quad (3.7)$$

onde $\gamma_{f,m\u00e9dio}$ e $\gamma_{f,m\u00e1x}$ s\u00e3o o desvio m\u00e9dio e m\u00e1ximo da chama f respectivamente. De forma an\u00e1loga, os desvios podem ser aplicados em um conjunto de chamadas.

Os resultados obtidos com os pesos gerados pelo m\u00e9todo inverso s\u00e3o comparados com os resultados obtidos pelo modelo WMP com a utiliza\u00e7\u00e3o da distribui\u00e7\u00e3o linear dos pesos dada pela Equa\u00e7\u00e3o (3.1) e com o modelo SPS, Equa\u00e7\u00e3o (2.9), atrav\u00e9s do desvio m\u00e9dio dado pela Equa\u00e7\u00e3o (3.6) e do desvio m\u00e1ximo dado pela Equa\u00e7\u00e3o (3.7).

3.2 Detalhamento do Processo de Solu\u00e7\u00e3o

Para minimizar a fun\u00e7\u00e3o objetivo, F_o , \u00e9 utilizado o algoritmo de Otimiza\u00e7\u00e3o Extrema Generalizada (GEO) para a obten\u00e7\u00e3o do conjunto de pesos e a fra\u00e7\u00e3o radiante. Para o modelo WMP ter significado f\u00edsico, algumas restri\u00e7\u00f5es devem ser impostas na obten\u00e7\u00e3o dos pesos. A primeira restri\u00e7\u00e3o \u00e9 que todos os pesos devem ser iguais ou maiores que zero. Para uma primeira abordagem, em que o peso \u00e9 considerado a vari\u00e1vel de projeto, a condi\u00e7\u00e3o \u00e9 facilmente imposta ajustando os limites inferiores das vari\u00e1veis de projeto como zero. A segunda restri\u00e7\u00e3o \u00e9 que, por defini\u00e7\u00e3o, o somat\u00f3rio dos pesos de todas as fontes deve ser igual a um. Para garantir a segunda restri\u00e7\u00e3o, os limites superiores foram considerados com o valor unit\u00e1rio e depois de distribu\u00eddos valores aleat\u00f3rios entre 0 e 1 para cada vari\u00e1vel de projeto, cada peso pode ser dado pela equa\u00e7\u00e3o abaixo, onde os pesos s\u00e3o os valores normalizados das vari\u00e1veis de projeto do GEO:

$$w_j = \frac{x_i}{\sum_i^{N-1} x_i} \quad (3.8)$$

sendo x_i a vari\u00e1vel de projeto. A fra\u00e7\u00e3o radiante \u00e9 dada diretamente pela vari\u00e1vel de projeto x_N com os mesmos limites superiores e inferiores. Assim \u00e9 necess\u00e1rio uma vari\u00e1vel de projeto para cada fonte, mais uma vari\u00e1vel de projeto para a fra\u00e7\u00e3o radiante que tamb\u00e9m \u00e9 encontrada pelo GEO, $N = J + 1$.

Para a implementa\u00e7\u00e3o do GEO \u00e9 necess\u00e1rio definir a precis\u00e3o das vari\u00e1veis de projeto. No presente estudo, a defini\u00e7\u00e3o de precis\u00e3o foi feita com a considera\u00e7\u00e3o de que o algoritmo deva ser capaz de reproduzir a distribui\u00e7\u00e3o linear da Equa\u00e7\u00e3o (3.1) com 20 fontes, n\u00famero m\u00ednimo para um resultado independente do n\u00famero de fontes, segundo Hankinson e Lowesmith, 2012. \u00c9 necess\u00e1ria uma precis\u00e3o m\u00ednima de $p = 6,7 \times 10^{-3}$ com a aplica\u00e7\u00e3o

deste valor na Equação (2.17), onde se encontra que $m = 8$ bits tem a precisão de $p = 3,9 \times 10^{-3}$ para os limites das variáveis de 0 a 1, o que é uma resolução suficiente para a distribuição linear dos pesos com 20 fontes.

Para a obtenção dos pesos e fração radiante através do método GEO foi escrito um programa em linguagem FORTRAN no qual se utiliza o procedimento descrito a seguir:

- 1) É atribuído um valor ao parâmetro ajustável do GEO, τ ;
- 2) As fontes pontuais são distribuídas no eixo da chama através da Equação (3.2);
- 3) Um conjunto de variáveis de projeto x_i é escolhido aleatoriamente;
- 4) O peso de cada fonte é calculado pela normalização das variáveis de projeto, x_i , pela Equação (3.8), o valor da fração radiante é dado diretamente pela variável de projeto x_N ;
- 5) O fluxo de calor em cada ponto de medição é calculado pela Equação (3.3) em todos os pontos em que o fluxo de calor radiativo é obtido experimentalmente;
- 6) A distribuição do fluxo de calor obtido pelo modelo é comparada com a distribuição obtida experimentalmente pela função objetivo, Equação (3.4);
- 7) Cada bit do vetor é invertido pelo GEO e o algoritmo é recomeçado do passo 4 até que todos bits sejam invertidos;
- 8) Os bits são ordenados do menos adaptado ao mais adaptado, $k = 1$ até $k = L$, através do valor de adaptabilidade $\Delta F_{o,j} = F_{o,j} - F_{o,melhor}$, o vetor dos bits que corresponde a menor função objetivo é o conjunto mais bem adaptado na minimização, é gravado em conjunto com o valor da função objetivo;
- 9) Um bit é escolhido aleatoriamente para sofrer mutação, e através da comparação de um valor entre 0 e 1, gerado aleatoriamente com Equação (2.16), é decidido se o bit deve sofrer mutação. Este passo é repetido até que haja mutação de um bit;
- 10) O algoritmo é repetido a partir do passo 4 até que o critério de parada seja alcançado;
- 11) O valor da função objetivo é armazenado e o algoritmo é reiniciado no passo 2 com um novo conjunto de variáveis aleatórias até que o critério de parada seja atingido, o que permite resultados independentes da inicialização;
- 12) O valor médio da função objetivo é armazenado e o algoritmo é reiniciado no passo 1 com outro parâmetro do GEO, τ , assim pode ser feita a escolha do parâmetro;
- 13) São escolhidas as variáveis de projeto com o menor valor da função objetivo do τ com o menor valor médio da função objetivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos em quatro partes. A primeira parte mede a capacidade do método inverso de obter os pesos do modelo WMP. Na segunda parte são definidos os parâmetros utilizados no modelo WMP. Finalmente, os pesos das fontes pontuais são correlacionados com parâmetros das chamadas através de duas abordagens. Na primeira, utiliza-se o comprimento de chamada estimado para distribuir as fontes. Na segunda abordagem, as fontes são distribuídas com a utilização do comprimento de chamada medido.

4.1 Avaliação do Método Inverso com o Modelo WMP

Para medir a capacidade do método inverso de obter os pesos do modelo WMP, dois testes foram feitos. O primeiro, com o emprego do mesmo número de fontes para gerar a distribuição do fluxo de calor, método direto, quanto no método inverso utilizado para recuperar os pesos do modelo WMP. A vantagem dessa abordagem é permitir a comparação da distribuição dos pesos, do método direto com o inverso. O segundo caso é com mais fontes no método direto que no método inverso. Isso mostra a capacidade do método em recuperar os pesos gerados por um modelo diferente do utilizado no método inverso.

No primeiro caso é utilizado o modelo com sete fontes tanto no método direto como no inverso (sete é o número mínimo de fontes que é possível gerar a distribuição dos pesos com os mesmos parâmetros, e comportamento, propostos por Hankinson e Lowesmith, 2012). No método direto é simulada a distribuição do fluxo de calor radiativo de uma chamada com potência de 0,3 kW e fração radiante de 0,2. Primeiro, é utilizada a Equação (3.1) para gerar a distribuição dos pesos das fontes pontuais, mostrado no gráfico da Figura 4.1. Em seguida, foi gerada a distribuição da radiação incidente em 20 pontos de “medições” a uma distância radial de 0,5 vezes o comprimento visível da chamada estimado pela Equação (2.4), com distribuição igualmente espaçada no comprimento da chamada.

Para recuperar o peso das sete fontes através do método inverso, é utilizado o método GEO. No algoritmo GEO, a distribuição inicial dos bits é pseudoaleatória. Para a solução ser independente da configuração inicial das variáveis de projeto, o algoritmo é resolvido diversas vezes, com diferentes valores iniciais das variáveis de projeto. Isto permite uma análise mais precisa do comportamento da função objetivo com os diferentes parâmetros do método, critério de parada, e τ que ajusta a probabilidade de um bit sofrer mutação na Equação (2.16).

Para o estudo, foi verificado que vinte repetições são suficientes para a independência dos resultados com o número de inicializações. O parâmetro τ foi testado em um intervalo de 0,25 até 2,5 com acréscimos de 0,25.

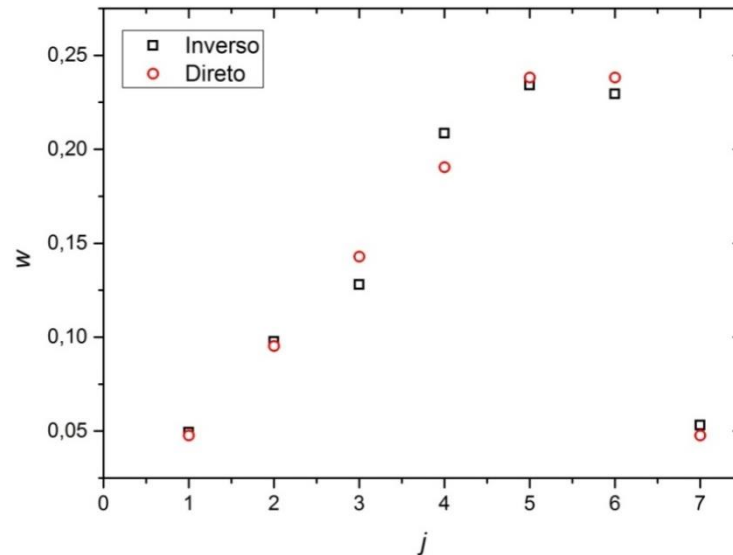


Figura 4.1 – Distribuição dos pesos das fontes, w , caso com 7 fontes no método direto

A Figura 4.2(a) mostra a média dos melhores resultados da função objetivo para 20 inicializações independentes do GEO, depois de 500 mil avaliações da função objetivo, η , para diferentes valores de τ . O valor de τ usado para obter a solução corresponde ao menor valor da média da função objetivo. De acordo com o gráfico foi escolhido o τ igual a 1,0. Para verificar o critério de parada do método, foi plotada a curva do número de avaliações pelo valor médio de vinte inicializações da função objetivo, Figura 4.2(b).

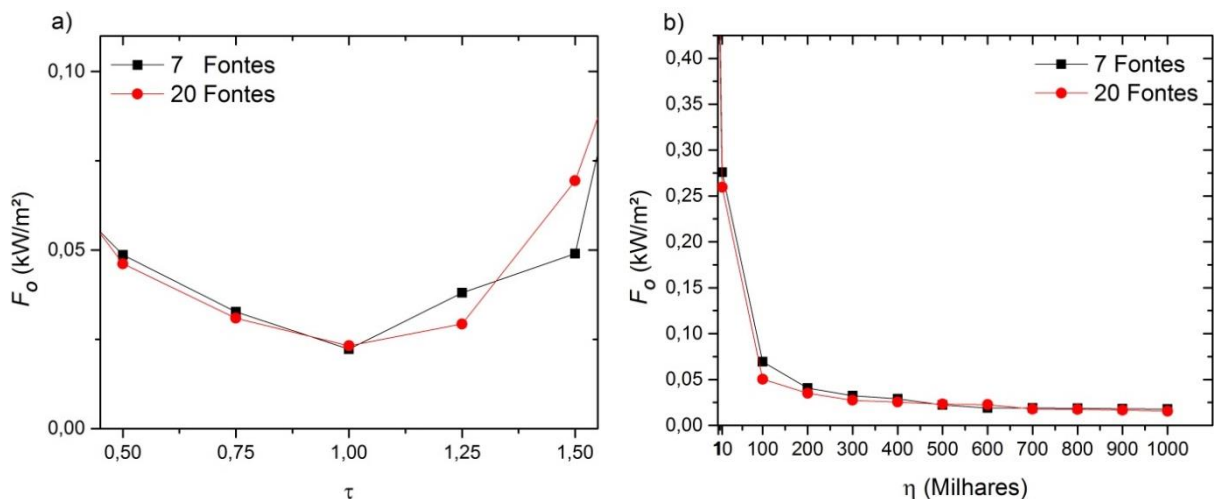


Figura 4.2 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η

A média da função objetivo não apresenta mudanças significativas depois de 600 mil avaliações, 0,7% em 100 mil avaliações da função objetivo. Por este motivo, o número de 600 mil avaliações da função objetivo foi adotado como critério de parada. A distribuição dos pesos recuperados pelo método inverso é mostrada na Figura 4.1, juntamente com a distribuição dos pesos utilizada para gerar o fluxo de calor empregado como dado de entrada, isto é, os pesos utilizados no método direto.

A Figura 4.1 mostra pequenas diferenças entre os pesos gerados pela distribuição linear da Equação (3.1), e os pesos recuperados pelo método inverso. A Figura 4.3(a) apresenta o fluxo de calor gerado pelo modelo WMP com a distribuição dos pesos obtidos pelo método inverso em comparação com o fluxo de calor gerado pelo método direto.

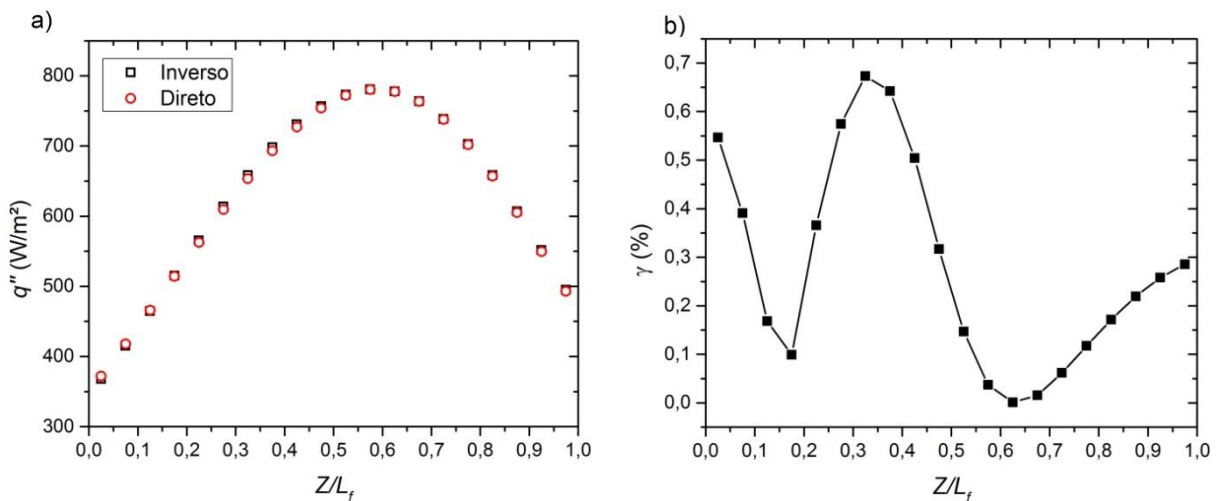


Figura 4.3 – Caso com 7 fontes; a) Fluxo de calor radiativo; b) Desvio

Apesar da diferença entre os pesos, a radiação incidente do método inverso tem o mesmo comportamento do método direto. Também é possível analisar o desvio entre os métodos na Figura 4.3(b). Observa-se que o desvio é menor que 0,7 % para todos os pontos de medições. Os resultados mostram que o método inverso empregado tem a capacidade de recuperar os pesos que geraram o fluxo de calor radiativo.

No segundo caso, observa-se o comportamento do método inverso com dados de radiação gerados de forma diferente. Como alternativa à geração de dados experimentais sintéticos, com a adição de perturbações nos resultados do método direto, foi feita a análise com o uso dos mesmos parâmetros. Porém, com 20 fontes pontuais no método direto, com a distribuição linear da Equação (3.1), e novamente sete fontes no método inverso. Pelo motivo do método direto e inverso ter o número diferente de fontes, não é possível a comparação

direta entre os pesos do método direto com os pesos obtidos na análise inversa. Para a comparação da distribuição dos pesos na Figura 4.4 são mostrados os pesos obtidos pelo método inverso divididos pelo valor da fonte com maior peso. Os pesos da distribuição linear utilizada para gerar os dados de entrada do método inverso, também são mostrados na figura, sendo normalizados pelo valor máximo.

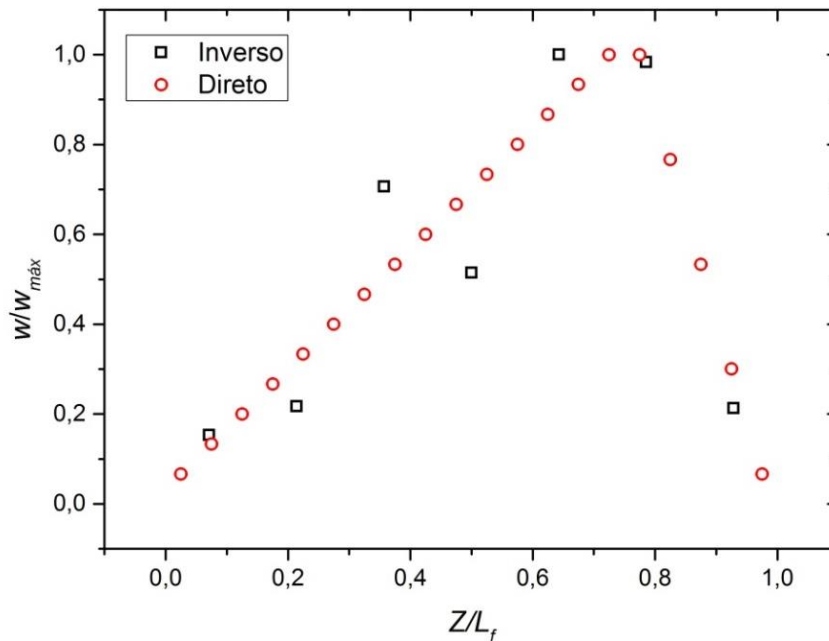


Figura 4.4 – Distribuição dos pesos das fontes, w , caso com 20 fontes no método direto

Os pesos obtidos no método inverso tem a mesma tendência apresentada pelos pesos do método direto, crescente até o valor de pico e depois deste valor decrescente, mas com variações antes do valor de pico. Na comparação feita com os resultados obtidos nos dois casos, a radiação incidente em cada ponto de medição geradas com os pesos do método inverso e direto é mostrada na Figura 4.5(a), e o desvio, γ , na Figura 4.5(b).

O método se mostrou robusto para a mudança nos dados de entrada. Mesmo com os dados de radiação incidente, a uma distância de 0,5 vezes o comprimento da chama obtidas de um modelo com o número de fontes diferente do modelo usado no método inverso, o desvio máximo ficou abaixo de 0,4%. Isto mostra que apesar do baixo número de fontes, sete fontes, é possível obter a distribuição do fluxo de calor radiativo próximo ao gerado pelo modelo com 20 fontes.

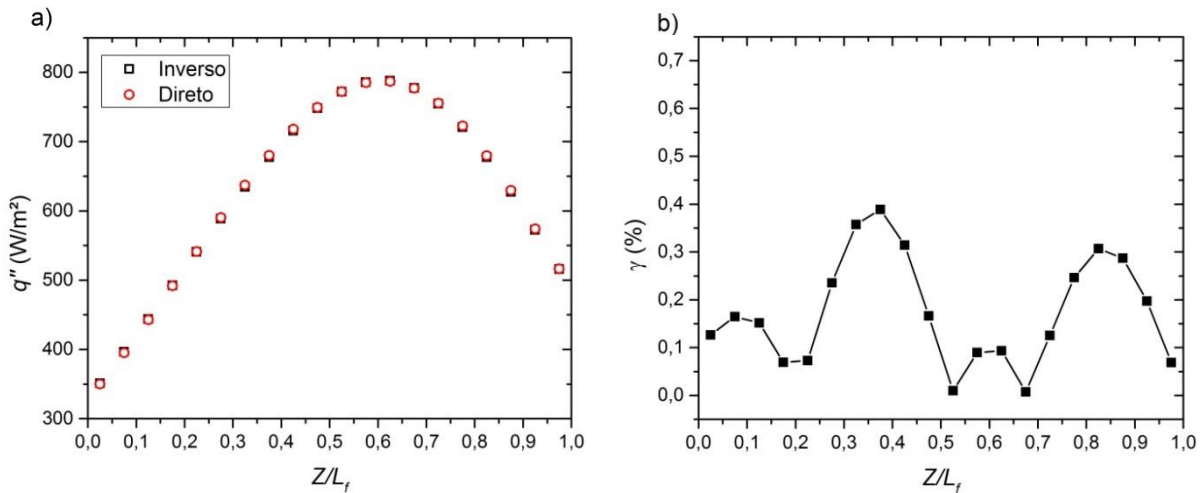


Figura 4.5 – Caso com 20 fontes; a) Fluxo de calor radiativo; b) Desvio

4.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo

No caso analisado para determinar os parâmetros do modelo, número de fontes e comprimento de distribuição das fontes, o modelo de fontes pontuais ponderadas foi alimentado diretamente com os dados experimentais de uma chama com potência de 0,25 kW. Apesar da chama analisada não pertencer ao conjunto de chamas utilizado no estudo, o objetivo é demonstrar o comportamento do fluxo de calor radiativo com a distribuição das fontes, depois de demonstrado o comportamento, o conjunto de doze fontes será utilizado para a escolha do comprimento de distribuição das fontes. Foram considerados 39 pontos de medições localizados a 0,07 m do eixo da chama, e através da análise inversa são obtidos pesos para as fontes pontuais. A Figura 4.6(a) mostra o gráfico para determinar o parâmetro τ e a Figura 4.6(b) mostra a convergência da média da função objetivo em função do número de avaliações, η .

O gráfico mostra que o τ responsável pelo menor valor médio da função objetivo corresponde a 1,25. A função objetivo não mostrou variação significativa após 500 mil avaliações, menos que 0,5% em 100 mil avaliações, o que mostra que o critério de parada escolhido é suficiente. Também são mostrados os resultados para as chamas 1 e 6 que serão utilizadas posteriormente para determinar o número de fontes.

Foram consideradas sete fontes pontuais distribuídas ao longo do eixo da chama. Depois de obtido os pesos de cada fonte através da análise inversa, foi gerado o fluxo de calor radiativo nas coordenadas correspondentes a cada ponto de medição experimental. A Figura

4.7(a) mostra a distribuição dos dados gerados pelo modelo de fontes pontuais com os pesos obtidos através do método inverso, em comparação com os dados experimentais.

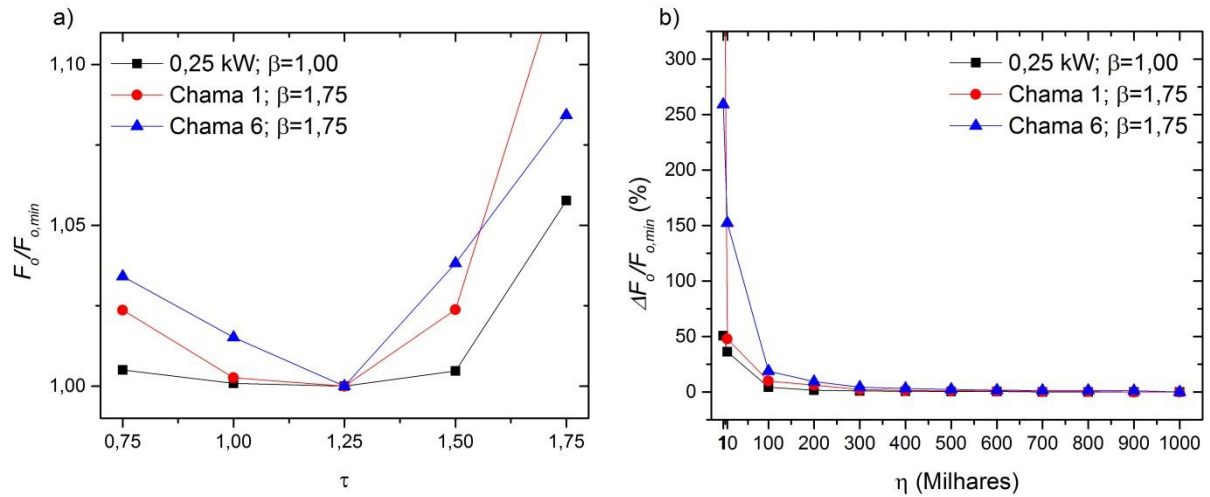


Figura 4.6 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η

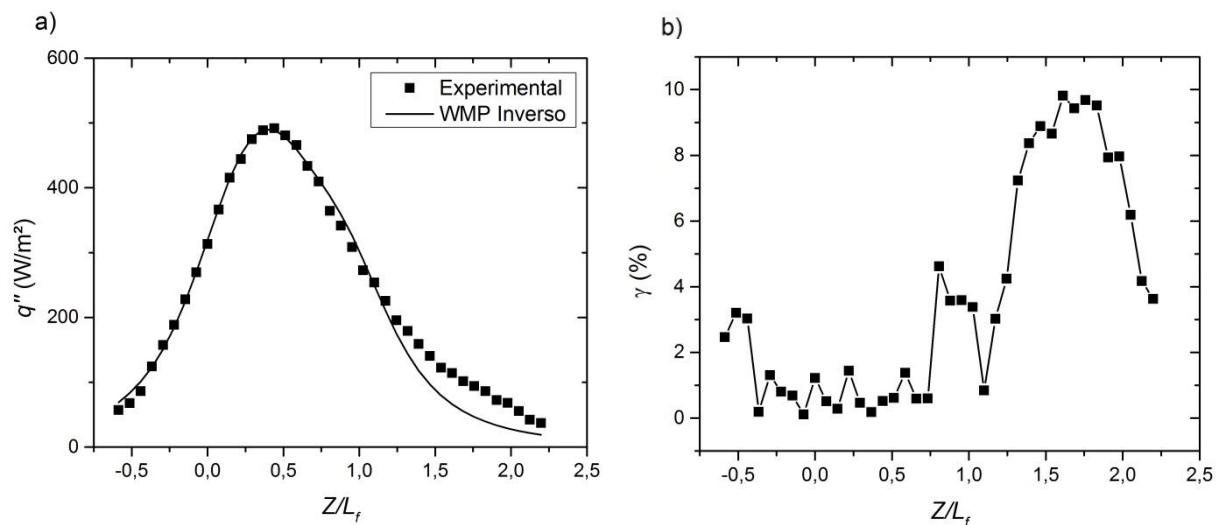


Figura 4.7 – a) Fluxo de calor a 0,7 m do eixo da chama de 0,25 kW; b) Desvio.

É possível observar que a distribuição do fluxo de calor tem resultados melhores no comprimento menor que o comprimento da chama, Z/L_f , entre 0 e 1,0. A Figura 4.7(b) mostra o desvio entre os valores do fluxo radiativo gerados através do modelo de fontes pontuais e obtidos experimentalmente.

O aumento dos desvios em uma distância axial maior que uma vez o comprimento da chama mostrados na Figura 4.7(b), se deve ao fato de que as fontes pontuais estão distribuídas somente no comprimento da chama. Sendo assim, o fluxo de calor é mais sensível às

mudanças dos pesos das fontes pontuais na distância abaixo do comprimento da chama, Z/L_f menor que 1,0.

Para observar o comportamento do fluxo radiativo na distância axial maior que uma vez o comprimento da chama foram distribuídas as sete fontes pontuais, ao longo do eixo da chama, nas distâncias de 1,25; 1,50; 1,75 e 2,00 vezes o comprimento da chama, constante β da Equação (2.11) na qual o comprimento da chama, 0,131 m, é estimado pela Equação (2.4). A Figura 4.8 mostra o desvio entre o fluxo gerado com os pesos obtidos através da análise inversa e dados experimentais para os quatro casos, em comparação com o caso com distribuição ao longo de uma vez o comprimento da chama, β igual a 1,0.

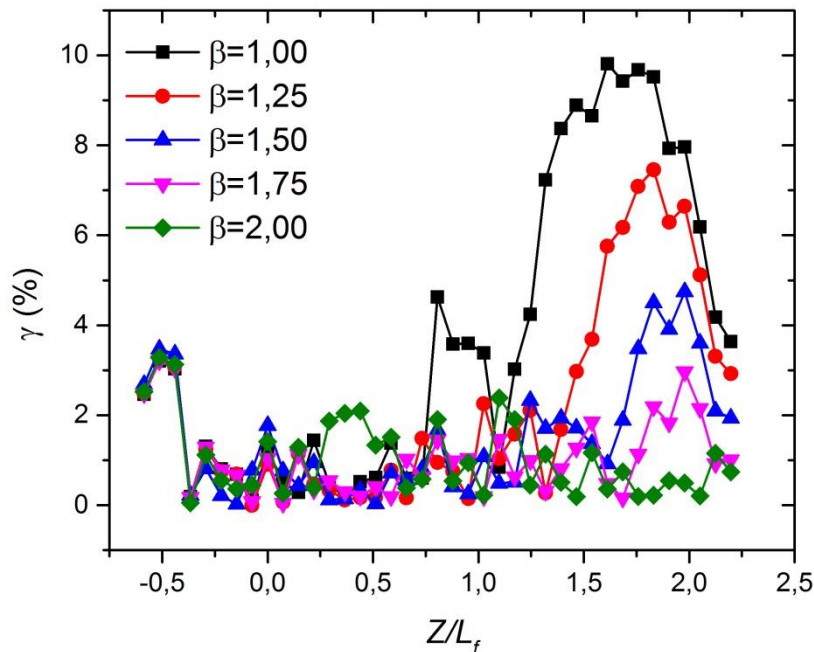


Figura 4.8 – Desvio para a chama de 0,25 kW com diferentes valores de β

No gráfico é possível observar que o desvio diminui na distância axial maior que uma vez o comprimento da chama, Z/L_f maior que um, com o aumento do domínio das fontes pontuais. A configuração com a distribuição das fontes de duas vezes o comprimento da chama demonstra o menor desvio médio, $\gamma_{méd} = 1,04\%$, para esta chama, apesar do desvio aumentar em Z/L_f menor que 1,0. A Figura 4.9 mostra a distribuição do fluxo de calor para os casos com a distribuição das fontes com o parâmetro β igual a 1,0 e igual a 2,0.

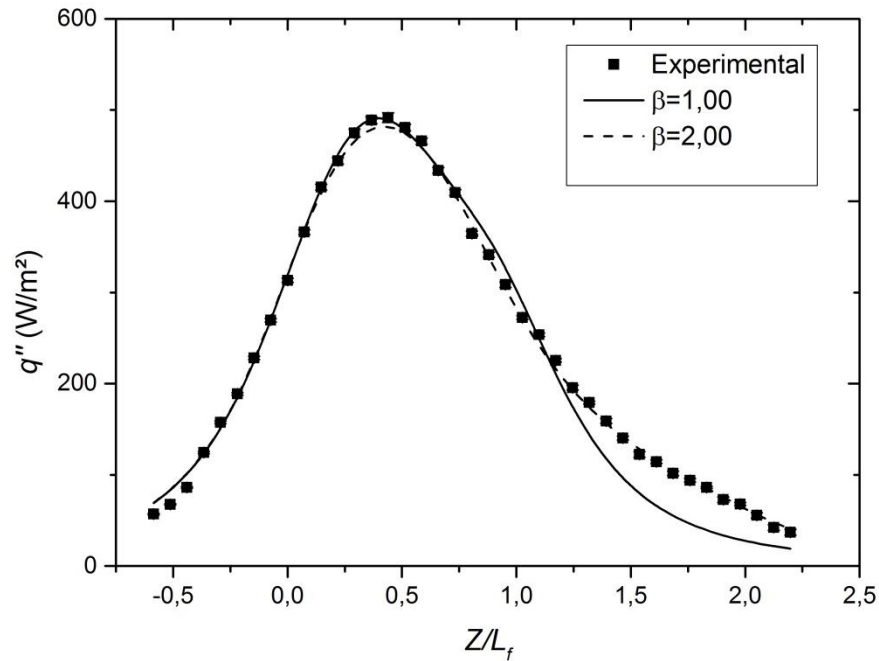


Figura 4.9 – Distribuição do fluxo radiativo, chama de 0,25kW com β igual a 1,0 e 2,0

No gráfico é possível observar que o caso com β igual a 2,0 tem uma distribuição do fluxo de calor radiativo mais próximo dos dados experimentais. Este estudo de caso mostra que o modelo é sensível à distância onde as fontes pontuais são distribuídas. Como a região do espectro infravermelho é responsável por grande parte da troca de calor radiativa, os gases quentes a jusante da parte visível da chama tem contribuição considerável na troca de calor radiativa, posicionar fontes acima da chama gera uma discretização da chama mais condizente com a realidade.

Para definir o comprimento de distribuição das fontes, L_S , o modelo WMP foi alimentado com dados experimentais do conjunto de doze chamas mostrado na Tabela 3.1. Através da análise inversa foram obtidos os pesos para as sete fontes pontuais para cinco comprimentos de distribuição, com β entre 1,0 e 2,0 com intervalos de 0,25, totalizando 60 simulações. A Tabela 4.1 mostra o resumo dos resultados.

A tabela mostra que o modelo consegue reproduzir os dados experimentais com pequenas diferenças, a distribuição das fontes igual a 1,75 teve um desvio menor que 5% para todos os pontos de medições das doze chamas. Como a fração radiante também é obtida pelo método inverso há uma pequena diferença em relação à fração radiante experimental.

Tabela 4.1 – Desvios entre resultados do modelo inverso e dados experimentais para o conjunto de doze chamas

β	$\gamma_{médio}$ [%]	$\gamma_{máx}$ [%]	Desvio Fração Radiante [%]
1,00	2,47	12,26	5,43
1,25	1,87	8,61	5,15
1,50	1,54	6,38	6,21
1,75	1,38	4,99	6,33
2,00	1,58	6,87	6,81

Para analisar a influência do número de fontes nos resultados, o modelo inverso foi alimentado com dados experimentais de duas chamas, chamas 1 e 6 da Tabela 3.1. Através da análise inversa foram obtidos os pesos para cada fonte e a fração radiante, para configurações de sete a quinze fontes pontuais com $\beta = 1,75$. A varredura para a escolha do parâmetro do GEO, τ , é mostrado na Figura 4.6(a) para as duas chamas, na Figura 4.6(b) é mostrada a evolução da função objetivo em relação ao número de avaliações da mesma. Na Figura 4.10(a) são mostrados os desvios médios entre os resultados gerados com o modelo para as duas chamas e os dados experimentais. O gráfico mostra que o desvio médio aumenta levemente com o aumento do número de fontes. Na Figura 4.10(b) são mostrados os desvios máximos entre os pontos de medições.

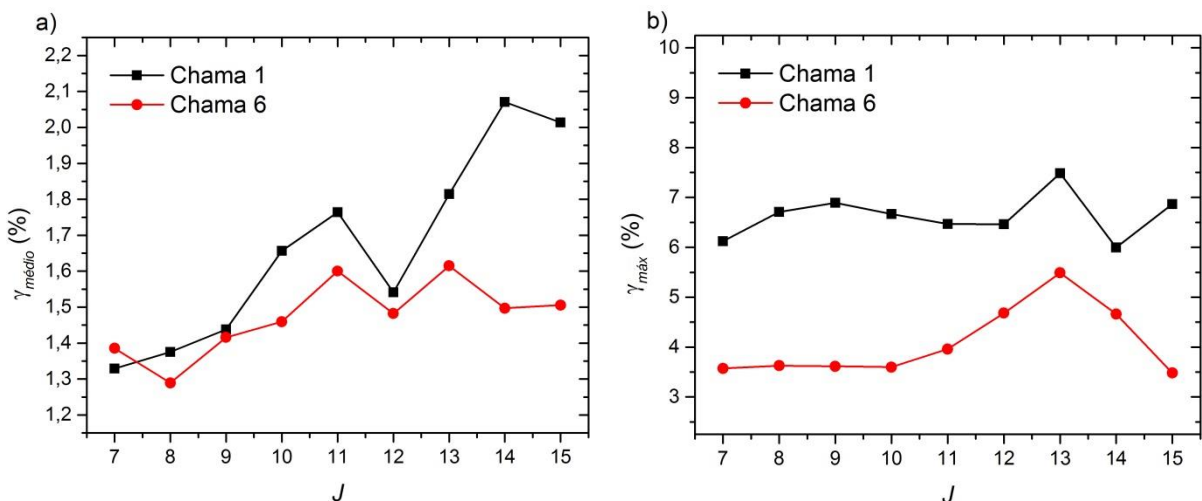


Figura 4.10 – a) Desvio médio b) Desvio máximo pelo número de fontes

É possível concluir que o aumento de número de fontes não gerou resultados melhores. Isto se deve ao fato de que com um maior número de fontes, o que resulta em mais variáveis de projeto, o método GEO tem maior dificuldade de obter os resultados, o que gera uma maior probabilidade de ficar preso em um mínimo local da função objetivo. Como o peso de cada fonte depende do somatório de todas as fontes, por causa da normalização dada pela Equação (3.8), o aumento do número de fontes diminui a sensibilidade do fluxo de calor radiativo que cada ponto de medição tem em relação à mudança do peso em cada fonte. Isto é, deve ocorrer uma mudança maior no peso de uma fonte para a mesma alteração no fluxo de calor, o que dificulta mais na obtenção do resultado no problema inverso. Por um lado, quanto maior o número de fontes mais discretizada a chama, é possível atribuir com maior precisão a contribuição de cada parte da chama. Por outro lado, a dificuldade de obter uma resposta do problema inverso é maior.

A Figura 4.11 mostra o tempo da cada simulação, normalizado pelo tempo da simulação com sete fontes pontuais. O custo computacional cresce linearmente com o aumento do número de fontes. As próximas análises serão feitas utilizando sete fontes, pelo fato de gerar resultados satisfatórios do fluxo de calor radiativo com menor custo computacional.

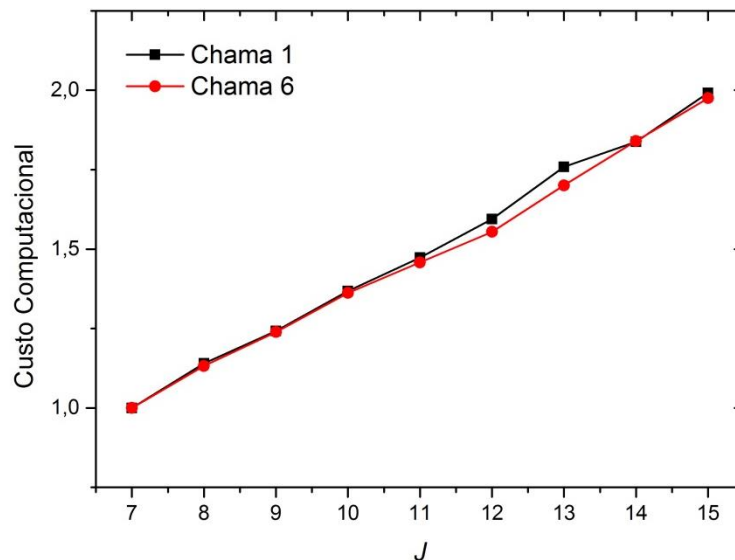


Figura 4.11 – Tempo computacional normalizado com o modelo de 7 fontes

4.3 Correlação entre Pesos e Parâmetros das Chamas com Comprimento Estimado

Apesar do peso de cada fonte ter relação com a potência da chama, na solução de um problema inverso, é possível obter mais de uma resposta para o mesmo conjunto de dados. Isso gera, mesmo com soluções individuais satisfatórias, uma aleatoriedade nas soluções. A Figura 4.12 mostra o peso da fonte um, w_1 , em função da potência da chama. A falta de uma correlação clara se repete para os pesos das outras seis fontes, mostradas no Apêndice A.

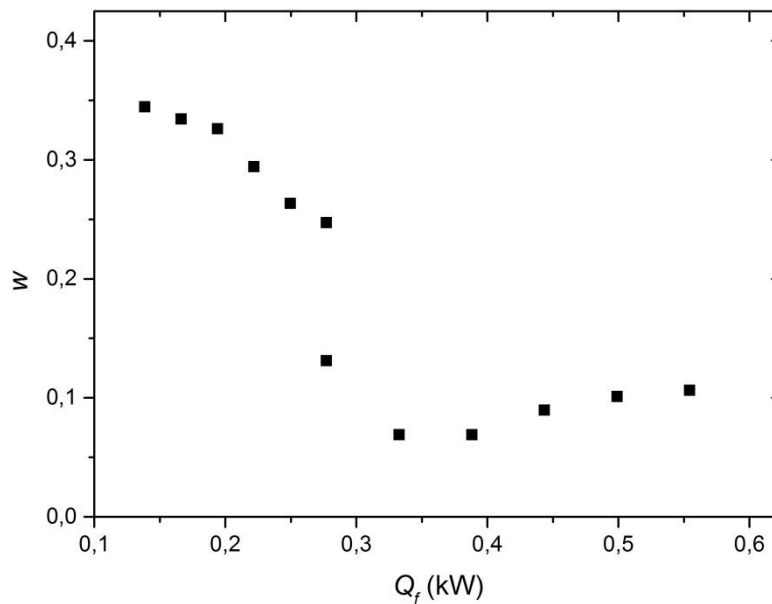


Figura 4.12 – w_1 em função da potência da chama

Para correlacionar o peso das fontes com a potência da chama, é proposta uma equação polinomial de segunda ordem, onde a constante D_j é utilizada para encontrar os pesos das fontes.

$$A_j Q_f^2 + B_j Q_f + C_j = D_j \quad (4.1)$$

onde A_j, B_j e C_j são coeficientes encontrados pela análise inversa para a fonte j . Para encontrar o peso de cada fonte, w_j , a Equação (3.8) deve ser atualizada para manter a condição do somatório dos pesos igual a um.

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^J D_j} \quad (4.2)$$

Assim, é possível obter uma correlação do peso de cada fonte, com a potência da chama. Para manter a condição de que todos os pesos devem ter o valor igual ou maior que zero, D_j deve ser igual ou maior que zero. Sendo assim, é imposta a função condicional no algoritmo na qual se D_j é menor que zero, o programa iguala D_j a zero.

A recuperação da fração radiante do modelo, X_R , é dada da mesma forma da recuperação dos pesos por uma equação polinomial de segunda ordem:

$$A_{X_R} Q_f^2 + B_{X_R} Q_f + C_{X_R} = X_R \quad (4.3)$$

Apesar da fração radiante do modelo considerar a fração radiante real, ela é um parâmetro de ajuste do modelo e não tem o mesmo significado físico. Para cada fonte são encontrados os três parâmetros da Equação (4.1), como são utilizadas sete fontes pontuais, para encontrar a fração radiante do modelo através da Equação (4.3), mais três parâmetros, assim o método inverso é responsável por recuperar um total de 24 parâmetros. Neste caso, foram utilizados os dados das doze chamadas mostradas na Tabela 3.1. Os intervalos utilizados para cada parâmetro, que foram encontrados com o teste de diferentes intervalos, tanto para os pesos quanto para os coeficientes da fração radiante do modelo são descritos abaixo:

$$\begin{cases} -5,0 \geq A \geq 5,0 \\ -5,0 \geq B \geq 5,0 \\ 0 \geq C \geq 10,0 \end{cases} \quad (4.4)$$

A Figura 4.13(a) mostra a média da função objetivo em relação ao parâmetro do GEO, τ . Para o caso, foi utilizado o τ igual 0,75. Outro parâmetro que afeta a solução é o número de avaliações da função objetivo, η . Neste caso o método inverso encontra a solução para o conjunto das chamadas. Isto é, contém mais parâmetros para ser encontrado pelo método inverso, o que pode exigir mais avaliações da função objetivo para chegar à solução. Por este motivo, a evolução da função objetivo é mostrada na Figura 4.13(b). O gráfico não mostra mudanças significativas na função objetivo depois de 700 mil avaliações, 0,3% para 100 mil avaliações, o que permite que 700 mil avaliações seja escolhido como critério de parada. Os coeficientes para gerar a distribuição dos pesos obtidos pelo método GEO são mostrados na Tabela 4.2.

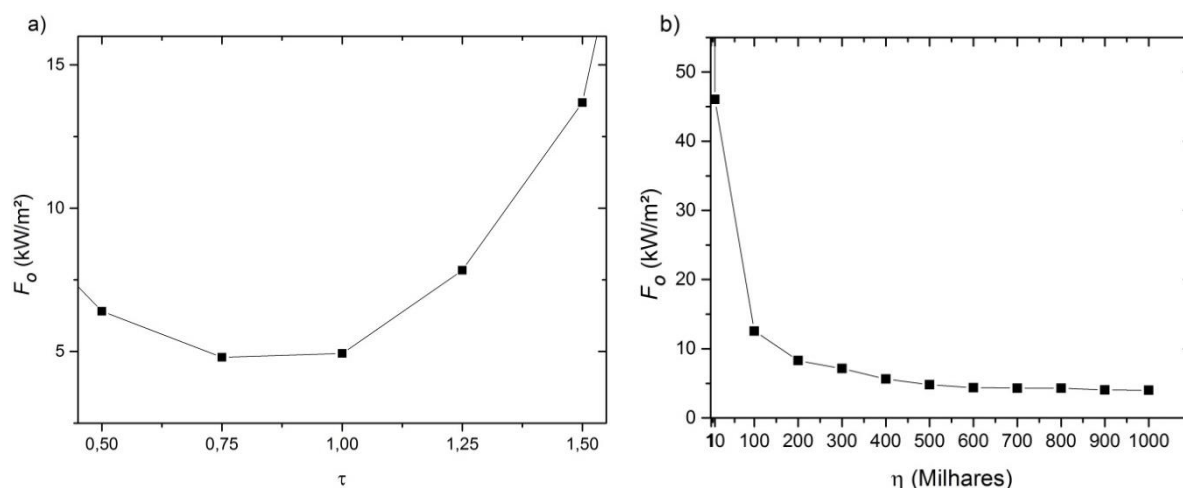


Figura 4.13 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η

Tabela 4.2 – Coeficientes obtidos pela análise inversa com L_f estimado

j	A_j	B_j	C_j
1	-4,8824	-4,6471	9,0980
2	1,6667	1,3137	9,8824
3	1,0784	4,3725	3,4902
4	-2,3333	1,5490	5,2157
5	-4,3725	-3,8235	0,6275
6	-4,8431	3,0392	1,2941
7	1,5882	-2,6078	1,0588
X_R	-0,6471	0,6078	0,0392

Os resultados obtidos foram comparados com outros dois modelos. O primeiro é o modelo WMP, com 25 fontes com pesos distribuídos linearmente pela Equação (3.1). O segundo modelo é o SPS, que é amplamente usado na indústria por sua simplicidade de aplicação, dado pela Equação (2.9). Em todos os modelos, o comprimento da chama foi estimado pela Equação (2.4). A Tabela 4.3 mostra os desvios médios entre os resultados de cada modelo com as medições experimentais.

Os resultados do modelo WMP com os pesos obtidos pela análise inversa tem o desvio médio menor que 5% para todos os casos. Em todas as chamas, o modelo WMP inverso tem o desvio médio menor que os modelos usados para comparação. Apesar dos pontos de medições estarem no campo próximo da chama, os modelos WMP linear e SPS tem desempenho

equivalente se comparados os maiores valores dos desvios médios. As distribuições do fluxo de calor radiativo obtidos para cada chama é mostrada no Apêndice B.

Tabela 4.3 – Desvios médios dos modelos com os dados experimentais, L_f estimado

$\gamma_{\text{médio}} [\%]$			
Chama f	WMP Inverso	WMP Linear	SPS
1	4,7	12,1	11,7
2	4,3	12,9	13,2
3	3,7	13,4	13,2
4	3,0	13,3	15,0
5	2,5	12,5	15,1
6	3,1	12,4	15,8
7	2,8	5,5	5,3
8	2,9	4,3	3,9
9	2,7	3,9	3,8
10	2,2	4,4	4,2
11	2,1	3,5	5,0
12	2,5	3,9	6,3

A Tabela 4.4 mostra a comparação dos três modelos através do desvio máximo. O modelo WMP inverso tem precisão melhor para todas as chamas analisadas. Se comparado o desvio máximo, o WMP inverso é superior aos outros modelos usados como comparativos, mas 18,6% de desvio máximo é um resultado pior que o resultado encontrado de 5%, mostrado na Tabela 4.1, obtido para a solução sem correlação dos pesos com a potência da chama.

Tanto os desvios médios, Tabela 4.3, quanto os desvios máximos, Tabela 4.4, o desvio é maior para as chamas de menor potência. Isto pode ser explicado pela imprecisão da Equação (2.4) em estimar o comprimento da chama. A Figura 4.14 mostra o desvio médio em relação ao desvio entre o comprimento visível da chama estimado e medido experimentalmente.

Tabela 4.4 – Desvio máximo do modelo WMP inverso, linear e SPS, L_f estimado

$\gamma_{m\acute{a}x}$ [%]			
Chama f	WMP Inverso	WMP Linear	SPS
1	18,6	34,1	39,3
2	13,2	36,9	45,8
3	8,7	38,9	29,3
4	5,0	38,5	57,2
5	6,3	37,7	59,8
6	5,1	38,9	64,3
7	7,7	17,0	12,7
8	7,1	18,1	9,8
9	6,8	15,7	9,1
10	5,6	15,5	9,5
11	7,8	11,9	12,4
12	6,9	11,4	15,4

A Figura 4.14 mostra a tendência do desvio médio do fluxo de calor radiativo aumentar com a dificuldade de prever o comprimento da chama. Apesar de o método inverso ter a capacidade de gerar soluções satisfatórias mesmo com uma estimativa imprecisa do comprimento da chama para soluções individuais de cada chama, o acoplamento da solução para o conjunto das chamas diminui a capacidade do método em determinar com acurácia soluções para os casos com maior desvio na estimativa do comprimento da chama.

Para eliminar a fonte de erro imposta pela estimativa do comprimento visível da chama, o método pode ser abordado com a utilização do comprimento de chama experimental, o que será feito na seção seguinte.

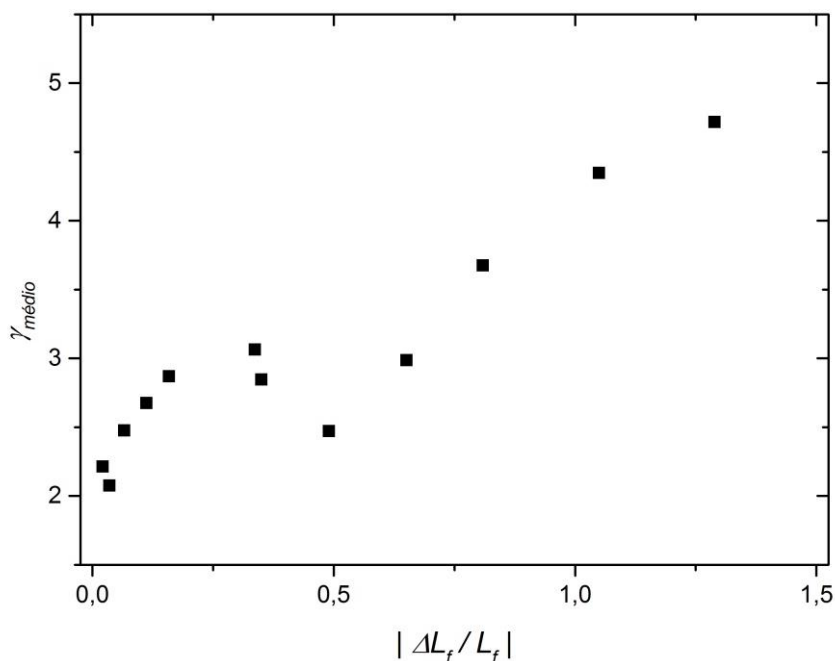


Figura 4.14 – Desvio médio pelo desvio do comprimento de chama

4.4 Correlação entre Pesos e Parâmetros das Chamas com Comprimento Medido

A utilização do comprimento da chama obtido experimentalmente permite avaliar o método inverso sem o acréscimo do erro relativo à estimativa do comprimento da chama. Depois de encontrado os pesos com o método inverso, o usuário das correlações pode utilizar um modelo para estimar o comprimento da chama com mais precisão, para a faixa de potência da chama. Como por exemplo, a Equação (2.3) para regime laminar de escoamento.

Novamente os dados experimentais utilizados são do conjunto de doze chamas apresentados na Tabela 3.1. As Equações (4.1) e (4.2) são empregadas para obter o peso de cada fonte j . Da mesma forma, a Equação (4.3) é usada para obter a fração radiante e os limites das variáveis de projeto são dados pela Equação (4.4). O comprimento para a distribuição das fontes é dado pela Equação (2.11), onde L_f é o comprimento experimental dado pela Tabela 4.5.

Como os parâmetros anteriores, o comprimento da distribuição das fontes, L_S , e o número de fontes, J , foram definidos para o comprimento da chama estimado pela Equação (2.4). Nesta última abordagem, o número de fontes foi testado entre duas até 12 fontes, e a constante β foi testada entre 1,0 e 2,5 com acréscimos de 0,25. O desvio máximo do fluxo de calor gerado pelo modelo do conjunto de chamas para cada parâmetro calculado pela Equação (3.7) é mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Comprimento de chama experimental [Machado, 2015]

Chama f	Q_f [kW]	$L_{f,exp}$ [m]
1	0,139	0,046
2	0,166	0,055
3	0,194	0,066
4	0,222	0,076
5	0,250	0,088
6	0,277	0,102
7	0,277	0,101
8	0,333	0,126
9	0,388	0,139
10	0,444	0,166
11	0,499	0,176
12	0,554	0,189

Tabela 4.6 – Desvio máximo em função de J (linhas) e β (colunas)

$\gamma_{m\acute{a}x}$ [%]							
J	$\beta = 1,00$	$\beta = 1,25$	$\beta = 1,50$	$\beta = 1,75$	$\beta = 2,00$	$\beta = 2,25$	$\beta = 2,50$
2	23,6	18,9	16,7	19,8	31,5	33,2	37,6
3	24,1	18,1	14,3	15,1	12,6	15,2	17,2
4	21,1	21,2	15,5	13,7	12,3	11,8	12,4
5	22,6	19,5	16,8	12,5	11,6	11,8	9,0
6	22,9	19,5	15,6	11,0	10,9	14,2	10,3
7	18,2	17,8	16,5	13,1	9,8	8,6	9,5
8	26,0	18,3	17,4	13,8	11,8	15,4	15,7
9	21,9	19,3	24,7	13,4	15,5	11,7	11,2
10	20,1	20,5	18,9	15,2	24,5	14,4	12,3
11	20,5	18,2	13,7	19,7	18,1	10,2	15,1
12	29,9	17,5	14,4	13,0	17,4	12,4	14,1

O resultado com o menor desvio máximo, $\gamma_{m\acute{a}x}$ igual a 8,6%, é encontrado com sete fontes e o parâmetro β igual a 2,25. O desvio médio para os mesmos parâmetros é de 2,9%. O desvio médio para as outras configurações são mostrados na Tabela C.1 no Apêndice C. Apesar de todas as 77 análises seguirem o mesmo procedimento para determinar os parâmetros do GEO, o procedimento é demonstrado somente para obtenção do melhor caso, com sete fontes e distribuição das fontes com β igual a 2,25. A Figura 4.15(a) mostra a média da função objetivo em relação ao parâmetro do algoritmo GEO.

Foi escolhido o resultado correspondente ao τ igual a 1,0. A evolução da média da função objetivo em comparação ao número de avaliações é mostrada na Figura 4.15(b). Depois de 700 mil avaliações, a função objetivo tem a variação menor que 1,3% em 100 mil avaliações. A Tabela 4.7 mostra as variáveis de projeto encontradas para o caso escolhido.

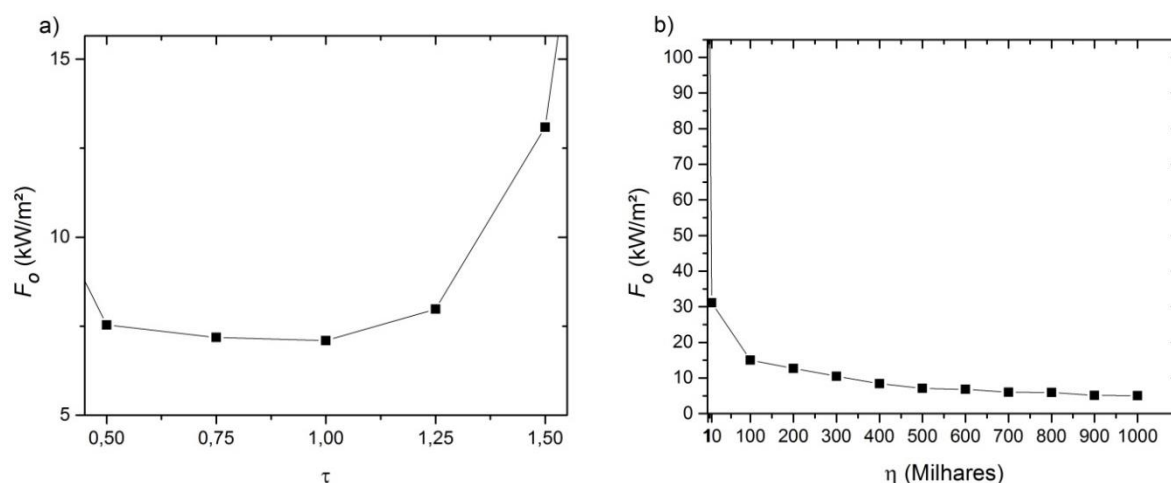


Figura 4.15 – a) Função objetivo em relação a τ ; b) Função objetivo em relação a η

Tabela 4.7 – Coeficientes obtidos pela análise inversa com L_f experimental

j	A_j	B_j	C_j
1	-3,3137	-2,3725	5,3333
2	4,6078	5,0000	4,8627
3	4,6471	-2,3333	2,5098
4	-4,7647	-5,0000	5,0196
5	-2,3333	-4,8824	1,9216
6	-4,7255	-5,0000	2,7451
7	-5,0000	0,0196	1,4118
X_R	-0,7255	0,6471	0,0392

Com a aplicação das variáveis da Tabela 4.7 na Equação (4.1) em conjunto com a potência da chama encontra-se o valor de D_j , e com este valor encontra-se w_j com a Equação (4.2). Para encontrar o valor de X_R , os valores de A_{X_R} , B_{X_R} e C_{X_R} , da última linha da Tabela 4.7 com a potência da chama são diretamente substituídos na Equação (4.3). A Figura 4.16 mostra a distribuição dos pesos para algumas das chamas.

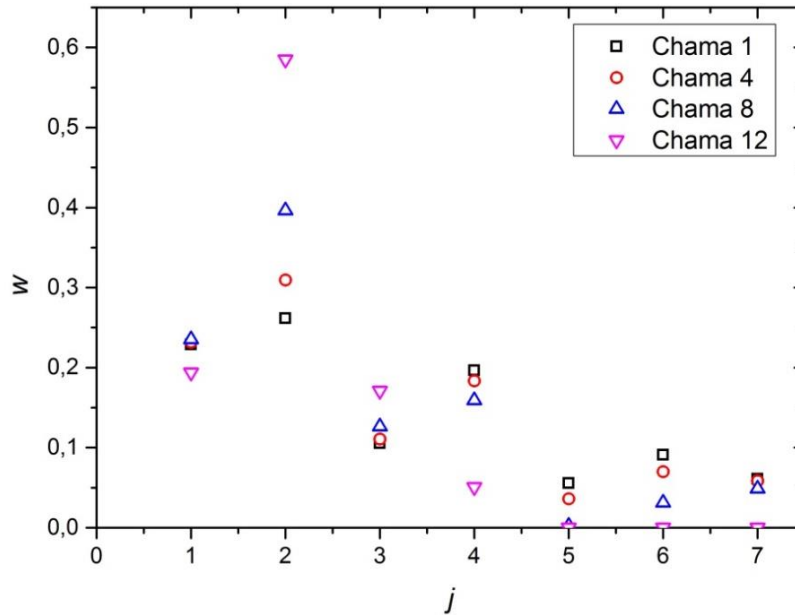


Figura 4.16 – Distribuição dos pesos das chamas 1,4,8 e 12

É possível observar que as fontes de 1 até 3 ganham mais importância com o aumento da potência da chama. Através da substituição do termo L_s da Equação (3.2) pela Equação (2.11) com $\beta = 2,25$, nota-se que as fontes 1, 2 e 3 estão distribuídas dentro do comprimento visível da chama, enquanto que as fontes 4 à 7 estão distribuídas na região acima da chama. A solução para a chama 12 exemplifica como uma solução com um número menor de fontes pode ser obtida pelo método inverso. No caso, a solução encontrada tem somente quatro fontes distribuídas em um comprimento menor que o proposto para sete fontes. Na Figura 4.17, é mostrada a comparação entre a fração radiante do modelo com a fração radiante medida experimentalmente.

A fração radiante do modelo tende a ser maior que a fração radiante experimental calculada pela Equação (2.13). Como discutido nas Seções 2.5 e 3, a fração radiante é um parâmetro do modelo e a análise inversa a utiliza como um meio de equalizar a influência de um peso sobre os outros. Isto é, um peso que não tem muita influência sobre o fluxo de calor

nos pontos de medições pode ter um valor alto sem prejudicar a solução diretamente. Mas por causa da normalização pela Equação (4.2), o peso das outras fontes é modificado e a alteração dos valores dos pesos é contornada pelo aumento do valor da fração radiante do modelo. A Tabela 4.8 mostra a comparação dos resultados dos modelos em função do desvio médio dado pela Equação (3.6).

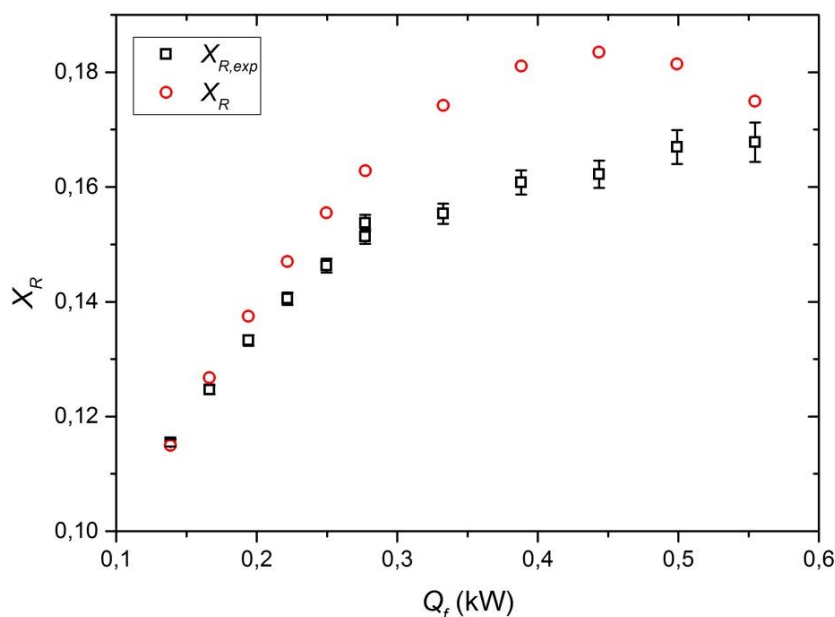


Figura 4.17 – Fração radiante em função da potência da chama

O modelo WMP com os pesos obtidos pela análise inversa tem resultados melhores se comparado aos resultados com o comprimento da chama estimado. O pior resultado passou de 4,7%, Tabela 4.3 chama 1, para 4,1% na chama 8, enquanto que o melhor resultado antes de 2,1% com a utilização do comprimento experimental é de 1,2%. A maior parte dos resultados gerados pelos modelos WMP linear e SPS também demonstram melhora. Apesar disto, o melhor resultado do modelo SPS passou de 3,8% para 4,1%. O modelo WMP inverso tem resultados com o desvio menor que os outros modelos utilizados para comparação, em todos os casos analisados.

A Figura 4.18 mostra a distribuição do fluxo de calor radiativo em relação à altura adimensional da chama 8, caso com o pior resultado para o modelo WMP inverso. Os dados experimentais são exibidos como pontos com a incerteza de medição mostrada nas barras de erro. Os modelos SPS e WMP com a distribuição dos pesos linear também são exibidos no mesmo gráfico para comparação entre os resultados.

Tabela 4.8 – Desvios médios dos modelos com os dados experimentais, L_f experimental

$\gamma_{\text{médio}} [\%]$			
Chama f	WMP Inverso	WMP Linear	SPS
1	3,1	9,4	11,5
2	3,8	10,3	12,9
3	4,0	11,4	14,4
4	3,8	11,8	15,3
5	3,0	10,7	14,9
6	2,2	10,7	14,9
7	2,3	4,6	7,2
8	4,1	3,6	4,5
9	2,8	3,1	4,1
10	2,6	4,8	4,3
11	1,2	4,0	4,7
12	2,2	4,9	6,1

Na Figura 4.18, é possível observar que mesmo sendo o pior resultado do modelo WMP com os pesos obtidos pelo método inverso, o fluxo de calor radiativo tem o comportamento próximo ao dos dados experimentais. Os resultados são próximos aos obtidos pelos modelos usados como comparativos. Para uma análise de todas as chamas, a Tabela 4.9 mostra o desvio máximo entre os dados obtidos pelos três modelos e os dados experimentais, calculado pela Equação (3.7).

O maior erro entre o fluxo de calor radiativo obtido pelo modelo WMP inverso e o fluxo de calor medido em todos os 251 pontos de medições é de 8,6%, e ocorre na chama 2. Apesar de ainda ser maior que o desvio máximo obtido para a solução das chamas separadas, isto é um resultado esperado pelo aumento da restrição de resultados, ao acoplar os pesos com a potência da chama para resolver todas as doze chamas pela Equação (4.1). A Figura 4.19 mostra a distribuição do fluxo de calor para a chama, com o desvio máximo de 8,6% para o modelo WMP inverso.

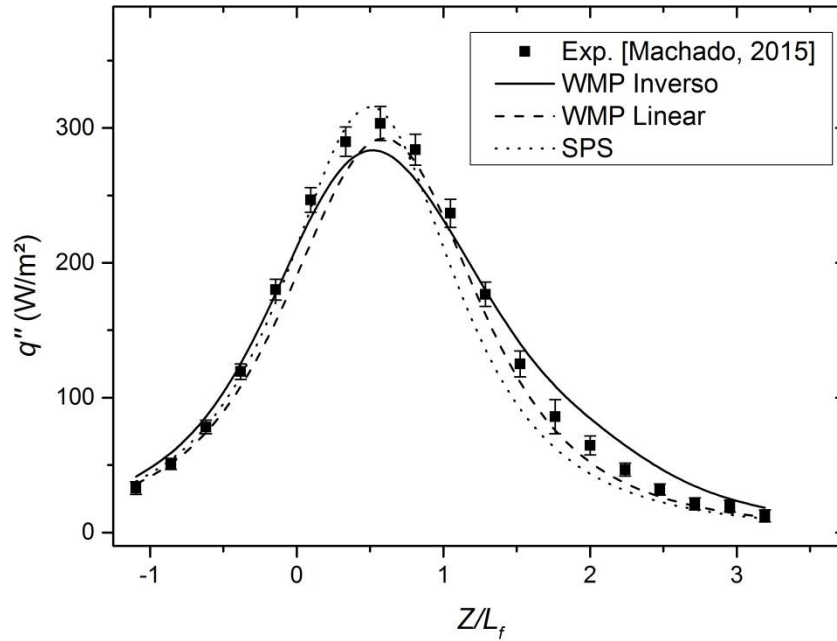


Figura 4.18 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 8

Tabela 4.9 – Desvio máximo do modelo WMP inverso, linear e SPS, L_f experimental

Chama f	$\gamma_{m\acute{a}x}$ [%]		
	WMP Inverso	WMP Linear	SPS
1	8,3	19,3	26,8
2	8,6	27,4	34,8
3	8,3	28,9	44,0
4	7,9	31,5	48,7
5	6,8	31,1	47,4
6	6,3	32,6	59,1
7	7,6	15,4	19,6
8	7,5	10,6	13,4
9	5,4	9,9	13,3
10	7,3	16,7	9,1
11	4,0	13,9	11,2
12	5,2	15,3	13,9

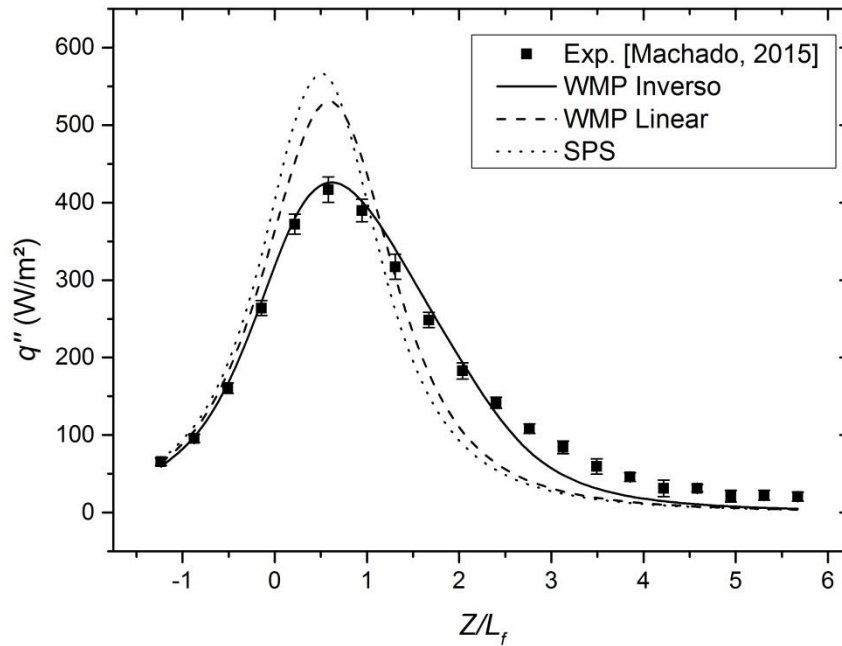


Figura 4.19 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 2

O gráfico mostra que apesar de ser o resultado com o maior desvio máximo, a distribuição do fluxo de calor gerada pelo modelo WMP com os pesos obtidos pelo método inverso é mais compatível com os dados experimentais do que os modelos utilizados para comparação. As diferenças são mais significantes na estimativa do valor de pico do fluxo de calor, o que em uma aplicação prática pode gerar um custo alto por erros de dimensionamento de áreas isoladas.

A Figura 4.20 mostra os resultados para a chama com o menor desvio médio e máximo. Neste caso, a distribuição do fluxo de calor radiativo é próxima aos resultados experimentais. Na maioria dos pontos, o resultado do modelo está dentro da faixa de incerteza de medição apresentada pelas barras de erro no gráfico.

Na Figura 4.21 e na Figura 4.22 são mostradas a distribuição do fluxo de calor para as chamas 6 e 7 respectivamente. As chamas 6 e 7 tem a mesma potência, por este motivo, os pesos obtidos pelo método inverso são os mesmos. No entanto, as medições foram feitas a distâncias axiais do eixo da chama diferentes. As medições da chama 6 foram feitas a uma distância de 0,054 m e a chama 7 a 0,114 m, 0,53 e 1,13 R/L_f respectivamente. A diferença na distância axial proporciona diferentes distribuições do fluxo de calor para um mesmo conjunto de pesos.

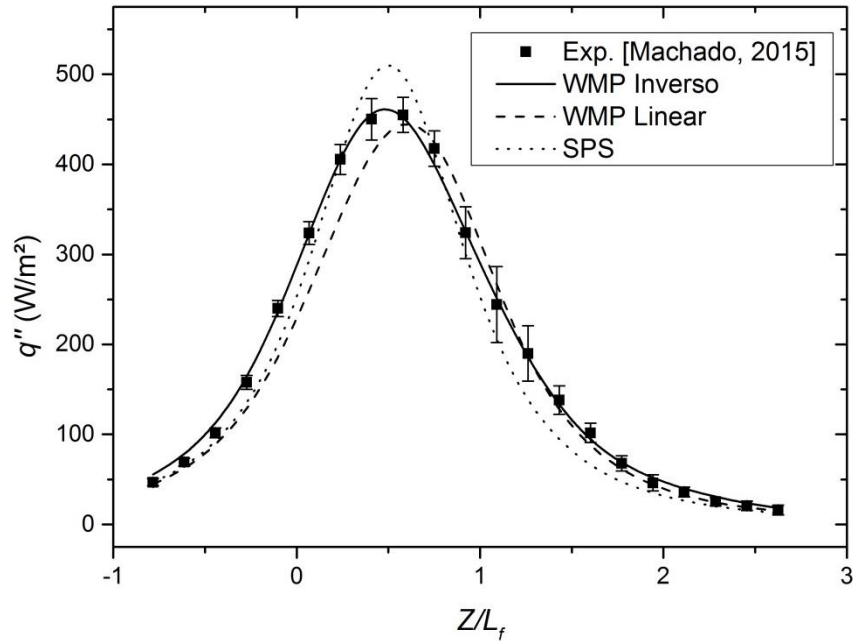


Figura 4.20 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 11

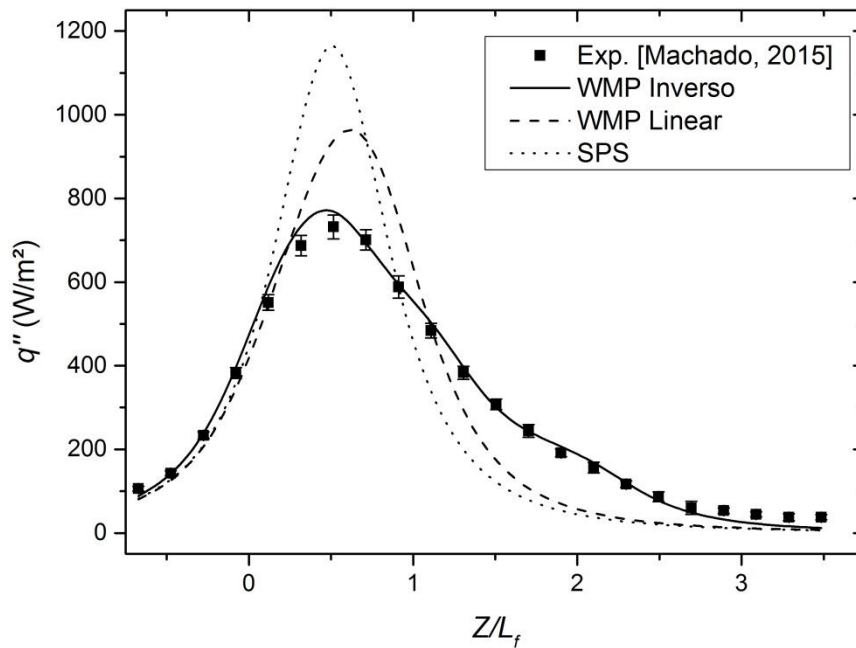


Figura 4.21 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 6

Os resultados dos gráficos mostram que o modelo WMP com os pesos obtidos através do método inverso é capaz de estimar o fluxo de calor radiativo com precisão para diferentes distâncias axiais. Na Figura 4.21 é possível observar que o modelo WMP mesmo com a distribuição linear dada pela Equação (3.1) gera a distribuição do fluxo de calor radiativo mais próxima dos dados experimentais que o modelo SPS. No entanto, na distância maior

representada na Figura 4.22, os modelos tem desempenho semelhante. O modelo WMP, com os pesos obtidos através do método inverso demonstra resultados mais condizentes com os dados experimentais da chama 6, do que os modelos usados para comparação. A distribuição do fluxo de calor radiativo das chamas 1, 3, 4, 5, 9, 10 e 12 para sete fontes com distribuição das fontes em 2,25 vezes o comprimento da chama são mostradas no Apêndice C.

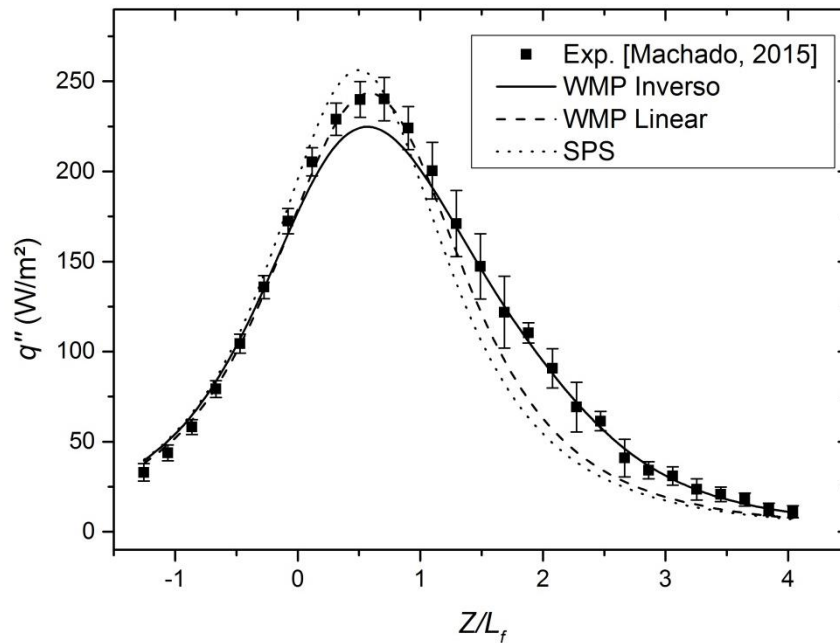


Figura 4.22 – Distribuição do fluxo de calor radiativo da chama 7

É importante ressaltar que a distribuição dos pesos obtidos pelo método inverso foi otimizada para obter os melhores resultados na faixa laminar da chama do tipo jato de metano-ar. São necessários dados experimentais de uma faixa mais ampla de potência de chamas, combustíveis e regimes de escoamento para estender a faixa de aplicabilidade do modelo para a faixa em que o modelo WMP com a distribuição dos pesos linear, e o modelo SPS abrangem.

5 CONCLUSÕES

Uma estimativa precisa do fluxo de calor radiativo permite o descarte de vapor e gases não desejados sem prejudicar a segurança de pessoas e equipamentos na indústria de óleo e gás. O superdimensionamento de áreas isoladas em razão de uma estimativa pobre do fluxo de calor tem alto custo, principalmente em instalações em mar aberto.

As dificuldades provenientes dos mecanismos complexos das reações químicas da combustão, escoamento e radiação térmica em gases participantes tornam a estimativa do fluxo de calor, com o uso de modelos físicos através da simulação numérica, complexa e com alto custo computacional. Modelos matemáticos simplificados, como o WMP e SPS, tem baixo custo computacional e são mais simples de serem usados, o que os tornam boas ferramentas de engenharia.

No presente trabalho, é proposta uma metodologia para definir a distribuição dos pesos no modelo WMP. As correlações foram desenvolvidas para chamas laminares de metano e ar para diferentes valores de potência da chama, e o peso de cada fonte foi correlacionado com a potência da chama. Para a obtenção dos pesos de cada fonte foi empregada a análise inversa com a utilização do GEO, como alternativa ao método de tentativa e erro, no qual uma distribuição dos pesos é proposta e depois comparado o resultado do modelo com dados experimentais.

O método da Otimização Extrema Generalizada (GEO) é estocástico e se fundamenta na teoria da evolução das espécies. No GEO, todas as variáveis do problema são codificadas através de uma única sequência de bits, que são invertidos e ordenados de acordo com a variação no valor da função objetivo. São mantidas somente as espécies mais adaptadas, ou seja, as configurações de bits que retornam os melhores valores para a função objetivo. Uma das vantagens deste método é que possui um único parâmetro ajustável, o qual controla a probabilidade da inversão dos bits.

O método inverso teve a capacidade de encontrar os pesos com boa precisão, pois conseguiu recuperar os resultados com desvio máximo de 0,4% para a distribuição do fluxo de calor radiativo gerado pelo modelo WMP com a distribuição dos pesos linear. A obtenção desse resultado mostra que apesar do fluxo de calor ser dependente do número de fontes com a utilização da distribuição linear, para menos que 20 fontes, uma quantidade menor de fontes, no caso estudado sete fontes, com os pesos recuperados pelo método inverso tem a capacidade de gerar uma distribuição semelhante do fluxo de calor.

Com o emprego de dados experimentais foi possível observar que o modelo WMP com os pesos obtidos pelo método inverso representa adequadamente os fenômenos envolvidos nas chamas analisadas. Apesar da maior dificuldade imposta pela incerteza intrínseca de dados experimentais foi possível obter resultados com o desvio máximo para o conjunto de chamas menor que 5%, para os pesos obtidos para cada chama separadamente.

Em relação ao parâmetro proposto para distribuir as chamas em uma extensão maior que o comprimento visível da chama, β , a distribuição das fontes em um comprimento maior gera resultados mais condizentes com a física do problema. A transferência de calor radiativo ocorre principalmente na região do espectro infravermelho, o que abrange tanto a região na qual a chama é visível quanto à região acima da chama. Com o uso do comprimento experimental da chama, $\beta = 2,25$ demonstrou os melhores resultados para a faixa de potência das chamas utilizadas.

Com a atribuição da função polinomial de segunda ordem para correlacionar os pesos à potência da chama, o modelo WMP mostrou-se uma alternativa adequada para estimar o fluxo de calor radiativo na região próxima da chama. Apesar do fluxo de calor radiativo apresentar o desvio máximo de 18,6% com o comprimento da chama estimado, o fato de necessitar somente o dado de potência da chama, e os coeficientes encontrados pelo método inverso para gerar a distribuição dos pesos das fontes é uma vantagem sobre os outros modelos. O aumento de complexidade da obtenção da correlação dos pesos no conjunto de chamas, como alternativa a obtenção dos pesos para cada chama separadamente aumentou o desvio máximo obtido, por restringir o número de soluções possíveis.

Ao eliminar a fonte de erro imposta pela estimativa imprecisa do comprimento da chama, a aplicação do modelo perdeu simplicidade ao necessitar de mais um parâmetro para distribuir as fontes. Por outro lado, os resultados obtidos tem desvio máximo igual a 8,6%. A aplicação do modelo WMP com os coeficientes obtidos pela análise inversa demonstrou acuracidade satisfatória para todas as chamas testadas. O modelo é de implementação relativamente simples, pois não necessita de muitas informações sobre a chama, e requer baixo custo computacional. Portanto, pode ser facilmente implementado com uma planilha de cálculo. A principal vantagem deste modelo sobre outros modelos é a possibilidade de estimar o fluxo de calor em um campo próximo da chama, em distâncias diferentes dos dados experimentais utilizados para obter os pesos das fontes.

Como sugestões de trabalhos futuros, a metodologia pode ser aplicada para outras condições, como outros combustíveis, regime de escoamento, dimensões da chama, com

dados obtidos tanto com chamas experimentais ou geradas por simulações computacionais detalhadas. Os pesos podem ser correlacionados com outros parâmetros das chamas, como tempo de residência característico ou diluição do combustível. Outras funções de correlação entre os pesos e parâmetros da chama podem ser testadas. A abordagem pode ser repetida com outras equações para estimar o comprimento da chama com maior precisão. A utilização de uma quantidade maior de dados experimentais, como a medição da distribuição do fluxo de calor em distâncias radiais diferentes, para a mesma chama pode restringir o número de soluções possíveis, e garantir a precisão do modelo proposto em toda a região próxima da chama.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API, **Recommended Practice 521 Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems**, Fourth Edition, American Petroleum Institute, Washington D. C., 1997.

Bak, P.; Sneppen, K. Punctuated Equilibrium and Criticality is a Simple Model of Evolution, **Physical Review Letters**, v. 71, p. 4083-4086, 1993.

Boettcher, S.; Percus, A. G. Optimization with Extremal Dynamics. **Physical Review Letters**, v. 86, p. 5211-5214, 2001.

Brittes, R.; França, F. H. R. A Hybrid Method for the Thermal Design of Radiative Heating Systems, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 48-57, 2013

Brittes, R.; França, F. H. R. Solution of the Enclosure with a Hybrid Inverse Method, **Proceedings to 13th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering**, 2010.

Brzustowski, T. A. Flaring in the energy industry, **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 2, n. 3, p. 129-141, 1976.

Brzustowski, T. A.; Sommer, E. C. Predicting Radiant Heating from Flares, **Proceedings to Division of Refining**, v. 53, p. 865-893, 1973.

Cassol, F.; Schneider, P. S.; França, F. H. R.; Sousa, F. L.; Neto, A. J. S. Inverse analysis applied to illumination design: determination of optimum locations of the light sources, **Proceedings of 12th ENCIT**, Belo Horizonte, 2008.

Cassol, F.; Schneider, P. S.; França, F. H. R.; Sousa, F. L.; Neto, A. J. S. Inverse analysis applied to illumination design: determination of optimum locations and powers of the light sources, **Proceedings of 20th COBEM**, Gramado, 2009.

Chamberlain, G. A. Developments in Design Methods for Predicting Thermal Radiation from Flares, **Chemical Engineering Research and Design**, v. 65, p. 299-309, 1987

Cook, D. K.; Fairweather, M.; Hammonds J.; Hughes D. J. Size and Radiative Characteristics of Natural Gas Flares. Part I-Field Scale Experiments, **Chemical Engineering Research and Design**, v. 65, p. 310-317, 1987.

Cook, J.; Bahrami, Z.; Whitehouse, R. J. A Comprehensive Program for Calculation of Flame Radiations Levels, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.3 , p.150-155, 1990.

Daun, K.J .; Howell, J. R. Inverse design methods for radiative transfer systems, **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 93, p. 43-60, 2005.

Denison, M. K.; Webb, B. W. A spectral line-based weighted sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE solvers, **Journal of Heat Transfer**, v. 115, p. 1004-1011, 1993.

De Faveri, D. M.; Fumarola, G.; Zonato, C.; Ferraiolo, G. Estimate Flare Radiation Intensity, **Hydrocarbon Processing**, v. 64, n. 5, p. 89-91, 1985.

De Sousa, F. L.; Ramos, F. M.; Paglione, P.; Girardi, R. M. New Stochastic Algorithm for Design Optimization, **AIAA Journal**, v. 41, p. 1808-1818, 2003.

De Sousa, F. L., Soeiro, F. J. C. P., Silva Neto, A. J., Ramos, F. M. Application of the generalized extremal optimization algorithm to na inverse radiative transfer problem, **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 15, n. 7, p. 699-714, 2007.

Dorigon, L. J. Determinação dos Coeficientes para o Modelo da Soma-Ponderada-dos-Gases-Cinzas a partir do Banco de Dados HITEMP 2010, **Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica UFRGS**, 2012.

Ekoto, I. W.; Ruggles, A. J.; Creitz, L. W.; Li, J. X. Updated Jet Flame Radiation Modeling with Buoyancy Corrections, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, p. 20570-20577, 2014.

Faeth, G. M.; Gore, J. P.; Chuech, S. G.; Jeng, S. M. Radiation from turbulent diffusion flames, **Annual Review of Heat Transfer**, p. 1-38, 1989.

Freeimages. **North Rankin A platform, off the North West Shelf**, www.freeimages.com, 2005. Disponível em: <<http://www.freeimages.com/photo/offshore-gass-platform-3-1239464>> Acesso em: 4 de agosto de 2015

Galski, R. L., de Sousa, F. L., Ramos, F. M., Silva Neto, A. J. Application of a GEO + AS hybrid optimization algorithm to the solution of an inverse radiative transfer problem, **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 17, n. 3, p. 321-334, 2009.

Glassman, I. Soot formation in combustion processes, **Symposium (International) on Combustion**, v. 22, n. 1, p. 295–311, 1988.

Hamins, A.; Klassen, M.; Gore, J.; Kashiwagi, T. Estimate of Flame Radiance via Single Location Measurement in Liquid Pool Fires, **Combustion and flame**, v. 86, p. 223-228, 1991.

Hankinson, G.; Lowesmith, B. J. A consideration of methods of determining the radiative characteristics of jet fires, **Combustion and Flame**, v. 159, p. 1165-1177, 2012.

Hartmann, J. M., Leon, R. L., Taine, J. Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for H₂O, **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 32, p. 119-127, 1983.

Hottel, H. C.; Sarofim, A. F. **Radiative Transfer**. McGraw-Hill, New York, 1967.

Houf, W.; Schefer, R. Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 136-151, 2007.

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

Machado I. M.; Peng F. B.; Caetano N. R.; Pereira F. M.; Pagot P. R. Measurements of Radiation from Methane Diffusion Flames Diluted with CO₂, **Proceedings to Congresso Brasileiro de Ciencias Termicas e Engenharia ENCIT2014**, Belém, 2014.

Machado, I. M. Caracterização Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas Não Pré-Misturadas de Metano Diluído com CO₂, **Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica UFRGS**, 2015.

McMurray, R. Flare Radiation Estimated, **Hydrocarbon Processing**, v. 61, n. 11, p. 175-181, 1982.

Mishra, D. P.; Kumar, P. Effects of N₂ gas on preheated laminar LPG jet diffusion flame, **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 2144-2149, 2010.

Modest, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 2^a ed. São Diego: Academic Press, 2003.

Mossi, A. C.; Vielmo, H. A.; França F. H. R.; Howell, J. R. Inverse design involving combined radiative and turbulent convective heat transfer, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 3217-3226, 2008.

Roper, F. G. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: part I - Theoretical model, **Combustion and Flame**, v. 29, p. 219-226, 1977.

Santoro, R. J.; Semerjian, H. G.; Dobbins, R. A. Soot particle measurements in diffusion flames, **Combustion and Flame**, v. 51, p. 203-218, 1983.

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

Schefer, R. W.; Houf, W. G.; Williams, T. C.; Bourne, B.; Colton, J. Characterization of High-Pressure, Underexpanded Hydrogen-Jet Flames, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 2081-2093, 2007.

Schefer, R. W.; Houf, W. G.; Colton, J. Spatial and Radiative Properties of an Open-Flame Hydrogen Plume, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, p. 1332-1340, 2006.

Schneider, P. S., Mossi, A. C., França, F. H. R., de Sousa, F. L., Silva Neto, A. J. Application of inverse analysis to illumination design, **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 17, n. 6, p. 737-753, 2009

Siegel, R.; Howell, J. R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Taylor & Francis, New York, 2002.

Silva Neto, A. J. **Problemas Diretos e Inversos em Transferência Radiativa e Processos Difusos**, UERJ, Rio de Janeiro, 2012.

Silva Neto, A. J.; Becceneri, J. C. Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza – Aplicação em Problemas Inversos em Transferência Radiativa, **SBMAC**, v. 41, p. 122, 2009.

Sivathanu, Y. R.; Gore, J. P. Total radiative heat loss in jet flames from single point radiative flux measurements, **Combustion and Flame**, v. 94, n. 3, p. 265–270, 1993.

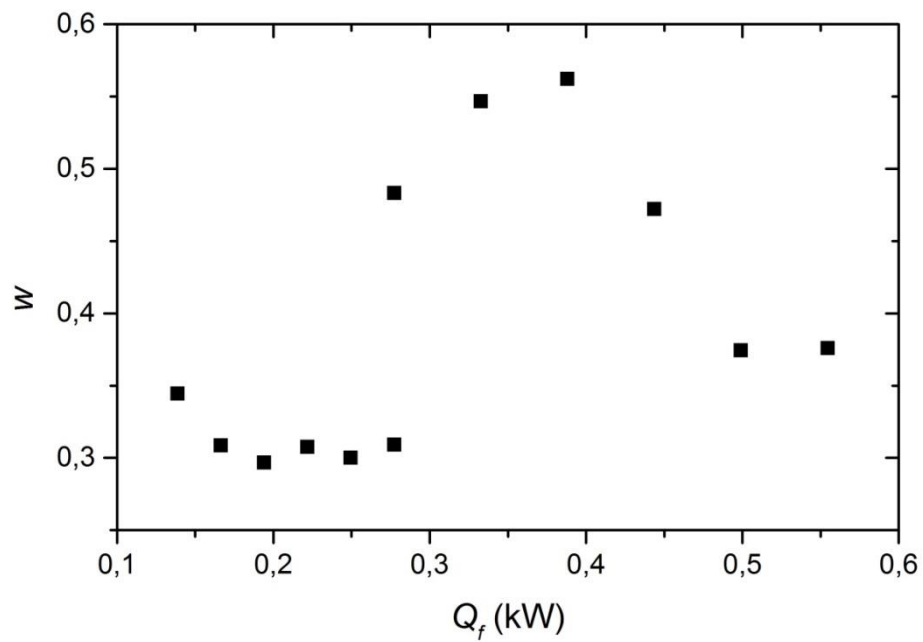
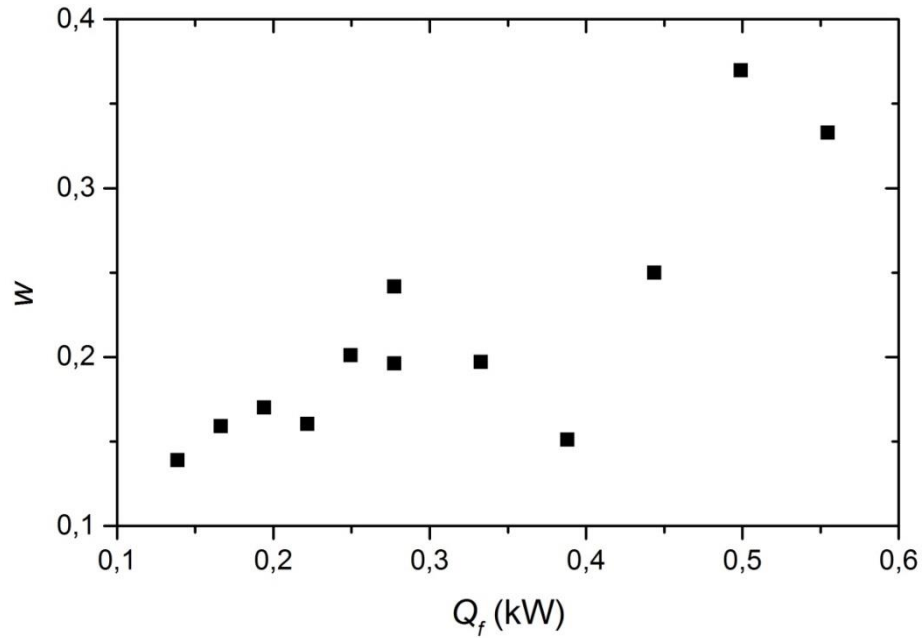
Solovjov, V. P; Webb, B. W. A local-spectrum correlated model for radiative transfer in non-uniform gas media, **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 73, p. 361-373, 2002.

Tan, S. H. Flare System Design Simplified, **Hydrocarbon Processing**, v.46, n. 1, p. 172-176, 1967.

Turns, S. R. **An introduction to combustion: concepts and applications**. 2^a. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.

Turns, S. R.; Myhr, F. H. Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: part I – fuel effects and flame radiation, **Combustion and Flame**, v. 87, p. 319-335, 1991.

Turns, S. R.; Myhr, F. H.; Bandaru, R. V.; Maund, E. R. Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: part II – fuel dilution and partial premixing effects, **Combustion and Flame**, v. 93, p. 255-269, 1993.

APÊNDICE A – PESOS E FRAÇÃO RADIANTE SEM CORRELAÇÃOFigura A.1 – w_2 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmenteFigura A.2 – w_3 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

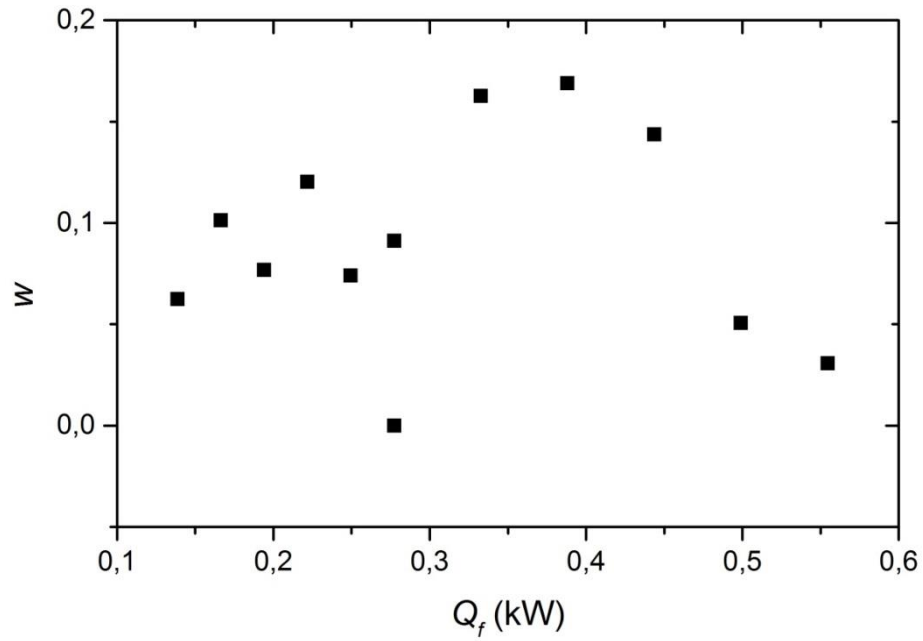


Figura A.3 – w_4 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

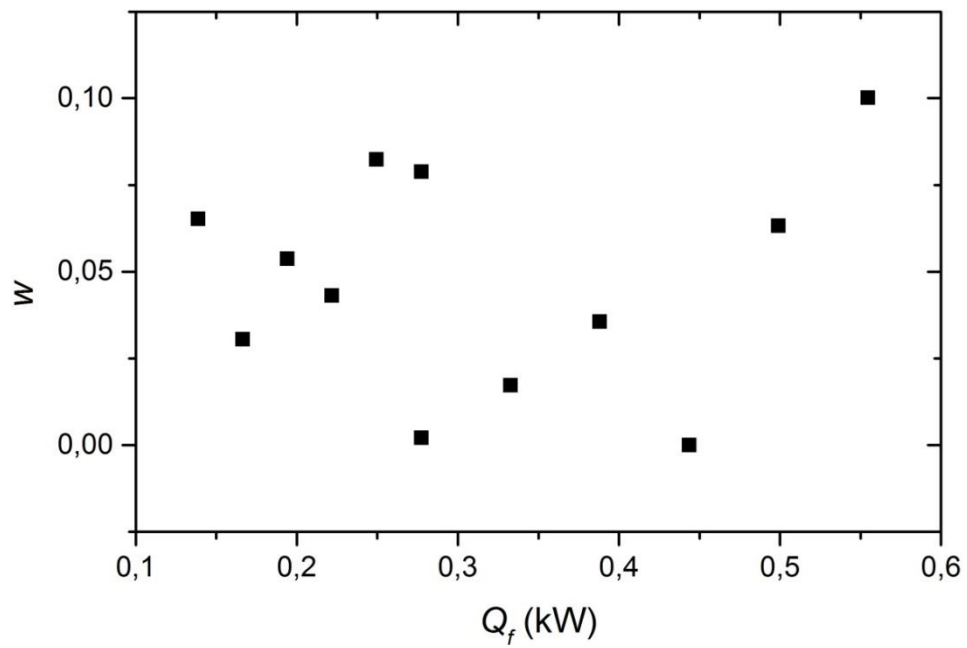


Figura A.4 – w_5 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

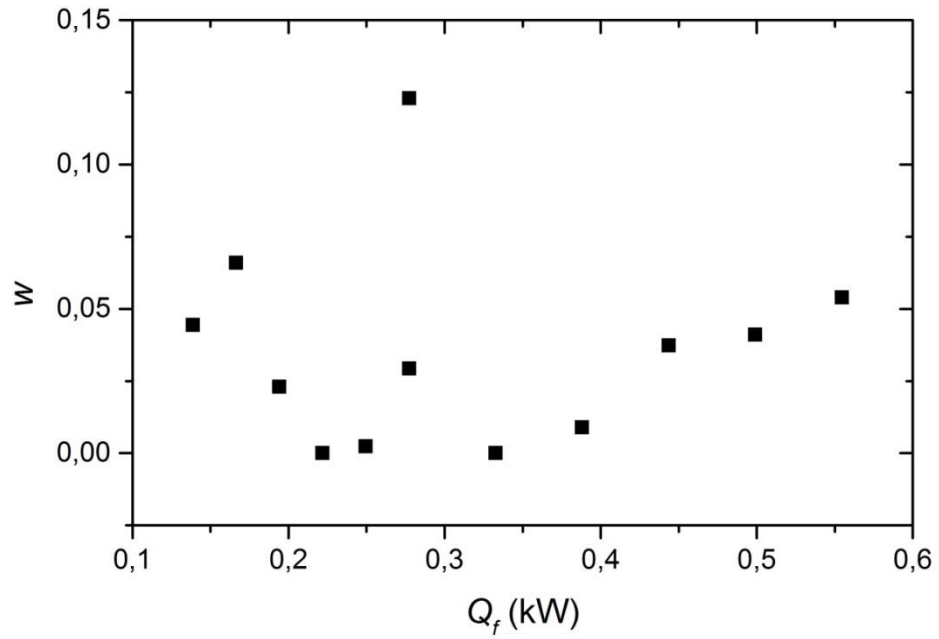


Figura A.5 – w_6 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

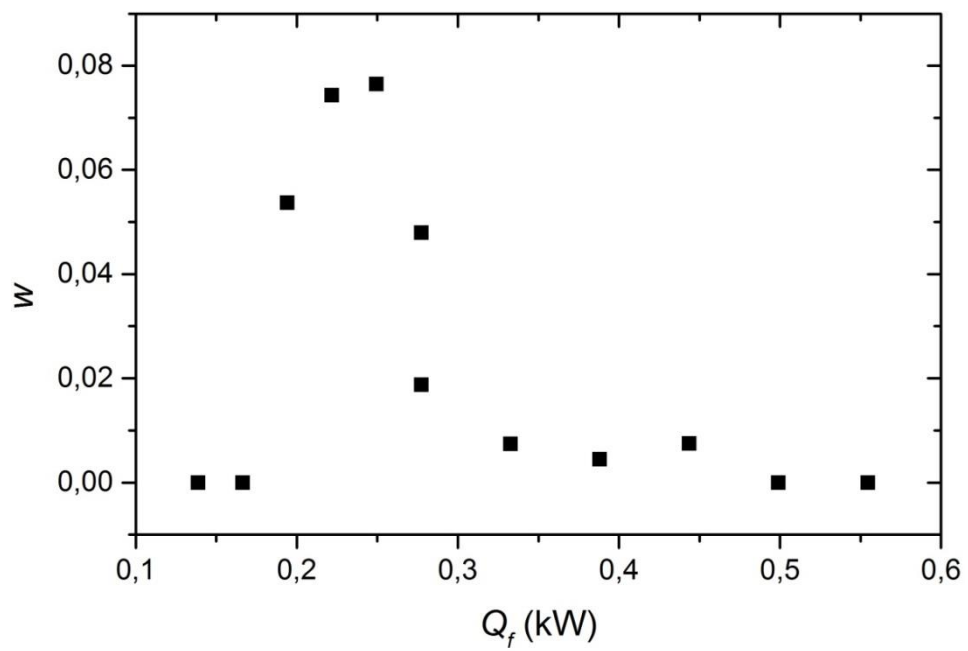


Figura A.6 – w_7 em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

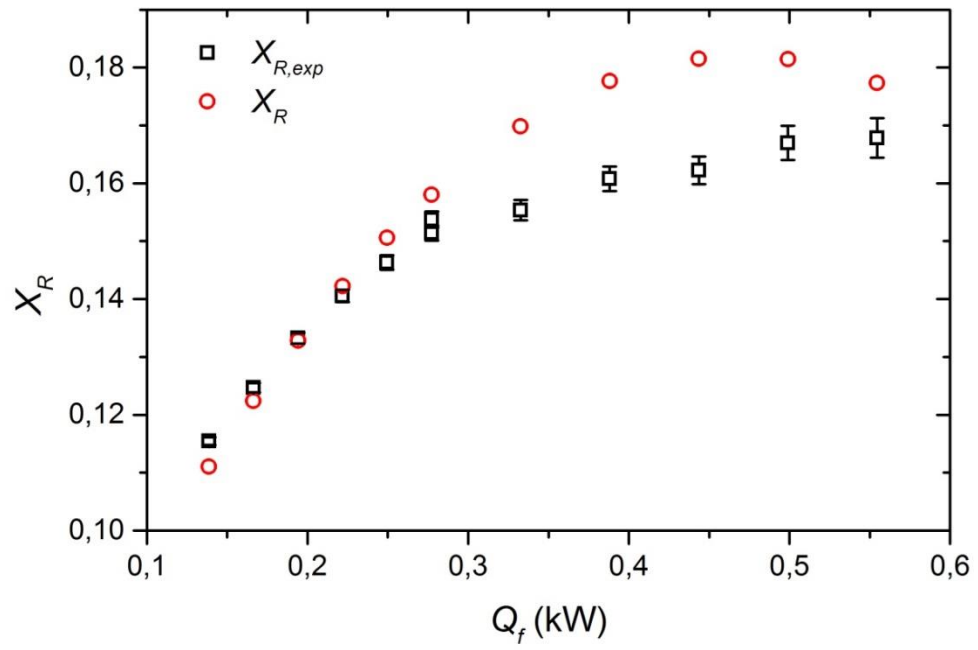


Figura A.7 – X_R em função da potência da chama nas chamas analisadas individualmente

APÊNDICE B – ANÁLISE COM COMPRIMENTO ESTIMADO

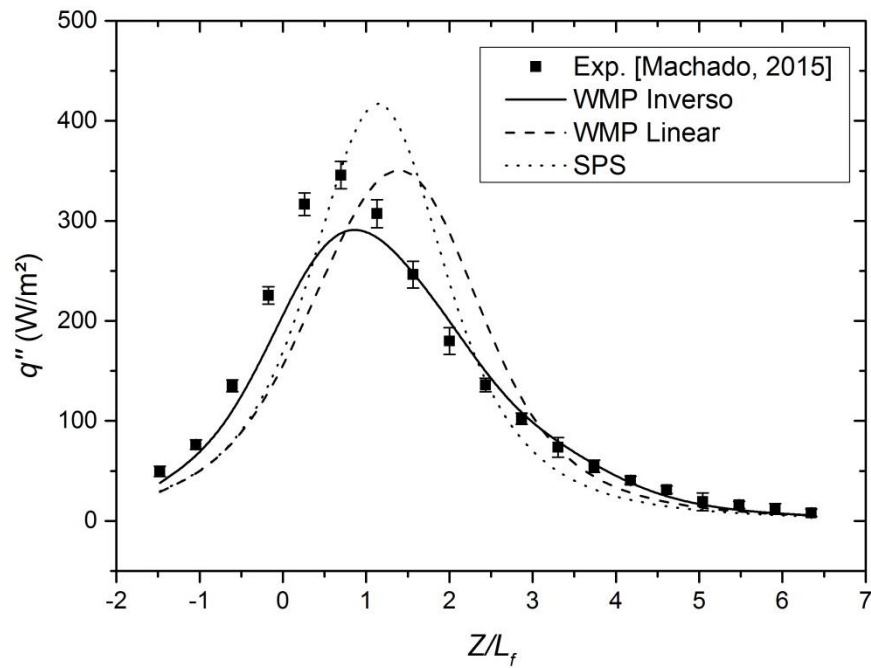


Figura B.1 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 1

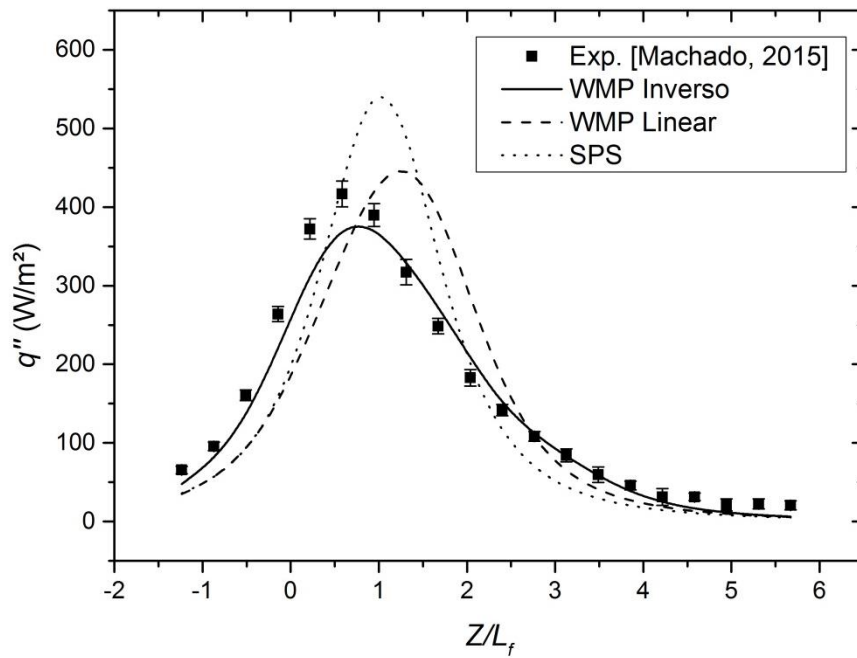


Figura B.2 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 2

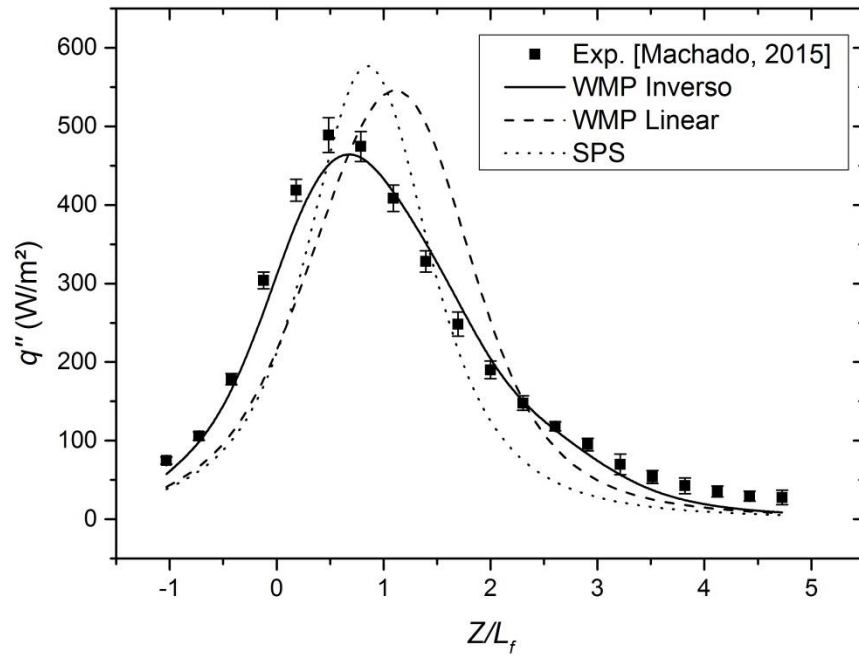


Figura B.3 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 3

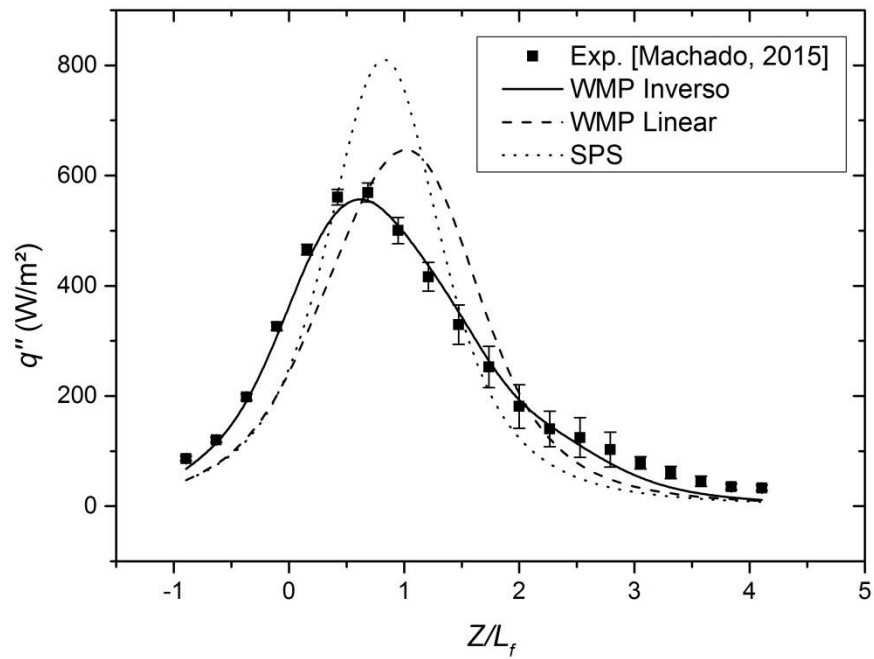


Figura B.4 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 4

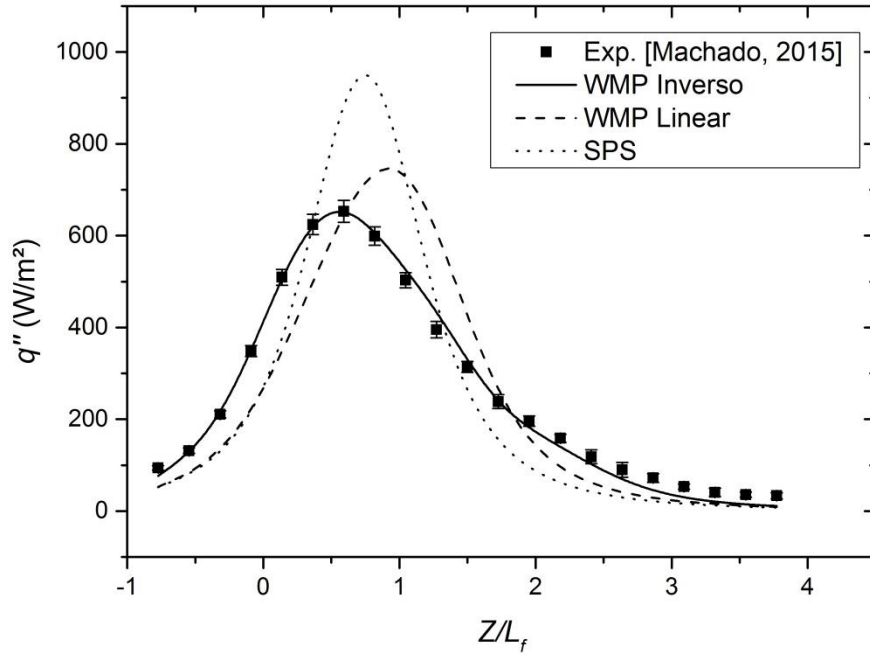


Figura B.5 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 5

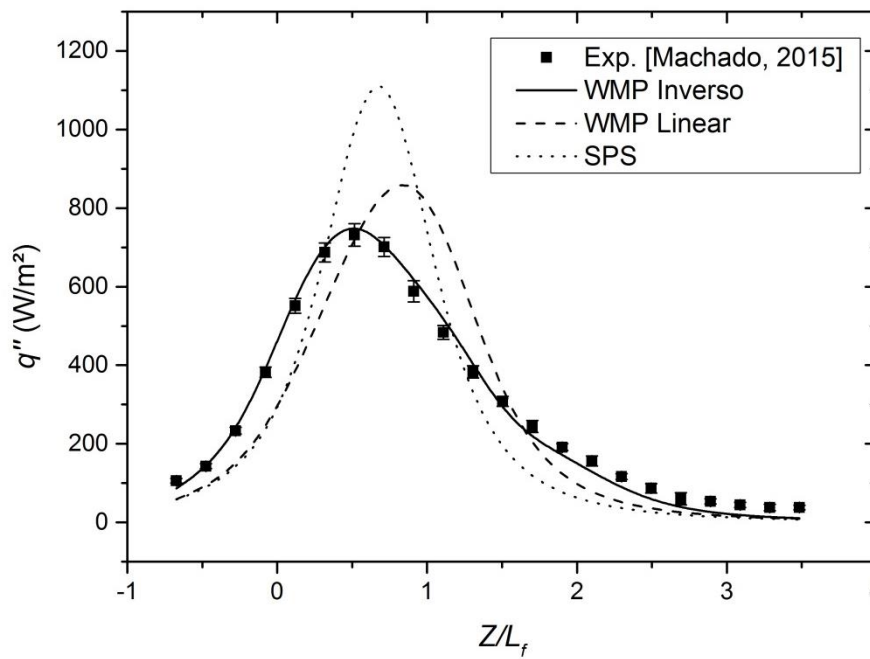


Figura B.6 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 6

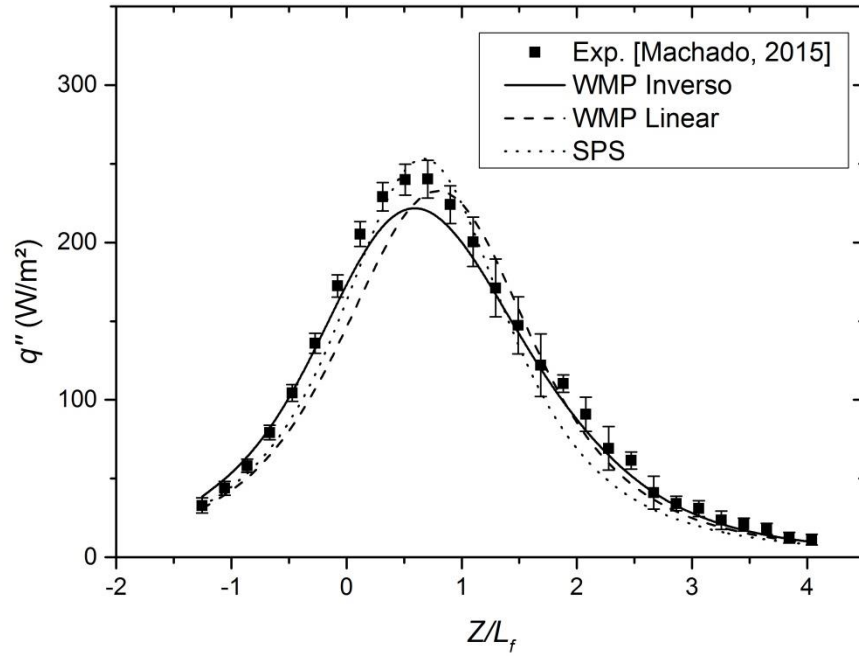


Figura B.7 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 7

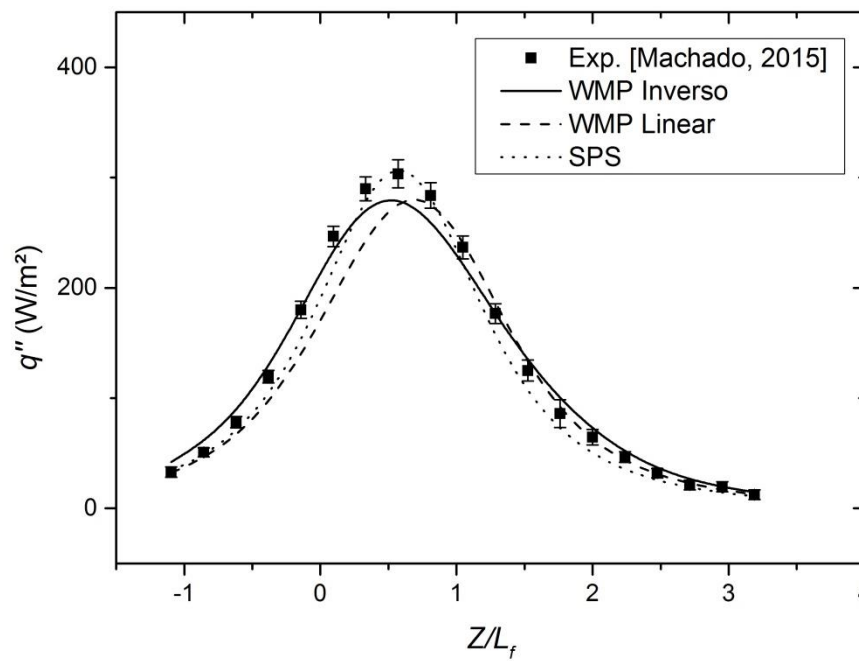


Figura B.8 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 8

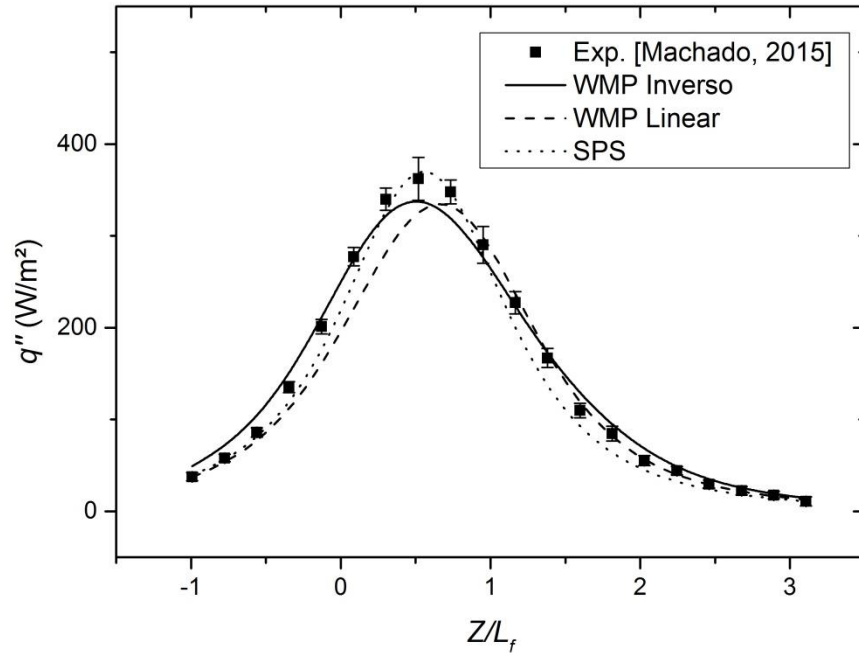


Figura B.9 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 9

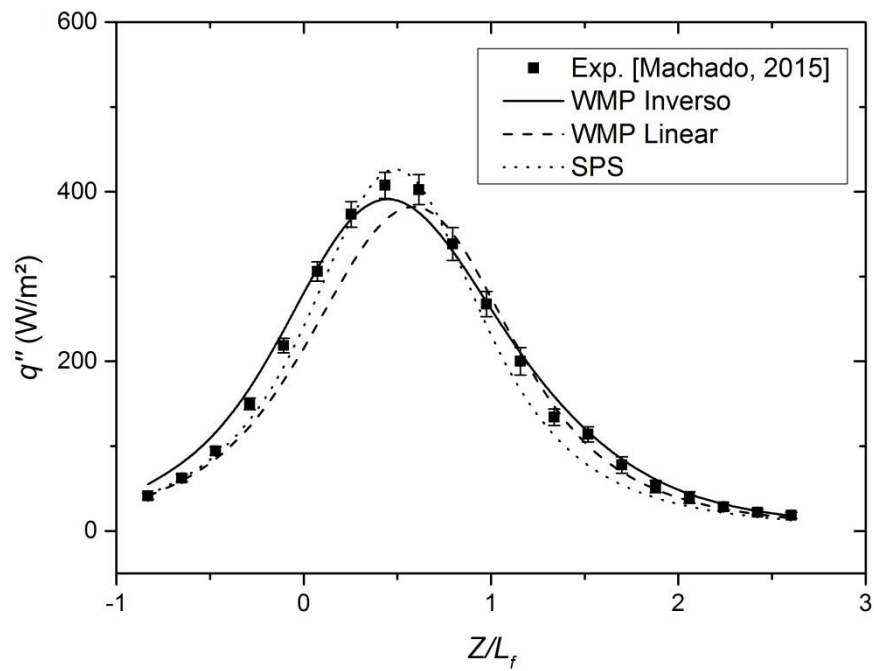


Figura B.10 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 10

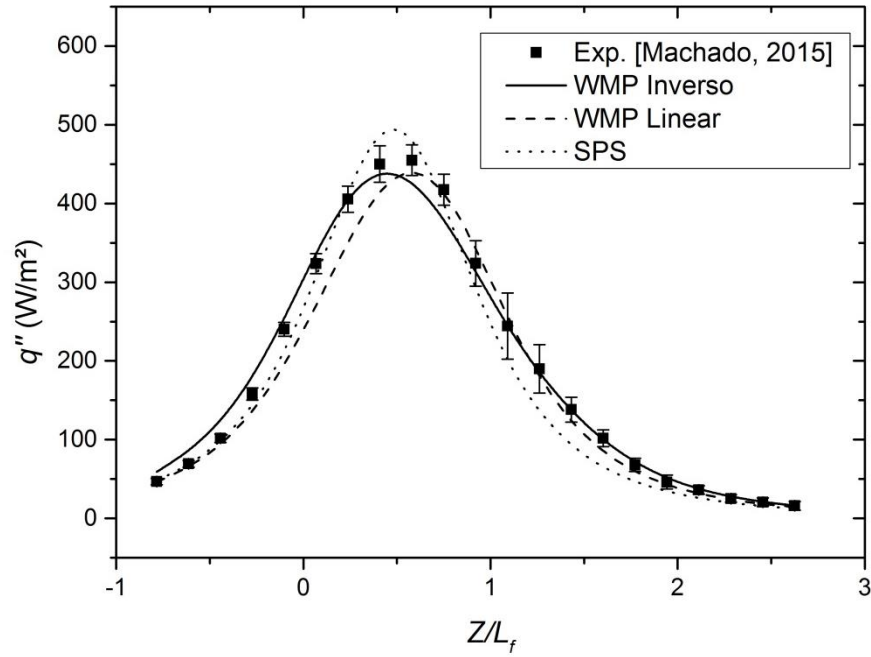


Figura B.11 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 11

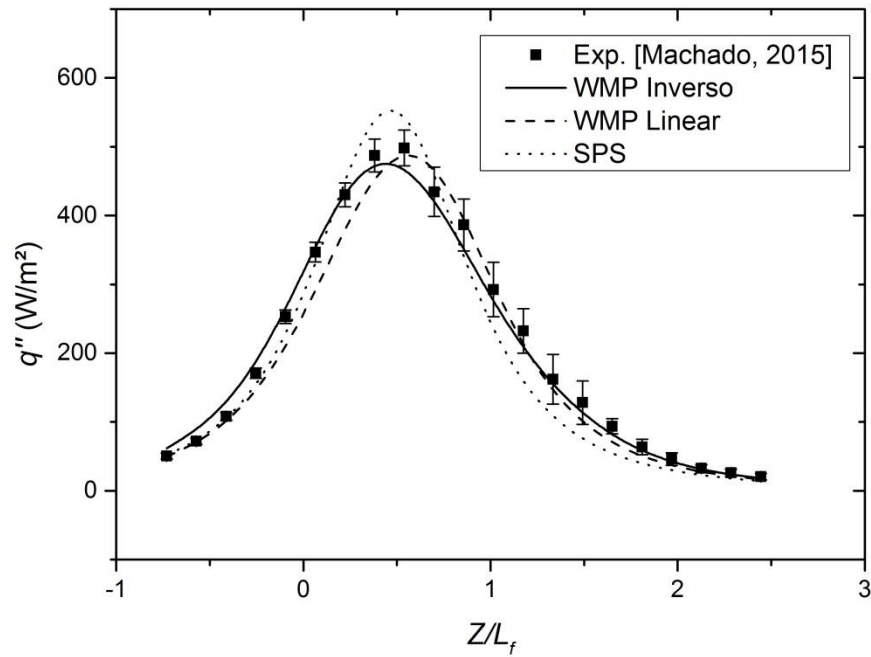


Figura B.12 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento estimado da chama 12

APÊNDICE C – ANÁLISE COM COMPRIMENTO EXPERIMENTAL

Tabela C.1 – Desvio médio em função de J (linhas) e β (colunas)

J	$\gamma_{\text{médio}} [\%]$						
	$\beta = 1,00$	$\beta = 1,25$	$\beta = 1,50$	$\beta = 1,75$	$\beta = 2,00$	$\beta = 2,25$	$\beta = 2,50$
2	6,2	5,2	4,8	4,5	4,8	5,3	6,3
3	5,6	4,6	4,7	4,2	3,6	3,4	3,3
4	6,0	4,9	4,3	3,8	3,3	3,1	2,7
5	5,8	5,1	4,2	3,8	3,2	3,0	2,7
6	6,1	5,0	4,1	3,0	3,6	3,4	2,9
7	5,6	4,7	4,3	4,1	3,3	2,9	2,7
8	5,2	4,7	4,2	3,8	3,0	3,4	2,8
9	5,3	5,0	5,0	3,8	3,3	3,3	3,3
10	6,4	5,0	4,2	4,7	4,5	3,4	3,5
11	6,2	4,7	4,0	5,7	4,6	3,1	3,4
12	6,5	4,6	4,1	3,7	4,8	3,8	3,2

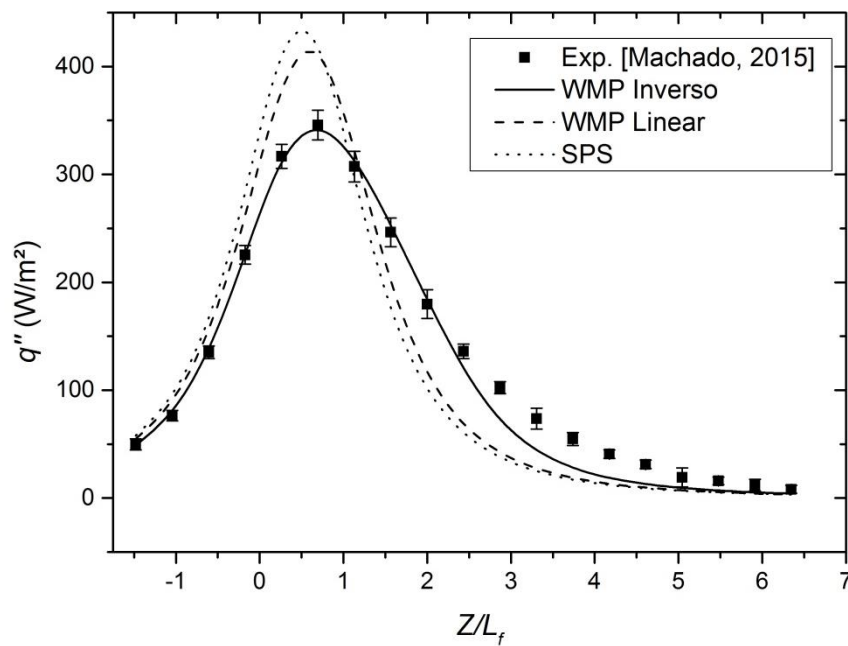


Figura C.1 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 1

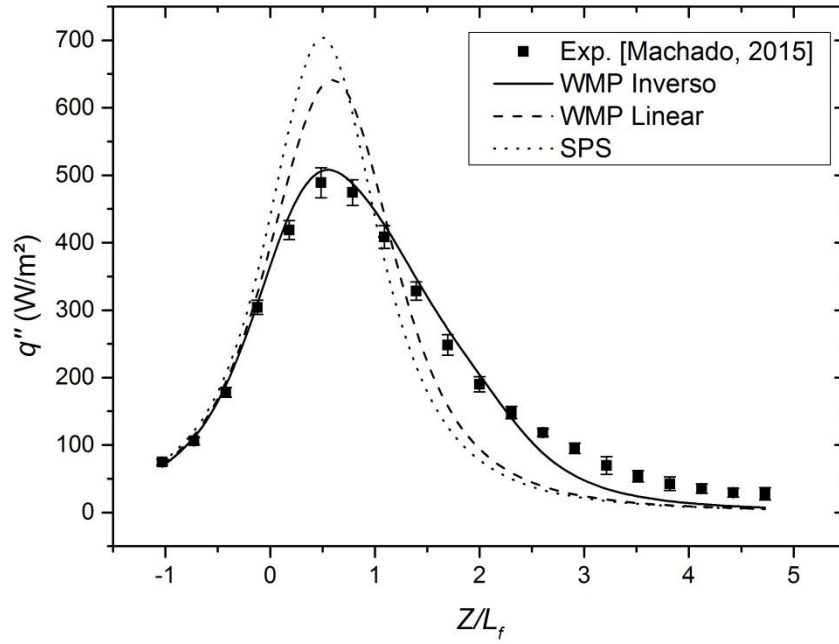


Figura C.2 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 3

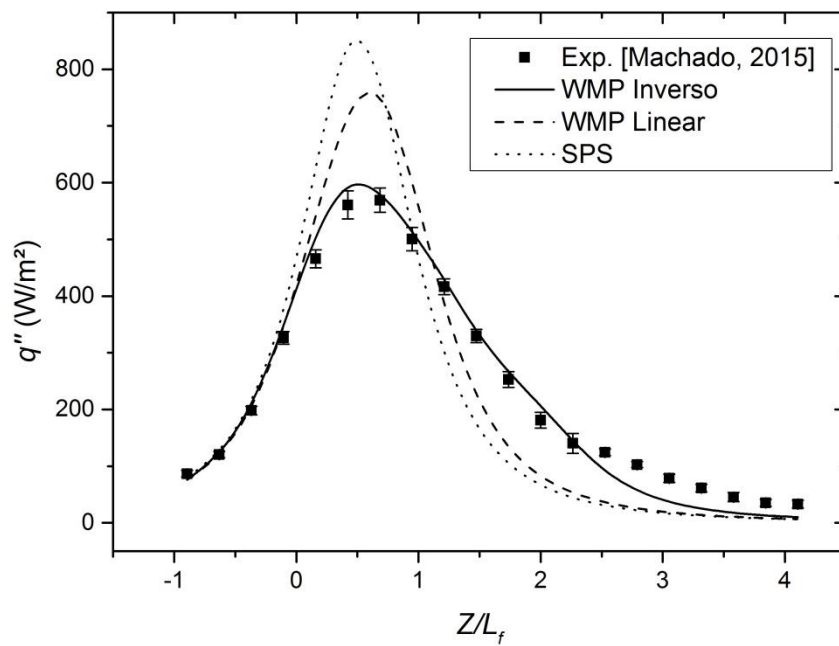


Figura C.3 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 4

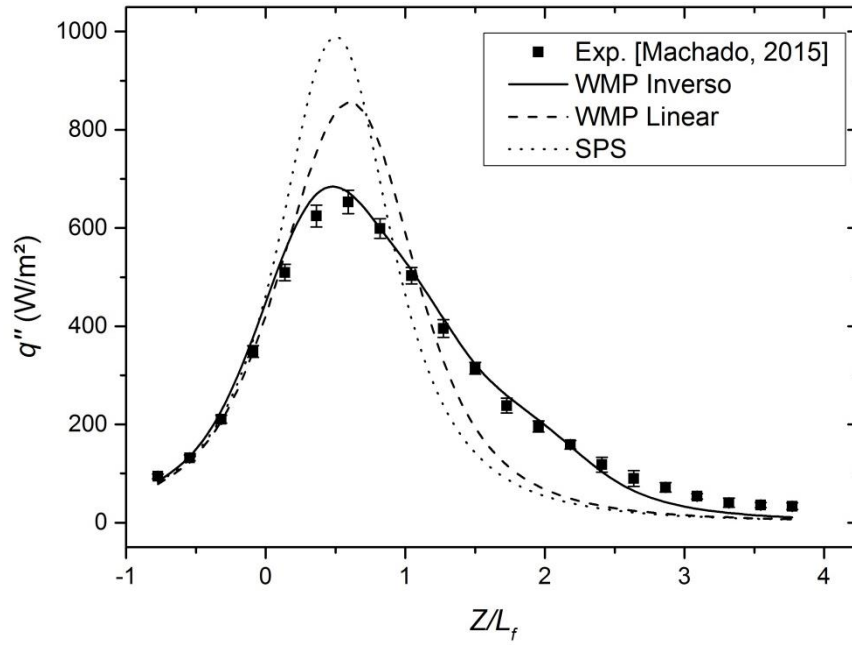


Figura C.4 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 5

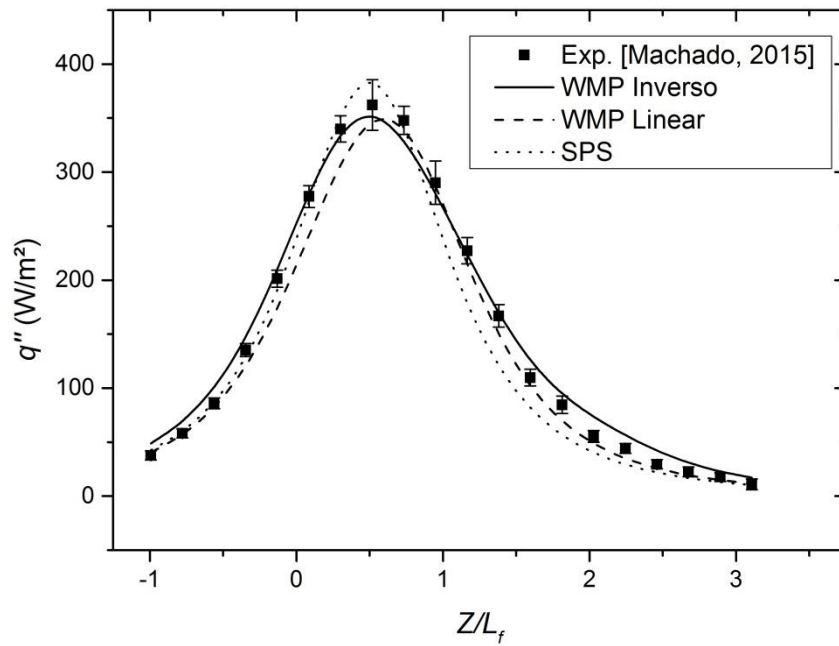


Figura C.5 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 9

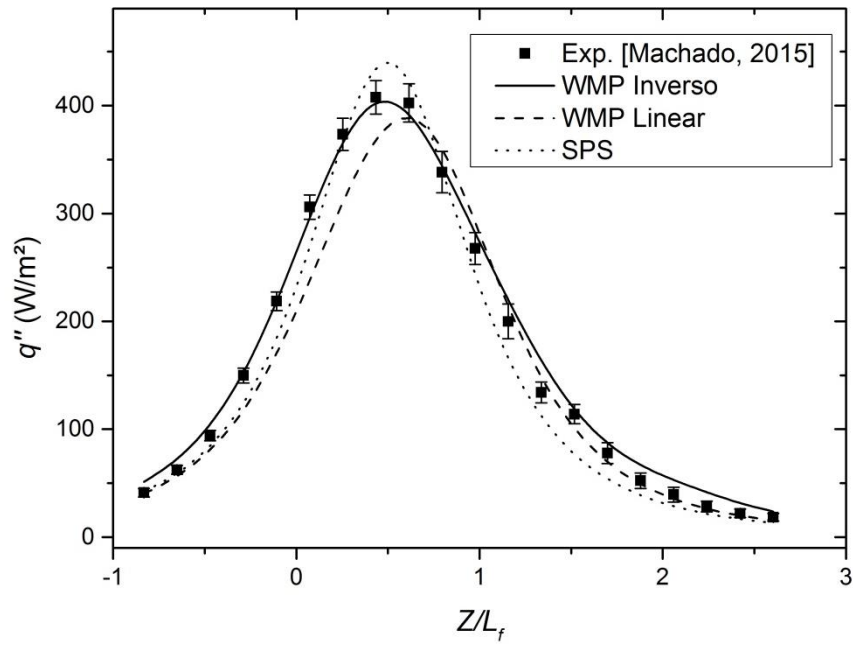


Figura C.6 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 10

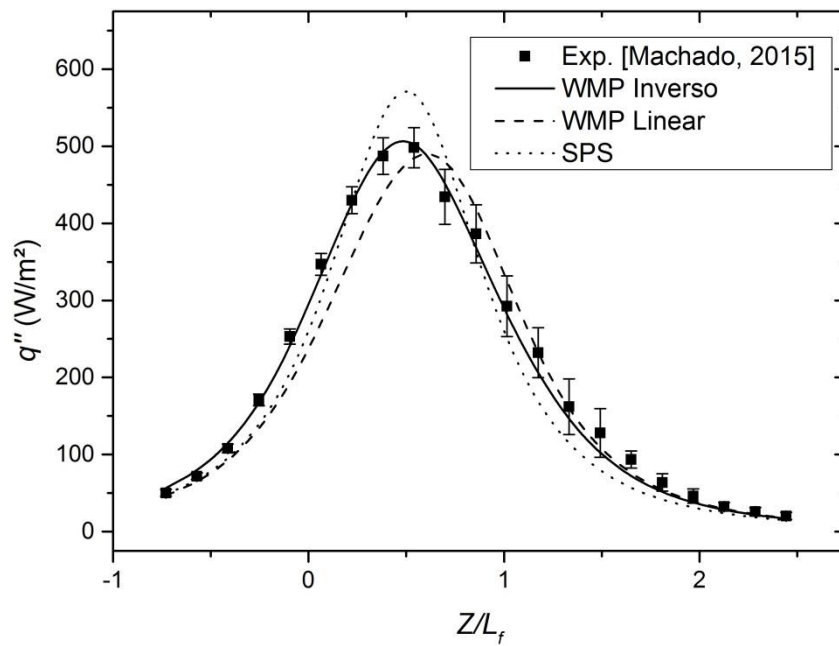


Figura C.7 – Distribuição do fluxo de calor com o comprimento experimental da chama 12